

## بررسی رفتار تجربی گروه شمع بلند و کوتاه با هد گیردار تحت بار جانبی

آیسان پورجعفر<sup>۱</sup>، هوشنگ کاتبی<sup>۲\*</sup>، مسعود حاجی‌علیلوی بناب<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد گروه خاک و پی، دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

<sup>۳</sup> استاد دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

(دریافت: ۹۵/۳/۸، پذیرش: ۹۵/۱۱/۵، نشر آنلاین: ۹۵/۱۱/۶)

### چکیده

گروه شمع تحت بار جانبی اغلب یکی از مسائل مهم در بررسی پی‌ها می‌باشد. در گروه شمع تحت بار جانبی، رفتار هر شمع از شمع‌های مجاور تأثیر می‌پذیرد. پارامتر فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها در گروه شمع، اندرکنش شمع-خاک-شمع را تحت تأثیر قرار داده و تعیین کننده در مقاومت جانبی پی‌ها می‌باشد. در تحقیق حاضر با استفاده از روش PIV (Particle Image Velocimetry)، شمع‌های کوتاه و بلند با فواصل متغیر مرکز به مرکز شمع‌ها مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها روی مدلی با مقیاس کوچک در آزمایشگاه انجام شد. در این مدل، گروه شمع 2x1 با فواصل ۱ تا ۴ برابر پهنای شمع درون خاک ماسه‌ای خشک بدانه‌بندی شده که در سست‌ترین حالت قرار داشت، انجام گرفت. شمع‌های مورد استفاده از نوع آلومینیومی بوده و اتصال هد شمع‌ها به کلاهک به صورت گیردار بود. تحلیل و بررسی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فاصله شمع‌ها در گروه از ۱ تا ۴ برابر پهنای شمع، ظرفیت باربری جانبی گروه شمع افزایش می‌یابد، همچنین اثر گروه برای شمع بلند مؤثرتر از شمع کوتاه است.

**کلیدواژه‌ها:** گروه شمع، GeoPIV، اتصال گیردار هد به کلاهک، بار جانبی.

### ۱- مقدمه

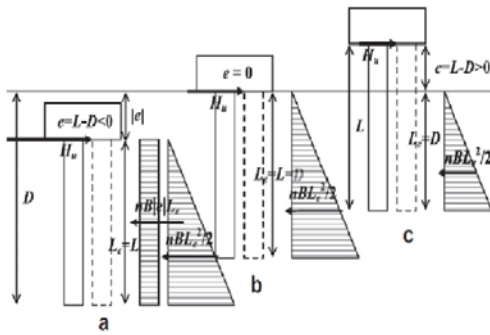
بسیاری از سازه‌ها نیاز به فونداسیون عمیق به منظور استفاده از ظرفیت باربری لایه‌های عمیق‌تر و قوی‌تر خاک دارند. گروه شمع‌ها یک نوع خاص از پی‌های عمیق است که در سازه‌های بزرگ به طور گسترده استفاده می‌شود (Ercann, 2010). چنانچه نسبت نیروهای جانبی به نیروهای قائم اعمال شده به شمع کوچک باشد، از نیروهای جانبی صرفنظر می‌شود. در غیر این صورت تحلیل شمع تحت اثر بار جانبی الزامی بوده و بایستی اثر بار جانبی بر رفتار شمع بررسی شود (مرندی و نیلق، ۱۳۸۳).

Brown و همکاران (۱۹۸۸) نشان دادند هنگامی که هر شمع در گروه شمع تحت بار متوسط مشابه با شمع منفرد قرار گیرد، انحراف گروه شمع مقدار قابل توجهی بیشتر از شمع منفرد مشاهده می‌شود. علاوه بر این، موقعیت ردیف در بازده شمع‌ها اثر می‌گذارد. شمع‌های ردیف جلو (ردیف پیشرو) در پاسخ به بار سخت‌تر از ردیف عقبی (ردیف دوم و سوم) هستند. با این حال، هیچ الگویی برای موقعیت شمع در یک ردیف مشاهده نشده است. این محققین نتایج تجربی و محاسبه شده منحنی‌های  $P-\gamma$  را برای شمع منفرد مقایسه کردند.

Rollins و همکاران (۲۰۰۶) اثرات اندرکنش گروه شمع با

توجه به فاصله شمع‌ها در گروه تحت بار جانبی را مورد آزمایش و بررسی قرار دادند. به منظور بررسی رفتار، مقیاس کامل آزمایش‌های تحت بار جانبی متناوب در گروه شمع‌های 3x3، 3x4 و 3x5 در خاک رس سخت با فواصل 4.4D، 3.3D و 5.65D انجام شد (D برابر با قطر شمع). خاک مورد آزمایش به طور کلی لایه‌های رس سخت همراه با لایه‌های ماسه می‌باشد که چگالی متوسط دارند ( $D_r=60\%$ ) و عمقشان 5m است. رولینز و همکاران در سال ۲۰۰۶ نشان دادند که مقاومت در برابر بار جانبی تابعی از فاصله شمع‌هاست. در حالی که با کاهش فاصله شمع از 5.65D تا 3.3D، اثر اندرکنش گروه شمع به تدریج مهم‌تر شد. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که شمع‌های ردیف جلو (ردیف اول) در گروه بیشترین بار را تحمل می‌کنند، در حالی که شمع‌های ردیف عقب (ردیف‌های دوم تا پنجم)، بار کمتری را برای همان مقدار جابجایی تحمل می‌کنند. برای این گروه شمع در خاک رس، موقعیت ردیف در گروه، نسبت به محل آن در یک ردیف اثر قابل توجهی در مقاومت جانبی دارد. بسیاری از مطالعات مدل سانتریفیوژ در گروه شمع تحت بار جانبی در پروفیل خاک متشکل از لایه‌های ماسه انجام شده

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۳۳۹۲۵۵۳



شکل ۱- شمع‌های کوتاه با هد گیردار تحت بار جانبی

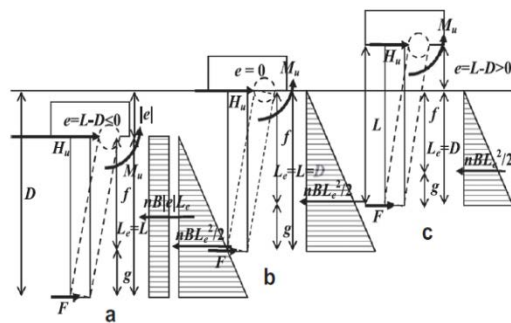
(Simone, ۲۰۱۲)

$$H_u = nB|e|L_e + nB \frac{Le^2}{2} \quad (e \leq 0) \quad (4)$$

$$H_u = nB \frac{Le^2}{2} \quad (e \geq 0) \quad (5)$$

در حالت متوسط، لولای پلاستیکی به شکل اتصال شمع-کلاhek همراه با امکان چرخش شمع حول یک نقطه نزدیک به پای شمع رخ می‌دهد. با ساده‌سازی برامز یعنی فرض چرخش حول نوک شمع متوسط، مکانیسم فروپاشی و عکس‌العمل نسبی خاک در شکل (۲) نشان داده شده است. تعادل لنگر خمشی نسبت به پای شمع به صورت رابطه (۶) نوشته شده است.

$$\frac{H_u RI}{nB^3} \left[ \frac{Le}{B} + (1-k) \frac{e}{B} \right] = \frac{1}{6} \left( \frac{Le}{B} \right)^3 + k \frac{1}{2} \left( \frac{Le}{B} \right)^2 \left| \frac{e}{B} \right| + \frac{M_u}{nB^4} \quad (6)$$



شکل ۲- شمع‌های متوسط با هد گیردار تحت بار جانبی

(Simone, ۲۰۱۲)

برای شمع بلند با هد گیردار دو لولای پلاستیکی مطابق شکل (۳) تشکیل می‌شود. لولای پلاستیکی دوم در عمق  $f_c^R$  شکل می‌گیرد. در شکل (۳) مکانیسم فروپاشی و واکنش خاک برای سه حالت شمع بلند نشان داده است.

است. Ilyas و همکاران (۲۰۰۴) مطالعاتی در گروه شمع تحت بار جانبی در خاک رس انجام داده است. آزمون مدل سانتریفیوژ در هر دو خاک رس کائولن عادی تحکیم یافته و بیش تحکیم یافته، انجام شد. شمع‌ها به طور منظم و متقارن در گروه شمع 2x1, 2x2, 2x3 و 2x4 با فواصل شمع 3Δ و 5Δ (Δ برابر با عرض شمع) مورد آزمایش قرار گرفتند. در نهایت به این نتیجه رسیدند که، با افزایش تعداد شمع‌ها در گروه شمع تحت بار جانبی، متوسط بار جانبی هر شمع کاهش یافته است. همچنین نتایج نشان داد که کاهش اثر گروه، برای شمع‌های نصب شده در رس بیش تحکیم یافته، نسبت به شمع‌های نصب شده در رس عادی تحکیم یافته کمتر محسوس است. برای گروه شمع با فاصله‌های شمع 3Δ که در هر دو خاک رس عادی تحکیم یافته و رس بیش تحکیم یافته نصب شده است نیز با افزایش تعداد شمع‌ها در گروه، اثر گروه کاهش یافته و به طور معمول با فاصله‌های زیاد شمع (5Δ)، اثر گروه از بین می‌رود.

Simone (۲۰۱۲) روش برامز برای شمع‌های تحت بار جانبی را برای شمع‌های با هد گیردار و ترازهای مختلف، در خاک‌های چسبنده و غیر چسبنده تعمیم داده است. مسئله مقاومت جانبی نهایی خاک برای خاک‌های چسبنده با استفاده از قانون خطی توسط برامز در سال ۱۹۶۴ با رابطه (۱) نوشته شده است و بارتون در سال ۱۹۸۲ با یک ضریب متفاوت تقریب بهتری به این قانون خطی داده است که با رابطه (۲) آورده شده است. فلمینگ و همکاران در سال ۲۰۰۹ یک بیان کلی برای قانون خطی پیشنهاد کرده‌اند که مطابق با رابطه (۳) می‌باشد. در این روابط  $P_u$  مقاومت نهایی جانبی خاک،  $K_p$  ضریب رانکین پاسیو فشار زمین،  $\gamma$  وزن واحد خاک،  $z$  عمق نسبت به سطح زمین و  $B$  قطر شمع می‌باشد.

$$P_u = 3K_p \gamma z B \quad (1)$$

$$P_u = K_p^2 \gamma z B \quad (2)$$

$$P_u = n z B \quad (3)$$

در این منبع روابط برای شمع در سه مورد شمع کوتاه، متوسط و بلند آورده شده است.  $H_u$  ظرفیت بار جانبی شمع می‌باشد. در شمع کوتاه لولای پلاستیکی تشکیل نشده و شمع به همراه کلاhek به صورت یک جسم صلب عمل می‌کند. عکس‌العمل خاک برای شمع کوتاه در حالت  $e=0$ ،  $e>0$  و  $e<0$  به ترتیب در شکل (۱) نشان داده شده است.

یکی از موارد قابل توجه در ساخت مدل‌های فیزیکی رعایت یکنواختی مدل و پیوستگی در ریختن ماسه به منظور تراکم یکسان در تمام قسمت‌های جعبه می‌باشد. سعی شده است که برای همه آزمایش‌ها مقدار تقریباً یکسانی داشته باشد. شکل (۴) نمای شماتیکی از آزمایش نشان می‌دهد.

## ۲-۲- ماسه مورد آزمایش

جهت انجام آزمایش‌ها از ماسه خشک ناحیه شمال غرب شهر تبریز (صوفیان) واقع در شمال غرب ایران استفاده شده است. ماسه مورد استفاده بر اساس طبقه‌بندی متحد که مورد تأیید استاندارد ASTM نیز می‌باشد، دانه‌بندی یکنواخت داشته و ماسه بدانه‌بندی شده (SP) می‌باشد. مشخصات ماسه مورد آزمایش در جدول (۱) نشان داده شده است. ماسه مورد استفاده به علت رنگ‌های مختلف ذرات، نور و سایه‌ای بین ذرات مجاور ایجاد می‌کند که نتایج حاصل از تحلیل PIV را بالا می‌برد.

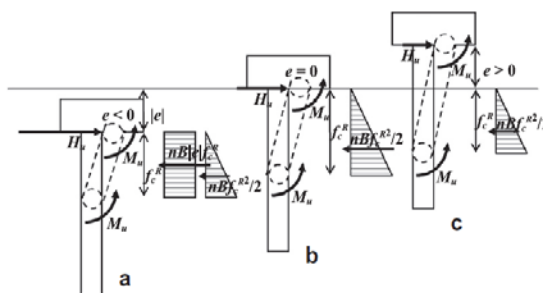
جدول ۱- مشخصات ماسه مورد آزمایش

G <sub>s</sub>	γ <sub>d min</sub>	γ <sub>d max</sub>	Φ	C <sub>c</sub>	C <sub>u</sub>	مشخصات ماسه
2.637	1448	1708	28°	0.87	1.36	(Kg/m <sup>3</sup> ) (Kg/m <sup>3</sup> )

## ۲-۳- شمع‌های مورد آزمایش

همان‌طور که در شکل (۴) دیده می‌شود، مقطع شمع‌ها به شکل مستطیلی انتخاب شده است و ضخامت ( $t$ ) نسبت به پهنا ( $2B$ ) کمتر در نظر گرفته شده است. شمع‌ها از وجه  $Lt$  به قسمت طلق شیشه‌ای جلوی جعبه تکیه داده می‌شوند و شمع در جهت محور ضعیف تحت بارگذاری قرار گیرد. همچنین به دلیل مدول الاستیسیته کمتر آلومینیوم نسبت به فولاد، شمع‌های آلومینیومی مورد استفاده قرار گرفته است تا تغییرشکل‌ها به طور محسوس‌تری مشاهده شود. مقطع شمع‌ها دارای تقارن محوری بوده و رفتار شمع فقط در نیمی از مقطع شمع (یعنی عرض شمع برابر با  $B$ ) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

برای خاک‌های دانهای، مدول خاک نسبت به عمق افزایش می‌یابد که برابر با رابطه (۱۱) می‌باشد. در این رابطه EI سختی خمشی شمع و  $nh$  ضریب تغییرات مدول عکس‌العمل بستر افقی می‌باشد که به صورت تجربی حدود  $2\text{MN/m}^3$  در نظر گرفته شده است.



شکل ۳- شمع‌های بلند با هد گیردار تحت بار جانبی

(Simone, ۲۰۱۲)

برای حل  $f_c^R$  از تعادل لنگر استفاده شده است و سپس  $H_u$  از تعادل افقی محاسبه می‌شود. تعادل لنگر قسمت فوقانی شمع (بالتر از مفصل پلاستیک دوم) نسبت به هد شمع رابطه (۷) را می‌دهد که در مورد شمع استقرار یافته در زمین می‌باشد و در مورد شمع بالاتر از سطح زمین رابطه (۸) برقرار می‌باشد.

$$\left( \frac{f_c^R}{B} \left| \frac{e}{B} \right| \right) \frac{1}{2} \frac{f_c^R}{B} + \frac{1}{2} \left( \frac{f_c^R}{B} \right)^2 \frac{2}{3} \frac{f_c^R}{B} - \frac{2M_u}{nB^4} = 0 \quad \left( \frac{e}{B} \leq 0 \right) \quad (7)$$

$$\frac{1}{2} \left( \frac{f_c^R}{B} \right)^2 \left( \frac{2}{3} \frac{f_c^R}{B} + \frac{e}{B} \right) - \frac{2M_u}{nB^4} = 0 \quad \left( \frac{e}{B} \geq 0 \right) \quad (8)$$

از تعادل افقی در قسمت فوقانی شمع بلند، ظرفیت بار جانبی شمع به صورت روابط (۹) و (۱۰) به دست می‌آید.

$$\frac{H_u}{nB^3} = \frac{1}{2} \left( \frac{f}{B} \right)^2 + \frac{f}{B} \left| \frac{e}{B} \right| \quad \left( \frac{e}{B} \leq 0 \right) \quad (9)$$

$$\frac{H_u}{nB^3} = \frac{1}{2} \left( \frac{f}{B} \right)^2 \quad \left( \frac{e}{B} \geq 0 \right) \quad (10)$$

## ۲- روش‌ها و تجهیزات

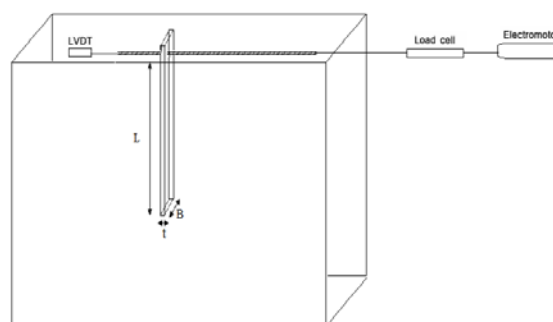
### ۲-۱- جعبه آزمایش

یک جعبه چوبی به ابعاد  $70 \times 80 \times 30 \text{ cm}^3$  از جنس چوب هفت لای اندونزی به ضخامت  $18 \text{ mm}$  به عنوان جعبه آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. دلیل انتخاب این جنس چوب، صلبیت زیاد آن می‌باشد. یک طلق شفاف از جنس Plaxiglass به ابعاد  $80 \times 70 \text{ cm}^2$  و ضخامت  $20 \text{ mm}$  در وجه جلویی جعبه جهت مشاهده تغییرشکل‌های ایجاد شده در خاک استفاده شد.

مهره‌ها در تراز ۳ سانتی‌متر بالاتر از تراز سطح خاک قرار می‌گرفتند و طول استقرار شمع در داخل خاک به عنوان طول گیرداری در نظر گرفته شده است. برای پیگیری تغییر مکان نقاط مختلف در راستای طول شمع حین بارگذاری، وجهی از شمع که به طلق شیشه‌ای تکیه می‌کند با کاغذ میلی‌متری پوشانده شد و روی محور مرکزی این وجه نقاطی به فواصل ۱ سانتی‌متر مشخص شد. برای جلوگیری از خطاهای ناشی از تغییرات نور فضای پشت جعبه آزمایش در تحلیل نتایج، پشت جعبه آزمایش یک مقوای سیاه که نور از آن عبور نمی‌کند، نصب شد. شکل (۵) نمایی از توضیحات مربوط به شرایط آزمایش را نشان می‌دهد و مشخصات کلی شمع‌های بلند و کوتاه مورد استفاده در آزمایش‌ها به ترتیب در جدول (۳) و جدول (۴) آمده است.



شکل ۵- نمایی از شرایط آزمایش و شمع‌های استفاده شده



شکل ۴- نمای شماتیک آزمایش

$$T = \sqrt[5]{\left(\frac{EI}{n_h}\right)} \quad (11)$$

جهت انجام آزمایش‌های لازم برای بررسی تأثیر دو مشخصه گروه شمع (فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها و طول شمع) در رفتار خاک اطراف، از دو سری شمع با مشخصات مختلف استفاده شد. مشخصات آلومنیوم استفاده شده برای شمع‌های بلند مطابق با جدول (۲) می‌باشد.

### ۲-۳- شمع‌های مورد آزمایش

برای ایجاد گروه شمع، دو شمع در یک ردیف در امتداد بار جانبی قرار داده می‌شد و توسط کلاهکی به هم وصل شدند که برای این منظور از یک پیچ M8 به طول ۲۰ سانتی‌متر استفاده شد. این پیچ توسط مهره‌ای عریض به امتداد میله اعمال نیرو بسته می‌شد. شمع‌ها در محل لازم برای استقرار توسط دو واشر به قطر ۳ سانتی‌متر (برابر با عرض شمع) و دو مهره در طرفین شمع، فیکس می‌شود تا باعث اتصال گیردار مدل شود. پیچ و

جدول ۳- مشخصات شمع بلند

شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵	۶
طول L (cm)	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰
پهنا B (cm)	۳	۳	۳	۳	۳	۳
ضخامت t (cm)	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲
سختی خمشی EI (kg.cm <sup>2</sup> )	۱۴۲۷/۱	۱۴۲۷/۱	۱۴۲۷/۱	۱۴۲۷/۱	۱۴۲۷/۱	۱۴۲۷/۱
فاکتور طول T (cm)	۵/۹	۵/۹	۵/۹	۵/۹	۵/۹	۵/۹
L/T	۵/۰۸	۵/۰۸	۵/۰۸	۵/۰۸	۵/۰۸	۵/۰۸
S (cm) فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها	شمع منفرد	B۱	B۲	B۳	B۴	شمع منفرد

جدول ۴- مشخصات شمع کوتاه

شماره آزمایش	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
طول L (cm)	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
پهنا B (cm)	۳	۳	۳	۳	۳	۳
ضخامت t (cm)	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
EI (kg.cm <sup>2</sup> ) سختی خمشی	۲۲۲۹۸/۷	۲۲۲۹۸/۷	۲۲۲۹۸/۷	۲۲۲۹۸/۷	۲۲۲۹۸/۷	۲۲۲۹۸/۷
T فاکتور طول (cm)	۱۰/۲۲	۱۰/۲۲	۱۰/۲۲	۱۰/۲۲	۱۰/۲۲	۱۰/۲۲
L/T	۱/۹۶	۱/۹۶	۱/۹۶	۱/۹۶	۱/۹۶	۱/۹۶
S (cm) فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها	شمع منفرد	B <sub>۱</sub>	B <sub>۲</sub>	B <sub>۳</sub>	B <sub>۴</sub>	شمع منفرد

نزدیک‌ترین شمع به محل اعمال نیروی جانبی در اصطلاح شمع عقب<sup>۱</sup> و دورترین شمع نسبت به آن، شمع جلو<sup>۲</sup> نامیده می‌شود.

از یک دوربین دیجیتال Canon از نوع Power shut G<sub>6</sub> با وضوح تصویر ۷/۱ مگا پیکسل (۳۰۷۲ × ۲۳۰۴) برای عکس-برداری استفاده گردید. دوربین روی سه پایه قرار داده شده و نسبت به سطح افق تراز می‌شد. ارتفاع پایه طوری تنظیم می‌شد که دوربین به طور عمود منطبق بر محدوده مورد بررسی قرار بگیرد. برای این که عکس‌ها در یک فاصله زمانی مشخص گرفته شود، عکس‌برداری با استفاده از نرم‌افزار Remote capture در فواصل زمانی ۳۰ ثانیه گرفته و ذخیره می‌شد. برای تأمین نور محیط، از دو عدد پروژکتور ۱۰۰۰ وات مخصوص نورپردازی استفاده گردید که با زاویه ۴۵ درجه در تراز ارتفاعی بالاتر نسبت به محور نوری دوربین مستقر گردیدند.

Geo PIV مدولی از نرم‌افزار MatLab است که ابزاری برای سرعت‌سنجی ذرات تصویر می‌باشد. علاوه بر این مطابقت خوبی با آزمایش‌های ژئوتکنیکی دارد. Geo PIV با استفاده از عکس-برداری سریع از اجزای خاک، مقدار تغییر مکان‌ها را اندازه-گیری می‌کند (White و همکاران، ۲۰۰۳).

### ۳- مشاهدات آزمایش

#### ۳-۱- مقایسه زاویه بردارهای جابجائی ایجاد شده در سطح خاک

نمودارهای این قسمت زاویه بردارهای جابجایی دانه‌های سطح خاک (ردیف اول مش‌بندی خاک) را نشان می‌دهند. در تمام این نمودارها، محور افقی در امتداد فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها بوده و نقطه (X/B=0) یعنی مبدأ محور افقی مربوط به محل استقرار شمع در مورد شمع منفرد بوده و در مورد گروه شمع این نقطه مربوط به محل استقرار شمع عقب است. محور

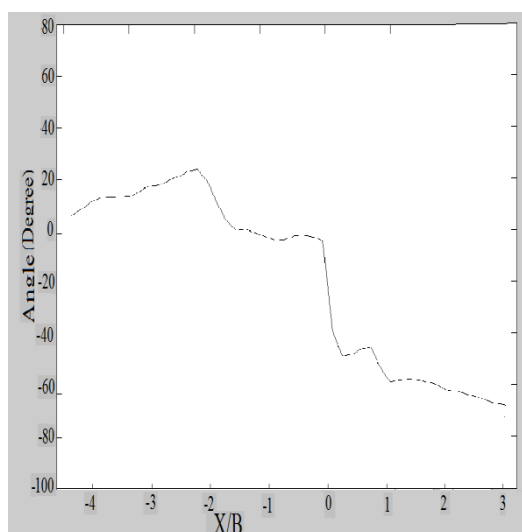
در این پروژه ۱۲ آزمایش انجام گرفت که ۶ آزمایش مربوط به شمع بلند و ۶ آزمایش مربوط به شمع کوتاه می‌باشد که در هر سری، ۲ آزمایش روی شمع منفرد و ۴ آزمایش روی گروه شمع صورت گرفت. فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها در گروه در امتداد محور اعمال نیروی جانبی، 1B، 2B، 3B و 4B انتخاب گردید. آزمایش‌ها بر روی دو شمع منفرد یکی نزدیک به بار و دیگری که به فاصله 4B از آن قرار داشت، انجام شد. دو آزمایش (آزمایش ۱ و ۶) بر روی شمع منفرد بلند و دو آزمایش (آزمایش ۷ و ۱۲) بر روی شمع منفرد کوتاه انجام گرفت.

در کلیه آزمایش‌ها، جهت بارگذاری جانبی شمع از یک الکتروموتور با سرعت ثابت ۰/۷۸ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است. این نیرو به صورت استاتیکی بوده و توسط دستگاه برش مستقیم از راست به چپ وارد می‌شد. لازم به توضیح است که در همه آزمایش‌ها، شمع‌ها با اتصال گیردار هد به کلاهک مورد آزمایش قرار گرفته است. نیروی مورد نیاز با استفاده از اهرمی به کلاهک شمع در فاصله ۳cm از سطح خاک وارد می‌شد.

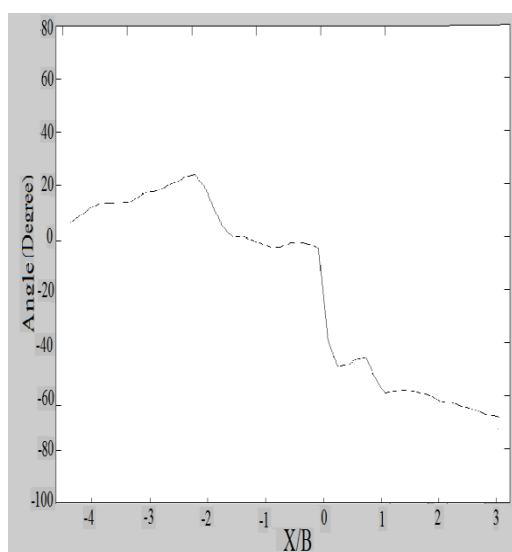
در هر آزمایش دو پارامتر مختلف اندازه‌گیری و ثبت شده است که یکی از این پارامترها تغییر مکان افقی کلاهک شمع‌ها در اثر اعمال نیروی جانبی می‌باشد. برای این منظور از یک عدد LVDT در کلاهک شمع‌ها استفاده گردید که دیتاهای آن در رایانه ثبت می‌شد. پارامتر اندازه‌گیری شده دیگر، میزان نیروی وارده بر کلاهک شمع می‌باشد که با استفاده از سنسور نیرو (Load cell) میزان نیروی وارده بر کلاهک شمع در رایانه ثبت می‌شد. این داده‌ها به کمک نرم‌افزار DASyLab در فاصله‌های زمانی ۱۰ ثانیه در رایانه ثبت می‌شد. اطلاعات ثبت شده توسط سیستم Load cell و LVDT به صورت ولتاژ الکتریکی هستند که در نهایت به واحدهای قابل درک نیرو و جابجایی تبدیل شده است. لازم به ذکر است که کلیه آزمایش‌ها با کنترل جابجائی به میزان ۱۰mm انجام گردید.

1. Trail Pile  
2. lead pile

در مورد گروه شمع، در پشت شمع عقب بردارهای جابجایی با زوایای تند رو به پایین حرکت می‌کنند و در جلوی شمع جلو این بردارها با زوایای تند رو به بالا حرکت می‌کنند. در مواردی که فاصله شمع‌ها در گروه کم باشد، بردارهای جابجایی مربوط به فاصله بین دو شمع تقریباً برابر با صفر می‌باشد که نشان دهنده حرکت افقی بردارهای جابجایی در امتداد بار می‌باشد و در مواردی که فاصله شمع‌ها در گروه بیشتر شود، بردارهای جابجایی جلوی شمع عقب نیز رو به بالا و بردارهای جابجایی پشت شمع جلو رو به بالا حرکت می‌کنند.

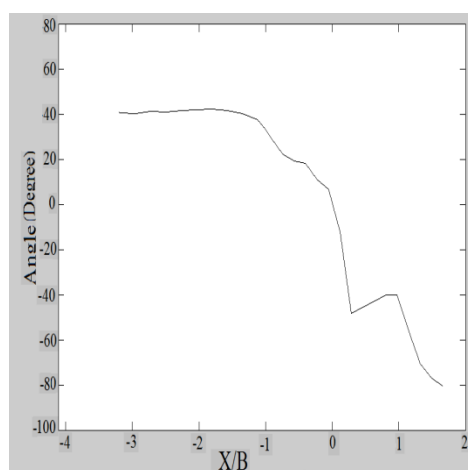


شکل ۸- زاویه بردارهای جابجایی سطح خاک گروه شمع بلند در فاصله 1B

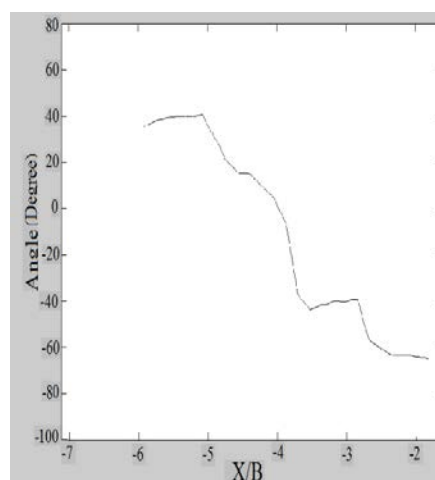


شکل ۹- زاویه بردارهای جابجایی سطح خاک گروه شمع بلند در فاصله 2B

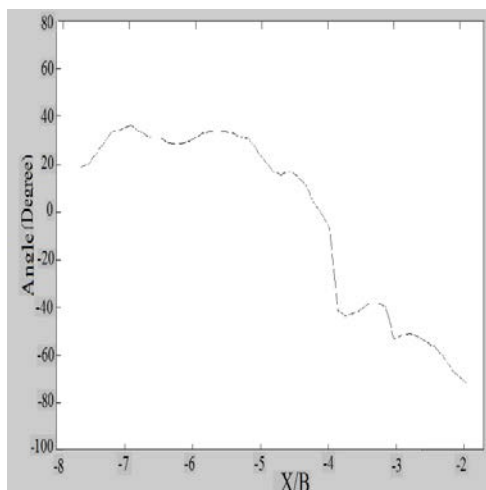
قائم زاویه بردارهای جابجایی دانه‌های خاک را نسبت به افق بر حسب درجه نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که نمودار برای بردارهایی که اندازه آن‌ها ۰/۰۵ سانتی‌متر و یا بیشتر است، ترسیم شده است. زوایای رو به پایین پشت شمع با مقادیر منفی و زوایای رو به بالای جلوی شمع با مقادیر مثبت نشان داده شده است. در نمودارهای شکل (۶) و (۷) که برای شمع‌های منفرد بلند و نمودارهای شکل (۱۲) و (۱۳) که برای شمع‌های منفرد کوتاه ترسیم شده است، ملاحظه می‌شود که در محل شمع‌ها به دلیل تغییرجهت ناگهانی بردارهای جابجایی (یا تغییرعلامت زاویه بردارهای جابجایی) یک پرش ناگهانی در نمودارها رخ داده است. با توجه به شکل (۸) تا (۱۱) که برای گروه شمع‌های بلند و شکل (۱۴) تا (۱۷) که برای گروه شمع‌های کوتاه ترسیم شده است، در مورد شمع عقب این تغییر جهت و پرش ناگهانی بردارها نسبت به شمع جلو قابل ملاحظه‌تر است که به دلیل نزدیکی به بار می‌باشد.



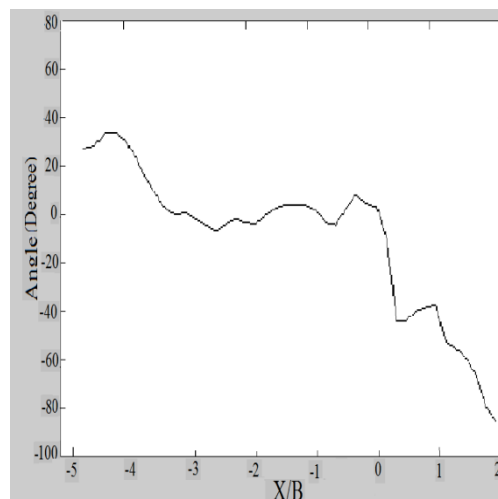
شکل ۶- زاویه بردارهای جابجایی سطح خاک شمع منفرد بلند



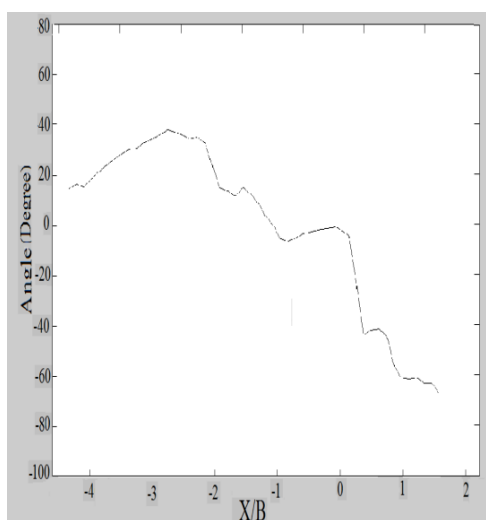
شکل ۷- زاویه بردارهای جابجایی سطح خاک شمع منفرد بلند در فاصله 4B



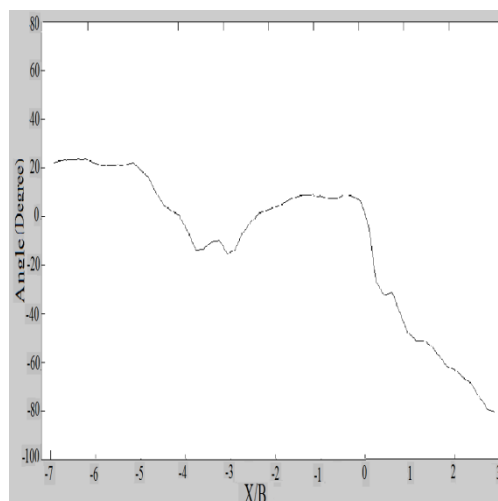
شکل ۱۳- زاویه بردارهای جابجائی سطح خاک شمع منفرد کوتاه در فاصله 4B



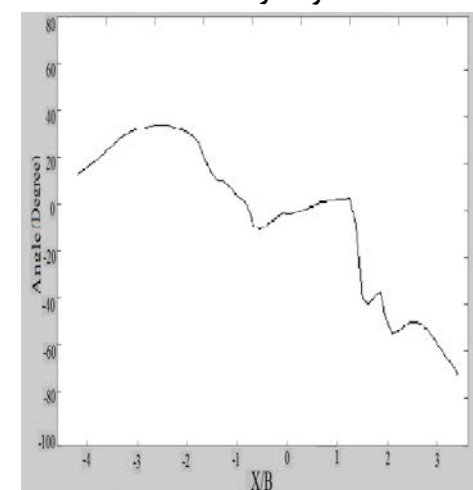
شکل ۱۰- زاویه بردارهای جابجائی سطح خاک گروه شمع بلند در فاصله 3B



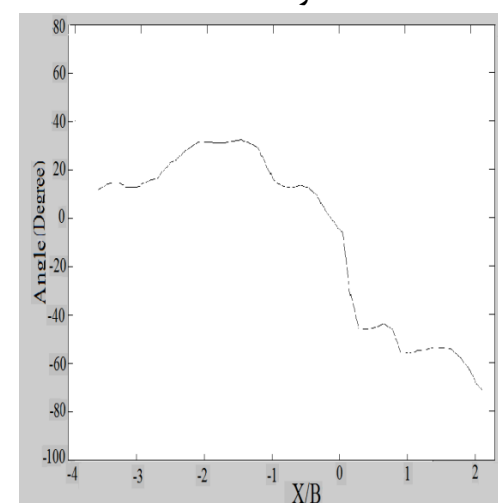
شکل ۱۴- زاویه بردارهای جابجائی سطح خاک گروه شمع کوتاه در فاصله 1B



شکل ۱۱- زاویه بردارهای جابجائی سطح خاک گروه شمع بلند در فاصله 4B



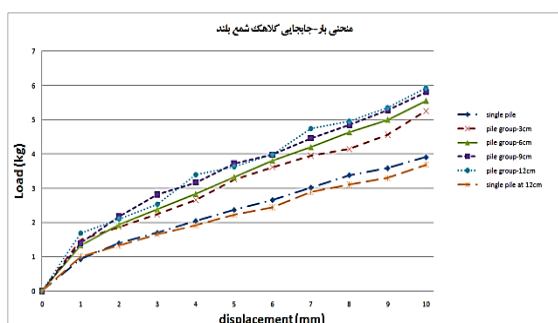
شکل ۱۵- زاویه بردارهای جابجائی سطح خاک گروه شمع کوتاه در فاصله 2B



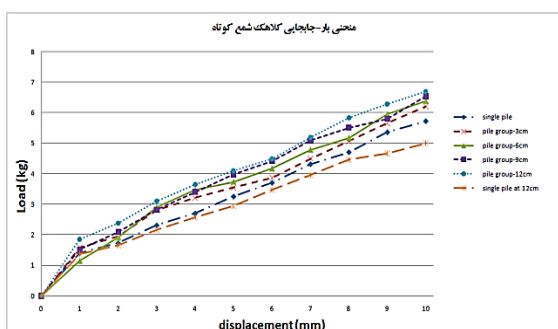
شکل ۱۲- زاویه بردارهای جابجائی سطح خاک شمع منفرد کوتاه

۲-۳- مقایسه منحنی بار-جابجایی برای هد شمع

در شکل (۱۸) و (۱۹) منحنی بار-جابجایی هد شمع به ترتیب برای آزمایش‌های مربوط به شمع بلند و کوتاه ترسیم شده است. برای بررسی بهتر میزان بار جانبی اعمال شده برای تغییر مکان ۱۰ میلی‌متر در هد شمع برای شمع‌های کوتاه و بلند به ترتیب در جدول (۵) آورده شده است. شیب نسبتاً زیادتر در قسمت ابتدای نمودار، نشانگر نیروی لازم جهت غلبه بر مقاومت ناچیز به وجود آمده طی متراکم کردن خاک می‌باشد.



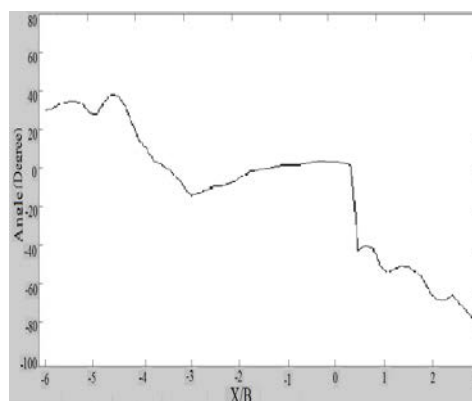
شکل ۱۸- منحنی بار-جابجایی هد شمع‌های بلند



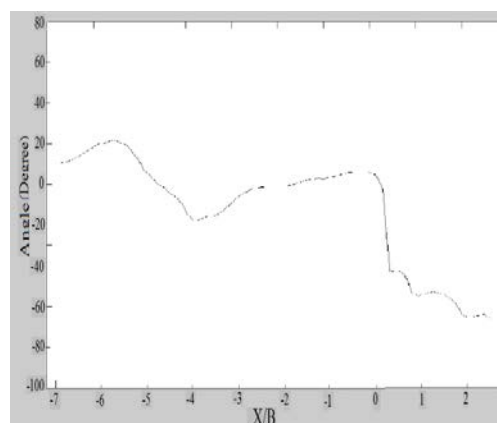
شکل ۱۹- منحنی بار-جابجایی هد شمع‌های کوتاه

جدول ۵- مقایسه ظرفیت باربری شمع در آزمایش‌های مختلف

شماره آزمایش	مشخصات آزمایش	ظرفیت باربری شمع برای تغییر مکان جانبی 1cm سرشمع (N)
۱	شمع بلند منفرد	۳۹/۱
۲	گروه شمع بلند با فاصله 1B	۵۲/۶
۳	گروه شمع بلند با فاصله 2B	۵۵/۵
۴	گروه شمع بلند با فاصله 3B	۵۸/۱
۵	گروه شمع بلند با فاصله 4B	۵۹/۳
۶	شمع بلند منفرد در فاصله 4B	۳۷/۰
۷	شمع کوتاه منفرد	۵۷/۲
۸	گروه شمع کوتاه با فاصله 1B	۶۲/۰
۹	گروه شمع کوتاه با فاصله 2B	۶۳/۸
۱۰	گروه شمع کوتاه با فاصله 3B	۶۵/۴
۱۱	گروه شمع کوتاه با فاصله 4B	۶۷/۰
۱۲	شمع کوتاه منفرد در فاصله 4B	۵۰/۰



شکل ۱۶- زاویه بردارهای جابجایی سطح خاک گروه شمع کوتاه در فاصله 3B



شکل ۱۷- زاویه بردارهای جابجایی سطح خاک گروه شمع کوتاه در فاصله 4B



جابجایی رو به پایین به دلیل ریزش دانه‌های خاک پشت شمع با اعمال نیروی جانبی می‌باشد و گوه پایا در جلوی شمع سبب حرکت رو بالای دانه‌های خاک این قسمت می‌شود.

(۲) در مورد گروه شمع، در پشت شمع عقب بردارهای جابجایی دانه‌های سطح خاک با زوایای تند رو به پایین و در جلوی شمع جلو این بردارها با زوایای تند رو به بالا حرکت می‌کنند. در مواردی که فاصله شمع‌ها در گروه کم باشد، زاویه بردارهای جابجایی دانه‌های سطح خاک در فاصله بین دو شمع تقریباً برابر با صفر می‌باشد که نشان دهنده حرکت افقی بردارهای جابجایی دانه‌های سطح خاک در امتداد بار می‌باشد. در مواردی هم که فاصله شمع‌ها در گروه بیشتر شود، فرصت تشکیل گوه پایا در جلوی شمع عقب نیز به وجود می‌آید. بنابراین بردارهای جابجایی دانه‌های سطح خاک جلوی شمع عقب نیز رو به بالا و بردارهای جابجایی پشت شمع جلو رو به پایین حرکت می‌کنند.

(۳) در محل شمع‌ها به دلیل تغییر جهت ناگهانی بردارهای جابجایی دانه‌های سطح خاک (یا تغییر علامت زاویه بردارهای جابجایی) یک پرش ناگهانی در نمودارها رخ داده است. در مورد گروه شمع‌ها، این تغییر جهت و پرش ناگهانی بردارها در محل شمع عقب نسبت به شمع جلو قابل ملاحظه‌تر است که دلیل این رفتار، نزدیکی این ردیف به محل بارگذاری می‌باشد.

(۴) با افزایش فاصله شمع‌ها از 1B تا 4B در گروه، ظرفیت باربری گروه شمع بیشتر می‌شود.

(۵) از نتایج آزمایش‌ها دیده می‌شود که هرچه شمع منفرد نسبت به محل اعمال بار دورتر شود، ظرفیت باربری جانبی آن کمتر می‌شود.

(۶) میزان افزایش باربری جانبی گروه شمع نسبت به شمع منفرد در شمع‌های بلند بیشتر از شمع‌های کوتاه است. همچنین میزان افزایش باربری جانبی گروه شمع با افزایش فاصله شمع در گروه در مورد شمع‌های بلند بیشتر از شمع‌های کوتاه است. در نتیجه اثر گروه برای شمع بلند مؤثرتر از شمع کوتاه است که به نظر می‌رسد به دلیل درگیری حجم بیشتر خاک باشد.

#### ۵- مراجع

Ercan A, "Behavior of pile groups under lateral loads", MSc Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Middle East Technical University, Turkey, 2010.

مردنی م، نلیق ع، "بررسی رفتار شمع تحت نیروهای افقی در داخل خاک‌های لایه‌ای با استفاده از روش المان محدود" یازدهمین کنفرانس دانشجویان عمران، دانشگاه هرمزگان، ۱۳۸۳.

Brown DA, Morrison C, Reese LC, "Lateral load Behaviour of pile group in sand", ASCE Journal of

بر مبنای تحقیقات انجام شده توسط Simone (۲۰۱۲) توسط سیمونه بر اساس تئوری برامز بر روی شمع‌های کوتاه قائم تحت بارگذاری جانبی با هد گیردار، ظرفیت بار جانبی به وسیله رابطه (۵) قابل محاسبه است. در این رابطه  $n$  مطابق با روابط (۲) و (۳) به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$H_u = nB \frac{Le^2}{2}$$

$$= 109350 \times 0.03 \times \frac{0.2^2}{2} = 65.61N \quad (e \geq 0)$$

$$n = K_p^2 \times \gamma = 2.7^2 \times 15000 = 109350$$

برای آزمایش شماره ۷ (شمع منفرد کوتاه) با استفاده از این روابط، ظرفیت بار جانبی در حدود ۶۵/۶۱ نیوتن به دست می‌آید و از سوی دیگر مطابق با آزمایش‌های انجام شده، ظرفیت بار جانبی در حدود ۵۷/۲۰ نیوتن می‌باشد. با توجه به تطابق قابل قبول نتایج آزمایش‌ها با نتایج تئوری می‌توان نتایج مربوط به آزمایش گروه شمع‌ها را قابل قبول دانست.

همچنین برای شمع‌های بلند قائم تحت بارگذاری جانبی با هد گیردار، ظرفیت بار جانبی به وسیله رابطه (۵) قابل محاسبه است که در این رابطه نیز  $n$  مشابه با قسمت قبل در نظر گرفته شده است و  $f$  همان  $f_c^R$  می‌باشد که مطابق با روابط (۲) و (۳) به صورت زیر محاسبه شده است.

$$\frac{H_u}{nB^3} = \frac{1}{2} \left( \frac{f}{B} \right)^2 \quad \left( \frac{e}{B} \geq 0 \right)$$

$$H_u = 40.53N$$

$$\frac{1}{2} \left( \frac{f_c^R}{B} \right)^2 \left( \frac{2}{3} \frac{f_c^R}{B} + \frac{e}{B} \right) - \frac{2M_u}{nB^4} = 0$$

$$f_c^R = 15.72cm$$

برای آزمایش شماره ۱ (شمع منفرد بلند) با استفاده از این روابط، ظرفیت بار جانبی در حدود ۴۰/۵۳ نیوتن به دست می‌آید و از سوی دیگر مطابق با آزمایش‌های انجام شده، ظرفیت بار جانبی در حدود ۳۹/۱۰ نیوتن می‌باشد. با توجه به تطابق قابل قبول نتایج آزمایش‌ها با نتایج تئوری می‌توان نتایج مربوط به آزمایش گروه شمع‌ها را قابل قبول دانست.

#### ۴- نتایج

(۱) در مورد شمع منفرد تحت بار جانبی، بردارهای جابجایی دانه‌های سطح خاک در پشت شمع با زوایای تند رو به پایین و در قسمت جلوی شمع با زوایای تند رو به بالا حرکت می‌کنند.

- Geotechnical Engineering, 1988, 114 (11), 1261-1276.
- Rollins KM, Olsen RJ, Egbert JJ, Jensen DH, Olsen KG, Garrett BH, "Pile spacing effects on lateral pile group behavior: Analysis", ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132 (10), 1272-1283.
- Ilyas L, Leung CF, Chow YK, Budi SS, "Centrifuge model study of laterally loaded pile groups in clay", ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130 (3), 274-283.
- Simone P, "Head embedment in Broms pile lateral capacity theory for cohesionless soils", Computers and Geotechnics, 2012, 43, 51-60.
- White DJ, Take WA, Bolton MD, "Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV)", Geotechnique, 2003, 53 (7), 619-631.

## EXTENDED ABSTRACT

# Movement on Surface of Soil and Lateral Capacity of Single Pile Group for Long and Short Pile

Aysan Poorjafar, Hooshang Katebi<sup>\*</sup>, Masoud Hajjalilue Bonab

Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 28 May 2016; Accepted: 24 January 2017

---

### Keywords:

Pile group, lateral loading, fixed-head, Geo PIV

---

## 1. Introduction

Pile groups mostly are used for translating the load of structures to soil and a pile cap is used on the top of the group. Lateral loading in designing pile group is important. In pile group under lateral loading, each pile is influenced by neighboring piles. The spacing between piles has an important effect on lateral bearing capacity.

## 2. Methodology

In this study, behavior of pile group under lateral loading was studied on short and long piles by using PIV (Partical Image velocimetry) method. Tests were done on small model in laboratory. A group of two piles was placed in dry loose SP sand. The piles were built from aluminum and fixedly connected to the pile cap. Pile cap was connected to two piles which had been driven to the depth of 30 cm and were spaced at 1B to 4B (B equals the width of pile) on centers.

GeoPIV (White et al., 2003) is a MATLAB module which implements Particle Image Velocimetry (PIV) in a manner suited geotechnical testing. After quickly capturing, GeoPIV analyses the results of the action of soil components. GeoPIV software developed at Cambridge University by White et al (2003). It is in good agreement with Geotechnical experiments.

## 3. Results and discussion

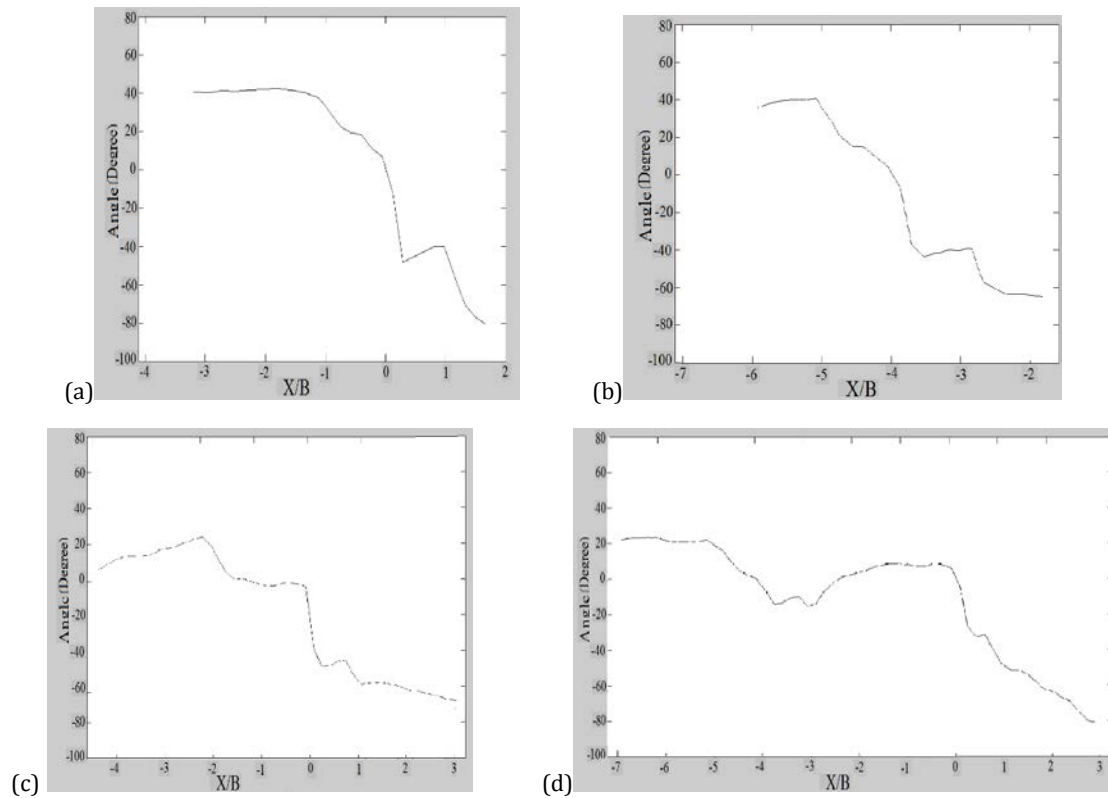
### 3.1. The angle of displacement vectors of soil on the surface of the soil

The soils in front of the single pile moved up and the soils behind it moved down. For pile group the soils in front of the lead pile moved up and the soils behind the trail pile moved down and when the spacing between them is 1B, the soil in this area moves horizontally. By increasing the spacing between the piles, the soils in front of the trail pile moved up and the soils behind the lead pile moved down and each pile behave similar to single pile.

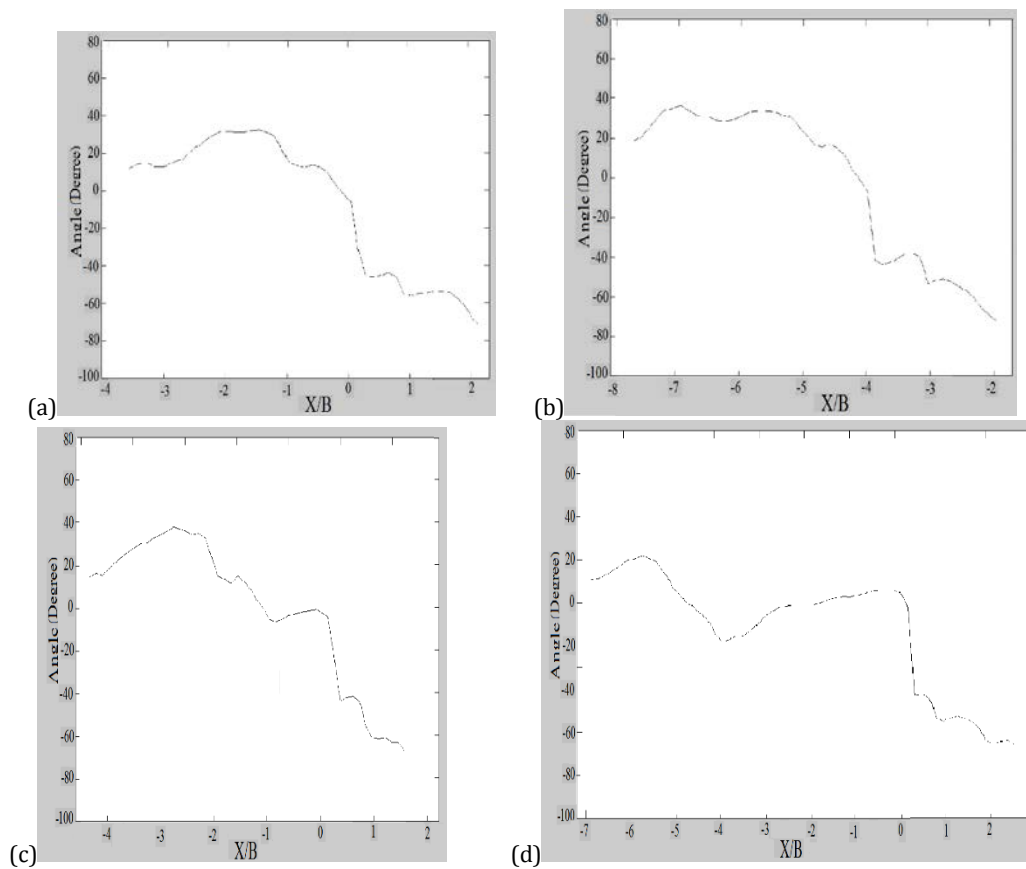
---

\* Corresponding Author

E-mail addresses: apg.civil@gmail.com (Aysan Poorjafar), katebi@tabrizu.ac.ir (Hooshang Katebi), hajjalilue@tabrizu.ac.ir (Masoud Hajjalilue).



**Fig. 1.** The angle of displacement vectors of soil on the surface of the soil: (a) Single long pile, (b) single long pile at 4B distance, (c) long pile group at spacing 1B, (d) long pile group at spacing 4B



**Fig. 2.** The angle of displacement vectors of soil on the surface of the soil: (a) Single short pile, (b) single short pile at 4B distance, (c) short pile group at spacing 1B, (d) short pile group at spacing 4B

### 3.2. Load-Displacement Curves of the piles head

Fig. 3 shows the curves for single piles and pile group that are long. Fig. 4 shows the curve for single piles and pile group that are short. Relatively higher slope at the beginning of the graphs, indicates the necessary force to overcome the minimal resistance caused by compacting the soil.

The results show when a single pile gets farther from loading place, lateral loading capacity decreases. Lateral loading capacity of pile group increase as the pile spacing increase from 1B to 4B.

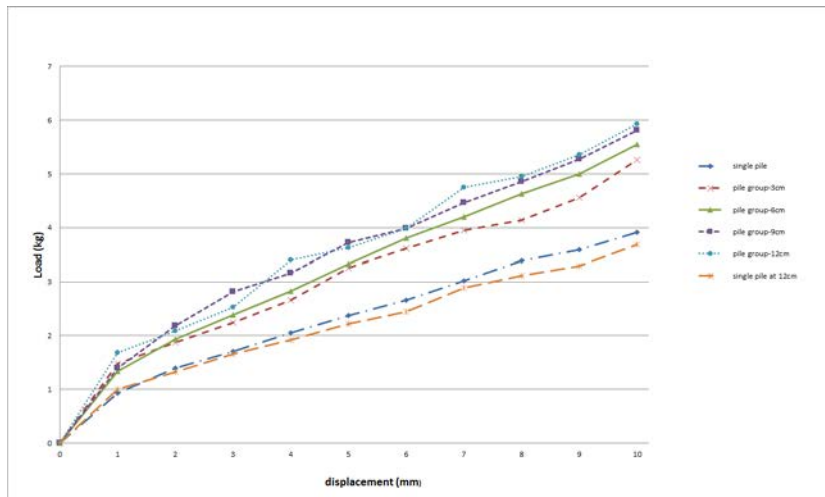


Fig. 3. Lateral load-lateral displacement curves of head for long piles

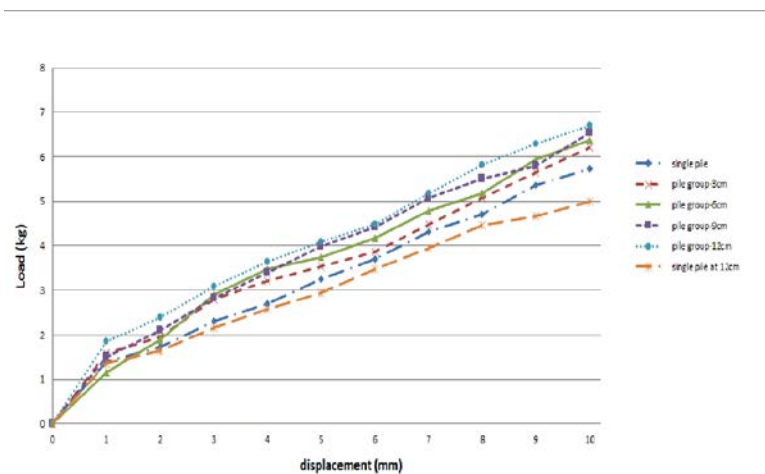


Fig. 4. Lateral load-lateral displacement curves of head for short piles

## 4. Conclusions

Results show that lateral load capacity increases as pile spacing increases and group effect on long piles is more effective than short piles. Soils in front of the pile moved up and soils behind the pile moved down. The places of the piles are completely clear in figures (The place that the angles are changed).

## 5. References

White DJ, Take WA, Bolton MD, "Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV)", Geotechnique, 2003, 53 (7), 619-631.