

## تعیین ظرفیت باربری شمع‌های فلزی لوله‌ای در خاک ماسه‌ای با استفاده از آزمایش بارگذاری استاتیکی فشاری

عیسی شوش پاشا<sup>۱\*</sup>، قاسم خبازی<sup>۲</sup>، علی حسن زاده<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران  
<sup>۲</sup> گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی پردیسان، فریدونکنار، ایران

**تاریخچه داوری:**  
دریافت: ۱۳-۱۲-۱۳۹۶  
بازنگری: ۰۵-۰۸-۱۳۹۷  
پذیرش: ۰۱-۱۰-۱۳۹۷  
ارائه آنلاین: ۰۱-۱۰-۱۳۹۷

**کلمات کلیدی:**  
آزمایش بارگذاری  
جک‌زنی، ظرفیت باربری  
شمع لوله‌ای  
ماسه

**خلاصه:** شمع‌ها، اعضا سازه‌ای نسبتاً بلندی هستند که برای انتقال بارهای سازه از میان لایه‌های خاک با ظرفیت باربری کم (و یا نشست زیاد) به خاک‌های سخت و محکم با ظرفیت باربری زیاد در ژرفای بیشتر و یا روی بستر سنگی به کار می‌روند. در طراحی پی‌ها، تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها به‌عنوان مسأله‌ای مبهم و دارای عدم‌اطمینان شناخته شده‌است. در این مقاله با انجام آزمایش بارگذاری استاتیکی فشاری، ظرفیت باربری شمع‌های فلزی لوله‌ای در خاک ماسه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. جهت نصب شمع‌های مورد آزمایش در خاک، روش جک‌زنی به کار گرفته شد به طوری که از جک هیدرولیکی در ابتدا برای راندن شمع‌ها به داخل خاک و سپس برای اعمال بار فشاری در آزمایش بارگذاری استاتیکی استفاده گردید. پس از ثبت نتایج، مقادیر ظرفیت باربری شمع‌ها در محل با مقادیر حاصل از روش‌های تحلیلی مقایسه شدند. در ادامه، برای بررسی رفتار اصطکاکی شمع‌ها با استفاده از داده‌های آزمایش کشش، سهم ظرفیت اصطکاکی شمع‌ها در ظرفیت باربری نهایی تخمین زده شد. نتایج نشان داد که به علت نحوه نصب شمع‌ها توسط روش جک‌زنی و نیز تاثیر پلاگ خاک بر روی ظرفیت باربری، مقادیر ظرفیت باربری شمع‌ها در محل به‌طور متوسط بیشتر از مقادیر تحلیلی آن‌ها می‌باشند. همچنین، نتایج به‌دست آمده بیانگر سهم قابل‌توجه مقاومت اصطکاکی در ظرفیت باربری نهایی شمع‌ها می‌باشد.

### ۱- مقدمه

از سوی دیگر، جاگذاری شمع‌ها با استفاده از روش جک‌زنی شیوه‌ای است که بسیار مورد استقبال مهندسان قرار گرفته است. در این روش، برای راندن شمع‌ها به داخل زمین از جک‌های هیدرولیکی استفاده می‌شود. در مقایسه با روش‌های مرسوم شمع‌کوبی دینامیکی از قبیل چکش‌های ارتعاشی و سقوط آزاد، جک‌زنی شمع مزیت‌های متعددی دارد. اولاً، این فرایند اساساً بدون ایجاد ارتعاش و سروصدا بوده و به‌طور خاص برای مناطقی که حساس به سر و صدا و ارتعاش هستند، روش مناسبی می‌باشد. ثانیاً، ظرفیت باربری هر یک از شمع‌ها مطمئناً حاصل می‌گردد.

پژوهش‌های مربوط به بررسی رفتار شمع‌ها تحت بار فشاری غالباً در محیط‌های آزمایشگاهی صورت گرفته‌اند که به وسیله آن‌ها به خوبی نمی‌توان شرایط واقعی ساختگاه را منعکس کرد. زیرا همواره دغدغه کالیبره نمودن محفظه‌های آزمایش و آماده‌سازی مناسب نمونه‌ها، شرایط را برای انجام آزمایش دشوار می‌سازد. بنابراین، بررسی رفتار واقعی خاک به خصوص در خاک‌های دانه ای که به‌دست‌خوردگی بسیار حساس می‌باشند، این ضرورت را می‌طلبد که تا حد امکان جهت تعیین رفتار شمع‌ها از آزمایش بارگذاری در محل استفاده شود.

نتایج آزمایش‌های پژوهشگران بر روی شمع‌های لوله‌ای انتها باز

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: shooshpasha@nit.ac.ir



بیشتر می‌گردد [۷-۵]. ظرفیت پلاگ عمدتاً توسط اصطکاک به وجود آمده در جدار داخلی شمع بسیج می‌شود. به خصوص در قسمت پایین پلاگ خاک که در آن پدیده قوس‌زدگی رخ داده و دارای مقدار ضریب فشار جانبی افقی زیادی است [۸].

پایک و لی<sup>۳</sup> در محیط آزمایشگاه و با استفاده از محفظه کالیبره و مدل شمع‌های انتها باز در خاک ماسه‌ای نشان دادند که ظرفیت پلاگ خاک وابسته به فشار جانبی در نوک شمع و تراکم نسبی خاک بوده و اثر تنش قائم بر آن ناچیز است. به علاوه، در حدود ۹۰ درصد مقاومت پلاگ به پلاگ خاکی منتقل می‌شود که محل قرارگیری آن از نوک شمع به فاصله ۳ برابر قطر داخلی شمع است. به علاوه، مقدار ضریب فشار جانبی در پلاگ خاک با افزایش عمق نفوذ شمع، کاهش و با افزایش تنش افقی اولیه، افزایش می‌یابد [۹]. پارامترهای زیادی بر پلاگ داخل شمع تاثیرگذار می‌باشند که می‌توان به مواردی مانند قطر، ضخامت جداره شمع و تنش ایجاد شده در اطراف شمع در حین و پس از نصب آن اشاره نمود. هنکه<sup>۴</sup> تنش افقی داخلی و خارجی در نوک شمع در حین نصب آن را اندازه‌گیری کرد که نتایج وی نشان‌دهنده بیشتر بودن میزان تنش داخلی نسبت به خارجی بود [۱۰]. فتاح و السودانی<sup>۵</sup> نشان دادند که ظرفیت باربری شمع لوله‌ای انتها باز در خاک ماسه‌ای متراکم چندین برابر مقدار آن در خاک ماسه‌ای سست یا متوسط است. زیرا در این حالت، ظرفیت باربری شمع لوله‌ای انتها باز در خاک ماسه‌ای متراکم مشابه مقدار آن در شمع لوله‌ای انتها بسته می‌باشد. طول پلاگ خاک وابسته به تراکم نسبی خاک و نحوه نصب شمع است. همچنین، با افزایش برداشتن پلاگ خاک، مقدار ظرفیت باربری شمع به میزان بیشتری کاهش می‌یابد. آن‌ها بیان کردند که تنش کل به وجود آمده در حین نصب شمع وابسته به پلاگ خاک می‌باشد و تنش موثر شعاعی که مقاومت اصطکاکی را کنترل می‌کند، مستقل از نحوه نفوذ یا رانده شدن شمع در خاک است [۱۱].

در پژوهشی دیگر، فتاح و السودانی به بررسی رفتار پلاگ بر ظرفیت باربری شمع پرداختند. آن‌ها نشان دادند که در حالت تشکیل پلاگ جزیی یا کامل، شمع لوله‌ای انتها باز رفتاری مشابه شمع لوله‌ای انتها بسته از خود نشان می‌دهد. هم‌چنین، طول پلاگ خاک

که توسط جک به داخل ماسه سست خشک موجود در یک محفظه آزمایش بزرگ رانده شده‌بودند، نشان داد که ظرفیت باربری نوک شمع‌های لوله‌ای ناشی از ظرفیت پلاگی و حلقوی نوک شمع بوده و مقاومت اصطکاکی هم در جدار داخلی و هم در جدار خارجی بسیج می‌شود. به علاوه، ظرفیت پلاگی دارای سهم قابل توجهی در مقاومت نوک شمع‌های لوله‌ای می‌باشد و موجب می‌گردد که شمع‌های لوله‌ای انتها باز عملکردی مشابه شمع‌های لوله‌ای انتها بسته داشته‌باشند. این موضوع می‌تواند منجر به کاربرد وسیع شمع‌های لوله‌ای انتها باز شود. زیرا استفاده از این شمع‌ها اقتصادی بوده و از طرفی دیگر، نصب آن‌ها نیز راحت است. بررسی‌های مختلف نشان داده است که قسمت زیادی از ناحیه فوقانی پلاگ خاک، سهم کمی در مقاومت پلاگی داشته و تنها نقش سربار را ایفا می‌کند که به آن پلاگ غیر گوه‌ای<sup>۱</sup> گویند. شمع‌های انتها بازی که کاملاً انسداد یافته‌اند، مقاومتی را بسیج می‌کنند که با شمع معادل انتها بسته‌اش قابل مقایسه است اما شمع‌هایی با انسداد ناقص، ظرفیت‌هایی ایجاد می‌کنند که متناسب با نسبت پرشدگی افزایشی یا پله‌ای<sup>۲</sup> می‌باشند [۳-۱].

لازم به ذکر است که نسبت پرشدگی افزایشی به صورت نسبت ارتفاع خاک در داخل شمع لوله‌ای به طول مدفون شمع در خاک تعریف می‌شود. اگر نسبت پرشدگی افزایشی صفر باشد، به این معنی است که خاکی در داخل شمع وجود ندارد و تنش‌های شعاعی زیادی در اطراف نوک شمع به وجود آمده‌است. اگر نسبت پرشدگی افزایشی برابر با یک باشد، به این معنی است که خاک داخل شمع به سمت پایین حرکت نمی‌کند و پلاگی وجود ندارد. در این حالت، تنش افقی پیرامون نوک شمع با تنش حالت اولیه تفاوت چندانی ندارد. اگر نسبت پرشدگی افزایشی کمتر از یک باشد، به آن معنی است که پلاگ جزیی در داخل شمع به وجود آمده‌است. در این حالت، تنش‌های شعاعی زیادی در شمع لوله‌ای انتها باز به وجود می‌آیند اما مقادیر آن‌ها از مقادیر شمع لوله‌ای انتها بسته کمتر است [۴]. همچنین، با توجه به این موضوع که هیچ‌گونه معیاری برای در نظرگیری تاثیر نسبت پرشدگی افزایشی در ظرفیت باربری شمع‌ها وجود ندارد، مشخص گردید که مقاومت نهایی واحد نوک به‌طور قابل توجهی با افزایش تراکم نسبی و تنش افقی، افزایش می‌یابد. همچنین، مقاومت نهایی واحد نوک در شمع‌های انتها باز با افزایش نسبت پرشدگی افزایشی،

3 Paik and Lee

4 Henke

5 Fattah and Al-Soudani

1 Unwedged plug

2 Incremental Filling Ratio

جدول ۱. مشخصات خاک محل  
Table 1. Soil properties

| c (kPa) | G <sub>s</sub> | Ø (°) | γ (kN/m <sup>3</sup> ) | N <sub>avg</sub> | طبقه‌بندی متحد |
|---------|----------------|-------|------------------------|------------------|----------------|
| ۱       | ۲/۷۳           | ۳۳    | ۱۷/۵                   | ۱۹               | SP             |

جدول ۲. مشخصات شمع‌های آزمایش  
Table 2. Properties of piles

| شمع | L (cm) | D <sub>out</sub> (cm) | D <sub>in</sub> (cm) | A <sub>in</sub> (cm <sup>2</sup> ) | A <sub>st</sub> (cm <sup>2</sup> ) | P <sub>in</sub> (cm) | P <sub>out</sub> (cm) |
|-----|--------|-----------------------|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------|-----------------------|
| A   | 210/0  | 14/0                  | 13/4                 | 141/0                              | 12/9                               | 42/1                 | 43/9                  |
| B   | 195/0  | 11/5                  | 10/9                 | 93/3                               | 10/5                               | 34/0                 | 36/0                  |
| C   | 140/0  | 7/8                   | 7/2                  | 40/7                               | 7/1                                | 22/0                 | 24/0                  |
| D   | 90/0   | 4/9                   | 4/3                  | 14/5                               | 4/3                                | 13/5                 | 15/3                  |

شمع‌ها در محل با نتایج روش‌های تحلیلی و بررسی علل اختلاف نتایج مورد مطالعه قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که معمولاً، برای تعیین ظرفیت باربری و مقاومت اصطکاکی شمع‌ها از روش‌های تحلیلی مانند وسیک<sup>[۱۴]</sup>، جانبو<sup>[۱۵]</sup>، کوپل و کاستلو<sup>[۱۶]</sup> و مایرهورف<sup>[۱۷]</sup> استفاده می‌گردد که ممکن است مقادیر محاسبه شده همراه با خطا باشند. در این مقاله، با مقایسه نتایج دو روش (نتایج حاصل از آزمایش در محل و روش‌های تحلیلی) مقدار این خطا نیز مشخص می‌گردد.

## ۲- انجام آزمایش

در این بخش، در ابتدا، مشخصات محل، سپس مشخصات شمع‌ها و تجهیزات مورد استفاده و در نهایت روند آزمایش بارگذاری استاتیکی

بستگی به نحوه نصب شمع دارد و بسته به مقدار پلاگ تشکیل شده، پلاگ به افزایش مقدار ظرفیت باربری شمع کمک می‌نماید. در حین رانده شدن شمع در خاک به مرور تمام اصطکاک داخلی و خارجی شمع بسیج می‌گردد. به علاوه، تحت شرایط یکسان، مقدار نشست شمع لوله‌ای انتها باز بیشتر از شمع لوله‌ای انتها بسته است [۱۲]. گو<sup>۱</sup> و یو<sup>۱</sup> با استفاده از روش اجزای مجزا به بررسی رفتار شمع لوله‌ای انتها باز در خاک غیر چسبنده پرداختند و نشان دادند که اثر قوس‌زدگی مقدار مقاومت پلاگ را افزایش می‌دهد. هم‌چنین، تغییرشکل غیریکنواخت در داخل شمع رخ داده و مقدار زیادی از خاک در پایین پلاگ خاک متراکم می‌گردد. آن‌ها بیان کردند که ضریب اصطکاک بین شمع- خاک تاثیر زیادی بر مقاومت پلاگ دارد [۱۳].

در این پژوهش، ظرفیت باربری و مقاومت اصطکاکی شمع‌های فلزی لوله‌ای انتها باز در خاک ماسه‌ای، میزان تاثیر پلاگ خاک در ظرفیت باربری شمع‌ها و در نهایت مقایسه نتایج حاصل از آزمایش

- 2 Vesic
- 3 Janbu
- 4 Coyle and Castello
- 5 Meyerhof

1 Guo and Yu

فشاری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۲-۱- مشخصات محل

محل مورد نظر جهت انجام آزمایش‌های بارگذاری شمع در استان مازندران، در ناحیه شمالی جاده کمربندی سرخرود - محمودآباد واقع در شهرک ساحلی چاکسر می‌باشد. نتایج آزمایش‌های ژئوتکنیکی انجام‌گرفته در محل و مشخصات گمانه‌های خاکی حفاری‌شده نشان داد که خاک مورد نظر طبق سیستم طبقه‌بندی متحد، از نوع ماسه بد دانه‌بندی شده ( $SP^1$ ) بوده و وزن مخصوص آن  $\gamma = 17/5 \text{ kN/m}^3$  می‌باشد. سطح آب زیرزمینی نیز در عمق ۳ متری از سطح زمین واقع شده‌است و خاک محل آزمایش در عمق ۲/۵ متری دارای رطوبت بسیار بالایی است. تا این عمق، ماسه مورد نظر از نوع ماسه سست با تراکم نسبی حدود  $Dr = 20\%$  می‌باشد. جدول ۱، خواص فیزیکی و مکانیکی خاک محل انجام آزمایش را نشان می‌دهد که در آن  $N_{avg}$ ،  $\phi$ ،  $G_s$  و  $c$  به ترتیب عدد نفوذ استاندارد متوسط، زاویه اصطکاک داخلی، چگالی دانه‌های جامد و چسبندگی خاک می‌باشند. با انجام آزمایش‌های ژئوتکنیکی مربوطه (دانه بندی، برش مستقیم و غیره) بر روی خاک منطقه، همگنی خاک در ارتفاع شمع‌ها مسجل شده‌است.

### ۲-۲- مشخصات شمع‌ها و تجهیزات مورد استفاده

مشخصات چهار شمع لوله‌ای مورد آزمایش در جدول ۲ ارائه شده‌است که در آن  $A_{st}$  مساحت مقطع فولادی،  $A_{in}$  مساحت قسمت توخالی مقطع،  $P_{in}$  محیط داخلی مقطع،  $P_{out}$  محیط خارجی مقطع،  $L$  طول شمع،  $D_{out}$  قطر خارجی مقطع و  $D_{in}$  قطر داخلی مقطع می‌باشند. این شمع‌ها از جنس فولاد بوده و با نام‌های A، B، C و D نشانه‌گذاری شده‌اند که نسبت  $L/D_{out}$  آن‌ها به ترتیب ۱۵، ۱۶/۹، ۱۷/۹ و ۱۸/۳ می‌باشد. ضخامت جداره (t) تمامی شمع‌ها ۳ میلی‌متر بوده و نسبت  $D_{out}/t$  در شمع‌های A تا D به ترتیب ۴۶/۷، ۳۸/۳، ۲۶ و ۱۶/۳ می‌باشد. فاصله بین شمع‌ها طوری در نظر گرفته شده تا در هنگام بارگذاری بر روی یکدیگر تاثیرگذار نباشد. فاصله لازم بین شمع‌ها طبق استاندارد ASTM-D1143 [۱۸] حداقل باید ۵ برابر قطر خارجی شمع باشد. بنابراین، فاصله مرکز به مرکز هر یک از شمع‌ها حدود ۱/۲ متر در نظر گرفته‌شد. برای اعمال بار بر روی شمع‌ها



شکل ۱. اعمال بار فشاری با استفاده از جک هیدرولیکی و گیج‌های اندازه‌گیری نشست

Fig.1. Applying compressive load using hydraulic jacks and settlement-measuring gauges

از جک هیدرولیکی با ظرفیت ۳۰ تن و دامنه حرکت ۲۰ سانتی‌متر استفاده گردید. به علاوه، به منظور اندازه‌گیری تغییر مکان‌ها، دو گیج با کورس ۵ و ۱۰ سانتی‌متر به کار گرفته شده‌اند. قاب واکنش برای تحمل بارهای وارده با استفاده از بلوک‌های بتنی ۲/۵ تنی، شایسته‌تر و تکیه‌گاه ایجاد شده‌است. نکات ایمنی نیز در حین کار کاملاً رعایت گردیدند (شکل ۱).

### ۲-۳- آزمایش بارگذاری استاتیکی فشاری

در این پژوهش، شمع‌ها با استفاده از روش جک‌زنی نصب گردیدند و سپس به منظور استقرار مناسب جک بر روی شمع‌ها، صفحات فولادی بر روی سر آن‌ها جوش داده شد. بارگذاری استاتیکی بر روی شمع‌ها، یک ساعت پس از نصب شمع و با استفاده از روش بار نگه‌داشته‌شده آهسته<sup>۲</sup> صورت گرفت که جزئیات آن مطابق استاندارد ASTM-D1143 می‌باشد. در این روش، شمع‌ها را تا ۲۰۰ درصد بار طراحی بارگذاری می‌کنند و در هر مرحله ۲۵ درصد بار طراحی به شمع وارد می‌شود. زمان اعمال بار در هر مرحله تا جایی ادامه می‌یابد که نرخ نشست کمتر از ۰/۲۵ میلی‌متر در ساعت شده و این زمان نباید از ۲ ساعت بیشتر شود. بارگذاری آنقدر ادامه می‌یابد 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 خارجی شمع برسد. این مراحل، بعد از اتمام آزمایش فشاری بر روی هر شمع،

شمع‌ها در مجموع سه بار نصب شده و مورد آزمایش قرار گرفتند که با نشانه‌های ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند (مانند A1، A2 و A3).

### ۳- نتایج و تفسیر آن‌ها

بعد از نصب کامل شمع‌ها، آزمایش بارگذاری استاتیکی فشاری بر اساس استاندارد ASTM- D1143 بر روی آن‌ها انجام شد و داده‌های آزمایش مورد تحلیل قرار گرفت. سپس نمودارهای مربوط به آزمایش‌های بارگذاری صورت گرفته بر روی آن‌ها ترسیم گردیدند.

#### ۳-۱- نتایج مربوط به ظرفیت باربری شمع‌های نوع A

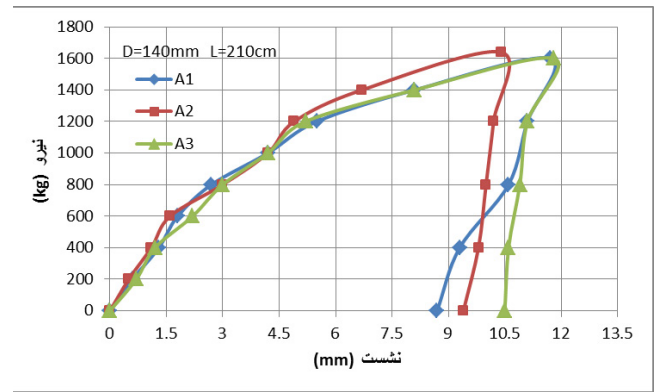
شکل ۲ نتایج مربوط به آزمایش بارگذاری استاتیکی فشاری بر روی شمع‌های نوع A را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، نمودارهای بار-نشست شمع‌های نوع A در ابتدای مراحل بارگذاری رفتاری شبیه به یکدیگر دارند اما در انتهای بارگذاری، نشست شمع A2 کمتر از دو شمع دیگر می‌باشد و باربرداری آن با تغییر شکل‌های برگشت پذیر کمتری همراه است. با توجه به روند منحنی بار-نشست شمع‌ها، مناسب‌ترین روش برای تعیین ظرفیت باربری نهایی آن‌ها استفاده از روش خطوط مماسی می‌باشد زیرا با مقایسه روش خطوط مماسی با برخی از روش‌های رایج موجود برای تعیین ظرفیت باربری مشخص شد که روش خطوط مماسی جواب‌های واقع‌گرایانه‌تری نسبت به سایر روش‌ها به دست می‌دهد و میزان تغییرات و پراکندگی مقادیر ظرفیت باربری شمع‌ها با به‌کارگیری این روش کمتر از روش‌های دیگر بوده‌است. بنابراین، در این مقاله نیز از همین روش برای تعیین ظرفیت باربری استفاده می‌شود. شکل ۳ نحوه استفاده از روش خطوط مماسی برای یکی از شمع‌ها (به‌عنوان مثال شمع A1) را نشان می‌دهد.

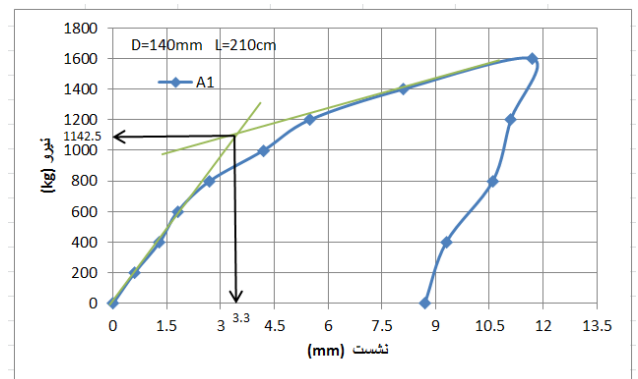
بر این اساس، ظرفیت باربری نهایی به‌دست آمده شمع‌های A1، A2 و A3 به ترتیب در نشست‌های معادل ۲/۳، ۲/۲ و ۲/۴ درصد قطر خارجی شمع رخ می‌دهند. این مطلب نشان می‌دهد که خاک ماسه‌ای محل در عمق استقرار نوک شمع‌های مذکور تقریباً همگن است.

#### ۳-۲- نتایج مربوط به ظرفیت باربری شمع‌های نوع B

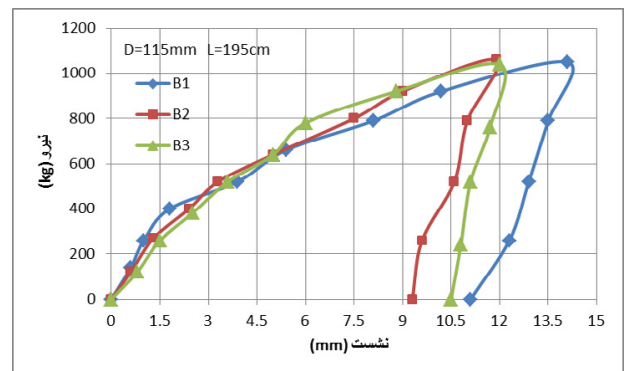
شکل ۴ نتایج آزمایش‌های بارگذاری فشاری شمع‌های نوع B را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، نشست نهایی شمع B1 نسبت به دو



شکل ۲. نتایج آزمایش بارگذاری و باربرداری بر روی شمع‌های نوع A  
Fig.2. Results of load tests on piles type A



شکل ۳. نحوه استفاده از روش خطوط مماسی برای شمع A1  
Fig.3. Using intersection of tangents technique for pile A1



شکل ۴. نتایج آزمایش بارگذاری و باربرداری بر روی شمع‌های نوع B  
Fig.4. Results of load tests on piles type B

برای شمع‌های مجاور نیز تکرار شدند. به‌منظور اطمینان در خصوص نتایج آزمایش، تمامی مراحل ذکر شده برای نصب و آزمایش شمع، دو بار دیگر نیز بر روی شمع‌ها انجام گردیدند. بنابراین هر اندازه از

### ۳-۳- نتایج مربوط به ظرفیت باربری شمع‌های نوع C

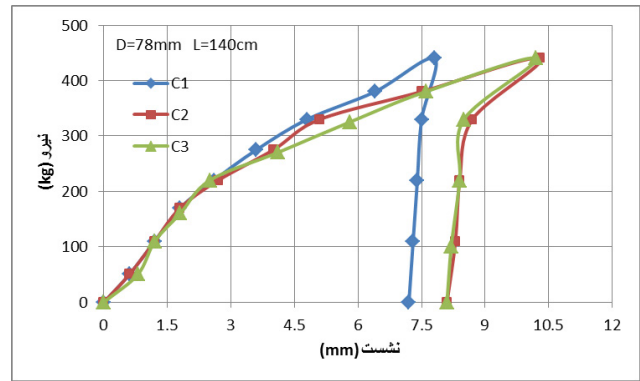
نتایج آزمایش‌های بارگذاری و باربرداری شمع‌های نوع C در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. تفاوت بارز میان شمع‌های این گروه، مربوط به نشست‌های انتهایی آزمایشی بارگذاری می‌باشد اما روند تغییرات بار-نشست برای هر سه شمع تقریباً مشابه یکدیگر است. نکته قابل توجه این است که نمودار باربرداری در هر سه شمع تقریباً قائم است. ظرفیت باربری نهایی شمع C۱، C۲ و C۳ به ترتیب در نشست ۳/۴، ۴ و ۳/۸ درصد از قطر خارجی شمع رخ می‌دهند. نشست متناظر با انتهای بارگذاری فشاری است. نشست‌های متناظر با ظرفیت باربری نهایی شمع‌های C۲ و C۳ اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند اما دارای اختلاف قابل توجهی در مقادیر ظرفیت باربری می‌باشند. علت این موضوع را می‌توان در انسداد زود هنگام این نوع شمع‌ها و تاثیری که بر تراکم خاک زیر نوک شمع دارند، دانست.

### ۳-۴- نتایج مربوط به ظرفیت باربری شمع‌های نوع D

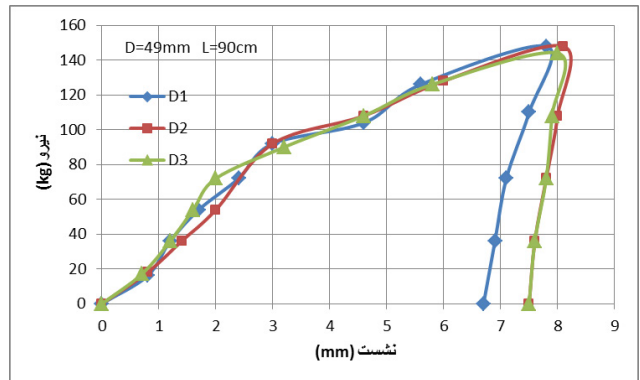
شکل ۶ نتایج آزمایش بارگذاری و باربرداری شمع‌های نوع D را نشان می‌دهد. نمودارهای بار-نشست این نوع شمع‌ها تشابه بسیار زیادی با یکدیگر دارند که بر تکرارپذیری آزمایش در خاک‌های ماسه‌ای همگن تاکید می‌کند. هم‌چنین، شیب باربرداری این نمودارها تقریباً یکسان بوده و تغییرشکل‌های برگشت‌پذیر در آن‌ها ناچیز است ولی مقدار تغییرشکل‌های باربرداری آن‌ها یکسان نمی‌باشد. نشست متناظر با ظرفیت باربری شمع‌های D1، D2 و D3 به ترتیب در ۶/۵، ۶/۶ و ۵/۶ درصد قطر خارجی شمع رخ می‌دهند. نشست متناظر با ظرفیت باربری شمع‌های نوع D بیشتر از سایر انواع شمع می‌باشد. برای مثال، نشست متناظر با ظرفیت باربری شمع D1 معادل ۴۱ درصد نشست نهایی آن تحت بارگذاری است.

### ۳-۵- تفسیر نتایج آزمایش بارگذاری فشاری

جهت مقایسه مقادیر ظرفیت باربری حاصل از نتایج آزمایش بارگذاری بر روی شمع‌ها با مقادیر تخمینی از روش‌های تحلیلی، لازم است که در ابتدا روابط مورد استفاده در روش‌های تحلیلی به اختصار معرفی شوند. مقدار ظرفیت باربری نهایی شمع ( $Q_{U1}$ ) در خاک‌های غیر چسبنده در حالت کلی از رابطه ۱ به دست می‌آید:



شکل ۵. نتایج آزمایش بارگذاری و باربرداری بر روی شمع‌های نوع C  
Fig.5. Results of load tests on piles type C



شکل ۶. نتایج آزمایش بارگذاری و باربرداری بر روی شمع‌های نوع D  
Fig.6. Results of load tests on piles type D

شمع دیگر بیشتر است. دلیل این موضوع را می‌توان ناشی از نحوه تشکیل پلاگ خاک این شمع در انتهای جک‌زنی، تغییرات ناچیز در ویژگی‌های تراکمی خاک ساختگاه و یا شرایط نامناسب آزمایش دانست اما آنچه که در این شکل واضح است، رفتار بارگذاری مشابه در هر سه شمع و تکرارپذیری آزمایش بارگذاری آن‌ها می‌باشد. نشست متناظر با ظرفیت باربری شمع‌های B۱، B۲ و B۳ به ترتیب در ۲/۱، ۲/۹ و ۳/۴ درصد قطر خارجی این شمع‌ها رخ می‌دهد. ظرفیت باربری نهایی به دست آمده و نشست متناظر شمع B۳ تفاوت قابل توجهی با مقادیر به دست آمده برای شمع‌های B۱ و B۲ دارد. مقدار نشست متناظر با ظرفیت باربری شمع B۳ بیشتر از دو شمع دیگر بوده و در حدود ۳۳ درصد نشست نهایی آن در انتهای بارگذاری می‌باشد.

جدول ۳. ظرفیت باربری نهایی و نشست متناظر شمع‌ها  
Table3. Ultimate bearing capacity and corresponding settlement of piles

| نوع شمع | مدل | ظرفیت باربری نهایی حاصل از انجام آزمایش (kg) | متوسط ظرفیت باربری به دست آمده از نتایج آزمایش (kg) | ظرفیت باربری حاصل از روش وسیک (kg) | ظرفیت باربری حاصل از روش مایرهورف (kg) | ظرفیت باربری حاصل از روش کویل و کاستلو (kg) | ظرفیت باربری حاصل از روش جانبو (kg) | ظرفیت باربری حاصل از روش آیین‌نامه چین (kg) | متوسط ظرفیت باربری حاصل از روابط تحلیلی (kg) | نشست (mm) | نسبت نشست به قطر خارجی شمع (%) | متوسط نسبت نشست به قطر خارجی شمع (%) |
|---------|-----|--|---|------------------------------------|--|---|-------------------------------------|---|--|-----------|--------------------------------|--------------------------------------|
| A       | A1  | 1142/5                                       | 1171/7  | 978                                | 905                                    | 768   | 589                                 | 1055  | 859  | 3/3       | 2/3                            | 2/3                                  |
|         | A2  | 1238/5                                       |   |                                    |  |   |                                     |   |  | 3/1       | 2/2                            |                                      |
|         | A3  | 1134/1                                       |   |                                    |  |   |                                     |   |  | 3/45      | 2/4                            |                                      |
| B       | B1  | 639/1  | 664/1   | 614                                | 567                                    | 466   | 453                                 | 651   | 550  | 2/4       | 2/1                            | 2/8                                  |
|         | B2  | 633  |   |                                    |  |   |                                     |   |  | 3/42      | 2/9                            |                                      |
|         | B3  | 720/2  |   |                                    |  |   |                                     |   |  | 4/01      | 3/4                            |                                      |
| C       | C1  | 255/1  | 277/6   | 249                                | 241                                    | 209   | 181                                 | 264   | 228  | 2/68      | 3/4                            | 3/7                                  |
|         | C2  | 294/8  |   |                                    |  |   |                                     |   |  | 3/15      | 4                              |                                      |
|         | C3  | 282/9  |   |                                    |  |   |                                     |   |  | 3/04      | 3/8                            |                                      |
| D       | D1  | 107/2  | 104/2   | 83                                 | 76                                     | 70  | 63                                  | 92  | 76   | 3/2       | 6/5                            | 6/2                                  |
|         | D2  | 103/5  |   |                                    |  |   |                                     |   |  | 3/25      | 6/6                            |                                      |
|         | D3  | 102/1  |   |                                    |  |   |                                     |   |  | 2/79      | 5/6                            |                                      |

که در آن،  $\sigma'_0$  تنش نرمال متوسط زمین (موثر) در تراز نوک شمع و  $N_q^*$  ضریب ظرفیت باربری مربوط به تنش نرمال می‌باشد [۱۴]. برای تعیین ظرفیت باربری نهایی شمع در روش جانبو نیز از رابطه ۱ استفاده می‌شود با این تفاوت که  $N_q^*$  با فرض سطوح گسیختگی معینی در خاک اطراف نوک شمع محاسبه می‌گردد [۱۵]. همچنین، آیین نامه چین<sup>۱</sup>، به‌طور خاص، برای تعیین ظرفیت باربری شمع‌های لوله‌ای با انتهای باز رابطه‌ای پیشنهاد نموده‌است که در آن برای محاسبه ظرفیت باربری اصطکاکی جدار شمع از عبارت مربوطه در رابطه ۱ استفاده می‌گردد اما جهت تعیین ظرفیت باربری نوک شمع، رابطه ۳ به‌کار گرفته می‌شود [۱۹]:

$$Q_p = q_p \lambda_p A_p \rightarrow \begin{cases} \lambda_p = 0.16 h_b / d : \text{for } h_b / d < 5 \\ \lambda_p = 0.8 : \text{for } h_b / d \geq 5 \end{cases} \quad (3)$$

که در آن،  $q_p$  ظرفیت باربری نهایی واحد سطح نوک شمع،  $\lambda_p$  ضریب پلاگی نوک شمع،  $h_b$  طول پلاگ خاک و  $d$  قطر خارجی شمع است. جدول ۳، ظرفیت باربری نهایی شمع‌ها و نشست متناظر هر یک

$$Q_U = Q_p + Q_s = q' N_q^* A_p + PLK \sigma'_v \tan \delta \quad (1)$$

که در آن،  $Q_p$  ظرفیت باربری نوک شمع،  $Q_s$  ظرفیت باربری اصطکاکی جدار شمع،  $q'$  تنش قائم موثر در تراز نوک شمع،  $N_q^*$  ضریب ظرفیت باربری،  $A_p$  مساحت نوک شمع،  $P$  محیط مقطع شمع،  $L$  طول شمع،  $K$  ضریب فشار جانبی خاک،  $\sigma'_v$  تنش قائم موثر در عمق مورد نظر و  $\delta$  زاویه اصطکاک بین شمع و خاک (معمولاً بین  $0.5\phi$  تا  $0.8\phi$ ) در نظر گرفته می‌شود که در آن  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی خاک) است. در روش کویل و کاستلو، ضریب ظرفیت باربری ( $N_q^*$ ) به نسبت طول مدفون ( $L/D$ ) و زاویه اصطکاک داخلی خاک ربط داده می‌شود و مقدار  $\delta = 0.8\phi$  فرض شده‌است [۱۶]. در روش مایرهورف نیز از رابطه ۱ استفاده می‌شود ولی نباید ظرفیت باربری نوک شمع از مقدار حدی آن تجاوز کند. هم‌چنین در این روش،  $N_q^*$  به زاویه اصطکاک داخلی خاک ربط داده می‌شود [۱۷]. در روش وسیک، برای تعیین ظرفیت باربری اصطکاکی جدار شمع از عبارت مربوطه در رابطه ۱ استفاده می‌شود اما برای محاسبه ظرفیت باربری نوک شمع، رابطه ۲ به‌کار گرفته می‌شود:

$$Q_p = \sigma'_0 N_{\sigma}^* A_p \quad (2)$$

جدول ۴. اطلاعات پلاگ خاک شمع‌های آزمایش  
Table 4. Soil plug

| شمع | طول شمع (cm) | طول پلاگ (cm) | وزن مخصوص پلاگ خاک (kN/m <sup>3</sup> ) |
|-----|--------------|---------------|---|
| A   | 210          | 96            | 21/4                                    |
| B   | 195          | 67            | 19/8                                    |
| C   | 140          | 50            | 19/3                                    |
| D   | 90           | 30            | 18/75                                   |

را ارائه می‌کند. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، مقادیر ظرفیت باربری حاصل از روش آیین‌نامه چین بسیار نزدیک به مقادیر متوسط ظرفیت باربری به‌دست‌آمده از نتایج آزمایش بارگذاری بر روی شمع‌ها است. همچنین، مقایسه متوسط ظرفیت باربری به‌دست‌آمده از نتایج آزمایش با متوسط ظرفیت باربری حاصل از روش‌های تحلیلی (مایرهورف، وسیک، جانبو، کویل و کاستلو، آیین‌نامه چین) نشان می‌دهد که مقادیر ظرفیت باربری شمع‌های A، B، C و D به ترتیب ۳۶، ۲۰، ۲۱ و ۳۷ درصد بیشتر از مقادیر به‌دست‌آمده از روش‌های تحلیلی می‌باشند. یکی از دلایل این اختلاف را می‌توان در تاثیر پلاگ خاک بر روی ظرفیت باربری شمع‌ها دانست. پلاگ درون شمع از طریق تنش برشی داخلی سبب ایجاد نیروی اصطکاکی داخلی می‌شود که با توجه به تعادل نیرو در راستای قائم در داخل پلاگ منجر به باربری اضافی در نوک شمع می‌شود. عامل دیگری که می‌تواند در ایجاد این اختلاف نقش داشته باشد، تاثیر نحوه نصب شمع با استفاده از روش جک‌زنی می‌باشد. زیرا در این روش، میزان دست‌خوردگی خاک به حداقل می‌رسد و ظرفیت باربری به مقدار واقعی خود نزدیک‌تر می‌شود. این موضوعی است که روش‌های تحلیلی مرسوم آن را در نظر نگرفته‌اند. بنابراین، پس از بیرون کشیدن کامل شمع‌ها، طول پلاگ خاک اندازه‌گیری شد و با توجه به قطر داخلی هر شمع، حجم پلاگ محصورشده در لوله محاسبه گردید. سپس، با توجه به وزن پلاگ خاک، وزن مخصوص آن تعیین شد. اطلاعات پلاگ پس از بیرون کشیدن کامل شمع‌ها در جدول ۴ نشان داده شده‌است. همان‌طور که در جدول ۴ ملاحظه می‌شود، با افزایش طول شمع، طول پلاگ خاک و وزن مخصوص خاک داخل پلاگ نیز افزایش می‌یابند.

### ۳-۶- محاسبه مقاومت اصطکاکی حاصل از بارگذاری فشاری

در اکثر پی‌های عمیق، مقاومت اصطکاکی در حالت فشار و کشش تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند [۲۰]. بنابراین می‌توان از نتایج آزمایش کششی انجام شده بر روی همین شمع‌ها [۲۱] برای تخمین مقاومت اصطکاکی آن‌ها استفاده کرد. بر این اساس، با کاستن وزن شمع و وزن پلاگ خاک درون آن می‌توان ظرفیت کششی ناشی از اصطکاک را محاسبه نمود. لازم به ذکر است که برخی پژوهشگران مانند اونیل و ریس<sup>۱</sup>، به علت اثر نسبت پواسون به‌وجود آمده، ظرفیت اصطکاکی در حالت بارگذاری فشاری را ۱۲ تا ۲۵ درصد بیشتر از ظرفیت اصطکاکی در حالت بارگذاری کششی گزارش کرده‌اند [۲۲] اما در این مقاله در جهت اطمینان، مقدار ظرفیت اصطکاکی در حالت فشاری برابر با ظرفیت کششی خالص در نظر گرفته شد. جدول ۵، نتایج مربوط به ظرفیت‌های باربری نهایی و اصطکاکی هر یک از شمع‌ها را نشان می‌دهد.

### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به‌منظور تعیین ظرفیت باربری شمع‌های لوله‌ای انتها باز که با روش جک‌زنی در داخل خاک ماسه‌ای نصب شده‌اند، تعدادی آزمایش بارگذاری استاتیکی فشاری مطابق استاندارد ASTM-D1143 صورت گرفت. در این روش، در ابتدا، شمع‌ها به روش جک‌زنی و با استفاده از جک هیدرولیکی در ماسه نصب شدند. پس از نصب کامل شمع‌ها در ماسه، آزمایش‌های بارگذاری فشاری انجام شد و پس از ثبت داده‌های آن‌ها، منحنی‌های بار-نشست برای شمع‌ها ترسیم گردیدند. این منحنی‌ها نشان دادند که ظرفیت باربری شمع‌های A، B، C و D به‌طور متوسط بیشتر از مقادیر تحلیلی است. یکی از دلایل این اختلاف، تاثیر پلاگ خاک بر روی ظرفیت باربری شمع‌ها و دلیل دیگر نیز تاثیر نحوه نصب شمع با استفاده از روش جک‌زنی می‌باشد. به‌منظور آگاهی بیشتر از ساز و کار باربری در اینگونه از شمع‌ها و با توجه به مطالعات انجام شده در خصوص شمع‌های لوله‌ای، تحلیل‌های مقاله بر موضوع ظرفیت باربری پلاگی و اصطکاک داخل شمع لوله‌ای متمرکز گردید و مقدار آن محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد که در محدوده قطرهای بررسی شده در این مقاله، هر چه قطر خارجی و داخلی شمع توخالی بیشتر باشد، میزان



جدول ۵. ظرفیت باربری اصطکاکی شمعها  
Table 5. Frictional bearing capacity of piles

| شمع | مدل | ظرفیت کل (kg) | متوسط ظرفیت کل (kg) | ظرفیت اصطکاکی [21] (kg) | متوسط ظرفیت اصطکاکی (kg) | نسبت ظرفیت اصطکاکی به ظرفیت کل (%) | نسبت متوسط ظرفیت اصطکاکی به متوسط ظرفیت کل (%) |
|-----|-----|---------------|---------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------------|--|
| A   | A1  | 1142/5        | 1171/7              | 621/2                   | 600/5                    | 54/3                               | 51/2   |
|     | A2  | 1238/5        |                     | 629/7                   |                          | 50/8                               |  |
|     | A3  | 1134/1        |                     | 550/8                   |                          | 48/5                               |  |
| B   | B1  | 639/1         | 664/1               | 271                     | 300/2                    | 42/4                               | 45/1   |
|     | B2  | 633           |                     | 301/3                   |                          | 47/5                               |  |
|     | B3  | 720/2         |                     | 328/5                   |                          | 45/6                               |  |
| C   | C1  | 255/1         | 277/6               | 73/5                    | 74/4                     | 28/8                               | 26/8   |
|     | C2  | 294/8         |                     | 74/3                    |                          | 25/2                               |  |
|     | C3  | 282/9         |                     | 75/4                    |                          | 26/6                               |  |
| D   | D1  | 107/2         | 104/2               | 26/5                    | 24/7                     | 24/7                               | 23/7   |
|     | D2  | 103/5         |                     | 21/9                    |                          | 21/1                               |  |
|     | D3  | 102/1         |                     | 25/9                    |                          | 25/3                               |  |

Mechanisms of shaft friction in sand from instrumented pile tests, Journal of Geotechnical Engineering, 119(1) (1993)19–35.

- [4] C. Moormann, J. Labenski, J. Aschrafi, Simulation of soil plug effects in open steel pipe piles considering the complex soil-structure-interaction during installation, Proceedings of the 40th Annual Conference on Deep Foundations, Oakland, California, USA, (2015).
- [5] K.H. Paik, R. Salgado, Determination of bearing capacity of open-ended piles in sand, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 129(46) (2003) 46–57.
- [6] M.W. O'Neill, R.D. Raines, Load transfer for pipe piles in highly pressured dense sand, Journal of Geotechnical Engineering, 117(8) (1991) 1208–1226.
- [7] S.R. Gudavalli, O. Safaqah, H. Seo, Effect of soil plugging on axial capacity of open-ended pipe piles in sands, Proceedings of 18th International Conference

اصطکاک خارجی و داخلی (که منجر به مقاومت پلاگی می‌شود) نیز افزایش می‌یابد که در عملکرد شمع‌های اصطکاکی تاثیر چشمگیرتری می‌گذارد. این نتایج زمانی سودمندتر می‌شوند که اطلاعات مربوط به پلاگ خاک در حین جک‌زنی شمع‌ها قرائت شود. زیرا براساس این داده‌ها می‌توان تنش اصطکاکی درون شمع‌ها و در نتیجه نیروی مقاوم حاصل از آن را در عمق‌های نفوذ مختلف محاسبه کرد و با توجه به این نیروها می‌توان سهم پلاگ خاک در اعماق مختلف را تعیین نمود.

#### مراجع

- [1] B. Lehane, K.G. Gavin, Base resistance of jacked pipe piles in sand, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 123(10) (2001) 473–480.
- [2] M.W. O'Neill, Side resistance in piles and drilled shafts, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 127(1) (2001) 3-16.
- [3] B.M. Lehane, R.J. Jardine, A.J. Bond, R. Frank,

- Washington, D.C., (1977).
- [15] N. Janbu, Static bearing capacity of friction piles, In Proceedings of the 6th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vienna, Austria, 1.2 (1976) 479 – 488.
- [16] H.M. Coyle, R.R. Castello, New design correlations for piles in sand, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 107(7) (1981) 965-986.
- [17] G.G. Meyerhof, Bearing capacity and settlement of pile foundations, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 102(3) (1976) 195-228.
- [18] ASTM-D1143, Standard test method for piles under static axial compressive load, American Society for Testing and Materials. USA, (1981).
- [19] China's Ministry of Construction, Technical code for building pile foundations, Beijing, JG J94, (2008).
- [20] N. Parthipan, M. Kumar, Experimental study on uplift load carrying capacity of steel pile in sand, International Journal of Science and Research, 6(5) (2017) 2682-2684.
- [21] A. Sharifi, A study on the frictional resistance of steel pipe piles under tension in sandy soil, MSc. thesis, Pardisan University, (2016) (in Persian).
- [22] M.W. O'Neill, L.C. Reese, Drilled shafts: construction procedures and design methods, Vol. II, Publication No. FHWA-IF-99-025, U.S. Dept. of Transportation, Washington, DC, (1999).
- on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, (2013)1487–1490.
- [8] F. Yu, J. Yang, Base capacity of open-ended steel pipe piles in sand, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138(9) (2012)1116–1128.
- [9] K.H. Paik, S.R. Lee, Behavior of soil plugs in open-ended model piles driven into sands, Marine Georesources Geotechnology, 11(4) (1993) 353–373.
- [10] S. Henke, Untersuchungen zur pfpfenbildung infolge der installation offener profile in granularen boden habilitation, Veroffentlichungen des Instituts für Geotechnik und Baubetrieb der TU Hamburg-Harburg, Heft 29, (2013).
- [11] M. Fattah, W. Al-Soudani, Bearing capacity of open-ended pipe piles with restricted soil plug, Ships and Offshore Structures, 11(5) (2016) 501-516.
- [12] M. Fattah, W. Al-Soudani, Bearing capacity of closed and open ended pipe piles installed in loose sand with emphasis on soil plug, Indian Journal of Geo-Marine Sciences, 45(5) (2016) 703-724.
- [13] Y. Guo, X.B. Yu, Design and analyses of open-ended pipe piles in cohesionless soils, Frontiers of Structural and Civil Engineering, 10(1) (2016) 22–29.
- [14] A.S. Vesic, Design of pile foundations, National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Practice No.42, Transportation Research Board,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*I. Shooshpasha, G. Khabbazi, A. Hasanzadeh, Determination of Bearing Capacity of Steel Pipe Piles in Sandy Soil using Static Compressive Load Test, Amirkabir J. Civil Eng., 52(2) (2020) 397-406.*

DOI: 10.22060/ceej.2018.14161.5574

