

مطالعه آزمایشگاهی و تحلیلی نشست شمع‌های بتنی درجا در ماسه

عیسی شوش پاشا^{۱*} و مهدی شرف‌خواه^۲^۱ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی بابل^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد خاک و پی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی بابل

چکیده

جهت محاسبه نشست شمع‌ها روش‌های متعددی عنوان شده است. یکی از دقیق‌ترین روش‌های ارزیابی نشست شمع‌ها، انجام آزمایش بارگذاری فشاری و تعیین منحنی بار-نشست شمع‌ها می‌باشد. در این مطالعه ابتدا با انجام یک سری آزمایش بارگذاری روی ۱۲ عدد شمع بتنی درجا با ابعاد کوچک و متفاوت در خاک ماسه‌ای، منحنی بار-نشست شمع‌ها به دست آورده شده و سپس از این منحنی‌ها، مقدار نشست در بار مجاز شمع‌ها تعیین گردید. از طرفی دیگر مقادیر نشست با کمک روابط تجربی محاسبه و نتایج این محاسبات با مقادیر اندازه‌گیری شده در محل مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهند که روش تجربی Meyerhof در خاک ماسه‌ای با نتایج این تحقیق سازگاری خوبی دارد و نیز با انتخاب ضریب تجربی مناسب در روش Vesic می‌توان نشست شمع‌ها را با دقت مناسبی پیش‌بینی نمود. علاوه بر این در این مطالعه مدول الاستیسیته خاک با کمک آنالیز برگشتی و با ترسیم منحنی بار-نشست و با بهره‌گیری از روش عددی اجزاء محدود تخمین زده شد. نتایج نشان می‌دهند که مقدار این پارامتر با مقدار پیشنهادی Schmertmann سازگاری خوبی دارد.

واژگان کلیدی: شمع‌های بتنی درجا، نشست، ماسه، آزمایش بارگذاری شمع، مدول الاستیسیته خاک.

۱- مقدمه

با کمک مقایسه نتایج محاسباتی با نتایج حاصل از بارگذاری شمع در محل مقایسه نموده که سازگاری خوبی مشاهده گردید. Whitaker و Cooke [۴] با آزمایش روی شمع‌های دارای پدستال نشان دادند که مقاومت نهایی جداره با نشست به اندازه ۰/۵ تا ۱ درصد قطر بدنه شمع اتفاق می‌افتد و این در حالی است که مقاومت نهایی نوک با نشست معادل ۱۰ تا ۱۵ درصد قطر نوک شمع رخ می‌دهد. این مسئله برای شمع‌های کوتاه حائز اهمیت است. Vesic [۵] و Sharma و Joshi [۶] نشان دادند که در خاک ماسه‌ای مقدار نشست که به ازای آن جداره شمع به ظرفیت نهایی خود می‌رسد، بدون توجه به نوع شمع و ابعاد آن، از ۰/۲ اینچ بیشتر نمی‌شود. Randolph [۷] با کمک آزمایش بارگذاری به همراه مدل‌سازی عددی و روش بار-انتقال نشان داد که مقاومت جداره به ازای نشست ۰/۵ تا ۲ درصد قطر شمع به حداکثر خود می‌رسد، ولی مقاومت نوک به ازای ۵ تا ۱۰ درصد نشست به حداکثر خواهد رسید. بنابر این جداره شمع‌ها خیلی زودتر از نوک آن‌ها به ظرفیت نهایی خود می‌رسد. مکانیزم انتقال بار به مقدار بار و ابعاد شمع نیز بستگی دارد. شکل (۱) نمونه‌ای از منحنی‌های توزیع بار را نشان می‌دهد. جهت تعیین نحوه درست توزیع بار می‌بایست از آزمایش بار گذاری به همراه نصب گیج‌های اندازه‌گیری در جداره و نوک شمع استفاده نمود.

به طور کلی محاسبه و پیش‌بینی نشست شمع‌ها پیچیده است. این مسئله به خاطر تغییر ماهیت خاک در هنگام احداث شمع و نیز به دلیل عدم آگاهی از نحوه توزیع نیرو در جداره و نوک شمع می‌باشد. از این رو روابطی که برای نشست شمع‌ها مطرح شده است، بیشتر تجربی می‌باشند. برخی از نتایج آزمایش بارگذاری در ماسه در تحقیقات مختلفی ارائه شده و قابل دسترسی است.

Omer و همکاران [۱] با کمک یک آنالیز تحلیلی-تجربی روشی را جهت محاسبه نشست و توزیع تنش در جداره شمع ارائه نمودند. آن‌ها این روش را بر مبنای نتایج بارگذاری ۱۰ شمع به دست آوردند. Fellenius و Ochoa [۲] با انجام آزمایش بارگذاری بر روی ۴ شمع در دو گروه با ابعاد مشابه، ظرفیت باربری جداره و نیز توزیع نیرو در جداره شمع را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در این آزمایش نشست شمع را در بار مجاز اندازه‌گیری نمودند و با این آزمایش پروژه موردی ساخته شده را کنترل نمودند. Castelli [۳] یک روش تقریبی را جهت محاسبه نشست شمع منفرد و در نتیجه نشست گروه شمع، پیشنهاد نمود. او در این روش، رفتار غیرخطی اندرکنش خاک-شمع را با کمک تابع هیپربولیک بار-انتقال مدل‌سازی کرده و

$$S_t = S_s + S_p + S_{ps} \quad (2)$$

که نشست کل شمع در بالای آن، S_s نشست محوری خود شفت و S_p نشست مربوط به نوک شمع در اثر باری که به نوک منتقل شده و S_{ps} نشست مربوط به جداره شمع در اثر باری که به آن منتقل شده می‌باشد.

نشست S_s از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$S_s = (Q_{pa} + \alpha_s Q_{fa})L / (A_p E_p) \quad (3)$$

که Q_{pa} بار واقعی منتقل شده به نوک شمع در سطح بار کمتر از بار مجاز، Q_{fa} بار واقعی منتقل شده به جداره شمع در سطح بار کمتر از بار مجاز، L طول شمع، A_p سطح مقطع شمع، E_p مدول الاستیسیته شمع و α_s هم عددی است که به نحوه توزیع بار در جداره شمع بستگی دارد. Vesic [۵] مقدار α_s را برابر ۰/۵ برای توزیع یکنواخت و سهمی و ۰/۶۷ را برای توزیع مثلثی (صفر در بالای شمع و حداکثر در نوک شمع) پیشنهاد نمود. Sharma و Joshi [۶] نشان دادند که نشست کل به مقدار α_s حساس نیست و برای مقاصد طراحی انتخاب هر مقدار α_s عدد قابل قبولی را به دست می‌دهد.

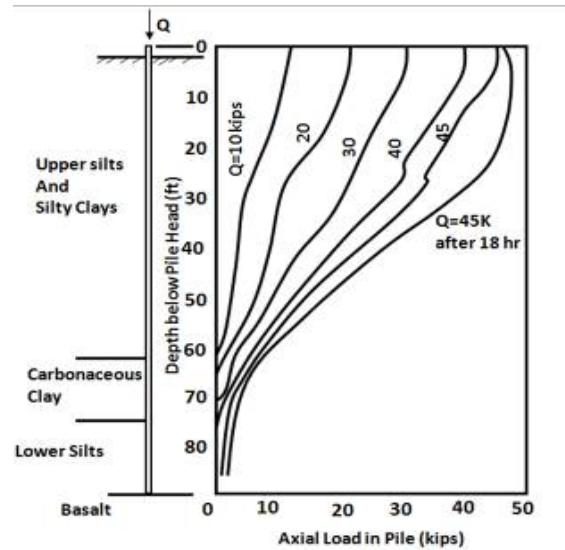
بر مبنای روابط تئوری و تجربی که بین مشخصات خاک و مقاومت نهایی نوک (q_p) شمع در تعدادی از پروژه‌ها گزارش شده است، Vesic [۵] روابط زیر را برای محاسبه مؤلفه‌های دیگر نشست پیشنهاد نمود:

$$S_p = C_p Q_{pa} / (B q_p) \quad (4)$$

$$S_{ps} = C_s Q_{fa} / (D_f q_p) \quad (5)$$

که C_p ضریب تجربی و بدون بعد است و به نحوه احداث شمع و میزان تراکم خاک بستگی دارد. Vesic [۵] مقدار این ضریب را برای ماسه سست تا متراکم در شمع‌های بتنی درجا بین ۰/۰۹ تا ۰/۱۸ و در شمع‌های کوبشی بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۴ پیشنهاد کرده است. q_p ظرفیت باربری نهایی نوک شمع از جنس نیرو بر واحد سطح، B قطر شمع و D_f طول مدفون شمع می‌باشد. C_s از رابطه (۶) به دست می‌آید:

$$C_s = (0.93 + 0.16 \sqrt{D_f / B}) C_p \quad (6)$$



شکل ۱- نمودار توزیع نیرو در جداره و نوک شمع کوبشی Francis و همکاران [۱۰] و Vesic [۵]

بنابر این با توجه به توضیحات فوق، در گذشته به طور کلی نشست را از روش‌های نیمه تجربی و تجربی محاسبه می‌نمودند. امروزه با توسعه کامپیوتر محاسبه نشست و توزیع بار به روش بار-انتقال، روش محاسبه نشست بر اساس تئوری الاستیسیته با کمک معادلات Mindlin [۸] برای بارگذاری روی سطح یک محیط نیمه بی‌نهایت که توسط Davis و Poulos [۹] ارائه شد و نیز روش‌های عددی مانند روش المان‌های محدود انجام می‌شود که در ادامه به برخی از این روش‌ها اشاره می‌شود. یکی از دقیق‌ترین روش‌های ارزیابی نشست شمع‌ها، انجام آزمایش بارگذاری شمع در محل می‌باشد که در پروژه‌های با اهمیت بیشتر توجیه‌پذیر خواهد بود. در این مطالعه با کمک آزمایش بارگذاری فشاری شمع‌ها نشست شمع‌ها اندازه‌گیری و سپس با برخی از روش‌های محاسبه نشست مقایسه می‌گردد.

۲- روش‌های محاسبه نشست شمع‌ها

Meyerhof [۱۱] رابطه زیر را برای محاسبه نشست شمع‌ها در ماسه پیشنهاد نمود:

$$\rho = \frac{d_b}{30F} \quad (1)$$

که d_b قطر شمع در نوک و F ضریب اطمینان بزرگ‌تر از ۳ در بار نهایی می‌باشد. واحد این دو پارامتر یکسان است.

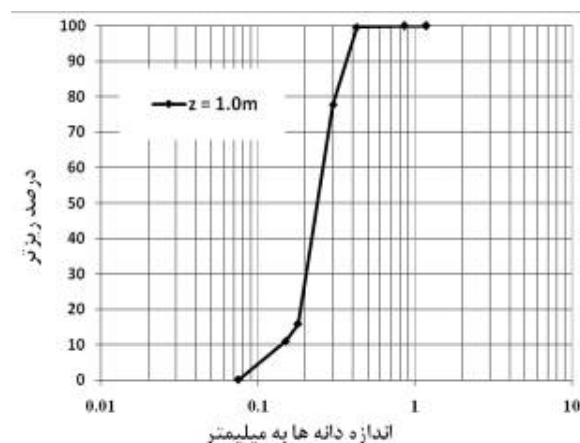
طبق پیشنهاد Vesic [۵] برای مقاصد طراحی نشست شمع را مطابق رابطه (۲) می‌توان به سه مؤلفه تقسیم نمود:

۳- مشخصات خاک محل

در این تحقیق شهر ساحلی سرخرود به عنوان محل انجام آزمایش انتخاب گردید. این منطقه طبق تقسیمات زمین شناسی کشور در زون گرگان- رشت واقع شده است. از نظر رسوبات زمین شناسی شامل رسوبات دوره پالئوژن و دوره چهارم زمین شناسی می‌باشد. خاک این منطقه یک نهشته ساحلی می‌باشد. از این رو تحت اثر حرکات تلاطمی آب قرار داشته است و این حرکات باعث شکل دادن و تولید این نهشته ساحلی شده است. به همین دلیل در فاصله قابل ملاحظه‌ای از دریا خاک‌ها ساختار نسبتاً منظمی از لحاظ دانسیته نسبی و استحکام دارند. البته در برخی از نقاط ممکن است این نظم با ورود نهشته‌های رودخانه‌ای از بین برود.

از آنجا که بررسی اثر آب زیرزمینی مورد بحث قرار نخواهد گرفت، از این رو محل آزمایش و زمان انجام آن به گونه‌ای انتخاب شده است که تراز آب زیر زمینی پایین‌تر از نوک شمع‌ها قرار گیرد. در هنگام انجام آزمایش تراز آب زیر زمینی در حدود ۵ متر از سطح زمین قرار گرفته است.

در این تحقیق دو دسته آزمایشات محلی و آزمایشگاهی بر روی خاک محل انجام پذیرفت. از جمله آزمایش درصد رطوبت طبق استاندارد ASTM D 2216-98، آزمایش تعیین چگالی دانه‌ها طبق استاندارد ASTM D 854، آزمایش دانه‌بندی با الک طبق استاندارد ASTM D 422، آزمایش طبقه‌بندی خاک به روش یونیفاید طبق استاندارد ASTM D 2487 و آزمایش برش مستقیم طبق استاندارد ASTM D 3080 [۱۸] بر روی نمونه‌هایی که در هنگام حفاری شمع‌ها تهیه شده است، انجام شده است. منحنی دانه‌بندی خاک در عمق ۱ متری در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی خاک در عمق ۱ متری

لازم به ذکر است که در روابط اخیر فرض شده که لایه مقاوم برابر خاک به اندازه حداقل ۱۰ برابر قطر شمع از نوک شمع پایین‌تر قرار گرفته است.

AL-Homoud و همکاران [۱۲] با در اختیار داشتن نشست شمع‌های بتنی درجای حاصل از آزمایش بارگذاری، روابط Vesic [۵] و Davis و Poulos [۹] را مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها با کمک ارزیابی پارامتریک و آنالیز برگشتی، ضرایب تجربی موجود در این روابط را بررسی نمودند و نشان دادند که این روش‌ها مقدار نشست را دست بالا تخمین می‌زند. روش دیگری که برای ارزیابی نشست شمع‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش اجزاء محدود یا المان‌های محدود می‌باشد. توضیحات کامل روش المان‌های محدود توسط Zienkiewicz [۱۳] و Abel و Desai [۱۴] و کاربرد آن در ژئوتکنیک توسط Desai و Christian [۱۵] ارائه شد. استفاده از این روش در مورد شمع‌ها توسط چندین محقق بیان شد. Desai [۱۶] برای شمع‌ها در ماسه، رفتار خاک را به صورت منحنی هیپربولیک در نظر گرفته و برای جداره از المان‌های مرزی خاصی استفاده نمود. در نظر گرفتن رفتار هیپربولیک برای خاک توسط محققین دیگری نیز دنبال شد و نتیجه جالبی که از این تحقیقات به دست آمد، این بود که با وجود رفتار غیر خطی تنش-کرنش، رفتار بار-نشست شمع تا باری فراتر از نصف بار گسیختگی به صورت خطی می‌باشد. این مطلب نشان می‌دهد که با قبول رفتار الاستیک خاک در محدوده بار مجاز شمع و با انتخاب مدول الاستیسیته مناسب می‌توان پیش‌بینی خوبی از منحنی بار-نشست شمع‌ها داشت.

امروزه با کمک نرم‌افزارهای عددی می‌توان مدل‌سازی شمع‌ها را انجام داده و نشست شمع‌ها را مورد ارزیابی قرار داد. زمانی که برای خاک رفتار الاستیک در نظر گرفته می‌شود، انتخاب مدول الاستیسیته خاک معمولاً دشوار است. برای تخمین این پارامتر روابط متعددی بیان شده است. Schmertmann [۱۷] رابطه (۷) را جهت تعیین مدول الاستیسیته ماسه با کمک نتایج آزمایش نفوذ استاندارد پیشنهاد نمود:

$$E_s = 766 N \quad (7)$$

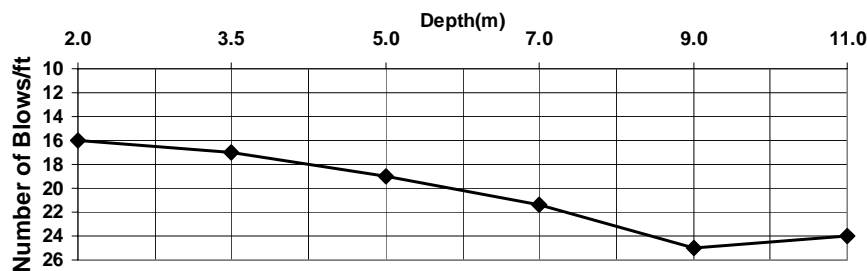
این مقاله نشان می‌دهد که با کمک آزمایش بارگذاری شمع و با فرض این‌که خاک رفتار الاستیک را در محدوده بار مجاز تجربه می‌کند، می‌توان مدول الاستیسیته خاک را با کمک آنالیز برگشتی تخمین زد.

خاک حاصل از نتایج آزمایشات فوق در جدول (۱) نشان داده شده است. خاک محل در گروه SP در طبقه بندی یونیفاید قرار دارد. تغییرات عدد نفوذ استاندارد نسبت به عمق در شکل (۳) نشان داده شده است.

آزمایشاتی که در محل انجام گرفت شامل آزمایش تعیین وزن مخصوص در محصل طبق استاندارد ASTM D 1556 و آزمایش نفوذ استاندارد طبق ASTM D 1586 [۱۸] می باشد. مقادیر متوسط پارامترهای

جدول ۱- نتایج آزمایشات انجام شده بر روی خاک محل

ω (%)	Gs	Cu	Cc	γ_{dry} (kN/m ³)	γ_{wet} (kN/m ³)	e	Fines (#200) (%)	C(kpa)	ϕ	N	Ncor
۳/۷	۳/۰۵	۱/۶۲	۱/۰۰	۱۶/۴۵	۱۷/۰۶	۰/۸۲	۰/۱۷	۶/۰	۳۳	۱۶	۱۸



شکل ۳- نمودار تغییرات عدد نفوذ استاندارد نسبت به عمق

خاک را می‌بهد. سپس لوله فولادی از درون غلاف خارج شده و خاکی که به همراه آورده خارج می‌شود. به همین ترتیب این کار تکرار می‌شود به طوری که یک لایه تقریباً ۱۰ سانتیمتری از خاک حفاری می‌شود. سپس غلاف با کمک فشار استاتیکی به درون خاک هدایت می‌شود. در تمام این مراحل همواره دقت می‌شود که غلاف پایین‌تر از سطح خاک درون آن قرار گیرد تا از ریزش جداره خاک به درون غلاف جلوگیری شود. قبل از انجام آرماتورگذاری و بتن‌ریزی لازم است تا از سطح زمین تا کف گودال که برابر با طول شمع‌ها می‌باشد به طور دقیق اندازه‌گیری شود و سپس بتن‌ریزی انجام گیرد.



شکل ۴- هدایت لوله فولادی به درون غلاف

۴- ساخت شمع‌ها

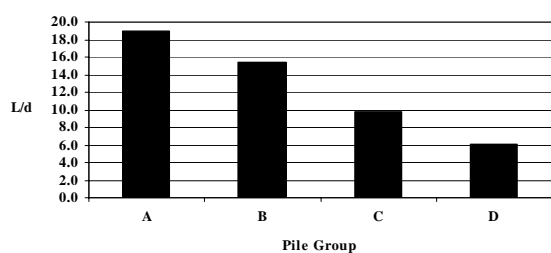
مراحل احداث شمع‌ها شامل حفاری و سپس آرماتورگذاری و بتن‌ریزی می‌باشد. برای انجام عملیات حفاری در این تحقیق، از غلاف استفاده شده است. از آن جا که شمع‌های مورد آزمایش کوچک هستند و بیرون آوردن غلاف نیروی زیادی لازم ندارد، از لوله‌های PVC فشار قوی استفاده شده است. این لوله‌ها از آن جا که سطح نسبتاً صاف و صیقلی‌تری نسبت به لوله‌های فولادی دارند، کمتر موجب دست خوردگی خاک اطراف می‌شوند و از طرفی آسان‌تر خارج می‌شوند. در ساخت شمع‌ها از لوله‌هایی با قطر ۱۱، ۱۲/۵ و ۱۶ سانتیمتر و طول‌های مختلف استفاده شده است.

روشی که جهت حفاری در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت به دلیل ابعاد کوچک شمع‌ها، با نحوه حفاری شمع‌های بتنی در مقیاس واقعی متفاوت بوده است. حفاری با کمک یک چهارپایه فلزی که در شکل (۴) نشان داده شده است، انجام می‌گیرد. به این ترتیب که ابتدا غلاف در محل خود روی زمین قرار داده می‌شود و سپس اپراتور یک لوله سبک فولادی جدار نازک با ضخامت جداره ۲ میلی‌متر و قطر ۶ سانتیمتر و طول ۲/۵ متر را در دست می‌گیرد و آن را داخل غلاف حفاری قرار داده و رها می‌کند. به این ترتیب لوله فولادی حدود ۵ تا ۱۰ سانتیمتر به درون خاک نفوذ می‌کند و همانند نمونه‌گیر اسپیلت اسپون

جدول ۲- نام گذاری شمع‌ها

نام شمع	قطر d (cm)	طول مدفن شمع L (cm)	نسبت طول به قطر شمع (L/d)
A-1	۱۱	۲۱۸	۱۹/۸
A-2		۲۱۰	۱۹/۱
A-3		۱۹	۱۷/۸
B-1	۱۱	۱۸۶	۱۶/۹
B-2		۱۵۸	۱۴/۴
B-3		۱۴	۱۴/۹
C-1	۱۲/۵	۱۱۸	۹/۴
C-2		۱۱۷	۹/۴
C-3		۱۳۰	۱۰/۴
D-1	۱۶	۱۰۱	۶/۳
D-2		۹۵	۵/۹
D-3		۹۷	۶/۱

شکل (۶) نسبت طول به قطر میانگین این گروه شمع‌ها را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود، این شمع‌ها نسبت طول به قطر ۶ تا ۱۹ را پوشش داده‌اند.



شکل ۶- نمودار تغییرات نسبت طول به قطر شمع‌ها بر حسب دسته آن‌ها

۵- نحوه بارگذاری شمع‌ها

آزمایش بارگذاری فشاری مطابق استاندارد ASTM D 1143-81 [۱۸] انجام شده است. در این تحقیق از وزنه‌های بتنی با ابعاد ۸۰×۸۰×۱۸۰ سانتیمتر جهت فراهم کردن عکس‌العمل استفاده شده است. وزن هریک از وزنه‌ها حدود ۲/۷ تن می‌باشد. این وزنه‌ها روی تیرورقی به طول ۶ متر قرار می‌گیرند. این تیر ورق از ورق‌های ۲۵ میلیمتر و با سخت کننده در محل اعمال بار متمرکز ساخته شده است. وزن تیر ورق حدود ۱ تن می‌باشد. شکل (۷) وزنه‌های سربار به همراه تیر ورق و نحوه قرارگیری آن‌ها را نشان می‌دهد.

بارگذاری با کمک جک هیدرولیکی با کورس ۱۵ سانتیمتر و ظرفیت ۵۰ تن که در زیر تیرورق نصب می‌شود، انجام شده

غلاف‌های PVC در هنگام بتن ریزی می‌بایست از درون خاک خارج شود. این کار باید دقیقاً همانند ورود لوله‌ها به آرامی انجام شود که منجر به دستخوردگی زیاد خاک نشود. از طرفی خروج غلاف باید در جهت شاغولی باشد. بدین منظور از همان چهار پایه حفاری استفاده شده است و آن را در بالای غلاف‌ها قرار داده، به طوری که محور آن با محور غلاف هم امتداد شود. بیرون کشیدن غلاف‌ها با کمک سوراخ کردن جداره آن‌ها و بالا کشیدن آن‌ها توسط طناب انجام می‌شود. برای فراهم کردن نیروی کششی از قرقه با ظرفیت ۱/۵ تن استفاده شده است. تجهیزات لازم جهت بیرون آوردن غلاف‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است.

در این مطالعه ۱۲ شمع بتنی با ابعاد کوچک و متفاوت در نظر گرفته شده است. در انتخاب ابعاد این شمع‌ها به این صورت عمل شده که از هر شمع ۳ نمونه با اندازه تقریباً یکسان موجود باشد و در واقع در کل ۴ شمع با ابعاد متفاوت وجود دارد. علت این امر این است که اگر در آزمایشی اشتباه و نتیجه غیرقابل قبول حاصل شود. با مقایسه آن با نتایج دو شمع دیگر از مراحل تجزیه و تحلیل خارج شود. در این صورت با همبستگی نتایج دو آزمایش دیگر می‌توان از درستی نتایج آن‌ها اطمینان حاصل نمود. از طرفی در انتخاب ابعاد این شمع‌ها سعی شده تا نسبت طول به قطرهای متفاوتی از شمع‌ها را پوشش داد. ابعاد شمع‌های حفاری شده به همراه نام آن‌ها در جدول (۲) نشان داده شده است. در این جدول شمع‌ها در ۴ گروه قرار داده شده‌اند و در هر گروه قطر شمع‌ها یکسان و طول آن‌ها تقریباً با هم برابر است. اختلاف جزئی که در طول شمع‌ها وجود دارد، روی ظرفیت باربری تأثیر کمی داشته و نتایج نشان می‌دهد که قطر شمع‌ها به مراتب اثرگذارتر است.



شکل ۵- تجهیزات خارج کردن غلاف از داخل خاک



شکل ۹- نمایشگر نیرو

آزمایش به روش نرخ نفوذ ثابت (CRP) به ازای نفوذ مشخصی به اندازه ۰/۷۵ تا ۱/۲۵ میلیمتر در دقیقه انجام شده است. بارگذاری آنقدر ادامه یافته است تا لحظه گسیختگی فرا برسد و شمع‌ها بدون افزایش بار در خاک فرو روند و یا این که نشست شمع به حداقل ۱۵ درصد قطر شمع برسد. از آن جایی که خاک منطقه مورد مطالعه دانه‌ای بوده و درصد رطوبت آن حداکثر ۴ درصد بوده و تراز سطح آب نیز پایین‌تر از نوک شمع می‌باشد، بنابر این شرایط زهکشی شده حاکم می‌باشد.

۶- منحنی‌های بار- نشست

پس از انجام آزمایش بارگذاری، منحنی تغییرات بار بر حسب نشست ترسیم شده که نتایج آن در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

نتایج نشان می‌دهند که منحنی بارگذاری شمع‌های B-3 و A-2 از نتایج منحنی‌های دیگر فاصله زیادی داشته و نمی‌تواند درست باشد. از نظر Tomlinson [۱۹] علت بروز منحنی‌های مشابه A-2 وجود فاصله و گپ در طول شمع می‌باشد که با اعمال بارگذاری این فواصل بسته می‌شود. این بازشدگی‌ها ممکن است در هنگام بیرون کشیدن غلاف به وجود آمده باشد. Tomlinson [۱۹] دلیل رخداد منحنی‌های مشابه B-3 را وجود بتن ضعیف در طول شمع و گسیختگی برشی آن در هنگام بارگذاری می‌داند. بنابراین این منحنی‌ها از مطالعات حذف شده و نتایج آزمایش ۱۰ شمع باقیمانده مبنای تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت.

از آنجا که ارزیابی نشست در محدوده بار مجاز شمع‌ها انجام می‌شود، از این رو لازم است تا ظرفیت باربری نهایی شمع‌ها و سپس بار مجاز شمع‌ها تعیین گردد. ظرفیت باربری نهایی شمع‌ها با کمک روش Terzaghi [۲۰] برابر با بار متناظر

است. قطر خارجی بدنه جک ۱۲/۷ سانتیمتر و قطر شفت بارگذاری ۷۹/۵ میلیمتر می‌باشد. جهت اندازه‌گیری نیرو از نیروسنج دیجیتالی که با کمک یک سیم رابط به یک نمایشگر متصل شده و بین جک و شمع قرار می‌گیرد استفاده می‌شود. جهت اعمال نیرو بر روی شمع از صفحات صلب فولادی استفاده شده است. جهت اندازه‌گیری جابجایی شمع از دو گیج عقربه‌ای به دقت ۰/۰۱ میلیمتر و کورس ۳۰ میلیمتر استفاده شده است که در دو طرف شمع‌ها نصب و میانگین قرائت آن‌ها جهت تعیین جابجایی شمع مورد استفاده قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که گیج‌ها بر روی دو تیر آهن که در فاصله بیش از ۱/۵ متر از بدنه شمع روی تکیه‌گاه قرار داده شده‌اند به صورت مغناطیسی متصل گردیده‌اند. تجهیزات فوق در شکل (۸) و (۹) نشان داده شده است.



شکل ۷- قرارگیری سربار روی تیرورق



شکل ۸- وسایل اندازه‌گیری نیرو و جابجایی شمع

جدول ۳- ظرفیت باربری نهایی شمع‌ها

نام شمع	d (cm)	L (cm)	Qu (kN)
A-1	۱۱	۲۱۸	۳۵/۶
A-3	۱۱	۱۹۶	۲۷/۰
B-1	۱۱	۱۸۶	۳۲/۳
B-2	۱۱	۱۵۸	۳۰/۷
C-1	۱۲/۵	۱۱۸	۲۹/۴
C-2	۱۲/۵	۱۱۷	۲۳/۵
C-3	۱۲/۵	۱۳۰	۲۹/۸
D-1	۱۶	۱۰۱	۴۲/۷
D-2	۱۶	۹۵	۳۷/۹
D-3	۱۶	۹۷	۴۱/۹

از مقایسه نتایج ظرفیت باربری شمع‌ها، مشاهده می‌گردد که در شمع‌های گروه B مقادیر ظرفیت باربری به هم نزدیک است. از آنجا که طول شمع A-3 از شمع‌های گروه B بزرگ‌تر است و قطر آن با شمع‌های گروه B برابر است، از این رو ظرفیت باربری شمع A-3 نمی‌تواند کمتر از این شمع‌ها باشد. بنابراین شمع A-1 جهت تجزیه و تحلیل نتایج مورد استفاده قرار می‌گیرد. در گروه C مقادیر ظرفیت باربری شمع‌های C-1 و C-3 نشان می‌دهد که می‌توان یکی از این دو را ملاک عمل قرار داد. شمع C-2 عدد کمی را نشان می‌دهد که نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در ماسه جداره شمع‌ها سهم کوچکی از ظرفیت باربری را به خود اختصاص می‌دهند و از این رو مقدار ظرفیت باربری کوچک شمع C-2 را نمی‌توان به اختلاف جزئی در طول آن نسبت داد.

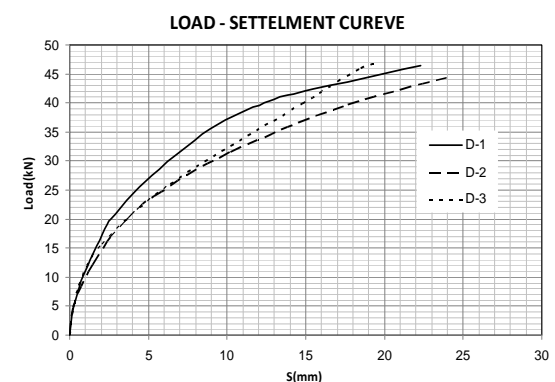
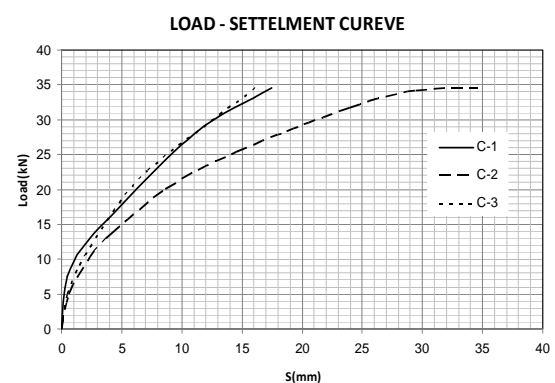
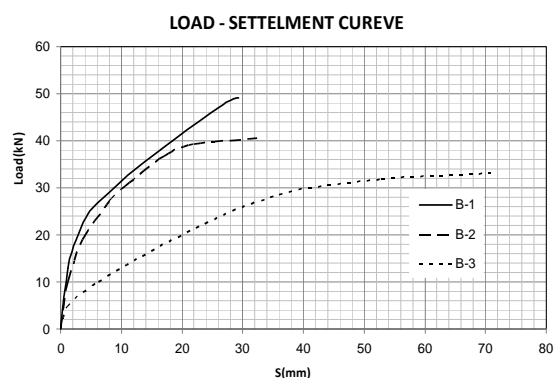
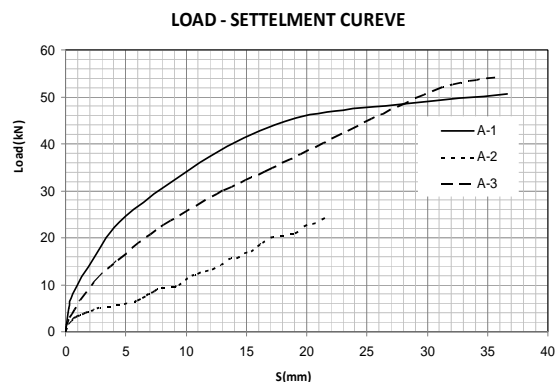
در گروه D نیز به دلایل فوق می‌توان یکی از شمع‌های D-1 و D-3 را مبنای تجزیه و تحلیل قرار داد. از آنجا که طول شمع‌ها دقیقاً با یکدیگر برابر نیستند، از این رو نمی‌توان میانگین نتایج را استفاده نمود و در عوض از هر گروه یک نماینده انتخاب می‌شود.

به این ترتیب نتایج ظرفیت باربری ۴ شمع A-1، B-2، C-1 و D-1 برای ارزیابی نشست در محدوده بار مجاز مورد استفاده قرار می‌گیرد. بار مجاز شمع‌ها با اعمال ضریب اطمینان ۳ روی بار نهایی تعیین خواهد شد.

۷- ارزیابی نشست شمع‌های آزمایش

در این بخش با کمک نتایج منحنی‌های بار- نشست شمع‌ها، روش‌های موجود در خصوص محاسبه نشست، ارزیابی خواهد شد.

با نشست برابر با ۱۰ درصد قطر شمع‌ها در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب ظرفیت باربری نهایی شمع‌ها در جدول (۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۰- منحنی‌های بار- نشست شمع‌ها

زاویه اصطکاک ناحیه مرزی جداره شمع و خاک طبق پیشنهاد محققین برای شمع‌های بتنی درجا بین ۰/۷ تا ۱ برابر زاویه اصطکاک خاک پیشنهاد شده است، از این رو ضریب کاهش زاویه اصطکاک در نرم‌افزار ($R_{interface}$) برابر ۰/۸ و نسبت پواسون خاک برابر ۰/۳ برای خاک‌های ماسه‌ای لحاظ شده است. مشخصات شمع را می‌توان با کمک مدول یانگ، نسبت پواسون و وزن مخصوص آن تعریف نمود. برای مقاطع بتنی راهنمای نرم‌افزار پیشنهاد کرده که نسبت پواسون برابر ۰/۱۵ در نظر گرفته شود. مدول یانگ بتن با توجه به مقاومت مشخصه بتن برابر ۲۱۰۰۰۰۰۰ کیلوپاسکال و وزن مخصوص شمع برابر ۲۵ کیلونیوتن بر متر مکعب در نظر گرفته شده است.

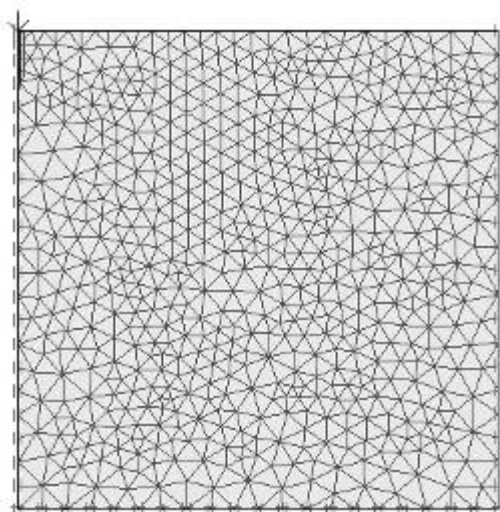
نتایج تحلیل عددی فوق نشان داده‌اند که از آنجایی که تحلیل در محدوده بار مجاز شمع‌ها بررسی می‌شود، از این رو انتخاب مقدار ضرایب کاهش مقاومت در ناحیه مرزی، نسبت پواسون خاک و مشخصات بتن بر روی نتایج چندان تأثیرگذار نمی‌باشد. از طرفی با توجه به این که رفتار خاک با کمک مدل الاستیک-پلاستیک کامل مور-کولومب مدل‌سازی شده، از این رو مقدار نشست به طور قابل ملاحظه‌ای به مقدار مدول الاستیسیته خاک بستگی دارد. خاک‌ها در حالت عادی رفتار غیرخطی دارند، از این رو مدول الاستیسیته خاک مقدار ثابتی نداشته و در ترازهای مختلف بارگذاری و با توجه به مسیر تنش تغییر می‌کند. بنابراین به ازای هر مقداری که برای مدول الاستیسیته اختیار می‌شود، منحنی بار-نشست متفاوتی را به دست می‌دهد. از طرفی از آنجا که در عمل نشست در بارهای بهره‌برداری کنترل می‌شوند، از این رو در این تحقیق با کمک تحلیل برگشتی برای شمع‌های انتخابی، مدول الاستیسیته مناسب خاک در محدوده بار مجاز شمع‌ها تعیین می‌شود. بدین صورت که یک مدول الاستیسیته انتخاب و سپس تحلیل عددی انجام و نتایج با منحنی آزمایش بارگذاری مقایسه می‌گردد تا در یک سوم بار نهایی شمع‌ها (بار مجاز شمع) در آزمایش بارگذاری، منحنی حاصل از روش المان‌های محدود با منحنی آزمایش بارگذاری تقریباً منطبق گردند. به این ترتیب با آزمون و خطا روی مدول الاستیسیته مقدار آن تعیین شده است.

نتیجه نهایی این آزمون و خطا در شکل (۱۲) نشان داده شده است. خط چین محدوده بار مجاز شمع‌ها را نشان می‌دهد. مقدار مدول الاستیسیته خاک که شرایط فوق را به بهترین نحو تأمین نماید حدوداً برابر ۱۲۰۰۰ کیلوپاسکال برای خاک ماسه‌ای محل به دست آمد.

ابتدا با کمک انجام تحلیل عددی اجزای محدود، رفتار شمع‌های مورد آزمایش بررسی شده و منحنی‌های بار-نشست حاصل از تحلیل عددی با منحنی‌های آزمایش بارگذاری شمع‌ها مقایسه خواهد شد. این تحلیل با کمک نرم‌افزار PLAXIS 2D انجام شده است. سپس ارزیابی نشست به کمک روش‌های تجربی و نیمه‌تجربی انجام خواهد گردید.

PLAXIS 2D جهت تحلیل مسائل دو بعدی با کرنش مسطح و یا تقارن محوری مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجا که یک شمع منفرد نیز دارای تقارن محوری است، از این رو در این تحقیق از این نرم‌افزار استفاده شده است. از آنجا که مسئله تقارن محوری است، از این رو نصف یک شمع با بعد $d/2$ تعریف خواهد شد که d قطر شمع است. مرزهای انتهایی باید به اندازه‌ای از شمع دور باشند که تنش‌ها و تغییر شکل‌های ناشی از بارگذاری در آن‌ها ناچیز و قابل نظر کردن باشد. در این تحقیق به اندازه بیش از ۲۰ متر از شمع فاصله گرفته می‌شود که این مقدار برابر حدود ۲۰۰ برابر قطر شمع‌ها است. نحوه مدل‌سازی مسئله در شکل (۱۱) نمایش داده شده است.

برای در نظر گرفتن اثر لغزش در جداره و یا در نوک شمع با کمک گزینه Interface نواحی مرزی اطراف شمع تعریف می‌شود. در این تحقیق شمع به صورت الاستیک خطی بدون منافذ در نظر گرفته شده است. مش‌بندی به صورت خیلی ریز در نظر گرفته شده است. از آنجا که رفتار شمع در خاک ماسه‌ای به صورت زهکشی شده می‌باشد و فاکتور زمان در آن تأثیرگذار نیست، از این رو تحلیل الاستیک-پلاستیک با انتخاب گزینه Plastic فراهم می‌شود.



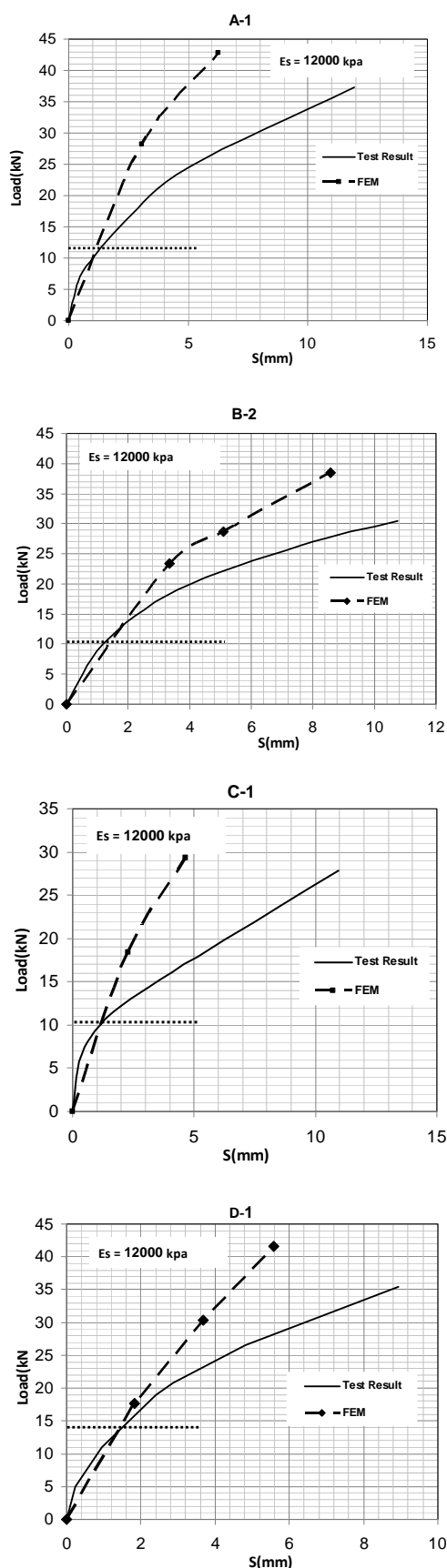
شکل ۱۱- مدل‌سازی شمع‌ها در نرم‌افزار PLAXIS 2D

همان طور که ملاحظه می شود، تا مرحله بار مجاز شمع ها، نشست حاصل از آزمایش با نتایج آنالیز عددی تقریباً با هم برابر شده است. با روشی که Schmertmann [۱۷] پیشنهاد نمود مقدار مدول الاستیسیته خاک برابر ۱۲۲۵۶ کیلوپاسکال به دست می آید که با مقدار مدول الاستیسیته به دست آمده در این تحقیق سازگاری خوبی دارد.

همان طور که قبلاً عنوان شد، برای محاسبه نشست روابط تجربی و نیمه تجربی نیز پیشنهاد شده است. از جمله می توان به رابطه تجربی Meyerhof [۱۱] و رابطه نیمه تجربی Vesic [۵] اشاره نمود که قبلاً در مورد آن ها صحبت شد. در این بخش برای شمع های انتخاب شده با کمک روش های فوق محاسبه نشست انجام شده است و در واقع با فرض رفتار خطی منحنی بار-نشست شمع ها ترسیم شده است. در واقع این حرکت به معنی وجود رفتار خطی برای شمع ها نبوده، بلکه تنها کنترل و ارزیابی نشست در ابتدای منحنی بارگذاری و در تراز بار بهره برداری می باشد.

شمع های مورد استفاده در آزمایش دارای ابعاد کوچکی می باشند و از این رو جهت استفاده از نتایج این تحقیق در عمل می توان بر روی شمع ها تحلیل ابعادی براساس تئوری Buckingham [۲۱] انجام داد. شمع هایی که در عمل در مناطق شمالی مورد استفاده قرار می گیرند، اغلب در گروه شمع های کوتاه قرار دارند و نسبت طول به قطر آن ها کمتر از ۲۰ می باشد. در این آزمایش نیز شمع هایی با نسبت طول به قطر حدود ۶ تا ۲۰ مورد استفاده قرار گرفته شده است و به همین دلیل، تشابه هندسی بین شمع های مدل و شمع ها در واقعیت برقرار است. سرعت بارگذاری هم طوری تعیین گردیده که تشابه سینماتیکی نیز برقرار گردد. به همین دلیل اعداد بدون بعد بین مدل و واقعیت برابر می باشند. از آن جا در این بخش تحقیق بر روی اعداد بدون بعد انجام می شود، از این رو از نتایج به دست آمده در مورد این ضرایب در عمل نیز می توان استفاده نمود. به عنوان مثال ضریب بدون بعد C_p بدون بعد می باشد و بین مدل و واقعیت یکسان می باشند.

نتایج این محاسبات در شکل (۱۳) نمایش داده شده است. همان طور که در شکل ها ملاحظه می شود، هر دو روش نتایج کاملاً سازگاری را با نتایج منحنی بارگذاری نشان می دهند. در روش Vesic [۵] ضریب بدون بعد C_p تجربی بوده و مقدار معینی برای آن وجود ندارد. همان طور که قبلاً نیز عنوان شد، این ضریب به روش احداث شمع و میزان تراکم خاک بستگی دارد.



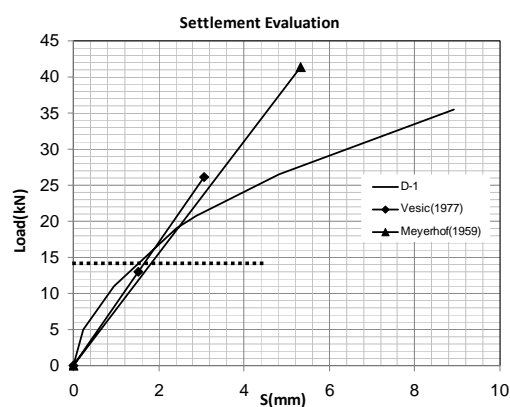
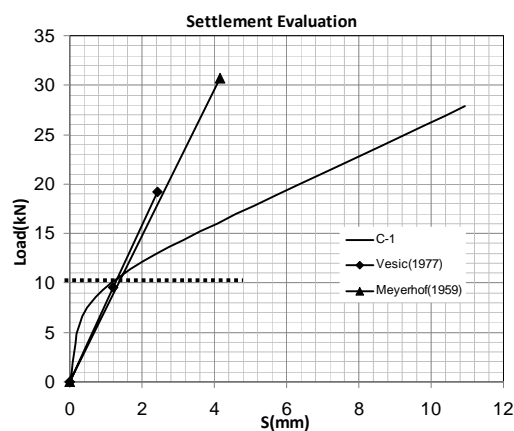
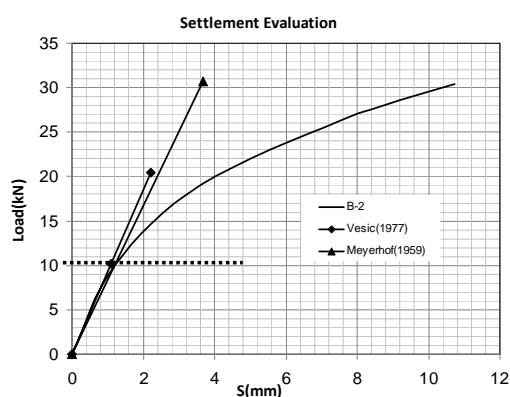
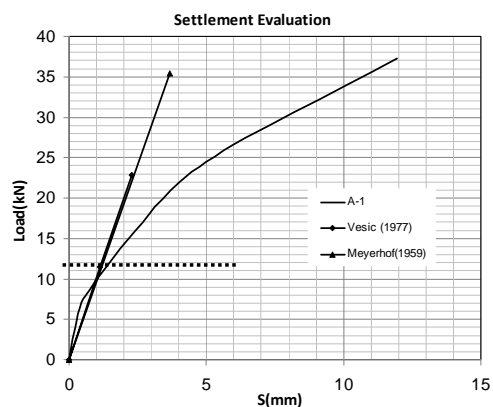
شکل ۱۲- تخمین مدول الاستیسیته خاک ماسه ای محل آزمایش

در این مطالعه با انتخاب مقدار $0.35 C_p$ و محاسبه نشست، مشاهده گردید که مقدار نشست‌ها در تراز بار بهره‌برداری تقریباً برابر می‌شوند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، این مقدار در محدوده پیشنهادی توسط Vesic [۵] (0.09) تا (0.18) نمی‌گنجد و Vesic [۵] این مقدار را برای شمع‌های کوبشی پیشنهاد نمود. اگر مقدار این ضریب برابر 0.09 در نظر گرفته شود که حداقل مقدار محدوده پیشنهادی توسط Vesic [۵] برای شمع‌های درجا است، مقدار نشست‌های محاسباتی حدوداً ۲ برابر مقدار واقعی به دست خواهد آمد. این امر احتمالاً به علت تفاوت در نحوه احداث شمع‌ها در عمل و در شرایط واقعی می‌باشد. در شمع‌های درجا که در شرایط واقعی احداث می‌شوند، دست‌خوردگی در خاک بیش از شرایطی است که در این تحقیق برای احداث شمع‌ها فراهم شده است. بنابراین در جداره و مخصوصاً در نوک شمع‌ها دست‌خوردگی منجر به افزایش نشست خواهد گردید. شکل (۱۳) نشان می‌دهد که روش ساده‌ای که Meyerhof [۱۱] پیشنهاد نمود، مقدار نشست را به صورت مناسبی تخمین می‌زند.

۸- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق با انجام یک سری آزمایش بارگذاری شمع، نشست شمع‌ها در خاک ماسه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است. ابتدا مدول الاستیسیته خاک با کمک روش اجزای محدود جهت محاسبه نشست شمع‌ها در محدوده بار مجاز تخمین زده شد. نتایج نشان داده‌اند که مقدار این پارامتر با مقدار پیشنهادی از رابطه Schmertmann [۱۷]، سازگاری خوبی دارد و برای ماسه مورد نظر با چگالی متوسط حدود 12000 کیلوپاسکال به دست آمد.

روش نیمه‌تجربی Vesic [۵] و روش تجربی Meyerhof [۱۱] نشست شمع‌های آزمایش را در محدوده بار مجاز، به صورت مناسبی تخمین می‌زنند. از این میان، روش Meyerhof [۱۱] دقت بیشتری را از خود نشان داده است. نتایج نشان داده که با انتخاب مقدار مناسبی برای ضریب تجربی C_p در روش Vesic [۵] می‌توان نشست شمع‌ها را با دقت خوبی پیش‌بینی نمود. میزان دست‌خوردگی خاک در هنگام احداث شمع‌ها تأثیر قابل ملاحظه‌ای در انتخاب این ضریب خواهد داشت. در این مطالعه برای شمع‌های درجا که در خاک ماسه‌ای با چگالی متوسط احداث شده است و از اعمال دست‌خوردگی به خاک تا حد امکان جلوگیری شده است، مقدار این ضریب برابر 0.35 تخمین زده شده است.



شکل ۱۳- مقایسه نشست اندازه‌گیری شده شمع‌های آزمایش با مقادیر روش‌های تجربی و نیمه‌تجربی

- ۹-مراجع
- [11] Meyerhof, G. G., "Compaction of Sands and Bearing Capacity of Piles", ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundations, 1959, 85 (SM6), 1-29.
- [12] AL-Homoud, S., Fouad, T., Mokhtar, A., "Evaluating Accuracy for Two Empirical Methods in Predicting Settlement of Drilled Shafts", Geotechnical and Geological Engineering, 2004, 22, 245-267.
- [13] Zienkiewicz, O. C., "The Finite Element Method in Engineering Science", McGraw-Hill, London, 1971.
- [14] Desai, C., Abel, J. F., "Introduction to the Finite Element Method", Van Nostrand Reinhold, New York, 1972.
- [15] Desai, C. S., Christian, J. T., "Numerical Method in Geotechnical Engineering", McGraw-Hill, New York, 1977.
- [16] Desai, C. S., "Numerical Design-Analysis for Piles in Sand", ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division, 1974, 100 (GT6), 613-635.
- [17] Schmertmann, J. H., "Static Cone to Compute Static Settlement over Sand", ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundations, 1970, 96 (SM3), 1011-1043.
- [18] American Society for Testing and Materials, "Annual Book of ASTM Standards", Philadelphia, USA, 1994.
- [19] Tomlinson, M. J., "Pile Design and Construction Practice", Viewpoint Publications, London, 2004.
- [20] Terzaghi, K., "Discussion of the Progress Report of the Committee on the Bearing Value of Pile Foundation", Proc. ASCE, 1942, 68, 311-323.
- [21] Buckingham, E., "Model Experimental and the Form of Empirical Equation", ASME Transactions, 1915, 37, 263-296.
- [1] Omer, R., Delpak, R., Robinson, B., "An Empirical Method for Analysis of Load Transfer and Settlement of Single Piles", Geotechnical and Geological Engineering, 2010, 28, 483-501.
- [2] Fellenius, B. H., Ochoa, M., "Testing and Design of Applied Foundation Project. A Case History", Geotechnical Engineering, Journal of the Southeast Asian Geotechnical Society, 2009, 40 (3) 129-137.
- [3] Castelli, F., Maugeri, M., "Simplified Nonlinear Analysis for Settlement Prediction of Pile Groups." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128 (1), 76-84.
- [4] Cooke, R. W., Whitaker, R. "Experiments on Model Piles with Enlarged Bases", Geotechnique, 1961, 11, 1-13.
- [5] Vesic, A. S., "Design of Pile Foundations", National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice, Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC, 1977.
- [6] Sharma, H. D., Joshi, R. C., "Drilled Pile Behavior in Granular Deposits," Canadian Geotechnical Journal, 1988, 25, 2, 222-232.
- [7] Randolph, M. F., "RATZ-Load Transfer Analysis of Axially Loaded Piles", User Manual, University of Western Australia, Perth, 2003.
- [8] Mindlin, R. D., "Force at a Point in the Interior of a Semi-Infinite Solid", Physics, 1936, 7-195.
- [9] Poulos, H. G., Davis, E. H., "Pile Foundation Analysis and Design", John Wiley and Sons, New York, 1980.
- [10] Francis, A. J., Savory, N., Stevens, L. K., Trollop, D. H., "The Behavior of Slender Point-Bearing Piles in Soft Soil", Symposium on Design of Tall Buildings, University of Hong Kong, 1961, pp 25-50.