ارزیابی روشهای تعیین ظرفیت باربری شمعها در خاکهای دانه‌ای برمبنای نتایج آزمایش نفوذ استاندارد(SPT)

ابوالفضل اسلامی*، مهران کریم‌پور فرد** و نادر شریعتمداری***
گروه عمران، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان
مهندسان مشاور فارور، تهران
دانشکدهٔ مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت مقاله: ۸۲/۲/۲۷ – دریافت نسخه نهایی: ۸۳/۶/۲۸)

چکیده – *در سالهای اخیر تعیین ظرفیت باربری پی‌های عمیق(شمعها) براساس نتایج آزمونهای درجا به عنوان مکمل روشهای تحلیل استاتیکی و دینامیکی مورد توجه مهندسان ژئوتکنیک قرارگرفته است. روشهای مختلف تعیین ظرفیت باربری شمعها برمبنای نتایج آزمایش نفوذ استاندارد(SPT) در این مقاله نقد و بررسی شده است. روشی جدید برای تعیین ظرفیت باربری براساسN(شماره ضربات حاصل ازSPT) برای شمعهای کوبیدنی در خاکهای دانه‌ای ارائه شده است. در روش جدید به چگونگی پردازش داده‌ها، محدودهٔ گسیختگی و بار نهایی شمع در حالت فرورفت کامل پرداخته شده است. یک بانک اطلاعاتی حاوی ۴۲ مورد عملی شمع شامل نتایج آزمایش بارگذاری استاتیکی و نتایج SPTانجام شده در مجاورت شمعها، برای ارزیابی روشها تدوین شده است. نتایج حاصل از بررسی خطاهای روشهای مختلف درتعیین ظرفیت باربری شمعها به روشهای آماری و احتمال تجمعی نشان می‌دهد که روش جدیدمبتنی بر نتایجSPT، ظرفیت باربری شمعها را با دقت بیشتر و پراکندگی کمتری نسبت به روشهای رایج پیش بینی کرده و به عنوان یک راه حل مناسب می‌تواند در طراحیهای ژئوتکنیکی مورد استفاده قرار گیرد.*

واژگان کلیدی : *شمع، ظرفیت باربری، آزمایش نفوذ استاندارد، پردازش داده‌ها، بارنهایی شمع*

Comparision of Methods for Determining Bearing Capacity of Piles Using Standard Penetration Test (SPT) Data

A. Eslami, M. Karimpoor Fard, and N. Shariatmadari
University of Gilan, Civil Engineering Dept., Rasht, Iran
Farour Consulting Engineering Co., Tehran, Iran
University of Science and Technology, Civil Engineering Dept., Tehran, Iran

Abstract: *In recent years, determining bearing capacity of piles from in-situ testing data as a complement to static and dynamic analysis has been used by geotechnical engineers. In this paper, different approaches for estimating bearing capacity of piles from SPT data are studied and compared. A new method based on N value from SPT is presented. Data averaging,*

* – دانشیار ** – کارشناسی ارشد *** – استادیار

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.6.9]

failure zone and plunging failure of pilesare revisited in the light of this new method. A data bank was compiled including 42 full scale pile load tests in sites where SPT was performed close to pile locations. Comparison of current methods by error investigation with statistical and cumulative probability approaches demonstrates that the new method predicts pile capacity with more accuracy and less scatter than others. Therefore, it can be applied as a suitable solution in geotechnical design.

Keywords: *Pile, Bearing capacity, Standard penetration test(SPT), Data filtering, Failure load*

۱- مقدمه

تعیین ظرفیت باربری شمعها یکی از چالشهایی است که اکثر مهندسان ژئوتکنیک با آن مواجه‌اند. اثر عواملی نظیر ناهمگنی و ناهمسانی خاک دربرگیرندهٔ شمع، نحوهٔ اجرا، جنس و حتی شکل شمع، تخمین ظرفیت باربری را با معضلات و ابهاماتی همراه می‌کند. برای تعیین ظرفیت باربری شمعها روشهای تحلیل استاتیکی[۱]، فرمولهای دینامیکی[۲]، آزمایشهای دینامیکی[۳] ، روشهای مبتنی بر نتایج آزمونهای درجا[۴] و بارگذاری استاتیکی شمع درمقیاس اصلی[۵] متداول است.

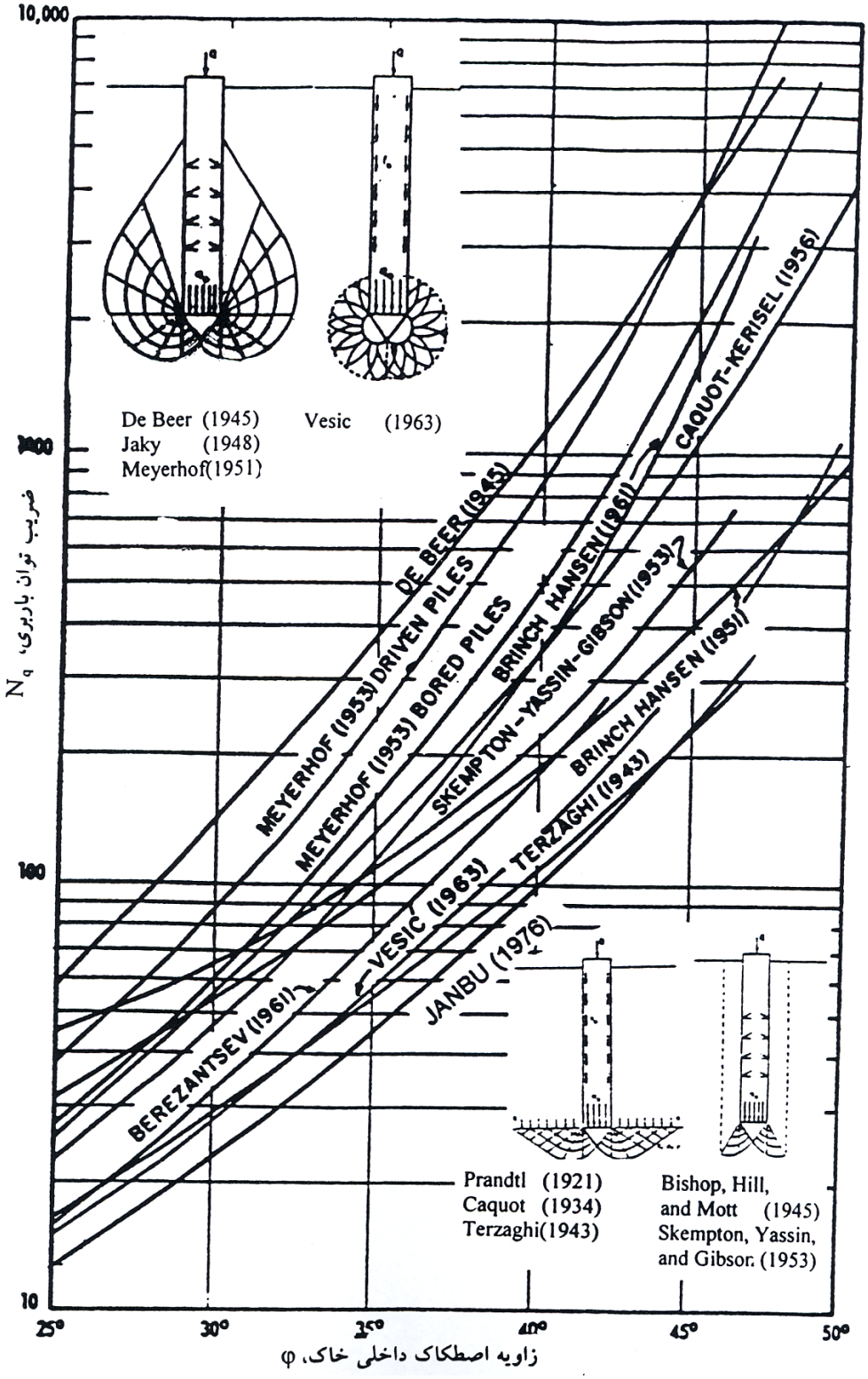
در روشهای تحلیل استاتیکی روابط تعیین مقاومت کف و جداره شمع متفاوت از هم بوده که بسته به نوع خاک، از زاویه اصطکاک داخلی خاک(φ) و یا مقاومت برشی زهکشی نشده خاک(S_u) استفاده می‌شود. در خاکهای دانه‌ای روابط مختلفی توسط محققان درتعیین مقاومت کف شمع با استفاده از نظری‌های ظرفیت باربری وانبساط حفره‌ای ارائه شده است که عموماً مقاومت کف را با ضریب N_q (ضریب توان باربری) به تنش مؤثر کف شمع مرتبط می‌کنند. از آنجا که N_q تابعی از φ بوده و تعیین مقدار معرف زاویهٔ اصطکاک داخلی دارای مشکلات و معضلاتی مثل نمونه‌گیری دست نخورده، الگوهای متفاوت گسیختگی و اغماض از ناهمسانی و اثر بافت خاک در مقیاسهای بزرگتر، پاسخهای متفاوت و پراکنده‌ای در تعیین مقادیر ظرفیت باربری کف شمع مطرح بوده که درانتخاب مقادیر صحیح N_q براساس مقادیر φ، تردیدهایی را در طراحی به دنبال دارد. نمونه‌های مختلفی از روابط φ - N_q به همراه مدلهای مختلف گسیختگی در شکل (۱) ارائه شده است. در تعیین مقاومت جداری، تنش مؤثر در عمق و ضریب تبدیل تنش قائم به تنش افقی خاک(K_S) لازم بوده که تعیین دقیق K_S برای شمعها با توجه به خاکهای متنوع و روشهای استقرار متفاوت شمعها توأم باجابه جاییهای متنوع درخاک تقریباً غیر عملی است و بدین لحاظ راه حل واحدی برای تعیین مقادیر صحیح مقاومت جداری شمع نمی‌توان یافت.

در خاکهای چسبنده نیز ظرفیت باربری شمع تابعی از مقاومت برشی زهکشی نشده(S_u) است که پارامتر واحدی نبوده و به میزان قابل توجهی وابسته به نوع آزمایش انتخاب شده برای تعیین آن، نرخ کرنش اعمالی و امتداد صفحهٔ گسیختگی وابسته است. مضافاً بر اینکه در خاکهای ریزدانه و نیز همهٔ خاکها ظرفیت باربری شمع در دراز مدت و نه در کوتاه مدت حاکم بر سرویس دهی درمقابل بارهای وارده است.

استفاده از مفهوم عمق بحرانی نیز در روش تحلیل استاتیکی از مواردی است که بر مبنای تحلیلهای نظری و نیز نتایج مدلهای آزمایشگاهی و عملی قابل اثبات نبوده و ناشی از نادیده انگاشتن وجود تنشهای پس ماند در شمع کوبی، نشست خاک اطراف شمع و همچنین عدم ملاحظهٔ کاهش مقادیر زاویه اصطکاک داخلی در عمق برحسب افزایش تنشهای سربار و همه جانبه است[۱].

روابط دینامیکی کوبش شمع که براساس روابط برخورد و ضربهٔ نیوتن در شمعهای کوبیدنی ارائه شده‌اند، به دلیل مشکلات ناشی از اختلاف بین انرژی اسمی و انرژی واقعی که از شمعکوب به شمع انتقال می‌یابد، عدم ملاحظهٔ انعطاف‌پذیری شمع در مقابل ضربات، استاندارد نبودن انرژی کوبشی که عملاً برای موارد موضعی و تخمینهای اولیه مورد کاربرد قرار می‌گیرد، و نیز استفاده از تحلیل تنشهای کلی خصوصاً در

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.6.9]



شکل ۱- رابطهٔ بین ضریب ظرفیت باربری(N_q) و زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک به همراه الگوهای مختلف گسیختگی[۷]

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.6.9]

خاکهای رسی، با خطاهای زیادی توأم است.

در آزمایشهای دینامیکی که برپایه اندازه‌گیری و تحلیل شتاب و کرنش در نزدیکی سر شمع و درحین کوبش ارائه شده است، تعیین ظرفیت باربری شمع با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده توسط PDA [۶] و تحلیل عددی نیرو وسرعت امواج ایجاد شده در شمع در حین عملیات شمعکوبی حاصل می‌شود. مشکل عمدهٔ این روش نیاز به متخصصان مجرب و کار آزموده در اندازه‌گیری و همچنین تحلیلها بوده مضاف بر آنکه تا زمانی که شمع کوبیده نشده باشد استفاده از این روش در تخمین باربری شمع عملاً ناممکن است. اگرچه در پروژه‌های مهم و شرایط نامتعارف بارگذاری و وضعیت خاک بستر، معمولاً چند شمع به عنوان شمعهای آزمایشی در نقاط مختلف ساختگاه کوبیده شده و آزمایشPDA و تحلیل CAPWAP[۷] به سرعت و به راحتی برای تکمیل تحلیل باربری انجام می‌شود که البته متضمن صرف هزینه وزمان است.

آزمایش بارگذاری شمع کاملترین و بهترین روش تعیین ظرفیت باربری یک شمع، چه در مرحلهٔ طراحی و چه پس از اجرای فونداسیون پروژه است. مشکل عمدهٔ این روش گرانی و صرف زمان زیاد و نیز صعوبت برای انجام این آزمایش است. به گونه‌ای که استفاده از این روش تنها در پروژه‌های بزرگ توجیه اقتصادی دارد. کما اینکه در محیطهای دریایی استقرار تجهیزات و انجام آزمایش با معضلاتی همراه است.

استفاده از تکنیکهای آزمایش درجا در طراحیهای ژئوتکنیکی در سالهای اخیر گسترش قابل توجهی یافته است. دلیل اصلی این گسترش و گرایش را می‌توان از عدم توانایی محققین در شبیه سازی کاملاً واقعی شرایط جانبی و مرزی برای نمونه‌های آزمایشگاهی در مقایسه با حالت درجا، مشکلات نمونه‌گیری صحیح (نمونه‌های دست نخورده به خصوص در خاکهای دانه‌ای) و نیز توسعه و پیشرفتهای امکانات و تجهیزات آزمایشگاهی که توأم با ایدهٔ حمل دستگاه آزمایش به محل به جای آوردن نمونه‌های کوچک خاک به آزمایشگاه ذکر کرد.

در مجموع و در مطالعات ژئوتکنیک در مواردی که پارامترهای مقاومت، سختی خاک وانتقال بار از طریق پی‌های سطحی و یا عمیق مطرح است، استفاده از نتایج آزمایشهای درجا از اهمیت بیشتری برخودار است. اشاره به این نکته ضروری است که علی‌رغم مزایا ومعایب روشهای آزمایشگاهی و درجا برای طراحیهای کاملتر و دقیقتر در مطالعات ژئوتکنیک ازداده‌ها و متدهای این روشها می‌توان به عنوان مکمل یکدیگر استفاده کرد.

از آنجا که امروزه معمولاً قبل از انجام هر پروژهٔ عمرانی یک بررسی دقیق ژئوتکنیکی شامل حفر گمانه‌های دستی، ماشینی و انجام آزمونهای درجایی نظیر SPT[۸] ، CPT[۹] و بعضاً PMT[۱۰] سایت در محل احداث پروژه به امری اجتناب ناپذیر بدل شده است. استفاده از نتایج این آزمونها در تعیین ظرفیت باربری شمعها به عنوان یک آلترناتیو مؤثر مد نظر محاسبان قرار گرفته است. حسن عمدهٔ این آزمایشها تعیین پارامترهای سختی و مقاومت شمع در مکانی است که قرار است بارها را در آنجا به زمین کف و اطراف منتقل شود. در این میان آزمایش SPT به دلیل سادگی، ارزانی و وجود تجربیات ارزنده در این زمینه در بین مهندسان ایرانی محبوبیت و مقبولیتی قابل توجه دارد و این علی‌رغم مشکلات و محدودیتهایی است که در زمینهٔ تفسیر نتایج این آزمایش و تکرار پذیری آن، عدم استاندارد بودن علی‌رغم نام آزمایش و منشاء خطا به خصوص در مورد خاکهای اشباع ریزدانه و یا خاکهای درشت دانه حاوی ذرات بزرگ، نوع نمونه‌گیر و لوله‌های ارتباطی برای این آزمایش مطرح است.

در این مقاله پنج روش تعیین ظرفیت باربری مبتنی بر نتایج آزمایش SPT مورد نقد و بررسی قرار گرفته و سپس با توجه به نقایص موجود در متدهای جاری یک روش جدید ارزیابی ظرفیت باربری شمعها براساس نتایج آزمون SPT ارائه شده است. با استفاده از یک تحلیل آماری و احتمالی نتایج آن با نتایج پنج روش دیگر مقایسه شده است. مبنای این مقایسه متدها و نتایج حاصله ازپیش بینیهای حاصل از آزمایش بارگذاری شمع است.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.6.9]

۲- متدهای رایج تعیین ظرفیت باربری مبتنی بر نتایج SPT

با توجه به رواج SPT، سادگی وارزانی و نیز تهیه نمونه از خاک، علی‌رغم اشکالات وارده درخصوص نقاط ضعف آن، عدم تطابق جنبه‌های عملی با استاندارد آزمایش، و تکرارپذیری ضعیف ناشی از نتایج این روش، روابط متعددی برای تعیین ظرفیت باربری یک شمع مبتنی بر نتایج این آزمایش ارائه شده است. رایجترین روابط تعیین ظرفیت باربری شمعها با استفاده از نتایج آزمایش SPT عبارت‌اند از:

۱) روش آوکی - ولسو [۲]

۲) روش مایر هوف [۳]

۳) روش بازارا - کورکور [r۴]

٤) روش شیو- فوکی [۴]

۵) روش برياد - تاکر [۵]

شکل کلی معادلات ارائه شده توسط مراجع فوق مطابق معادلات زیر است:

$$R_t = q_t.A_t = n_t.N_{ti}.A_t \qquad (۱)$$

$$R_s = \sum q_{si}.A_{si}.h_i = \sum_{i=1}^{n} n_{si}.N_{si}.A_{si}.h_i \qquad (۲)$$

که در این معادلات، R_t توان باربری کف شمع بر حسب مگانیوتن (MN)، R_S توان باربری جداری شمع بر حسب مگانیوتن(MN)، q_t مقاومت یاتنش واحدکف مگاپاسگال (MPa)، q_{si} مقاومت واحد جداری لایه i ام (MPa)، A_t سطح مقطع کف شمع (m^2)، A_{si} سطح جداری در طول واحد بخش مستقر در لایه i ام، h_i ضخامت لایهi ام، N_{ti} مقدار متوسط N در یک محدوده خاص از اطراف کف شمع و N_{si} مقدار متوسط N در لایه i ام دراطراف شمع بوده و مقادیر n_s, n_t نیز مقادیر تجربی توصیه شده توسط متدهای مختلف‌اند. در مواردی که خاک محل استقرار شمع همگن و عمق استقرار شمع D_f باشد معادله (۲) به صورت زیر در می‌آید:

$$R_s = q_s.A_s.D_f = n_s.N_S.A_S.D_f \qquad (۳)$$

نقطهٔ تمایز معادلات فوق در مقادیر معرفی شده برای ضرایب ظرفیت باربری کف و جداری شمع n_s, n_t و نیز میزان گستردگی ناحیهٔ گسیختگی در کف شمع برای تعیین مقدار معرف N_t است. در ذیل جزییات مربوط به هر روش ارائه شده است.

۲-۱- روش آوکی - ولسو[۲]

این محققان برای شمعهای کوبیده شده، ضرایب n_t و n_s را به صورت زیر در خاکهای مختلف ارائه کردند:

الف) ماسه‌ها: $0.285 \le n_t \le 0.571$ $\quad 0.004 \le n_s \le 0.005$

ب) لای‌ها: $0.131 \le n_t \le 0.314$ $\quad 0.002 \le n_s \le 0.004$

ج) رسها: $0.114 \le n_t \le 0.200$ $\quad 0.002 \le n_s \le 0.003$

در این روش N_t متوسط مقادیر سه مقدار N در نزدیکی کف شمع و N_s نیز متوسط مقادیر N در طول شمع(به جز سه مقدار مورد استفاده در تعیین N_t) است. نسبت انرژی مورد استفاده در این روش برابر 72% است.(نسبت انرژی برابرنسبت میزان انرژی واقعی درآزمایش SPT به انرژی در حالت استانداردآزمایش است).

۲-۲- روش مایرهوف [۳]

مایر هوف معادلات زیر را برای تعیین ظرفیت باربری شمعهای کوبیده شده در خاکهای ماسه‌ای ارائه کرد:

$$q_t = 0.4.N_t.C_1.C_2 \qquad (۴)$$

$$C_1 = (\frac{B+0.5}{2B})^n \le 1 \qquad (۵)$$

$$C_2 = \frac{D_b}{10B} \le 1 \qquad (۶)$$

$$q_s = n_s.N_s \qquad (۷)$$

که N_t مقدار N در تراز کف شمع، B قطر شمع، n یک ضریب تجربی که برای ماسه‌های شل، نسبتاً متراکم و متراکم به قرار ۲،۱ و ۳ است و D_b میزان نفوذ کف شمع در لایه باربر و C_1 و C_2 به ترتیب ضرایب تصحیح مربوط به قطر (برای قطرهای بزرگتر از ۰/۵ متر) و عمق نفوذ شمع در لایه باربر است. N_s نیز متوسط مقادیر N در طول شمع و n_s ضریب ظرفیت باربری جداری است که برای شمعهای کوبیده شده با

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.6.9]

جابه جایی زیاد [11] معادل ۲ و برای شمعهای کوبیده شده با جابه جایی کم [12] برابر ۱ است. میزان نسبت انرژی مورد استفاده در این روش ۵۵٪ است. معیار گسیختگی در نظر گرفته شده در این روش بار متناظر با حداکثر شیب نمودار بار- نشست به دست آمده از آزمون بارگذاری شمع است.

۲-۳- روش بازارا - کور کور [۴]

بازارا و کورکور براساس تجربیاتشان از فعالیتهای ژئوتکنیکی صورت گرفته در کشور مصر، برای تعیین ظرفیت باربری قائم شمعها در خاکهای غیرچسبنده، ضرایب n_t و n_s را به صورت زیر پیشنهاد کردند:

$$n_t = 0.4B \le 0.2 \qquad (۸)$$

$$n_s = 0.044B \le 0.022 \qquad (۹)$$

که در آن B قطر شمع برحسب متر است. در این روش، N_t معادل میانگین مقادیر N در مجدودهٔ 3.75B بالای کف شمع و 1B زیرکف شمع است که دارای حد فوقانی ۵۰ برای N متوسط است.

۲-۴- روش شیو - فوکی [۴]

شیو - فوکی برای تعیین ظرفیت باربری شمعهای کوبیده شده، معادلات زیر را ارائه کردند:

$$q_t = (0.1 + 0.04.\frac{D_b}{B}).N_t \le 0.3.N_t \qquad (۱۰)$$

که معادله فوق برای شمعهای لوله‌ای سر باز به صورت ذیل خواهد بود:

$$q_t = 0.06.\frac{D_b}{B}.N_t \le 0.3.N_t \qquad (۱۱)$$

مطابق این روش ضریب ظرفیت باربری جداری در خاکهای ماسه‌ای برابر ۲ و در خاکهای رسی برابر ۱۰ است. نسبت انرژی مورد استفاده در این روش ۵۵٪ است.

۲-۵- روش بریاد - تاکر[۵]

بریاد و تاکر با استفاده از نتایج SPT و مدول الاستیسیتهٔ شمع E_p و ابعاد شمع و برمبنای ملاحظات نشست شمع، روشی را برای تعیین ظرفیت باربری شمعهای کوبیدنی ارائه کردند. در این روش اثر تنشهای پس ماند در تعیین ظرفیت باربری شمعها مد نظر قرار گرفته است. این معادلات به قرار ذیل‌اند:

$$q_t = \frac{0.1}{\frac{1}{k_t} + \frac{0.1}{q_{t.max} - q_{t.res}}} + q_{t.res} \qquad (۱۲)$$

$$q_S = \frac{0.1}{\frac{1}{k_s} + \frac{0.1}{q_{s.max} + q_{s.res}}} - q_{s.res} \qquad (۱۳)$$

که

$$k_t = 1868400.(N_t)^{0.0065} \qquad (۱۴)$$

$$k_s = 20000.(N_S)^{0.27} \qquad (۱۵)$$

$$q_{t.max} = 1975.(N_t)^{0.36} \qquad (۱۶)$$

$$q_{s.max} = 22.4.(N_S)^{0.29} \qquad (۱۷)$$

$$q_{t.res} = 557L\Omega \qquad (۱۸)$$

$$q_{s.res} = q_{t.res} \cdot \frac{A_t}{A_s} \le q_{s.max} \qquad (۱۹)$$

$$\Omega = \sqrt{\frac{k_s.p}{A_t.Ep}} \qquad (۲۰)$$

که در آنها، N_t متوسط مقدار N در محدودهٔ 4B بالای کف شمع و 4B زیر کف شمع است. L، طول شمع و p محیط شمع، A_t سطح مقطع کف شمع و A_s سطح جداری شمع، است. معیار گسیختگی در این روش فرورفت سر شمع برابر ۱۰٪ قطر شمع است.

۳- نقد و ارزیابی متدها

در نقد وبررسی متدهای مختلف ارائه شده توسط محققان مختلف برای تعیین ظرفیت باربری شمعها بر اساس نتایج SPT می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱) در تمامی این روشها مقاومت واحد جداری به یک مقدار متوسط عدد نفوذ استاندارد در طول شمع مرتبط می‌شود. این درحالی است که میانگین حسابی مورد استفاده در میانگین‌گیری از این مقادیر، تغییرات موجود در اعداد نفوذ استاندارد در طول شمع را به صورت منطقی لحاظ نمی‌کند، زیرا در حین آزمایش

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.6.9]

و در فواصل انجام آن ممکن است به موانعی برخورد شود که مقادیر غیر عادی N را در مقایسه با خاک معمول اطراف دربرداشته است. این موارد موضعی تغییرات جدی را در محاسبات مقادیر میانگین و معرف به دنبال دارد.

۲) مبنای توسعه تمامی روابط ارائه شده آزمایش بارگذاری شمع است. به دلیل تفاوت برداشتها از نحوهٔ گسیختگی سیستم خاک- شمع، تفاسیر متفاوتی از نمودار بار- نشست آزمایش بارگذاری شمع ارائه شده است. در میان روابط ارائه شده تنها سه روش آوکی - ولسو، [۲]، بریاد- تاکر[۵]، و مایر هوف[۳] یک معیار خاص گسیختگی را برای تعیین ظرفیت باربری نهایی شمعها توصیه کرده و برای بقیه متدها مبنایی در خصوص بارنهایی ومعیار گسیختگی ذکر نشده است.

۳) در روشهای مایرهوف[۳] و شیو- فوکی [۴]، استفاده از یک مقدار N واقع در تراز کف شمع چندان منطقی به نظر نمی‌رسد. لحاظ نکردن تغییرات مقادیر N اطراف کف شمع که ناشی از تغییر در فاکتورهای مقاومتی در لایه‌های در بر گیرندهٔ اطراف شمع است موجب عدم در نظر گرفتن نوع و گسترهٔ مکانیزم گسیختگی خاک کف شمع شده و متعاقباً نتایج نادرستی را از مقاومت کف به دنبال دارد.

۴) دستور العمل روش آوکی - ولسو[۲] مبنی بر انتخاب سه مقدار N واقع در نزدیکی کف شمع و متوسط گیری از آنها برای تعیین مقاومت کف و عدم استفاده از این مقادیر در تعیین مقاومت جداری غیر منطقی به نظر می رسد.

۵) در روشهای بازارا - کورکور [۴] و بریاد - تاکر[۵]، مقدار نسبت انرژی درنظر گرفته شده برای مقادیرN نامشخص است. این در حالی است که عملا مقدارN به دست آمده از آزمایش با مقدار انرژی که از دستگاه به میلهٔ حفار انتقال می‌یابد، نسبت عکس دارد. لذا عدم تعیین صحیح نسبت انرژی مربوط به مقادیر N و عدم هماهنگی نسبت انرژی مقادیر ورودیN و نسبت انرژی مورد نیاز این روابط باعث ایجاد خطا در تعیین مقدار صحیح ظرفیت باربری شمع می شود. کما اینکه همهٔ متدها از میزان انرژی واردهٔ واحدی تبعیت نکرده که بتوان مقادیر ظرفیت پیش بینی شده رادرقالب یکسان سنجید.

۶) در میان روابط ارائه شده تنها روش بریاد - تاکر [۵] دارای یک ناحیهٔ گسیختگی مفروض نسبتاً وسیع برای تعیین ظرفیت باربری کف بوده و سایر روشها به دلیل لحاظ نکردن پارامترهای مقاومت وسختی خاک واقع در تراز کف شمع، توانایی شبیه‌سازی گسیختگی کلی در شمع را دارا نیستند.

٤- ارائهٔ متد جدید

با توجه به متدهای رایج و با ارزیابی عوامل مؤثر و تأثیرگذار برروی ظرفیت باربری شمع با استفاده از متدهای آزمون درجا، از قبیل ناحیهٔ گسیختگی ایجاد شده در اطراف کف شمع، میانگین مقادیر مورد استفاده N و معیار گسیختگی شمعها دراثرآزمایش بارگذاری، یک روش جدید ارزیابی ظرفیت باربری قائم شمعها ارائه شده است. جزییات و ویژگیهای رابطهٔ جدید در ذیل ارائه می شود.

٤-۱- پردازش داده‌ها ومقادیر متوسط N

به حساب آوردن تغییرات مشخصه های مقاومتی خاک با ارائهٔ یک مقدار متوسط از N در تعیین مقاومت واحد کف و نیز مقاومت واحد جداری بسیار حائز اهمیت است. در اکثر سایتها به دلیل ناهمگنی خاک تشکیل دهندهٔ آن و نیز وجود لایه‌ای نازک کم مقاومت و یا دارای مقاومت بالا، مقادیر N به دست آمده از آزمایش SPT دارای تغییرات زیادی است. از آنجا که مقاومت واحد نوک و جداری شمع به یک مقدار متوسط از N مرتبط می‌شود، لذا این مقدار متوسط باید به نحوی مقتضی تغییرات موجود در مقادیرمربوط N معرف به دست آمده از آزمایش SPT را لحاظ کند.

غالباً برای تعیین متوسط مقادیر موجود در یک رشته از مقادیر، از دو روش متوسط گیری، میانگین حسابی و میانگین هندسی استفاده می‌شود. میانگین حسابی یک رشته از مقادیر N برای n مورد را می‌توان از معادله زیر تعیین کرد:

$$N_a = (N_1 + ... + N_n)/n \qquad (۲۱)$$

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.6.9]

که در آن N_a متوسط حسابی مقادیر N_1 تا N_n حاصل ازآزمایش است.

میانگین هندسی یک رشته از مقادیر N از معادله زیر به دست می‌آید:

$$N_g = \sqrt[n]{N_1 \times ... \times N_n} \qquad (۲۲)$$

که در آن N_g متوسط هندسی مقادیر N_1 تا N_n حاصل از آزمایش است.

ویژگی مهم میانگین هندسی این است که مقدار ارائه شده توسط این معادله مستقل از اندازه مطلق مقادیر است و بیشتر تحت تأثیر نسبت تغییرات مقادیر است. به عنوان مثال اگر یک سری داده‌های آزمایش نظیر ۱۰۰،۷۰،۱۷،۱۵،۱۷،۱۵،۱۴،۱۵،۳،۲ موجود باشد، متوسط حسابی و هندسی آنها به ترتیب ۲۶/۸ و ۱۵ است. بایک نگاه اجمالی مشاهده می‌شود مقدار متوسط هندسی این مقادیر به مقدار غالب نزدیکتر است. به عبارت دیگر متوسط حسابی این مقادیر تحت تأثیر دو عدد ۷۰ و ۱۰۰ مقداری متفاوت از مقدار غالب در این رشته اعداد را ارائه می‌کند. لذا استفاده از میانگین هندسی در تعیین یک مقدار میانگین منطقی N که در عین حال اثر تغییرات موجود در مقادیر N در آن منظور شده باشد، حتی می‌تواند برای فیلتر کردن داده‌ها در حذف منطقی موارد داده‌های غیر عادی بزرگ و یا کوچک مفید باشد. در متد جدید پیشنهادی از این روش میانگین‌گیری استفاده شده است[۶].

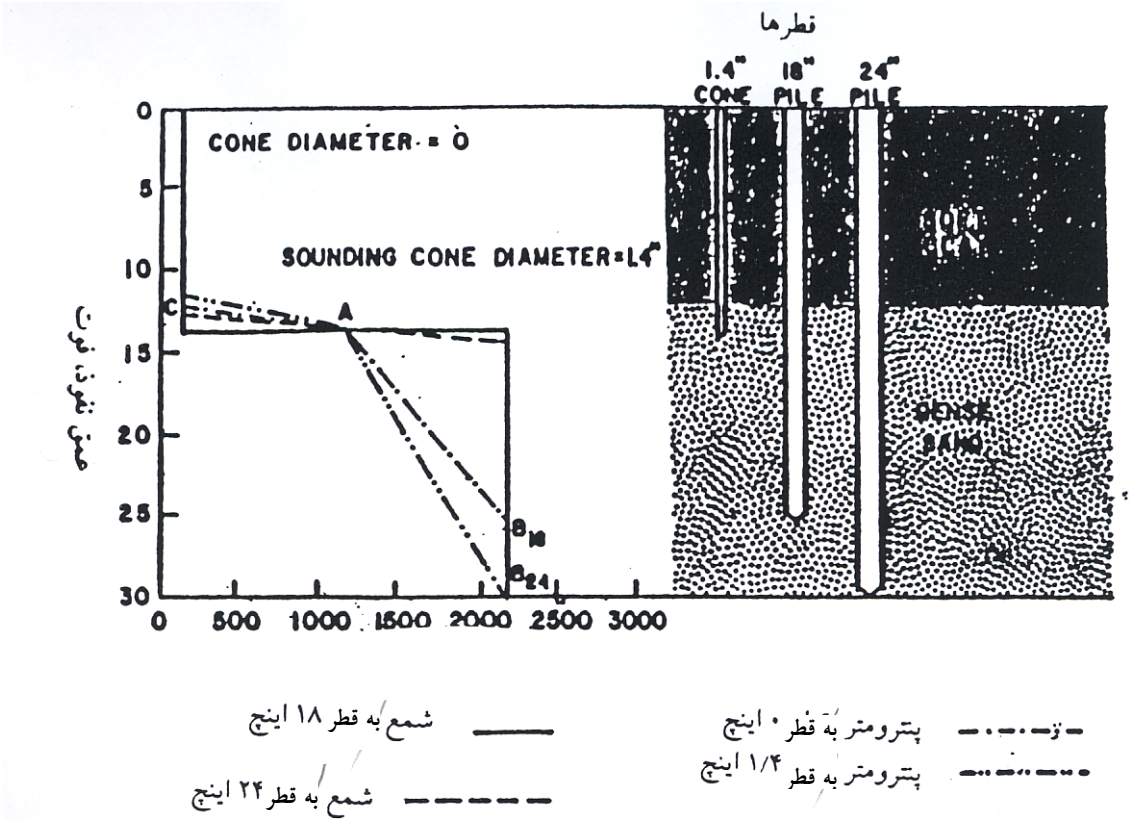
٤-۲- ناحیه گسیختگی

برای تعیین مقاومت واحد کف شمع از مقادیر عدد نفوذ استاندارد، لازم است که ناحیه گسیختگی در اطراف کف شمع مشخص شود. در این راستا، باید عمل تعیین ناحیهٔ گسیختگی به نحوی انجام گیرد که توانایی شبیه سازی گسیختگی پانچی یا موضعی را دارا باشد. همان طوری که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، مقایسه‌ای بین ظرفیت باربری کف یک شمع و دو پنترومتر با اقطار مختلف ارائه شده است. پنترومتر اول به قطر ایدئال صفر دارای ظرفیت باربری کفی مستقل از لایه مقاوم تحتانی و نیز میزان نفوذ در لایه مقاوم باربر است. در پنترومتر دوم به قطر ۳۵ میلیمتر همان گونه که مشاهده می‌شود با نزدیک شدن نوک پنترومتر به لایهٔ مقاوم، ظرفیت باربری کف افزایش یافته که این روند با یک میزان خاص فرورفت در لایه باربر و با رسیدن به یک مقدار حدی که مستقل از قطر نوک پنترومتر است، متوقف می‌شود. این پدیده در مورد یک شمع که دارای قطر به مراتب بزرگتری از پنترومترهاست، نیز مشاهده می‌شود با این تفاوت که گستردگی ناحیه انتقالی از میزان مقاومت واحد حدی کف در لایه کم مقاومت به میزان مقاومت واحد حدی کف در لایه مقاوم گستردگی بیشتری دارد.

نتایج حاصل از تحقیقات محققان مختلف نشان داده است که میزان گستردگی این ناحیه تابعی از قطر شمع است[۶]. مطالعات تجربی مایر هوف درسال۱۹۷۶ نشان داد که یک مقدار نفوذ درلایه خاک باربر معادل ۱۰ برابر قطر شمع برای بسیج کامل مقاومت کف لازم است. مایر هوف الگوی گسیختگی خاک اطراف کف یک شمع را در محیطهای همگن به صورت یک منحنی اسپیرال لگاریتمی فرض کرد که مطابق این الگو سطح گسیختگی به بدنه شمع می رسد.

دبیر نیز در طی مطالعات خود بر روی شمعهای مستقر در خاکهای ماسه‌ای، عمق نفوذ مشابهی را برای بسیج کامل ظرفیت باربری کف شمع تشخیص داد. ارتفاع و عمق این منحنی اسپیرال لگاریتمی که تابعی از زاویه اصطکاک داخلی خاک است، از چهار تا نه برابر قطر شمع بالای نوک و از یک تا یک ونیم برابر قطر شمع زیر کف، برای یک محدودهٔ معمول از زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک متغیر است. اما از آنجا که خاک دربرگیرندهٔ اطراف یک شمع، غالباً همگن نیست، الگوی گسیختگی ایجاد شده در اطراف کف شمع متفاوت از الگوی فوق الذکر خواهد بود. با در نظر گرفتن معیار گسیختگی اسپیرال لگاریتمی و گسترهٔ آن، بررسیها نشان داد ناحیهٔ مؤثر میانگین‌گیری مقادیر N در روش جدید در ناحیه‌ای معادل هشت برابر قطر شمع (8B) بالای کف شمع و چهار برابر قطر شمع(4B) زیر کف شمع مناسب است(B قطر شمع) که بخش

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.6.9]



شکل۲. اثر ابعاد قطر پترومتر در بسیج کامل مقاومت واحد کف شمع[۷]

فوقانی این ناحیه بسیار مشابه نتایج تحقیقات مایر هوف، دبیر و اسلامی- فلنیوس است[۷].

٤-۳- معیاربار نهایی شمع

معیار بار نهایی مفروض در این رابطه، فرورفت کامل[۱۳] است که طبق این معیار شمع زمانی به گسیختگی نهایی می‌رسد که تحت یک بار ثابت یا افزایش اندک بار، میزان نشست شمع با یک نرخ تصاعدی افزایش یابد. دلیل انتخاب این معیار گسیختگی برای شمعها، لزوم یکسان بودن ردهٔ گسیختگی شمعها و نوع گسیختگی ایجاد شده در خاک در حین آزمایشهایی نظیر CPT و SPT است. و از آنجایی که آزمایشهای CPT و SPT در ردهٔ آزمایشهای کرنش بزرگ[۱۴] قرار دارد، معیار گسیختگی برای شمعها نیز فرورفت کامل درنظر گرفته شده است.

٤-٤- روابط تعیین توان باربری براساس متد جدید

با توجه به مطالب عنوان شده در فوق با استفاده از هشت مورد عملی مطالعاتی موجود در بانک اطلاعاتی که ظرفیت باربری کف و جداره آنها به تفکیک از هم محاسبه شده بود و یا شمعها تحت آزمایش بارگذاری کششی قرار گرفته بودند، رابطه‌ای برای تعیین ظرفیت باربری قائم شمعها ارائه شده است. این کار با ارائهٔ یک رگرسیون خطی از مقادیر متوسط N محاسبه شده در کل طول شمع و ناحیهٔ گسیختگی اطراف کف شمع نسبت به ظرفیت باربری واحد جداری و کف به دست آمده است.

طبق روش جدید توان باربری نهایی شمع را می‌توان از معادله زیر به دست آورد:

$$R_{ult} = R_t + R_s = q_t.A_t + q_s.A_s \qquad (۲۳)$$

$$q_t = 0.385.N_{g.t} \qquad (۲۴)$$

$$q_s = 0.00365.N_{g.s} \qquad (۲۵)$$

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.6.9]

که در آن R_{ult}، R_t و R_S توان باربری نهایی، کف و جداره برحسب مگانیوتن (MN) و q_t و q_s مقاومت واحد کف و جداره بر حسب مگا پاسگال MPa ، $N_{g.t}$ متوسط هندسی مقادیر N درناحیه 8B بالای کف شمع و 4B زیر کف شمع متناظر با انرژی وارده ۶۰٪ واقع در ناحیه گسیختگی مفروض، $N_{g.s}$ متوسط هندسی مقادیر N_{60} در کل طول مدفون شمع و A_t و A_s نیز سطح مقطع کف و جداره شمع بر حسب m^2 است. ذکر این مطلب ضروری است که به دلیل استفاده از نتایج آزمایش بارگذاری بر روی شمعهای کوبیده شده در خاکهای ماسه‌ای، برای کالیبره کردن معادله ارائه شده، معادله فوق تنها برای شمعهای کوبیده شده در محیطهای ماسه‌ای معتبر است.

۵- بانک اطلاعاتی

اطلاعات جمع آوری شده شامل ۴۲ مورد نتایج آزمایش بارگذاری شمعهای در مقیاس واقعی به همراه اطلاعات مربوط به نوع خاک منطقهٔ محل استقرار شمع و نتایج مربوط به آزمایش SPT اجراشده درحداقل فاصله نسبت به شمع تحت بارگذاری، تشکیل شده است. این موارد مطالعاتی از ۲۲ سایت و ۱۵ مرجع گزارش شده اندکه در جدول (۱) جزییات مربوط به این موارد مطالعاتی شامل مشخصات هندسی شمعها،جنس، ظرفیت باربری، پروفیل خاک، محل انجام مطالعه، نام نویسنده و یا دانشگاه حامی تحقیق ارائه شده است[۷- ۱۲].

اکثر موارد مطالعاتی موجود در این بانک اطلاعاتی از آمریکا گزارش شده‌اند. قطر شمهای مورد مطالعه از ۲۵۰ mm تا ۱۰۰۰ mm بوده که قطر غالب آنها بین ۳۰۰ mm تا ۴۰۰ mm است طول آنها از m ۸ تا m ۳۶ متغیر بوده که طول غالب آنها بین m ۱۵ تا m ۲۰ است. شمعها عمدتاً با مقاطع دایره‌ای یا مربع شکل بوده و نحوهٔ اجرای تمام آنها به صورت کوبشی است [۱۳].

آزمایشهای بارگذاری انجام شده در این موارد مطالعاتی از دو نوع کششی و فشاری‌اند که ۷۰٪ آنها فشاری و بقیه کششی‌اند. در ۱۵٪ از این موارد با ابزاربندی شمعهای تحت آزمایش، ظرفیت باربری جداری و نوک به تفکیک ارائه شده‌اند. در ۱۲ مورد از موارد مطالعاتی موجود در این بانک اطلاعاتی آزمایشهای بارگذاری تا مرحله گسیختگی کامل ادامه نیافته، اما درصد پیشرفت آنها به گونه‌ای است که با استفاده از متدهای تفسیری که توانایی برونیابی نمودار بار- نشست را دارا هستند، می‌توان ظرفیت باربری نهایی آنها را تعیین کرد. در این موارد با استفاده از معیار برینچ هنسن ظرفیت باربری نهایی موارد تعیین شده است[۱۴].

در ۸ مورد دیگر نیز آزمایشهای بارگذاری انجام شده جنبهٔ محک [۱۵]داشته، لذا با توجه به پیشرفت کم عملیات بارگذاری شمع، ظرفیت باربری شمع براساس معیار گسیختگی فرورفت کامل عاید شده و در این خصوص نمی‌توان از متدهای تفسیر برونیابی کننده نمودار بار- نشست برای تعیین ظرفیت باربری شمعها استفاده کرد.

در انتخاب موارد مطالعاتی موجود در این بانک اطلاعاتی سعی بر آن بوده است که خاک محل کوبش شمعها از نوع خاکهای دانه ای باشد. دلیل این مسئله زایل شدن سریع فشار آب حفره‌ای اضافی در این خاکهاست که عدم تغییر مقاومت خاک را با گذشت زمان به دنبال خواهد داشت. لذا اثر فشار آب حفره‌ای بر روی تعداد ضربات N به دست آمده از آزمایش SPT بسیار اندک خواهد بود. به این دلیل در موارد مطالعاتی موجود در این بانک اطلاعاتی یا خاک محل استقرار شمعها کاملاً از نوع خاکهای دانه‌ای است و یا در صورت وجود لایه‌های خاک چسبنده، ضخامت این لایه‌ها از ۲۰٪ طول شمع کمتر بوده است. در شکل ۳ نتایج آزمایش SPT بر حسب عمق برای برخی از موارد مندرج در بانک اطلاعاتی ارائه شده است.

۶- معیار بار نهایی شمع

معیار گسیختگی یک شمع غالباً در دو حالت جابه جاییهای کوچک[۱۶] و برپایه ملاحظات نشست مجاز و سرویس پذیری سازه و ایجاد جابه جاییهای بزرگ و یا ظرفیت باربری نهایی، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.6.9]

جدول۱- خلاصه مشخصات موارد عملی

No.	Case	Reference	Site location	Pile shape&Pile diameter material [a]	b(mm)	Embedment length,D(m)	Total capacity Rult(KN)	Soil profile
1	A&M 14	Briaud&Tucker (1988) [6,7]	USA	HP,St	246	8.5	590	clay&sand
2	A&M 39	Briaud&Tucker (1988) [6,7]	USA	HP,St	310	19	1370	clay&sand
3	A&M 40	Briaud&Tucker (1988) [6,7]	USA	Sq , Conc.	350	16	1070	clay&sand
4	A&M 41	Briaud&Tucker (1988) [6,7]	USA	HP,St	310	12.4	520	clay&sand
5	A&M 49	Briaud&Tucker (1988) [6,7]	USA	Sq , Conc.	400	14.7	1170	sand
6	A&M 66	Briaud&Tucker (1988) [6,7]	USA	Sq , Conc.	350	25	1560	clay&sand
7	A&N1	Haustorfer & Plesiotis (1988) [6,7]	Australia	Sq , Conc.	450	14	3850	sand&limestone
8	A&N2	Haustorfer & Plesiotis (1988) [6,7]	Australia	Sq , Conc.	450	13.75	4250	sand&limestone
9	A&N3	Haustorfer & Plesiotis (1988) [6,7]	Australia	Sq , Conc.	355	10.2	1300	silt&sand
10	ALABA	Laier,(1994) [6,7]	USA	HP,St	310	36.3	2130	silty clay&sand
11	BOOSH1	Iran khak Ltd. (1995) [8]	Iran	P , St	457	24	2230	silty clay&sand
12	BOOSH2	Iran khak Ltd. (1995) [8]	Iran	P , St	457	24	1200	silty clay&sand
13	B.A.1	Omran Sahel Ltd. (2002) [9]	Iran	P , St	1000	15	288	clay&sand
14	B.A.2	Omran Sahel Ltd. (2002) [9]	Iran	P , St	1000	18	350	clay&sand
15	B.A.3	Omran Sahel Ltd. (2002) [9]	Iran	P , St	1000	15	300	clay&sand
16	B.A.4	Omran Sahel Ltd. (2002) [9]	Iran	P , St	1000	18	300	clay&sand
17	B.A.5	Omran Sahel Ltd. (2002) [9]	Iran	P , St	1000	15	200	clay&sand
18	B.A.6	Omran Sahel Ltd. (2002) [9]	Iran	P , St	1000	18	200	clay&sand
19	B.A.7	Omran Sahel Ltd. (2002) [9]	Iran	P , St	1000	18	500	clay&sand
20	Fajr 1	Iran khak Ltd. (1998) [10]	Iran	Sq , Conc.	400	24.5	680	clay&silty sand
21	Fajr 2	Iran khak Ltd. (1998) [10]	Iran	Sq , Conc.	400	30	3000	clay&silty sand
22	Fajr 3	Iran khak Ltd. (1998) [10]	Iran	Sq , Conc.	400	24	1800	clay&silty sand

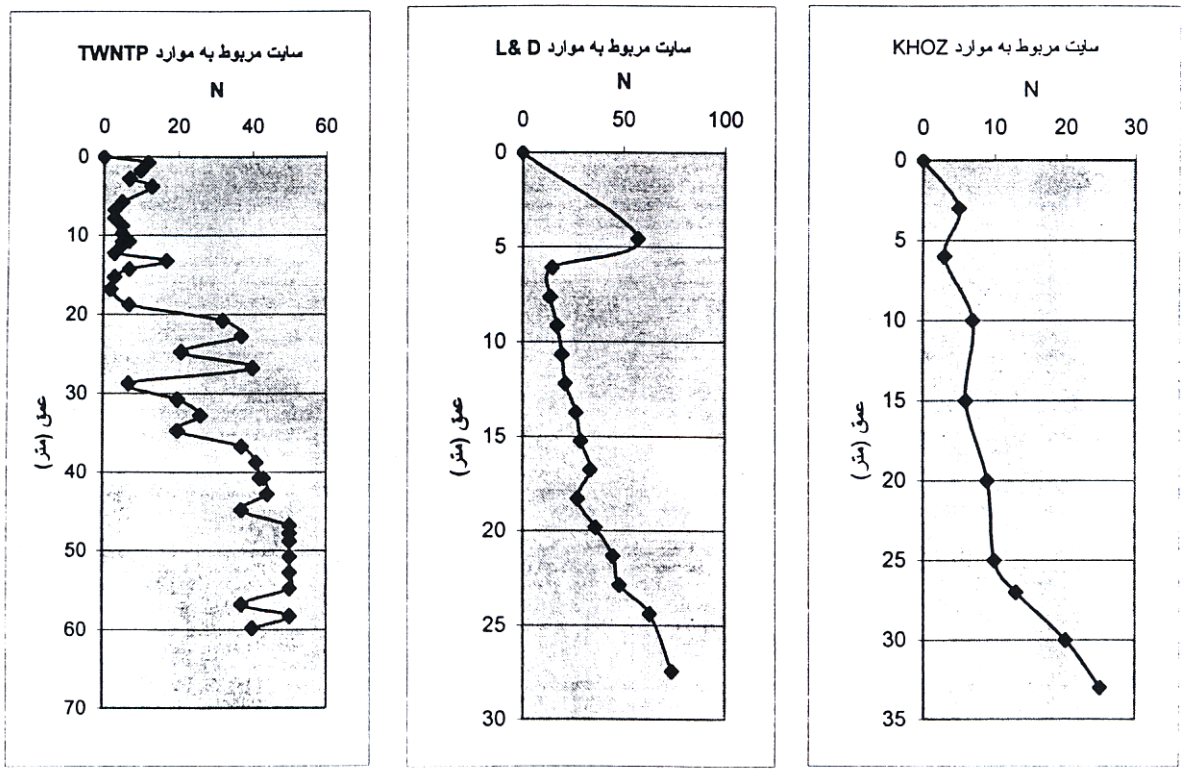
[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.6.9]

جدول۱- ادامه خلاصه مشخصات موارد عملی

No.	Case	Reference	Site location	Pile shape&Pile diameter material [a]	b(mm)	Embedment length,D(m)	Total capacity Rult(KN)	Soil profile
23	Khoz 1	Iran khak Ltd. (1999) [11]	Iran	Sq , Conc.	350	30	1400	clay&silysand
24	Khoz 2	Iran khak Ltd. (1999) [11]	Iran	Sq , Conc.	500	30	2025	clay&silysand
25	Khoz 3	Iran khak Ltd. (1999)[11]	Iran	Sq , Conc.	350	30	1050	clay&silysand
26	L&D 12	Tucker&Briaud (1988) [7]	USA	HP,St	360	16.5	1170	sand
27	L&D 13A	Tucker&Briaud (1988) [7]	USA	HP,St	360	16.5	2900	sand
28	L&D 16	Tucker&Briaud (1988) [7]	USA	HP,St	360	16.2	3600	sand
29	L&D 31	Tucker&Briaud (1988) [7]	USA	P , St	300	14.2	1310	sand
30	L&D 315	Tucker&Briaud (1988) [7]	USA	HP,St	360	11.3	817	sand
31	L&D 316	Tucker&Briaud (1988) [7]	USA	HP,St	360	11.3	870	sand
32	L&D 32	Tucker&Briaud (1988) [7]	USA	P , St	300	11	560	sand
33	L&D 35	Tucker&Briaud (1988) [7]	USA	P , St	350	12.2	360	sand
34	OKLACO	Neveles & Donald,(1994) [7]	USA	P , St	660	18.2	3600	sand
35	OKLAST	Neveles & Donald,(1994) [7]	USA	P , St	610	18.2	3650	sand
36	POLA 1	CH2M Hill,(1987) [7]	USA	Oct,Conc	600	25.8	5785	clay&sand
37	POLA 2	Urkkada Ltd.(1995) [7]	USA	Oct,Conc	600	32.6	3560	clay&sand
38	Rasht 1	Iran khak Ltd. (1996)[12]	Iran	Sq , Conc.	300	30	1600	clay&sand
39	Rasht 2	Iran khak Ltd. (1996) [12]	Iran	Sq , Conc.	300	30	1600	clay&sand
40	Twntp 4	Yen et al. (1989) [7]	Taiwan	P , St	609	34.2	4330	clay&sand
41	Twntp 6	Yen et al. (1989) [7]	Taiwan	P , St	609	34.2	4460	clay&sand
42	UF22	Avasarala et al. (1994) [7]	USA	Sq , Conc.	350	16	1350	sand

P=Pipe , Sq=Square , HP=H-Section , Conc= Concrete , St=Steel , b=Diamter , D=Length , R_{ult}=Total capacity

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.6.9]



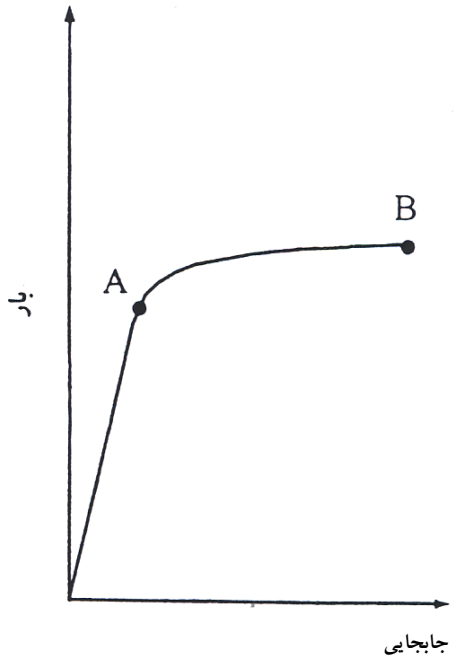
شکل۳- نمونه‌هایی از نتایج N حاصل از SPT با عمق برای برخی از موارد بانک اطلاعاتی

از آنجایی که بهترین روش تعیین ظرفیت باربری یک شمع استفاده از نتایج آزمایش بارگذاری شمع است، بحث بر روی مقولهٔ معیار گسیختگی بیشتر در زمینهٔ تفسیر نتایج این آزمون مطرح است.

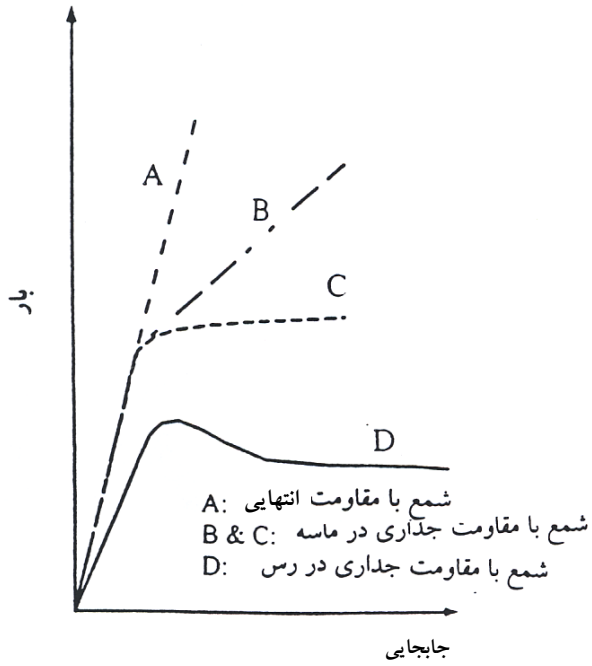
در شکل (۴)، نمودار نمونه‌وار بار- نشست به دست آمده از آزمایش بارگذاری شمع مشاهده می‌شود که می‌توان آن را با دو خط مستقیم تقریب زد. بخش اول این نمودار معرف اندر کنش الاستیک خاک – شمع است که تا نقطه A ادامه دارد که در این نقطه تغییر مکانهای ایجاد شده در شمع کوچک‌اند. در آزمایشهایی که با ایجاد تغییر مکانهای کوچک انجام می‌شود. محدودهٔ بارگذاری شمع، محدودهٔ فوق الذکر است. آزمایشهای بارگذاری محک با چنین پیش فرضی انجام می‌شوند. در این‌گونه موارد هدف از بارگذاری شمع، تعیین صحت عملکرد یک شمع در محدودهٔ بارگذاری مجاز آن است. بخش دوم این نمودار معرف اندر کنش پلاستیک خاک – شمع است که از نقطه A شروع می‌شود و تا نقطه B که نقطه گسیختگی کامل است ادامه می‌یابد. این ناحیه از نمودار بار- نشست دارای شکلهای مختلفی است که تابعی از جنس خاک محل نصب شمع، روش اجرای شمع، نوع عملکرد شمع (اتکایی یا اصطکاکی) و بالاخره صحت عملکرد سیستم کنترل عکس‌العمل آزمایش بار گذاری و نحوهٔ اعمال فشار پمپ در آزمایش است.

در شکل (۵) چند نمونهٔ متفاوت از نمودارهای بار- نشست برای شمعهای دارای عملکرد متفاوت ارائه شده است. همان طورکه مشاهده می‌شود بخش تغییر شکل پلاستیک این منحنیها دارای شکلهای متفاوتی‌اند که تصمیم گیری در مورد گسیختگی را با مشکل همراه می‌سازد. طبق تعریف گسیختگی بار نهایی شمع زمانی اتفاق می‌افتد که تحت یک بار ثابت یا افزایش اندک بار تغییر مکان آن با یک نرخ تصاعدی افزایش یابد. به این تعریف از گسیختگی شمع، گسیختگی فرورونده گویند. با توجه به این تعریف حالت ایدئال گسیختگی شمع را می‌توان

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.6.9]



شکل۴- نمودار عمومی بار- جابه‌جایی شمع



شکل۵- نمودارهای مختلف بار- جابه‌جایی شمع در خاکهای مختلف حاصل از آزمایش بارگذاری استاتیکی

در نمودار C از شکل (۶) مشاهده کرد.

با توجه به مطالب فوق تفسیر نمودار بار- نشست یک شمع کار چندان آسانی نخواهد بود، چرا که گسیختگی فرورونده به ندرت ایجاد می‌شود و نیز در برخی از موارد در تغییر مکانهای فوق العاده بزرگ رخ می‌دهد که محدودیتهای مربوط به ابزارآلات بارگذاری و ثبت تغییر مکانهای شمع مانع از حصول به آن می‌شود. لذا ظرفیت باربری نهایی یک شمع بیش از آنکه تابع سیستم خاک – شمع باشد تابع سیستم اپراتور – شمع است[۱۵].

در میان روشهای مورد بررسی در این تحقیق، تنها در سه روش معیار گسیختگی مشخص شده است که عبارت‌اند از:

اوکی- ولسو [۲]، بریاد- تاکر [۵] ، و مایرهوف [۳]، در روش اوکی – ولسو[۲] معیار گسیختگی ارائه شده توسط وان دروین[۱۷] در نظر گرفته شده است. طبق این روش معادله بین ظرفیت باربری نهایی شمع و مقادیر بار وارده بر شمع و نشست متناظر با آن به صورت معادله نمایی زیراست:

$$Q = Q_{ult}(1 - e^{-kS}) \qquad (۲۶)$$

که در آن k یک ثابت ریاضی بزرگتر از صفر است.

مطابق معادله فوق ظرفیت باربری نهایی معادل عرض مجانب افقی تابع فوق است که در تغییر مکانهای بزرگ ایجاد می‌شود. لذا منطقی است که ظرفیت باربری به دست آمده از این معادله بیشتر از مقدار واقعی باشد. لذا از آنجا که روش اوکی – ولسو [۲] براساس این معیار ارائه شده اند، قاعدتاً در تخمین ظرفیت باربری شمعها در خلاف جهت اطمینان عمل می‌کنند. معیار پیشنهادی توسط روش بریاد – تاکر[۵] نیز فرورفت سر شمع معادل ۱۰٪ قطر شمع است که براساس بررسیهای مرجع [۱۶] مقادیردست بالا را در بردارند.

معیار انتخابی توسط روش مایر هوف [۳] در مواردی که شمع به گسیختگی کامل برسد مقداری معادل با گسیختگی فرورفت را ارائه می‌دهد. اما نکته اینجاست که در موارد ناقص ماندن فرایند آزمایش بارگذاری به دلایلی نظیر کم بودن ظرفیت جکهای بارگذاری، طبق این معیار حداکثر بار وارده بر شمع

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.6.9]

معادل ظرفیت باربری نهایی شمع است.

در روش جدید معیار گسیختگی برای مقایسه ظرفیت باربری پیش بینی شده به مقادیر اندازه‌گیری شده معیار فرورفت کامل بوده که در این خصوص می‌توان به معیار بر ینچ هنسن ۸۰٪ اشاره کرد که بار نهایی شمع رامقداری در نظر می‌گیرد که تغییر مکان مربوط به آن بیش از چهار برابر ۸۰٪ بار مربوطه در آزمایش بارگذاری شمع باشد.

۷- ارزیابی روشها

همان طوری که عنوان شد ۴۲ مورد عملی شمع به همراه آزمایشات بارگذاری استاتیکی و آزمایشات درجا SPT برای ارائه متد جدید و ارزیابی متدهای جاری تدوین شده است.از آنجایی که از داده‌های موجود در بانک اطلاعاتی ۸ مورد برای کالیبراسیون روش جدید استفاده شده است برای یکسان سازی در مقایسه روشها، ۸ مورد فوق برای ارزیابی متدها کنار گذاشته شده و بررسی خطاها برای روش جدید و پنج روش جاری برمبنای ۳۴ مورد باقیمانده صورت گرفته است.

برای ارزیابی روش جدید و برای تعیین میزان صحت عملکرد آن و نیز میزان خطا و پراکندگی موجود در نتایج آن و همین طور برای مقایسه نتایج روشهای مبنی برSPT مرور شده، از روشهای آماری و احتمال تجمعی[۱۸] استفاده شده است.

در روش آماری خطای نسبی مطابق معادله زیر تعریف شده است:

$$E = \frac{R_e}{R_m} - 1 \qquad (۲۷)$$

E مقدار خطای نسبی

R_e ظرفیت باربری پیش بینی شده

R_m ظرفیت باربری اندازه گیری شده شمع است.

به دلیل جمع جبری مقادیر مثبت و منفی و پنهان مانده مقدار خطای واقعی شاخص خطای نسبی در مطالعات منظور نشده است. لذا برای رفع این مشکل از مقدار قدر مطلق خطاها استفاده شده است. برای ۳۴ مورد مندرج در بانک اطلاعاتی (۸ مورد برای کالیبراسیون متد جدید، در مقایسه متدها منظور نشده‌اند) نتایج حاصل از این تحلیل آماری در جدول (۲) ارائه شده است. بررسی آماری نشان می‌دهد که متوسط خطای مطلق برای روشهای جاری به قرار ۷۷٪ و با انحراف معیار متوسط ۸۵٪ بوده در صورتی که برای روش جدید مقدار خطای مطلق ۱۹٪ با انحراف معیار ۲۹٪ است.

در روش احتمال تجمعی که توسط لانگ و شیمل [۱۷] نیز استفاده شده است، نسبت مقادیر ظرفیت پیش بینی شده به مقادیر اندازه گیری شده، نسبت به یک میانگین تجمعی تحت عنوان احتمال تجمعی رسم می‌شود. طبق این روش برای یک سری از داده‌ها، نسبت ظرفیت تخمین زده شده شمع به مقدار اندازه‌گیری شده به صورت یک رشته صعودی مرتب شده و از ۱ تا n شماره گذاری می‌شود. برای هر یک از این نسبتها، فاکتور احتمالی تجمعی یا P به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P = \frac{i}{n+1} \qquad (۲۸)$$

که در آن P ، فاکتور احتمالی تجمعی، i ، شمارهٔ موردی که فاکتور احتمالی تجمعی برای آن محاسبه می‌شود و n تعداد کل موارد مورد بررسی است. مطابق یافته‌های لانگ وشیمل برای تعیین میزان تمایل یا تفرق موجود در نتایج یک روش خاص می‌توان از موارد زیر نهایت استفاده را برد. مقدار فاکتور R_e/R_m در یک احتمال تجمعی معادل 50 درصد، معرف مقدار میانگین نسبتهای R_e/R_m است. هر چقدر این میانگین به عدد یک نزدیکتر باشد بیانگر دقت بیشتر روش مورد نظر است. اگر مقادیر لگاریتم فاکتور R_e/R_m نسبت به متغیر احتمال تجمعی رسم شود، یک خط راست ایجاد می‌شود. شیب خط گذرنده از نقاط معرف پراکندگی یا انحراف معیار است. هر چقدر خطوط ایجاد شده در این مختصات نیمه لگاریتمی تخت‌تر باشند میزان پراکندگی موجود در نتایج روش کمتر خواهد بود. برای تعیین خطای متوسط با استفاده از این روش می توان از معادله زیر استفاده کرد:

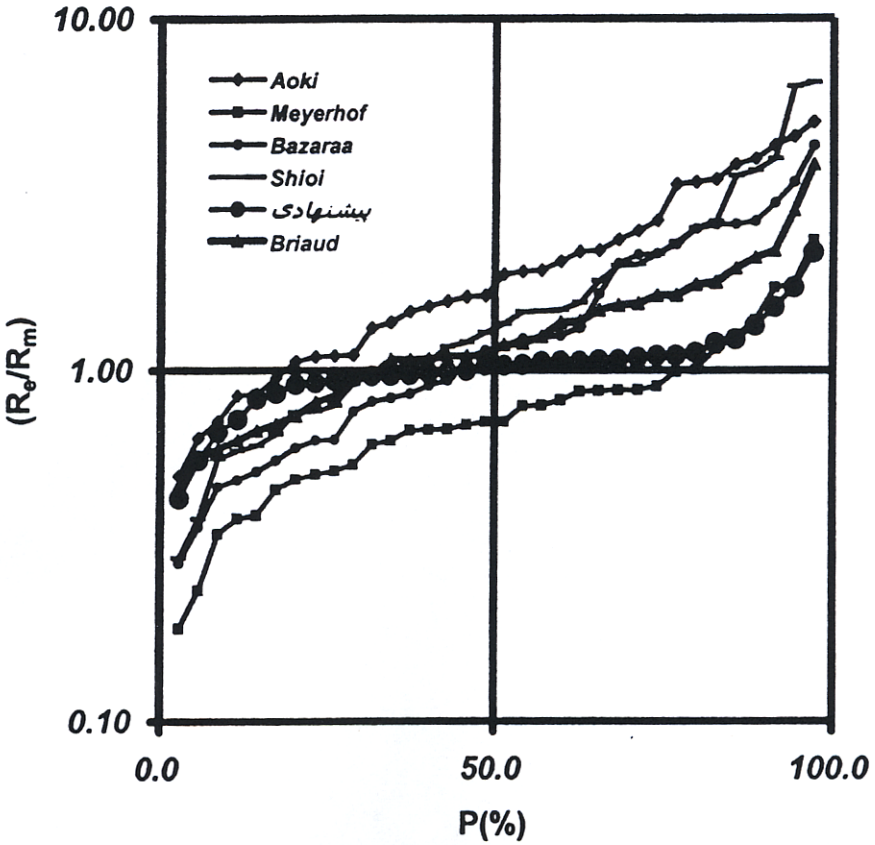
$$E_{r,ave} = \left(\frac{R_e}{R_m}\right)_{50} - 1 \qquad (۲۹)$$

که در آن $(R_e/R_m)_{50}$، نسبت ظرفیت تخمین زده شدهٔ شمع

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.6.9]

جدول ۲- مقایسه خطاهای آماری متدهای جاری و جدید برای بیش بینی ظرفیت باربری شمعها

روش		آوکی-ولسو Aoki & Velloso	مایرهوف Meyerhof	بازارا-کورکور Bazaraa & Kurkur	شیو-فوکی Shioi & Fukui	بریاد-تاکر Briaud & Tucker	روش جدید
خطای نسبی %	متوسط خطا	109	-18	45	8	33	5
	انحراف معیار	124	45	151	151	69	35
خطای مطلق %	متوسط خطا	118	39	77	101	49	19
	انحراف معیار	115	28	77	137	69	29



شکل۶- نمودار فراوانی تجمی خطاها برای مقایسه روشهای مختلف برای ۳۴ مورد عملی

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.6.9]

به مقدار اندازه‌گیری شده در احتمال تجمعی ۵۰٪ است.

در شکل (۶) نتایج حاصل از ارزیابی شش روش مشروح با متد احتمال تجمعی ارائه شده است. همان طوری که مشاهده می‌شود روش جدید، در احتمال تجمعی ۵۰٪ دارای ضریب R_e/R_m نزدیک واحد بوده و میزان خطای متوسط آن برابر ۳٪ است. علاوه بر خطای نسبی پایین این روش، شیب کم نمودار متناظر این روش مؤید پراکندگی پایین نتایج حاصل از این روش است. پس از این روش که در میان شش روش مورد بررسی بهترین تخمینها را از ظرفیت باربری شمع ارائه می‌دهد، روشهای برياد – تاکر، [۵]، بازارا – کورکور [۴]، شیو – فوکی، [۴]، مایر هوف، [۳] و آوکی – ولسو [۲] به ترتیب با خطای متوسطی معادل ۱۴٪، ۱۶٪، ۲۸٪، ۲۹٪ و ۷۵٪ در ردهٔ بعدی میزان خطا در تخمین ظرفیت باربری شمع قرار دارند.

در میان روشهای فوق الذکر، روش مایرهوف[۳] در تخمین ظرفیت باربری شمعها محافظه کارانه عمل می‌کند اما سایر روشها دارای نتایجی دست بالا بیش از میزان واقعی‌اند. همان طوری که که در شکل ۶ مشاهده می‌شود دو روش برياد – تاکر [۵]و آوکی – ولسو [۲] دارای نتایجی بیش از مقادیر واقعی‌اند. خطای حاصله از روش مایرهوف[۳] که در جهت اطمینان است می‌تواند به دلیل پایین بودن ضریب ظرفیت باربری جداری اتخاذ شده در این روش برای شمعهای کوبیده شده با جابه‌جایی کم باشد. شمعهای لوله‌ای ته باز که بنا به نظر مایرهوف[۳] در این رده از شمعها قرار دارند به دلیل اثر فرورفت[۱۹] خاک داخل شمعها دارای عملکردی نسبتاً متفاوت از شمعهای با جابه جایی کم هستند. دلیل خطای موجود در روش شیو – فوکی[۴] می تواند به دلیل مشخص نبودن نسبت انرژی مقادیر N مورد نیاز این رابطه در تعیین ظرفیت باربری شمعها باشد. این عامل در روش برياد – تاکر [۵] نیز می تواند عامل ایجاد خطا باشد.

یکی از دلایل مشترک ایجاد خطا و پراکندگی در نتایج حاصل از تخمین متدهای مورد بحث، ۸ مورد داده‌های موجود در بانک اطلاعاتی در آزمایش بارگذاری محک هستند. که این مطلب به خوبی در منتهی الیه سمت راست تمامی نمودارهای موجود در تصویر قابل مشاهده است.

۸- جمع بندی و نتیجه‌گیری

متدهای تخمین ظرفیت باربری یک شمع براساس نتایج آزمایشهای درجا به عنوان یک گزینه قابل توجه برای تحلیل استاتیکی در اکثر طراحیهای ژئوتکنیکی در سالهای اخیر مورد ملاحظه قرار گرفته است. آسانی، صرفهٔ اقتصادی، وجود تجربیات ارزنده در زمینهٔ آزمایشات درجا، پیشرفتهای روز افزون در زمینهٔ توسعه فناوری و کاربردها و نیز کارایی بالای تجهیزات آزمایشهای درجا و حذف عناصر و عوامل وابسته، در ایجاد رابطه بین نتایج این آزمایشات و نیز واحد کف و جداری شمع، از دلایل اصلی این رویکرد در محاسبات ژئوتکنیکی است.

در این میان آزمایش نفوذ استاندارد یا SPT یکی از رایجترین متدهای آزمایش درجاست که به دلیل سادگی روش آزمایش و نیز هزینه اولیه پایین تهیه ابزارآلات و دستگاههای مورد نیاز این آزمایش علی‌رغم ایرادات آزمایش و مشکلات تفسیری و تکرارپذیری بسیار مورد توجه متخصصین ژئوتکنیک قرار دارد.

در این مقاله پنج روش آوکی – ولسو[۲]، برياد - تاکر [۵] مایر هوف [۳]، بازارا- کور کور [۴] و شیو- فوکی [۴] رایج برای تعیین توان باربری شمعها براساس نتایج آزمایش SPT، مورد نقد و بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به نواقص و کاستیهای متدهای جاری، یک روش جدید تعیین ظرفیت باربری شمع براساس نتایج این آزمایش ارائه شده است که در آن ملاحظات میانگین گیری هندسی مقادیرN به جای میانگین‌گیری حسابی، محدودهٔ گسیختگی دراطراف کف شمع به قرار 8B در بالا و4B در زیرآن و نیز بار نهایی شمع بر مبنای گسیختگی فرورونده مطابق بامعیار ۸۰٪ برینچ- هنسن[۱۴] استفاده شده است.

با استفاده از یک بانک اطلاعاتی حاوی ۴۲ مورد عملی شمع

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.6.9]

شامل نتایج آزمایش بارگذاری استاتیکی روی شمعها و نتایج آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) که در حداقل فاصلهٔ ممکن نسبت به شمع تحت بارگذاری انجام شده‌اند، مقایسه‌ای بین تخمینهای حاصل از این پنج روش جاری و متد جدید با استفاده از بررسی خطاهای آماری و احتمال تجمعی انجام شده است. ارزیابی خطاهای متدهای مختلف نشان می‌دهد که خطای مطلق متوسط برای پنج روش به قرار ۷۷٪ با انحراف معیار ۸۵٪ بوده که این مقادیر برای روش جدید به قرار ۱۹٪ و۲۹٪ بوده است. با روش احتمال تجمعی میزان خطای متوسط پنج روش بقرار ۳۲٪ و برای روش جدید ۳٪ بوده است. در مجموع روش جدید با ملاحظه اندرکنش مناسب شمع وخاک اطراف نسبت به روشهای جاری تخمینهای بهتری از توان باربری شمعها ارائه داده و می‌تواند در طراحیهای ژئوتکنیکی به همراه دیگر روشها برای طراحی بهینه و تصمیم گیریها مورد ملاحظه قرار گیرد.

واژه‌نامه

1. static analysis
2. dynamic formula
3. dynamic testing
4. in-situ testing
5. full scale pile load test
6. pile driving analyzer
7. case pile wave analysis program
8. standard penetration test
9. cone penetration test
10. pressuremeter test
11. high displacement
12. low displacement
13. plunging
14. large strain
15. proof test
16. small movement
17. Van Der Veen
18. cumulative probability
19. plug effect

مراجع

1. Fellenius, B. H., and Altaee, A. A., "Critical Depth, How It Came Into Being and Why It Does Not Exist," *Proceedings of the Institution of Civil Engineering*, Geotechnical Engineering, pp. 107-111, 1995.
2. Aoki, N. and D. de Alencar, Velloso, "An Approximate Method to Estimate the Bearing Capacity of Piles," *Proc 5th Pan –American Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering,* Vol 1, pp. 367-376. Buenos Aires, Brazil, 1975.
3. Meyerhof, G. G., "Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundation," *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, ASCE, Vol 102, pp 195-225, No. GT3, 1983.
4. Bandini. R., and Salgado. R., "Methods of Pile Design on SPT and CPT Results," Geotechnical site Characterization Conference, Balekam, Rotterdam, 1998.
5. Briaud, J. L., and Tucker, L. M., "Measured and Predicted Axial Capacity of 98 Ppiles," American Society of Civil Engineers, ASCE, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 114, No. 9, pp. 984-1001,1988.
6. Eslami, A., and Fellenius, B. H., "Toe Bearing Capacity of Piles From Cone Penetration Test (CPT) Data," *Proceedings of the International Symposium on Cone Penetration Testing*, CPT'95, Linkoping, Sweden, SGI Report 3:95, Vol 2, pp. 453-460, 1995.
7. Eslami, A., and Fellenius, B. H., "Pile Capacity by Direct CPT and CPTu Methods Applied to 102 Case Histories," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 34, pp 886-904, June 1997.

۸. گزارش آزمایشات بارگذاری شمعهای فلزی پروژهٔ بوشهر- شرکت ایران خاک -۱۳۷٦.

۹. گزارش آزمایشات بارگذاری کششی و فشاری شمعهای فلزی پروژهٔ حوض خشک صنایع کشتی سازی خلیج فارس- شرکت عمران ساحل-۱۳۸۱.

۱۰. گزارش نتایج تستهای فشاری شمعهای بتنی پروژه پتروشیمی فجر- شرکت ایران خاک-۱۳۷۸.

۱۱. نتایج تستهای فشاری شمعهای بتنی پروژهٔ بندر ماهشهر- شرکت ایران خاک-۱۳۷۹.

۱۲. نتایج تستهای فشاری شمعهای بتنی پروژهٔ مخابرات استان گیلان- شرکت ایران خاک- ۱۳۷۵.

۱۳. کریمپور فرد، م.، اسلامی، ا.، وشریعتمداری، ن.، "تعیین ظرفیت باربری شمعها با استفاده از آزمایشهای درجا - ارائهٔ روش جدید،" مجموعه مقالات سومین همایش بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، تهران، جلد سوم، صفحات ۵۹-۵۱، ۱۸تا۲۰ آذر ۱۳۸۱.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.6.9]

14. Brinch-Hansen, J., "Discussion on Hyperbolic Stress-Strain Response, Cohesive Soils," American Society of Civil Engineers, ASCE, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 89, SM4, pp. 241-242 1963.
15. Fellenius, B. H., "Guidelines for Interpretation and Analysis and Static Loading Test, Deep foundation institute., DFI, 1990.
16. Goble, G. G. and Hussein, M. H., "Deep Foundation Capacity-What Is It?," Geotechnical Special Publication No. 94, Amherst, Massachusetts, Aprill, 2000.
17. Long, J. H., and Shimel, I. S., "Drilled Shafts, a Data-Base Approach," American Society of Civil Engineers, *Proceedings of Foundation Engineering Congress: Current Principles and Practices*, ASCE Geotechnical Special Publication, GSP 22, Vol. 2, pp. 1091 – 1108, 1989.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.1.6.9]