

# بررسی ظرفیت باربری شمع‌های کوتاه تحت اثر بار جانبی در خاک ماسه‌یی

جعفر بلوری‌باز\* (دانشیار)

جواد کشاورز (دانشجوی کارشناسی ارشد)  
دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

مهندسی عمران شریفیه، (پاییز ۱۳۹۳)  
دوره‌ی ۲-۳، شماره‌ی ۳، ص. ۹۵-۸۵

در بسیاری از سازه‌ها، بارهای جانبی بالایی نسبت به بارهای ثقلی به سازه تحمیل می‌شوند. شمع‌های این‌گونه سازه‌ها را، که تحت اثر بارهای جانبی قابل توجهی قرار می‌گیرند، می‌توان به ۲ گروه شمع‌های بلند و کوتاه تقسیم کرد. معمولاً تخمین ظرفیت باربری شمع تحت اثر بار جانبی برای شمع‌های کوتاه براساس بیشینه‌ی ظرفیت باربری و برای شمع‌های بلند براساس تغییرمکان افقی مجاز است. در این پژوهش، برای بررسی رفتار شمع تحت اثر بار جانبی، از لوله‌های فلزی به‌منزله‌ی شمع در آزمایشگاه استفاده شده است. برای تعیین ظرفیت باربری، بار جانبی به شمع‌های فلزی مدفون در خاک ماسه‌یی اعمال شده است. با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی رفتار شمع‌های کوتاه به لحاظ تغییر طول و قطر شمع و نیز وزن مخصوص خاک مورد بررسی قرار گرفته است. سپس نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی با روش‌های هانسن، برامز، پتراسوویت، میرهوف و پراساد مورد مقایسه قرار گرفته است. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که روش پراساد برای تخمین ظرفیت باربری جانبی شمع نسبت به دیگر تئوری‌های ارائه‌شده مناسب‌تر است.

واژگان کلیدی: شمع‌های کوتاه، بار جانبی، ظرفیت باربری، خاک غیرچسبیده، نقطه‌ی دوران.

## ۱. مقدمه

شمع‌ها، اعضای از جنس فولاد، بتن، بتن مسلح، و چوب هستند که در صورت مناسب نبودن ظرفیت باربری زمین برای استفاده از پی‌های سطحی، از آن‌ها برای ساخت پی‌های عمیق استفاده می‌شود. در بعضی موارد همچون وجود بارهای جانبی و سنگین، وجود لایه‌های فوقانی خاک با قابلیت فشردگی زیاد، وجود خاک‌های قابل تورم یا رمینده، و به دلیل وجود مسئله‌ی آب‌شستگی در محل پایه‌های پل، کاربرد شمع ایجاب می‌شود. تقریباً تمام شمع‌ها تحت تأثیر بارهای افقی قرار می‌گیرند. در بعضی از سازه‌ها مقدار این بار نسبت به بار قائم ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است، لیکن در مواردی، شمع‌ها تحت بارهای جانبی قابل توجهی قرار می‌گیرند. شمع تحت اثر بار جانبی در پل‌ها، ساختمان‌های بلند و مخصوصاً در سازه‌های ساحلی و تابلوهای علامت کاربرد دارد. برای تخمین بار جانبی وارد به شمع، روش‌های گوناگونی بیان شده است که به‌طور کلی از ۲ معیار مشخص می‌شود:

- بار جانبی مجاز از تقسیم بار نهایی به ضریب اطمینان،
- بار جانبی مجاز براساس تغییرمکان افقی.

به‌طور کلی شمع‌ها به ۲ دسته‌ی شمع‌های بلند و کوتاه تقسیم می‌شوند، که ظرفیت باربری شمع کوتاه به مقاومت خاک و ظرفیت باربری شمع بلند به مقاومت

\* نویسنده مستقر

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۷/۹، اصلاحیه ۱۳۹۱/۱۲/۸، پذیرش ۱۳۹۱/۱۲/۲۶

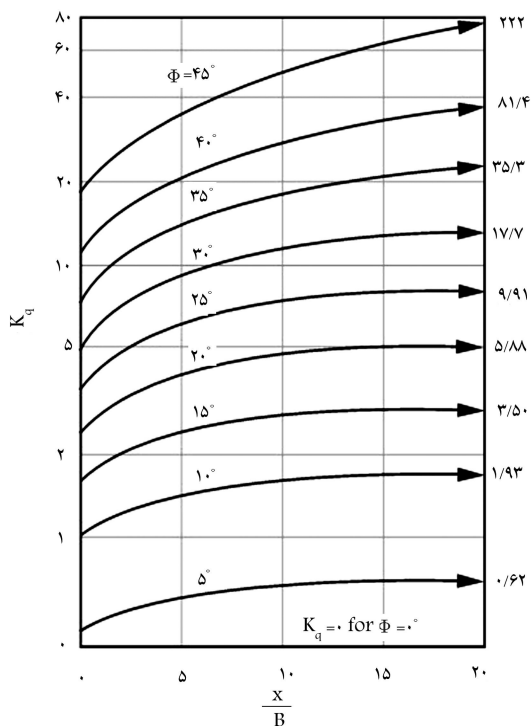
## ۲. معیارهای رفتاری شمع‌ها

شمع کوتاه در اثر بار جانبی به‌صورت صلب عمل می‌کند و حول نقطه‌یی دوران می‌کند، در صورتی که شمع بلند در اثر بار جانبی به‌صورت انعطاف پذیر عمل می‌کند و در نقطه‌یی در طول شمع مفصل ایجاد می‌شود. رفتار شمع کوتاه و بلند بستگی به سختی نسبی سیستم شمع و خاک دارد.<sup>[۱۵]</sup> برای پیش‌بینی رفتار یک شمع، که

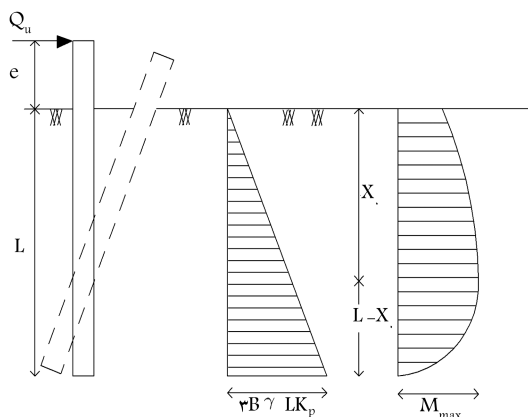
bolouri@um.ac.ir  
ke\_javad@yahoo.com

شمع بستگی دارد.<sup>[۱]</sup> شمع کوتاه تحت اثر بار جانبی همانند یک جسم صلب عمل می‌کند و کل شمع در نقطه‌یی دوران می‌کند، و در صورتی که شمع دارای پی<sup>۱</sup> باشد، کاملاً جابجا می‌شود. شمع بلند تحت اثر بار جانبی، با توجه به اینکه شمع بدون پی<sup>۲</sup> یا دارای پی است، ایجاد ۱ یا ۲ مفصل می‌کند و از نقطه‌ی مفصل دوران می‌کند.

برای تخمین ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها روش‌هایی ارائه شده است که می‌توان به روش‌های هانسن، برامز، پتراسوویت و اوارد، میرهوف و پراساد اشاره کرد.<sup>[۲-۸]</sup> به جز روش برامز، بقیه‌ی روش‌ها برای شمع‌های کوتاه کاربرد دارند. همچنین برای شمع‌های بلند می‌توان از نظریه‌ی مدول واکنش بستر،<sup>[۹]</sup> نظریه‌ی کشسان،<sup>[۱]</sup> روش رندولف،<sup>[۱۰]</sup> روش بار مشخصه،<sup>[۱۱]</sup> روش اصلاح‌شده‌ی بار مشخصه<sup>[۱۲،۱۳]</sup> و نظریه‌ی بیشینه‌ی مدول افقی واکنش بستر،<sup>[۱۴]</sup> استفاده کرد.



شکل ۱. ضریب هانسن (رابطه‌ی ۶). [۲]



شکل ۲. واکنش خاک غیرچسبیده برای شمع‌های کوتاه. [۴۳]

برامز با فرضیات ساده‌کننده‌ی، فشار خاک بر روی شمع کوتاه در خاک غیرچسبیده را به‌گونه‌ی نشان داده‌شده در شکل ۲ در نظر گرفت. با دانستن مقادیر  $L/B$  و  $e/L$  و همچنین پارامترهای وزن مخصوص مؤثر و ضریب فشار رانکین می‌توان با استفاده از شکل ۳، مقدار بیشینه‌ی بار جانبی شمع را تخمین زد. [۴۳] در شکل‌های ۲ و ۳،  $L$  طول مدفون شمع،  $e$  فاصله‌ی نیروی جانبی نسبت به سطح خاک،  $B$  عرض یا قطر شمع،  $\gamma$  وزن مخصوص مؤثر خاک،  $k_p$  ضریب فشار مقاوم رانکین و  $Q_u$  بیشینه‌ی بار جانبی شمع است. ضریب فشار مقاوم رانکین از رابطه‌ی ۷ به‌دست می‌آید:

$$K_p = \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (7)$$

در روش پتراسوویت و اوارد برای خاک‌های ماسه‌ی از رابطه‌ی ۹ استفاده می‌شود. این رابطه همانند رابطه‌ی ۶ است، با این تفاوت که به جای ضریب  $k_q$  مقدار  $k_a - \gamma k_p$  در فشار مؤثر سربار ضرب می‌شود. ضرایب  $k_a$  و  $k_p$  ضریب فشار

جدول ۱. معیارهای شمع بلند و کوتاه.

ردیف	مرجع	شمع کوتاه	شمع بلند
۱	[۴۳]	$L/T \leq 2$	$L/T \geq 4$
۲	[۱]	$K_r > 10^{-2}$	$K_r < 10^{-2}$
۳	[۱۶]	$L/B < 6$	$L/B > 6$
۴	[۱۷]	$S_H < 5$	$S_H > 5$
۵	[۱۸]	$L < 1,5BK^{0,36}$	$L > 1,5BK^{0,36}$
۶	[۱۹]	$L < L_c/3$	$L > L_c$

جدول ۲. محدوده‌ی مدول واکنش بستر برای ماسه‌ی خشک. [۲۰]

$n_h$ (kN/m <sup>۳</sup> )		
ماسه متراکم	ماسه نیمه متراکم	ماسه شل
۲۰۰۰۰	۷۷۰۰	۲۶۰۰

به‌صورت کوتاه یا بلند عمل می‌کند، معیارهای متفاوتی ارائه شده است (جدول ۱).

$$T = (E_P I_P / n_h)^{0,7} \quad (1)$$

$$K_r = (E_P I_P / E_s B^3) \quad (2)$$

$$S_H = (L/B)(E_P / E_s)^{0,25} \quad (3)$$

$$K = (E_P / E_s) \quad (4)$$

$$L_c = 4,44(E_P I_P / E_s)^{0,25} \quad (5)$$

در روابط ارائه‌شده،  $T$  طول مشخصه است که از رابطه‌ی ۱ به‌دست می‌آید. برای محاسبه‌ی طول مشخصه نیاز به مدول واکنش بستر است، که مقدار آن در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین پارامترهای انعطاف‌پذیری ( $K_r, S_H$ )، نسبت سختی ( $K$ ) و طول بحرانی ( $L_c$ ) به ترتیب از روابط ۲ الی ۵ به‌دست می‌آیند. در روابط ارائه‌شده،  $L$  طول مدفون شمع ( $m$ )،  $B$  پهناى شمع ( $m$ )،  $n_h$  ضریب واکنش بستر ( $kN/m^3$ )،  $E_P$  ضریب یانگ شمع ( $kPa$ )،  $I_P$  ممان اینرسی شمع ( $m^4$ )،  $E_s$  مدول یانگ خاک ( $kPa$ )،  $v_s$  نسبت پواسون خاک و  $G_s$  ضریب برشی خاک ( $kPa$ ) است. در میان معیارهای ارائه‌شده، بعضی از آنها (مانند ردیف ۳ در جدول ۱) به‌دلیل اینکه پارامترهای سختی خاک و شمع را در نظر نگرفته است، دقت خوبی ندارد. معیار ۲، تقریباً تمام پارامترهای مؤثر، طول، قطر و سختی نسبی خاک و شمع را در نظر می‌گیرد و رفتار شمع را به‌طور دقیق‌تری پیش‌بینی می‌کند.

### ۳. تئوری‌های تخمین ظرفیت باربری جانبی شمع کوتاه

هانسن با در نظر گرفتن فشار جانبی خاک غیرچسبیده، ظرفیت باربری شمع‌های کوتاه و نقطه‌ی دوران شمع را با استفاده از رابطه‌ی ۶ تخمین زده است: [۱]

$$P_{xu} = \sigma_{vx} K_q \quad (6)$$

که در این رابطه،  $P_{xu}$  مقاومت نهایی خاک،  $\sigma_{vx}$  فشار مؤثر سربار قائم و  $k_q$  ضریب هانسن است که از شکل ۱ قابل تعیین است. در این شکل،  $B$  و  $x$  به ترتیب عمق هر نقطه از شمع نسبت به سطح زمین و پهناى شمع است.

خاک از سطح زمین تا  $0.6x_r$  افزایش و سپس تا نقطه‌ی دوران کاهش می‌یابد و بعد در جهت مخالف افزایش خواهد یافت. مقدار فشار در نوک شمع به  $1.7$  برابر فشار در عمق  $0.6x_r$  می‌رسد، که  $x_r$  فاصله‌ی بین سطح خاک تا نقطه‌ی دوران شمع است. بر این اساس مقدار ظرفیت باربری شمع از رابطه‌ی ۱۳ قابل تعیین است، [۸].

$$Q_u = 0.24 \left[ 1 + (1.7 \tan \varphi + 0.7) \right] x_r \gamma B (2.7x_r - 1.7L) \quad (13)$$

که در آن، مقدار  $x_r$  از رابطه‌ی ۱۴ به دست می‌آید:

$$x_r = \frac{[-(0.567L + 2.7e) + (5.307L^2 + 7.29e^2 + 10.541eL)^{0.5}]}{2.1996} \quad (14)$$

#### ۴. اهداف تحقیق

یکی از موارد استفاده از شمع‌ها تحت اثر بار جانبی، پی تابلوهای بلند است که بار جانبی قابل توجه به آنها وارد می‌شود. به منظور تعیین ظرفیت باربری نهایی این‌گونه شمع‌ها، تئوری‌های گوناگونی ارائه شده است؛ که به دلیل اختلاف در ظرفیت باربری محاسبه شده با این تئوری‌ها، انتخاب روشی مناسب را برای مهندسان دشوار ساخته است. در بیشتر پژوهش‌های انجام شده تاکنون، مقایسه بین روش‌های گوناگون تعیین ظرفیت باربری به طور جامع معمولاً انجام نشده است. در پژوهش‌های سال‌های اخیر نیز توزیع فشار در شمع‌های کوتاه و بلند اندازه‌گیری و به نحوه‌ی جابجایی شمع در خاک کم‌تر توجه شده است. [۷] با توجه به اینکه بعضی از این روابط براساس نتایج آزمایشگاهی به دست نیامده‌اند، بنابراین بررسی آزمایشگاهی رفتار شمع‌ها تحت اثر بار جانبی، تعیین نقطه‌ی دوران و نیز ارائه‌ی نمودار نیرو- تغییرمکان (که کمک به تفسیر رفتار شمع می‌کند) را ضروری می‌سازد. برای مثال، در پژوهش پراساد تغییرمکان شمع در عمق و نیز چگونگی تغییرشکل شمع در خاک که ممکن است خطی (صلب) و یا غیرخطی (انعطاف پذیر) باشد، مشخص نشده است.

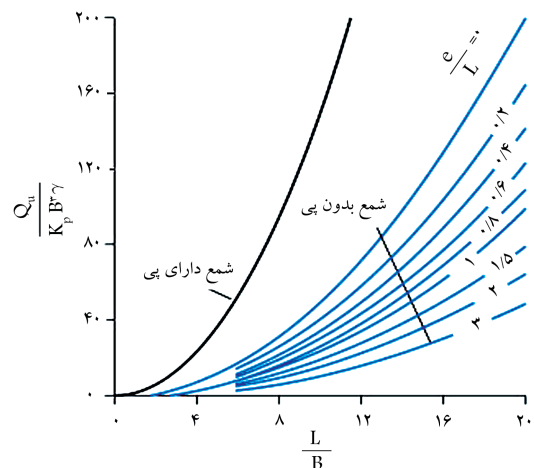
در این پژوهش سعی شده است تا با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، ظرفیت باربری و رفتار شمع‌ها تحت اثر بار جانبی بررسی شود. همچنین تعیین نقطه‌ی دوران در شمع‌ها و نیز اثر پارامترهای مؤثر مانند وزن مخصوص خاک، طول و قطر شمع نیز مورد پژوهش واقع شده‌اند.

#### ۵. دستگاه و مصالح آزمایش

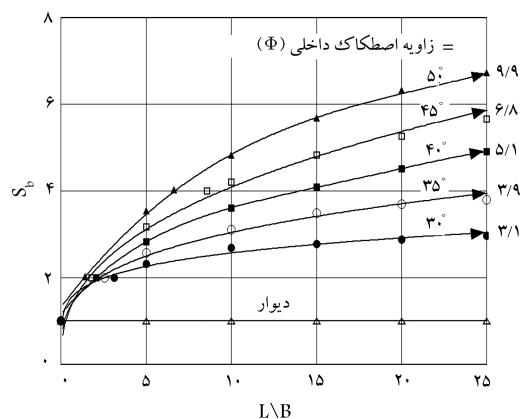
برای بررسی رفتار شمع تحت اثر بار جانبی نیاز به دستگاهی است که بتوان به شمع نیروی افقی اعمال کرد و جابجایی افقی شمع را در سطح و عمق خاک به دست آورد. به این منظور یک دستگاه آزمایشی طراحی شده است. در ادامه، به تشریح مصالح و تجهیزات مورد استفاده در این آزمایش پرداخته شده است.

##### ۱.۵. خاک مورد استفاده

خاک مورد استفاده در این آزمایش، ماسه‌ی فیروزکوه است که با انجام آزمایش دانه‌بندی و برش مستقیم مشخصات فنی آن تعیین شده است (شکل ۵). همچنین مشخصات به دست آمده از آزمایش برش مستقیم، تطابق خوبی با نتایج به دست آمده از آزمایش سه محوری انجام شده بر روی این ماسه توسط دیگر پژوهشگران دارد (جدول ۳). [۲۴]



شکل ۳. مقاومت جانبی نهایی شمع کوتاه. [۴۳]



شکل ۴. ضریب شکل شمع تحت اثر بار جانبی در ماسه. [۲۱]

مقاوم و محرک رانکین هستند که به ترتیب از رابطه‌های ۷ و ۸ به دست می‌آیند: [۵]

$$K_a = \tan^2 \left( 45 - \frac{\varphi}{\gamma} \right) \quad (8)$$

$$P_{xu} = \sigma_{vx} (3.7 K_p - K_a) \quad (9)$$

برای تخمین ظرفیت باربری شمع تحت اثر بار جانبی در خاک ماسه‌یی با استفاده از روش میرهوف، می‌توان از رابطه‌ی ۱۰ استفاده کرد. [۶] در این رابطه،  $F_b$  پارامتر مقاومت جانبی تحت تأثیر سختی نسبی لایه‌ها و ضخامت آنهاست، که این مقدار برای خاک ماسه‌یی یک لایه، برابر با  $0.117$  است. پارامتر کاهش ظرفیت باربری در اثر لنگر  $Q_u.e$  (رابطه‌ی ۱۱) و ضریب فشار جانبی است (رابطه‌ی ۱۲). رابطه‌ی ۱۰ برای دیوار حائل داده شده است که با ضرب ضریب شکل  $S_b$ ، این رابطه برای شمع‌ها نیز قابل استفاده است. پارامتر ضریب شکل برای دیوار حائل برابر ۱ است و برای شمع‌ها با توجه به نسبت طول به پهنا و زاویه‌ی اصطکاک داخلی از نمودار شکل ۴ به دست می‌آید.

$$Q_u = (\gamma L^2 K_b F_b r_b S_b) B \quad (10)$$

$$r_b = 1 / (1 + 1.4 \frac{e}{L}) \quad (11)$$

$$K_b = \tan^2 \left( 45 + \frac{\varphi}{\gamma} \right) - \tan^2 \left( 45 - \frac{\varphi}{\gamma} \right) \quad (12)$$

پراساد با انجام یک سری آزمایش بر روی شمع تحت اثر بار جانبی در خاک ماسه‌یی گردگوشه‌ی خشک مشاهده کرد که برای شمع کوتاه در خاک غیرچسبیده، فشار جانبی

شمع در عمق خاک، سوراخ‌های کوچکی در فواصل  $20^\circ$  میلی‌متری بر روی مخزن در جهت و خلاف جهت اعمال نیرو ایجاد شده است.

#### ۴.۵. نحوه‌ی اعمال نیروی افقی

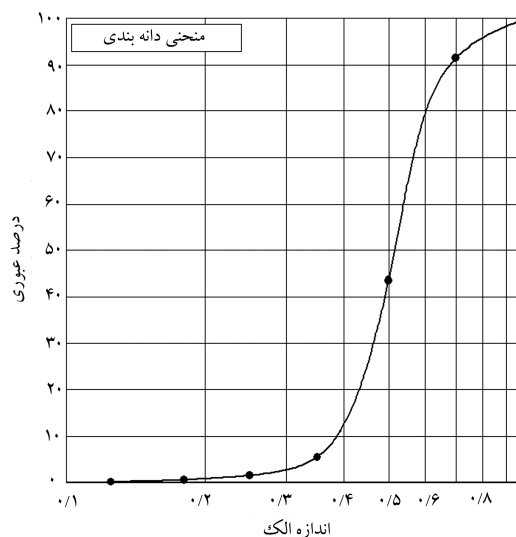
برای اعمال نیروی افقی قرقره‌یی در ارتفاع  $27^\circ$  میلی‌متری از سطح خاک ثابت شده است. سیم مفتولی از یک طرف به شمع و از طرف دیگر با عبور از روی قرقره به مخزن کوچکی متصل شده است. در داخل مخزن کوچک وزنه قرار می‌گیرد و نیروی استاتیکی به شمع اعمال می‌شود. برای کنترل دقت و صحت مقدار بار وارده، برای چند آزمایش بین سیم مفتول و شمع نیروسنج قرار داده شده است و بدین وسیله مقدار نیروی اعمالی کنترل شده است.

#### ۵.۵. نحوه‌ی اندازه‌گیری جابجایی افقی

جابجایی افقی در سطح خاک با گیج الکتریکی اندازه‌گیری شده است. برای مقدار جابجایی افقی شمع در عمق خاک، سیم‌های نازکی در فواصل  $20^\circ$  میلی‌متری به شمع‌ها متصل می‌شوند. این سیم‌ها با عبور از سوراخ‌های ایجادشده بر روی مخزن خاک در جهت و خلاف جهت اعمال نیرو به گیج‌های مکانیکی متصل می‌شوند. در هر مرحله با افزایش بار وارده، مقدار جابجایی توسط گیج‌ها ثبت می‌شود. در نتیجه در هر بارگذاری وضعیت شمع مشخص می‌شود.

#### ۶. نحوه‌ی انجام آزمایش

در ابتدا سیم‌های نازک جهت اندازه‌گیری جابجایی افقی در فواصل منظم به شمع متصل می‌شوند. سپس شمع در داخل مخزن قرار می‌گیرد. خاکریزی داخل مخزن تا رسیدن به تراز سوراخ‌های ایجادشده بر روی مخزن انجام می‌گیرد. هنگام رسیدن به تراز سوراخ، ابتدا سیم‌های نازک متصل به شمع از داخل سوراخ مخزن به سمت گیج‌هایی که بر روی پایه‌یی در کنار مخزن ثابت شده‌اند، هدایت می‌شوند. سیم‌ها مقداری کشیده و سپس به گیج‌ها متصل می‌شوند. این سیم‌ها بسیار نازک‌اند و در صورت کوچک‌ترین ممانعت یا به اصطلاح گیرکردن پاره می‌شوند، به این جهت برای کمینه‌سازی اصطکاک ایجادشده در اثر برخورد سیم با بدنه‌ی مخزن، هادی در محل سوراخ‌های ایجادشده قرار می‌گیرد. بعد از اتمام خاکریزی، سیم مفتولی در ارتفاع  $27^\circ$  میلی‌متری از سطح خاک به شمع متصل می‌شود. گیج الکتریکی در سطح خاک تماس با بدنه‌ی شمع قرار می‌گیرد. با قراردادن وزنه در داخل مخزن کوچک به شمع نیروی جانبی اعمال می‌شود و شمع حول نقطه‌یی دوران می‌کند. در نتیجه، سیم‌های متصل به شمع کشیده می‌شوند و مقدار جابجایی شمع توسط گیج‌ها نمایش داده می‌شود. در هر بارگذاری مقدار نیرو و جابجایی در اعماق متفاوت ثبت می‌شود. تصویر دستگاه آزمایش و همچنین طرح شماتیک آن در شکل ۶ نمایش داده شده است. هر یک از آزمایش‌های انجام‌شده با یک شماره‌ی منحصر به فرد و به صورت  $Ga - L * D$  یا  $Al - L * D$  مشخص شده است. حروف  $Ga$  نشان‌دهنده‌ی گالوانیزه‌بودن و  $Al$  نشان‌دهنده‌ی آلومینیومی‌بودن شمع مورداستفاده است. حرف  $L$  بیان‌گر طول شمع و عدد بعد از آن طول شمع (cm) است. حرف  $D$  بیان‌گر قطر خارجی شمع و عدد بعد از آن قطر شمع (mm) است. آزمایش‌ها در خاک با دو وزن مخصوص متفاوت انجام شده است. فهرست آزمایش‌های انجام‌شده در قسمت نتایج و در جدول‌های ۵ و ۶ قابل مشاهده است.



شکل ۵. منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده.

جدول ۳. زاویه‌ی اصطکاک داخلی (آزمایش برش مستقیم).

زاویه‌ی اصطکاک داخلی (درجه)	تراکم نسبی (%)	وزن مخصوص ( $\text{kN/m}^2$ )
۳۳	$28 \pm 1$	۱۳٫۸
۴۱٫۵	$91 \pm 1$	۱۵

جدول ۴. مشخصات شمع‌های مدل‌شده.

شماره‌ی شمع	وزن ( $\text{kg/m}$ )	مدول یانگ (GPa)	ضخامت دیواره (mm)	قطر خارجی (mm)
۱	۱	۱۹۶	۲٫۴	۲۱٫۷
۲	۱٫۳	۱۹۶	۲٫۴	۲۷
۳	۰٫۴	۶۸	۱٫۴	۲۴٫۸

#### ۲.۵. شمع‌های مورد استفاده

در این آزمایش از لوله‌های گالوانیزه‌ی سفید و لوله‌های آلومینیومی با طول‌های مدفون  $400$ ،  $600$  و  $800$  میلی‌متر به‌عنوان شمع استفاده شده است. این لوله‌ها با قطرهای خارجی  $21.7$ ،  $24.8$  و  $27$  میلی‌متر، دارای ضخامت‌های دیواره‌ی  $1.4$  و  $2.4$  میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. آزمایش کشش بر روی این لوله‌ها انجام شده است، که مشخصات آنها در جدول ۴ مشاهده می‌شود. شمع‌های ۱ و ۲ از جنس گالوانیزه و شمع ۳، نیز از جنس آلومینیوم است.

#### ۳.۵. مخزن خاک

ابعاد مخزن مورد استفاده بر پایه‌ی تأثیر منطقه‌ی تنش باید  $10^\circ$  برابر قطر شمع در جهت اعمال نیرو برای شمع تحت اثر بار جانبی در حالت استاتیکی در نظر گرفته شود.<sup>[۱]</sup> بدین منظور با توجه به شمع‌های مورد استفاده از یک مخزن دایره‌ی به قطر  $700$  میلی‌متر و ارتفاع یک متر استفاده شده است. برای اندازه‌گیری جابجایی افقی

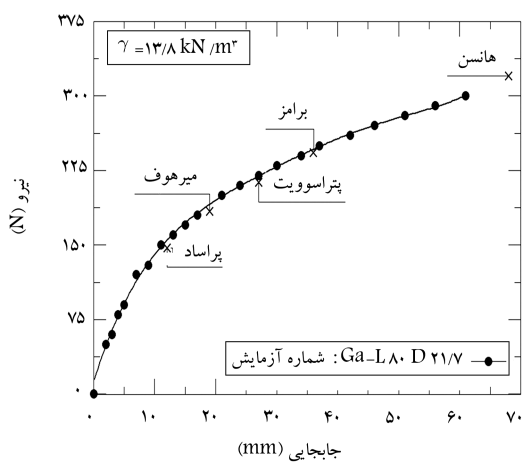
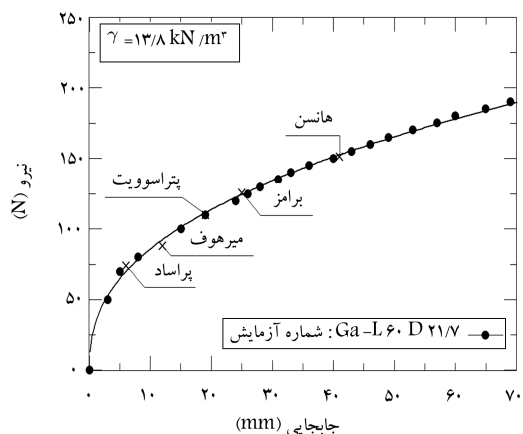
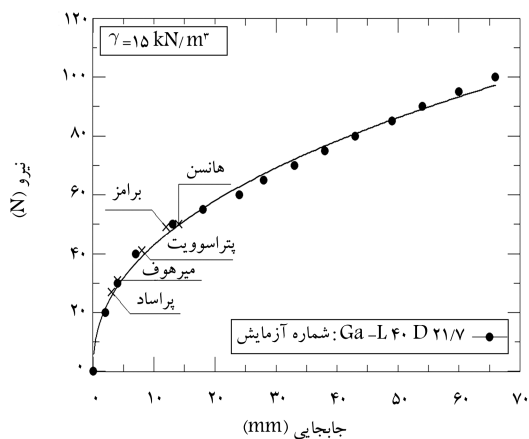
جدول ۵. تخمین ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها.

ظرفیت باربری نهایی (N)							
$\varphi = 33^\circ, \gamma = 13.8 \text{ kN/m}^3, e = 27 \text{ mm}, D = 217 \text{ mm}$							
برامز (% ۲۰ Diameter)	پراساد و چری (Eq. ۱۳)	میرهوف (Eq. ۱۰)	پتراسوسویت (Eq. ۹)	برامز (Fig. ۳)	هانسن (Eq. ۶)	L (mm)	Test No.
۳۰	۲۷	۳۱	۴۱	۴۹	۵۰	۴۰۰	Ga - L۴۰D۲۱۷
۶۲	۷۴	۸۸	۱۱۰	۱۲۶	۱۵۱	۶۰۰	Ga - L۶۰D۲۱۷
۹۵	۱۴۷	۱۸۴	۲۱۳	۲۴۳	۳۲۰	۸۰۰	Ga - L۸۰D۲۱۷
$\varphi = 33^\circ, \gamma = 13.8 \text{ kN/m}^3, e = 27 \text{ mm}, D = 27 \text{ mm}$							
۴۴	۳۴	۳۶	۵۱	۶۰	۵۸	۴۰۰	Ga - L۴۰D۲۷
۹۴	۹۲	۱۰۶	۱۳۶	۱۵۶	۱۷۶	۶۰۰	Ga - L۶۰D۲۷
۱۳۵	۱۸۲	۲۲۱	۲۶۵	۳۰۲	۳۷۵	۸۰۰	Ga - L۸۰D۲۷
$\varphi = 41.5^\circ, \gamma = 15 \text{ kN/m}^3, e = 27 \text{ mm}, D = 217 \text{ mm}$							
۱۱۰	۶۰	۶۷	۶۵	۷۷	۱۳۰	۴۰۰	Ga - L۴۰D۲۱۷
۱۸۰	۱۶۳	۱۹۹	۱۷۵	۱۹۹	۴۱۷	۶۰۰	Ga - L۶۰D۲۱۷
۲۲۰	۳۲۲	۳۹۹	۳۴۱	۳۸۴	۹۲۸	۸۰۰	Ga - L۸۰D۲۱۷*
$\varphi = 41.5^\circ, \gamma = 15 \text{ kN/m}^3, e = 27 \text{ mm}, D = 27 \text{ mm}$							
۱۴۵	۷۴	۷۷	۸۱	۹۵	۱۴۶	۴۰۰	Ga - L۴۰D۲۷
۳۰۰	۲۰۳	۲۳۸	۲۱۸	۲۴۸	۴۶۸	۶۰۰	Ga - L۶۰D۲۷
۳۷۰	۴۰۱	۴۹۰	۴۲۴	۴۷۸	۱۰۴۶	۸۰۰	Ga - L۸۰D۲۷*
$\varphi = 33^\circ, \gamma = 13.8 \text{ kN/m}^3, e = 27 \text{ mm}, D = 247.8 \text{ mm}$							
۴۴	۳۱	۳۳	۴۴	۵۵	۵۵	۴۰۰	Al - L۴۰D۲۴۷.۸
۸۵	۸۵	۹۰	۱۱۷	۱۴۴	۱۵۶	۶۰۰	Al - L۶۰D۲۴۷.۸
۸۵	۱۶۷	۱۸۳	۲۳۰	۲۷۸	۳۳۲	۸۰۰	Al - L۸۰D۲۴۷.۸

\* رفتار این شمع در آزمایش به صورت شمع کوتاه نبوده است.

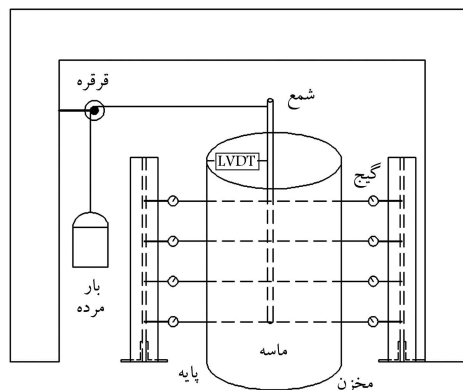
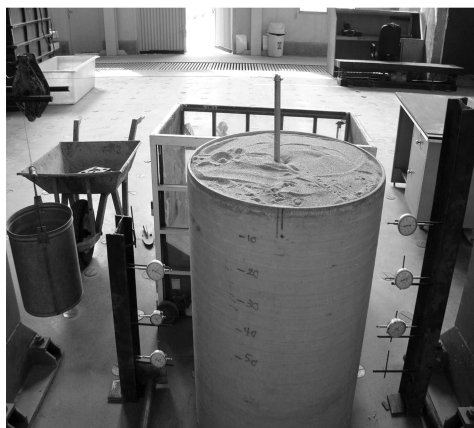
جدول ۶. نقطه‌ی دوران شمع نسبت به سطح خاک تحت اثر بار جانبی.

نقطه دوران نسبت به سطح خاک (mm)				D	$\gamma$	L	Test No.
مشاهده شده	پراساد	پتراسوسویت	هانسن	(mm)	(kN/m <sup>3</sup> )	(mm)	
۳۰۰	۲۹۰	۳۱۰	۳۱۰	۲۱۷	۱۳.۸	۴۰۰	Ga - L۴۰D۲۱۷
۳۱۰	۲۹۰	۳۱۰	۳۱۰	۲۷			Ga - L۴۰D۲۷
۳۱۰	۲۹۰	۳۱۰	۳۱۰	۲۱۷	۱۵	۶۰۰	Ga - L۴۰D۲۱۷
۳۱۰	۲۹۰	۳۱۰	۳۱۰	۲۷			Ga - L۴۰D۲۷
۴۳۰	۴۴۰	۴۴۰	۴۶۰	۲۱۷	۱۳.۸	۶۰۰	Ga - L۶۰D۲۱۷
۴۶۰	۴۴۰	۴۴۰	۴۶۰	۲۷			Ga - L۶۰D۲۷
۴۷۰	۴۴۰	۴۴۰	۴۷۰	۲۱۷	۱۵	۶۰۰	Ga - L۶۰D۲۱۷
۴۳۰	۴۴۰	۴۴۰	۴۷۰	۲۷			Ga - L۶۰D۲۷
۵۹۰	۵۹۰	۶۲۰	۶۴۰	۲۱۷	۱۳.۸	۸۰۰	Ga - L۸۰D۲۱۷
۶۰۰	۵۹۰	۶۲۰	۶۴۰	۲۷			Ga - L۸۰D۲۷
۳۰۰	۲۹۰	۳۰۰	۳۰۰		۱۳.۸	۴۰۰	Al - L۴۰D۲۴۷.۸
۴۴۰	۴۴۰	۴۶۰	۴۷۰	۲۴۷.۸			Al - L۶۰D۲۴۷.۸
۶۰۰	۵۹۰	۶۲۰	۶۳۰			۸۰۰	Al - L۸۰D۲۴۷.۸



شکل ۷. نمودارهای نیرو-جابجایی شمع‌ها در سطح خاک.

قطر ۲۴/۸ میلی‌متر نمایش داده شده است. در تمامی آزمایش‌های صورت‌گرفته، فاصله‌ی اعمال نیروی جانبی تا سطح خاک ۲۷۰ میلی‌متر بوده است. ملاحظه می‌شود که در میان تئوری‌های ارائه‌شده، ظرفیت باربری جانبی شمع که از روش هانسن به‌دست می‌آید، معادل بیشترین جابجایی افقی و پس از آن به‌ترتیب روش برامز، پتراسویت، میرهوف و پراساد دارای بیشترین جابجایی افقی است. روش پراساد کم‌ترین جابجایی افقی را نسبت به بقیه‌ی تئوری‌های دارد. با توجه به آزمایش‌های صورت‌گرفته به‌نظر می‌رسد روش هانسن به‌دلیل داشتن جابجایی زیاد شمع در بیشتر موارد به‌ویژه هنگامی که جابجایی شمع اهمیت بالایی دارد، برای

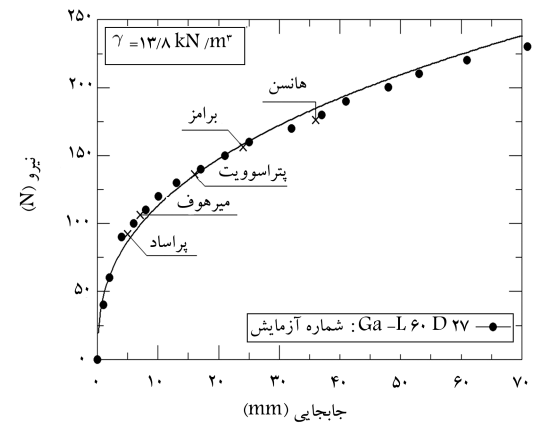
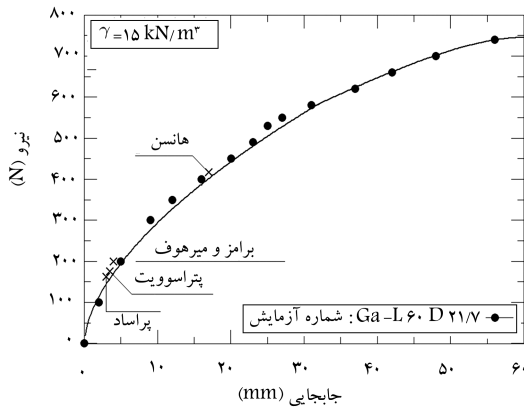
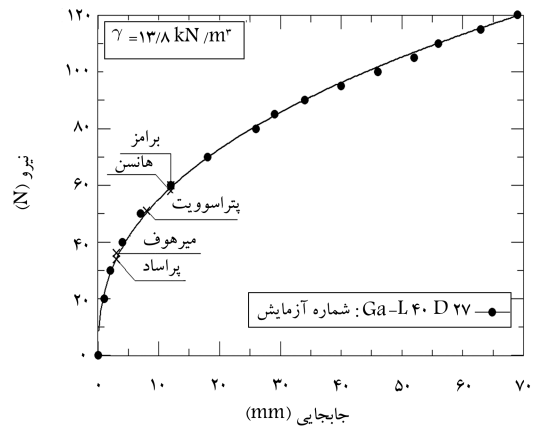
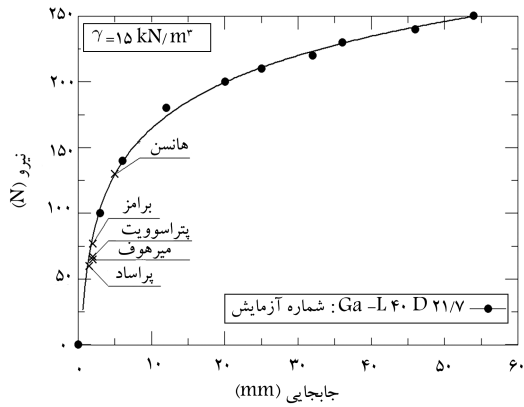


شکل ۶. تصویر و طرح شماتیک دستگاه آزمایش.

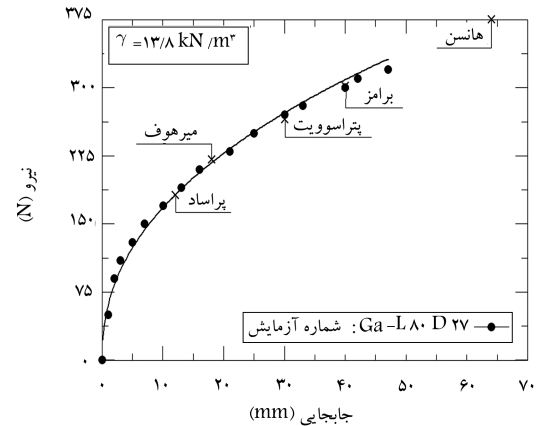
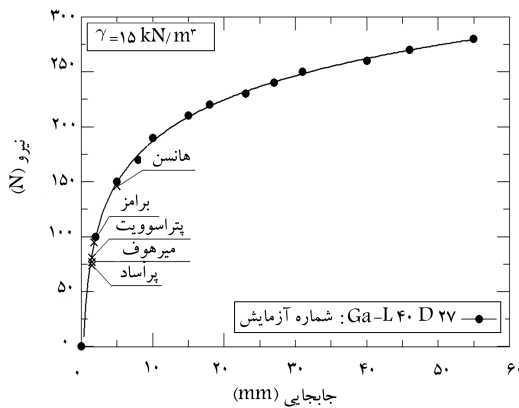
## ۷. نتایج آزمایش‌ها

### ۷.۱. ظرفیت باربری جانبی شمع‌های کوتاه

با توجه به مشخصات به‌دست‌آمده از خاک و شمع، که در جدول‌های ۳ و ۴ ذکر شده است، رفتار شمع‌های مورد آزمایش در تمامی معیارهای بیان‌شده در جدول ۱، به جز روابط ردیف‌های ۳ و ۶، به‌صورت شمع کوتاه پیش‌بینی شده است. مقدار ظرفیت باربری نهایی جانبی شمع‌های مورد آزمایش با استفاده از تئوری‌های بیان‌شده تخمین زده شده است. برای ظرفیت باربری جانبی شمع پیشنهاد شده است در صورت داشتن منحنی نیرو-جابجایی، مقدار بار متناظر با جابجایی برابر با ۲۰٪ قطر به‌عنوان ظرفیت باربری جانبی شمع در نظر گرفته شود.<sup>[۲۳]</sup> این موضوع به‌صورت پیشنهاد است و به‌عنوان یک معیار مورد استفاده‌ی پژوهشگران قرار نگرفته است. مقادیر به‌دست‌آمده از تئوری‌های بیان‌شده در جدول ۵ درج شده است. نتایج به‌دست‌آمده از این تئوری‌ها، که فقط شامل ظرفیت باربری نهایی است و اشاره‌ی به مقدار جابجایی شمع ندارد، بر روی نمودارهای آزمایشگاهی نیرو-جابجایی برای درک و مقایسه‌ی بهتر مشخص شده است. نمودارهای نیرو-جابجایی در سطح خاک برای شمع با قطر ۲۱/۷ میلی‌متر تحت اثر بار جانبی و طول‌های مدفون ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر در خاک ماسه‌ی با وزن مخصوص ۱۳/۸ کیلونیوتن بر مترمکعب در شکل ۷ نمایش داده شده است. نمودارهای مشابه برای قطر ۲۷ میلی‌متر نیز در شکل ۸ قابل مشاهده است. همچنین این نمودارها برای وزن مخصوص ۱۵ کیلونیوتن بر مترمکعب و برای قطرهای ۲۱/۷ و ۲۷ میلی‌متر در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده‌اند. در شکل ۱۱ نیز نمودار نیرو-جابجایی شمع‌های آلومینیمی با



شکل ۹. نمودارهای نیرو - جابجایی شمع‌ها در سطح خاک.

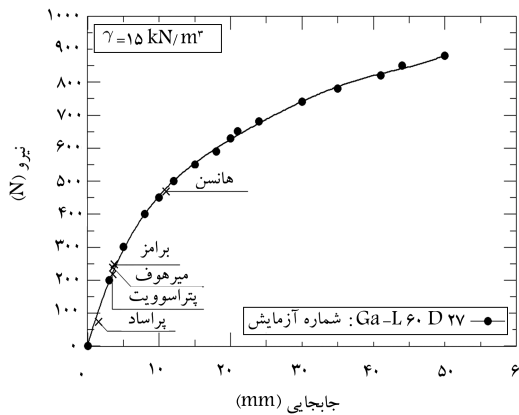


شکل ۸. نمودارهای نیرو - جابجایی شمع‌ها در سطح خاک.

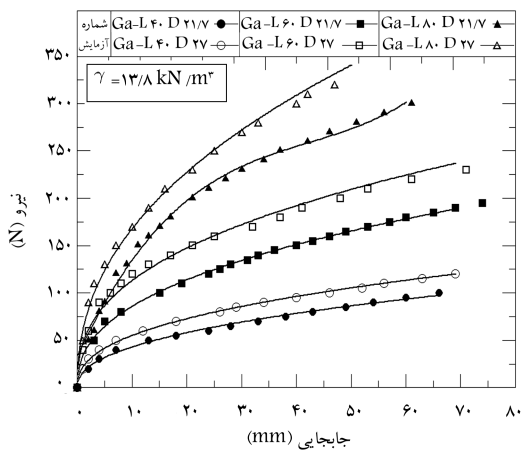
طراحی مناسب نیست و لذا پیشنهاد می‌شود از روش پراساد استفاده شود.

## ۲.۷. نقطه‌ی دوران در شمع‌های کوتاه

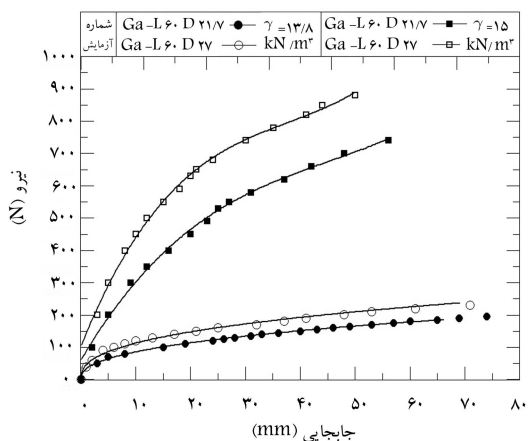
شمع‌های کوتاه بدون پی تحت اثر بار جانبی در نقطه‌ی دوران می‌کنند. این نقطه با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده در داخل خاک همراه با مقادیر به دست آمده از تئوری‌های موجود در جدول ۶ درج شده است. به دلیل تعداد زیاد نمودارها، از آوردن جابجایی‌های اندازه‌گیری شده در داخل خاک خودداری شده است. بین تئوری‌های بیان شده برای محاسبه‌ی نقطه‌ی دوران و مقدار به دست آمده در آزمایش تفاوت زیادی مشاهده نمی‌شود. همچنین با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته ملاحظه می‌شود که



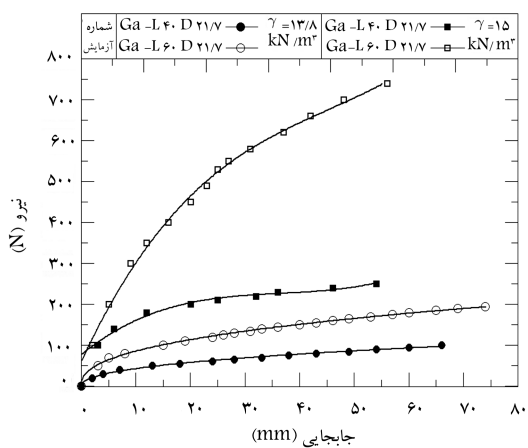
شکل ۱۰. نمودارهای نیرو - جابجایی شمع‌ها در سطح خاک.



شکل ۱۱. اثر قطر و طول شمع در خاک با وزن مخصوص  $13.8 \text{ kN/m}^3$ .

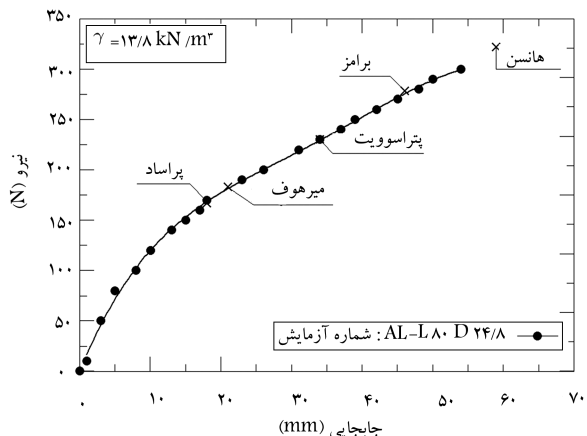
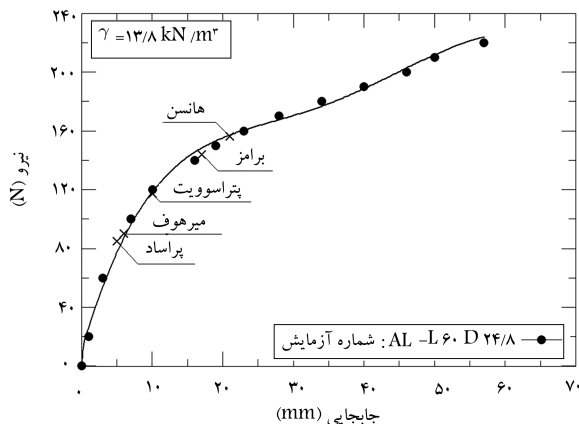
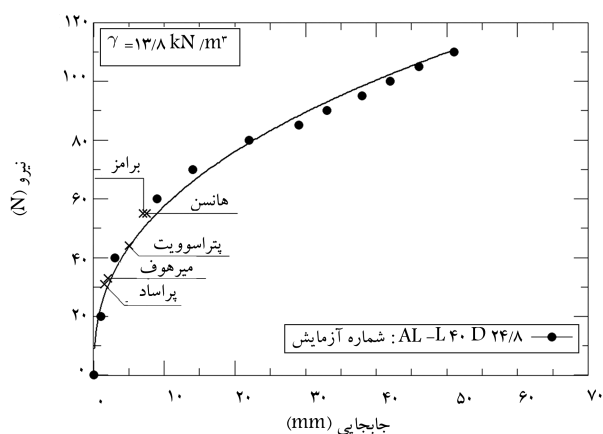


شکل ۱۲. اثر وزن مخصوص خاک و قطر شمع ( $L = 600 \text{ mm}$ ).



شکل ۱۳. اثر وزن مخصوص خاک و طول شمع ( $L = 600 \text{ mm}$ ).

افزایش هر یک از پارامترهای طول، قطر و وزن مخصوص باعث افزایش ظرفیت باربری جانبی شمع می‌شود. با در نظر گرفتن مقدار درصد تغییرات این پارامترها به درصد تغییرات ظرفیت باربری جانبی ملاحظه می‌شود که حساس‌ترین پارامتر وزن مخصوص خاک و بعد از آن طول شمع و در نهایت قطر شمع است. افزایش وزن مخصوص خاک و همچنین افزایش قطر شمع در شمع با طول بلندتر تأثیر بیشتری در افزایش باربری ظرفیت باربری شمع تحت اثر بار



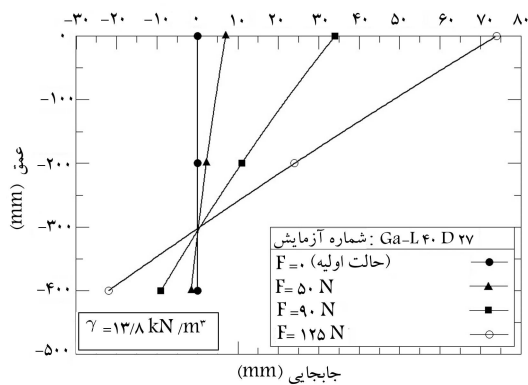
شکل ۱۱. نمودارهای نیرو - جابجایی شمع‌ها در سطح خاک.

با افزایش وزن مخصوص خاک و قطر شمع تغییر زیادی در نقطه‌ی دوران مشاهده نمی‌شود.

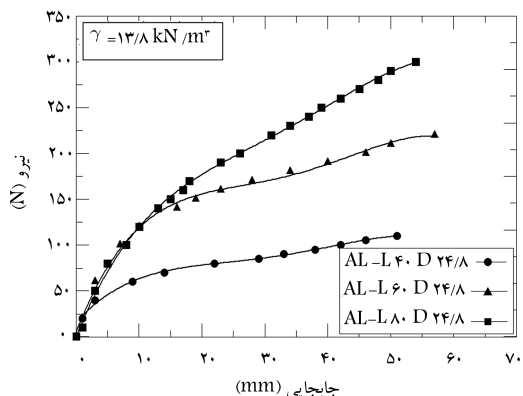
### ۳.۷. رفتار شمع‌های کوتاه

تغییرات طول و قطر شمع در خاک با وزن مخصوص ثابت  $13.8 \text{ kN/m}^3$  کیلونیوتن بر مترمکعب در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همچنین تغییرات وزن مخصوص خاک و قطر شمع با طول ثابت  $600 \text{ mm}$  میلی‌متر و تغییرات وزن مخصوص خاک و طول شمع با قطر ثابت  $24.7 \text{ mm}$  میلی‌متر به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نمایش داده شده است.

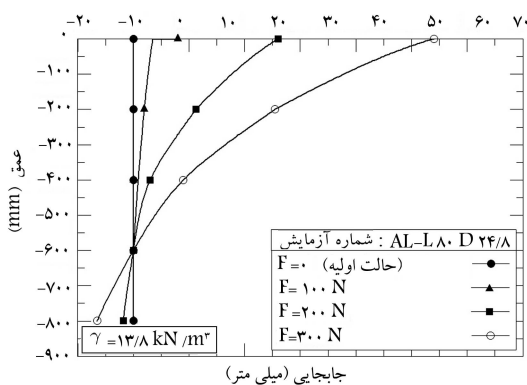




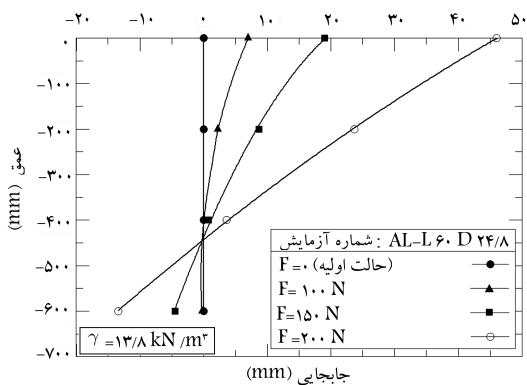
شکل ۱۷. جابجایی افقی شمع در اعماق متفاوت خاک ( $L = 400 \text{ mm}$ ).



شکل ۱۸. اثر طول شمع در خاک با وزن مخصوص  $13/8 \text{ kN/m}^3$ .



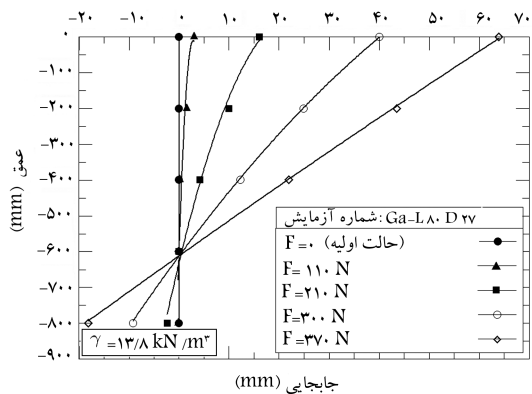
شکل ۱۹. جابجایی افقی شمع در اعماق متفاوت خاک ( $L = 800 \text{ mm}$ ).



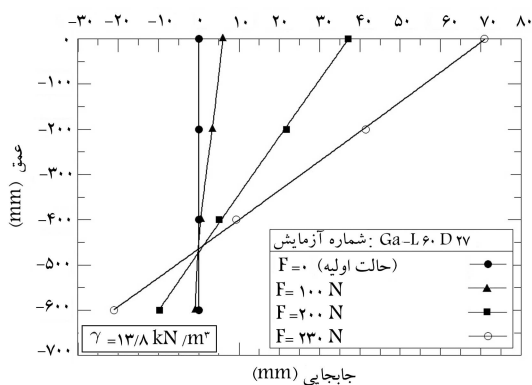
شکل ۲۰. جابجایی افقی شمع در اعماق متفاوت خاک ( $L = 600 \text{ mm}$ ).

جانبی نسبت به همان افزایش وزن مخصوص خاک و قطر در طول‌های کوتاه دارد.

تغییر شکل شمع گالوانیزه در اعماق خاک با طول‌های ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر و قطر ۲۷ میلی‌متری در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ به‌عنوان نمونه در ۴ مرحله از بارگذاری نمایش داده شده است. این نقاط به‌طور پیوسته در طول بارگذاری اندازه‌گیری شده‌اند، که نمودار آنها در اینجا آورده نشده است. نقطه‌ی دوران و همچنین تغییر شکل کشسان نیز در این شکل‌ها به وضوح دیده می‌شود. بدیهی است تغییر شکل کشسان شمع‌های با طول بیشتر (مانند ۸۰۰ میلی‌متر) کاملاً غیرخطی و شمع‌های کوتاه‌تر (مانند ۴۰۰ میلی‌متر) نزدیک به خطی است. تغییر شکل‌های غیرخطی با کوتاه‌تر شدن شمع به دلیل صلب‌تر شدن کاهش می‌یابند. در صورتی که شمع کوتاه و انعطاف‌پذیر باشد (مانند شمع‌های آلومینیمی)؛ قبل از دوران، تغییر شکل‌های کشسان قابل توجهی از خود نشان می‌دهد و سپس شروع به دوران می‌کند که با اندازه‌گیری جابجایی در عمق به وضوح قابل مشاهده است. در شکل ۱۸، نمودار نیرو به جابجایی افقی در سطح خاک و در شکل‌های ۱۹ تا ۲۱، تغییر شکل شمع در عمق خاک برای شمع‌های آلومینیمی با طول‌های ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ میلی‌متر نشان داده شده است. جابجایی این شمع‌ها تحت اثر بار جانبی مشخص در سطح خاک قبل از دوران یکسان است. هنگامی که شمع‌ها شروع به دوران می‌کنند، مقدار جابجایی شمع تحت اثر بار جانبی بستگی به طول مدفون آنها دارد. بدیهی است با افزایش طول مدفون شمع، برای یک جابجایی مشخص، حجم بیشتری از خاک جابجا می‌شود و در نتیجه نیاز به نیروی جانبی بیشتری است. در نهایت می‌توان می‌گفت چگونگی تغییر شکل شمع‌های کوتاه با افزایش صلابت به رفتار شمع‌های ایده‌آل کاملاً صلب، که مبنای

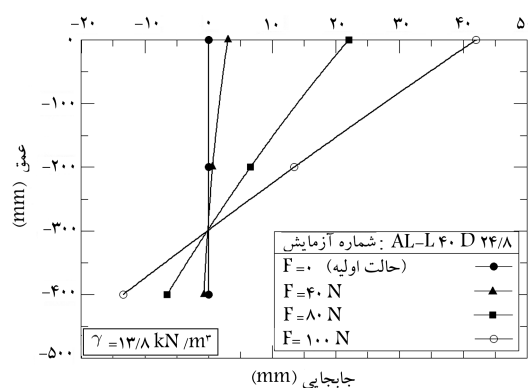


شکل ۱۵. جابجایی افقی شمع در اعماق متفاوت خاک ( $L = 800 \text{ mm}$ ).



شکل ۱۶. جابجایی افقی شمع در اعماق متفاوت خاک ( $L = 600 \text{ mm}$ ).

- برای پیش‌بینی رفتار شمع به لحاظ کوتاه و بلند بودن بهتر است از روابطی استفاده شود که مجموع پارامترهای قطر شمع، طول شمع، سختی شمع و خاک در نظر گرفته شود. روابط برامز و دوبری در این زمینه نسبت به بقیه‌ی روابط ارائه‌شده دقت بیشتری از خود نشان می‌دهند.
- به‌نظر می‌رسد برای تعیین ظرفیت باربری جانبی شمع‌های کوتاه روش پراساد، روش بهتری نسبت به سایر روش‌های ارائه شده است.
- بیشترین ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها در میان روش‌های نام‌برده از روش هانسن به‌دست می‌آید، که با توجه به جابجایی افقی زیاد شمع پیشنهاد می‌شود در مواقعی که تغییر مکان افقی شمع حائز اهمیت است، با احتیاط این روش مورد استفاده واقع شود.
- برای تخمین نقطه‌ی دوران می‌توان از هر یک از تئوری‌های موجود استفاده کرد، ولی روش پراساد سریع‌تر و ساده‌تر نسبت به بقیه‌ی روش‌هاست.
- افزایش قطر و افزایش وزن مخصوص تأثیر زیادی در نقطه‌ی دوران ندارد.
- تغییر وزن مخصوص خاک مؤثرترین پارامتر در ظرفیت باربری جانبی شمع‌های کوتاه است.
- افزایش قطر و افزایش طول شمع، هر دو باعث افزایش ظرفیت باربری شمع می‌شود، ولی افزایش طول تأثیر بیشتری نسبت به افزایش قطر در ظرفیت باربری از خود نشان می‌دهد.
- چگونگی تغییر شکل شمع‌های کوتاه با افزایش صلبیت به رفتار شمع‌های ایده‌آل کاملاً صلب، که مبنای تئوری‌های شمع‌های کوتاه است، نزدیک‌تر می‌شود.



شکل ۲۱. جابجایی افقی شمع در اعماق متفاوت خاک ( $L = 400 \text{ mm}$ ).

تئوری‌های شمع‌های کوتاه است، نزدیک‌تر می‌شود. شمع‌های ایده‌آل صلب تحت اثر بار جانبی تغییر شکل کم‌تری از خود نشان می‌دهند و بلافاصله پس از اعمال نیرو از نقطه‌ی در خاک شروع به دوران می‌کنند.

## ۸. نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایش‌های صورت‌گرفته و مقایسه‌ی انجام‌شده با تئوری‌های موجود می‌توان گفت:

## پانویس‌ها

1. fix head
2. free head

## منابع (References)

1. Poulos, H.G. and Davis, E.H., *Pile Foundation Analysis and Design*, John Wiley and Sons, New York, NY (1980).
2. Hansen, B.J. "The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces", *Danish Geotech. Institute, Bull, Copenhagen 12*, pp. 5-9 (1961).
3. Broms, B. "The lateral resistance of piles in cohesive soils", *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, **90**(SM2), pp. 27-63 (1964a).
4. Broms, B. "The lateral resistance of piles in chesive soils", *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, **90**(SM3), pp. 123-156 (1964b).
5. Petrasovits, G. and Award, A. "Ultimate lateral resistance of a rigid pile in cohesionless soil", *Proc., 5th European Conf. on SMFE, Madrid*, **3**, pp. 407-412 (1972).
6. Meyerhof, G.G., Mathur, S.K. and Valsangkar, A.J. "Lateral resistance and deflection of rigid wall and piles in layered soils", *Canadian Geotech. J.*, **18**(2), pp. 159-170 (1981).
7. Meyerhof, G.G. "Behaviour of pile foundations under special loading conditions", *Canadian Geotech. J.*, **32**(2), pp. 204-222 (1995).
8. Prasad, V.S.N. and Chari, T.R. "Lateral capacity of model rigid piles in cohesionless soils", *Japanese Geotechnical Society*, **39**(2), pp. 21-29 (1999).
9. Reese, L.C. and Matlock, H. "Non-dimensional solutions for laterally loaded piles with soil modulus assumed proportional to depth", *8th Texas Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Austin, TX, pp. 1-41 (1956).
10. Randolph, M.F. "The response of flexible piles to lateral loading", *Geotechnique*, **31**(2), pp. 247-259 (1981).
11. Evans, L.T. and Duncan, J.M. "Simplified analysis of laterally loaded piles", Report No, UCB/GT/82-04, Civil Engineering Department, University of California, Berkeley, CA (1982).
12. Wang, S. "Simplified analysis of laterally loaded piles in cohesionless soils", MS. Thesis, Hawaii University at Manoa, Honolulu (2000).
13. Chang, B.K.F. "Simplified procedure for analysis of laterally loaded single piles and pile groups", MS. Thesis, Hawaii University at Manoa, Honolulu (2003).
14. Kumar, S., Lalvani, L. and Omar, M. "Nonlinear response of single piles in sand subjected to lateral loads using khmax approach", *Geotechnical and Geological Engineering Journal, Springer*, **24**(1), pp. 163-181 (2006).

15. Boominathan, A. and Ayothiraman, R. "An experimental study on static and dynamic bending behavior of piles in soft clay", *Geotechnical and Geological Engineering, Springer*, **25**(2), pp. 177-189 (2007).
16. Bierschwale, M., Coyle, H. and Bartowkewitz, R. "Lateral load tests on drilled shafts founded in clay", *Drilled Piers Caissons, ASCE*, pp. 98-113 (1981).
17. Dobry, R., Vicente, E., O'Rourke, M.J. and Roesset, J.M. "Horizontal stiffness and damping of single piles", *J. Geotech. Eng Div., ASCE*, **108**(3), pp. 439-459 (1982).
18. Davies, T. and Budhu, M. "Nonlinear analysis of laterally loaded piles in heavily over consolidated clay", *Geotechnique*, **36**(4), pp. 527-538 (1986).
19. Poulos, H.G. and Hull, T. "The role of analytical geomechanics current principles and practices", *ASCE*, **2**, pp. 1578-1606 (1989).
20. Terzaghi, K. "Evaluation of coefficient of subgrade reaction", *Geotechnique*, **5**, pp. 297-326 (1955).
21. Berezantsev, V.G. "Axial symmetrical problem of the limit equilibrium theory of granular medium", *Gostekhizdat, Moscow*, pp.81-120 (1952).
22. Movahedifar, M. and Bolouri-Bazaz, J. "An estimation of passive pressure against integral bridge abutments considering arching Effects", *ACTA Geotechnica, Slovenica*, **10**(1) (2013).