

## بررسی آزمایشگاهی رفتار گروه شمع در خاک ماسه‌ای تحت بارهای جانبی

امیر وکیلی\*

مربی، گروه مهندسی عمران، واحد بیضا، دانشگاه آزاد اسلامی، بیضا، ایران

محمد علی زمردیان

دانشیار، مهندسی آب، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

محمدحسین احمدی

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد بیضا، دانشگاه آزاد اسلامی، بیضا، ایران

Amir\_Vakili\_20@Yahoo.Com

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۱/۲۰ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۸/۰۴/۲۵

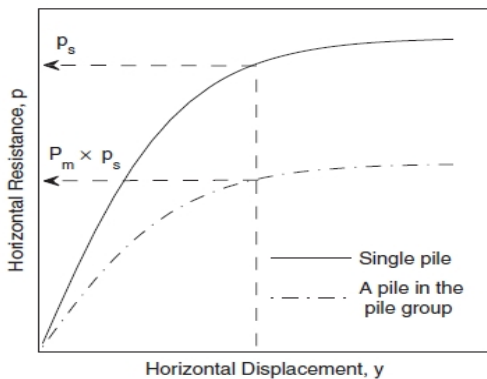
### چکیده:

سازه‌ها اغلب تحت بارهای جانبی ناشی از وزش باد، زلزله‌ها، امواج آب قرار می‌گیرند. به منظور ایجاد یک طراحی ایمن و اقتصادی پیش‌بینی و اندازه‌گیری رفتار «بار-جابجایی» گروه شمع بسیار مورد نیاز می‌باشد. رفتار شمع‌های مدفون در خاک زمانیکه تحت بار جانبی قرار گرفته‌اند به طور معمول توسط روش فترهای غیرخطی وینکلر مدل‌سازی و تحلیل می‌شود در این روش اندرکنش خاک-شمع توسط منحنی‌های غیرخطی  $p-y$  مدل‌سازی می‌گردد به طوری که منحنی  $p-y$  تک شمع‌ها را با استفاده از یک ضرب  $P_m$  برای هر ردیف شمع واقع در گروه ویرایش و اصلاح می‌کنند که این مقدار متوسط ضریب  $P_m$  «ضریب کاهش گروه» نامیده می‌شود. تحقیق حاضر با مطالعه بر روی اثرات و فاکتورهای مختلف از جمله فاصله شمع‌ها در گروه و تأثیر چیدمان‌های مختلف بر روی مقدار ضریب کاهش گروه صورت گرفته است. ضریب کاهش گروه بدست آمده از این مطالعه به خوبی با نتایج آزمایش‌های بزرگ مقیاس صورت گرفته بر روی گروه شمع‌ها مورد مقایسه قرار گرفته‌اند به طوری که نتایج تطابق خوبی با نتایج آزمایش‌های بزرگ مقیاس از خود نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد مقدار ضریب  $P_m$  برای گروه‌های شمع با چیدمان‌های مختلف با فاصله ۲/۵ برابر قطر در محدوده ۰/۴۲ تا ۰/۵۴ قرار گرفته است که این نتایج به مقدار ضریب  $P_m$  بدست آمده از تحقیقات گذشته مشابهت بسیار زیادی دارد.

**کلید واژگان:** گروه شمع، بار بری جانبی، روش  $P-y$ ، ضریب کاهش گروه

## ۱- مقدمه:

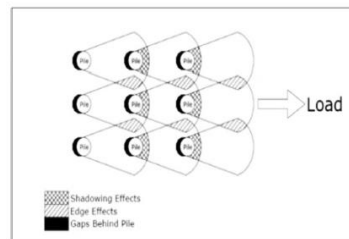
که در شکل ۲ نیز مشاهده می‌شود با ضرب شدن در یک ضریب ثابت  $P_m$  کاهش می‌یابد. که مقدار این ضریب  $P_m$  برای ردیف‌های جلو بیشتر و برای ردیف‌های عقب کمتر در نظر گرفته می‌شود و دلیل آن نیز اثرات هم پوشانی شمع‌ها می‌باشد. از آنجا که در طی بارگذاری‌های لرزه‌ای و دینامیکی عملکرد و جایگاه شمع‌های جلو و عقب مرتباً تغییر می‌کند (به دلیل ماهیت رفت و برگشتی و تغییر جهت بارهای لرزه‌ای) برخی مواقع از یک مقدار متوسط ضریب  $P_m$  برای تمامی شمع‌های واقع در گروه استفاده می‌شود که نهایتاً منجر به یک منحنی بارگذاری-جابجایی سر شمع می‌شود. این مقدار ضریب  $P_m$  ضریب کاهش گروه نامیده می‌شود [۵].



شکل ۲- تعریف ضریب  $P_m$  و مقاومت جانبی خاک برای تک شمع [۵]

لازم به ذکر است که استفاده از یک مقدار متوسط ضریب  $P_m$  برای تمامی شمع‌های واقع در گروه برای بارگذاری‌های دینامیکی و لرزه‌ای و سیکی محافظه کارانه است زیرا جهت بار در این نوع بارگذاری‌ها مرتباً تغییر می‌کند و اغلب نیز در طی بارگذاری غیرقابل پیش‌بینی است و هر چیتی از بارگذاری ماهیت ردیف‌های جلویی و ردیف‌های عقبی شمع‌ها را مرتباً عوض می‌نماید. ضرایب کاهش گروه را می‌توان با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی از قبیل آزمایش‌های بارگذاری بزرگ مقیاس و یا کوچک مقیاس بدست آورد. ولی به هر حال ایجاد و انجام یک آزمایش بزرگ مقیاس بر روی گروه‌های شمع کار بسیار سخت و پرهزینه‌ای می‌باشد. همچنین مشکلات دیگری نیز در این رابطه وجود دارد از جمله اینکه حداکثر ظرفیت تجهیزات بارگذاری در آزمایش‌های بزرگ مقیاس بسیار محدود است. بنابراین آزمایش‌های بزرگ مقیاس در این زمینه اغلب بر روی مدل‌های کوچک گروه شمع و با فواصل نزدیک به هم شمع‌ها صورت می‌پذیرد. همچنین مشکلات دیگری نیز در این رابطه وجود دارد از جمله اینکه حداکثر ظرفیت تجهیزات بارگذاری در آزمایش‌های بزرگ مقیاس بسیار محدود است. بنابراین آزمایش‌های بزرگ مقیاس در این زمینه اغلب بر روی مدل‌های کوچک گروه شمع و با فواصل نزدیک به هم شمع‌ها صورت می‌پذیرد. همچنین آزمایش‌های سانتزیفیوژ نیز یک روش دیگر برای انجام آزمایش‌های بزرگ مقیاس بوده و می‌تواند به منظور مطالعه

پی‌های شمعی اغلب مواقعی که سازه‌ها متکی بر خاکهای سست و ضعیف هستند مورد استفاده قرار می‌گیرند. پس بنابراین پی‌های شمعی به منظور تحمل بارهای وارده و انتقال آنها به لایه‌های قوی‌تر خاک و با مکانیزم‌های باربری جداری و اتکایی‌شان مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین پی‌های شمعی در برخی موارد ممکن است تحت بارهای جانبی از جمله نیروهای برخورد و باراندازی کشتی‌ها، نیروهای جانبی زمین لرزه، اثرات امواج و فشارهای جانبی خاک‌ها در اثر روانگرایی قرار گیرند. رفتار شمع‌های تحت بارگذاری جانبی معمولاً با استفاده از مدل فنرهای غیر خطی وینکلر مدلسازی و بررسی می‌شوند. فنرهای غیر خطی براساس منحنی‌های  $p-y$  (که  $p$  معرف مقاومت خاک اطراف شمع و  $y$  معرف مقدار جابجایی جانبی است) پیشنهاد داده شده توسط انجمن سوخت و انرژی آمریکا بدست می‌آیند [۲]. زمانیکه شمع‌ها به صورت گروهی عمل می‌کنند اندرکنش‌های بین خاک - شمع موجب کاهش مقاومت و باربری جانبی شمع‌های تکی می‌شود. بنابراین به طور معمول گروه شمع ظرفیتی کمتر از مجموع ظرفیت باربری جانبی تک شمع‌های واقع در گروه را دارا است. در گروه شمع هر یک از شمع‌ها توسط توده خاک واقع در جلوی شمع تحت فشار قرار می‌گیرد که باعث می‌شود یک ناحیه برشی درون توده خاک ایجاد گردد. این نواحی برشی با افزایش مقدار بار جانبی گسترش می‌یابد و به خصوص برای گروه‌های شمع با فاصله نزدیک به هم تداخل پیدا می‌کنند. صرف نظر از افزایش باربری جانبی گروه شمع، ظرفیت باربری تک شمع‌های مجزا در گروه کاهش می‌یابد. هم پوشانی که بین شمع‌های هر ردیف صورت می‌گیرد اثرات لبه‌ای<sup>۱</sup> نامیده می‌شود در حالیکه هم پوشانی ایجاد شده بین ردیف‌های مختلف شمع‌ها در گروه اثرات سایه-ای<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. این هم پوشانی در نواحی برشی موجب تضعیف و کاهش مقاومت توده خاک شده و موجب کاهش باربری جانبی هر شمع مجزا در گروه می‌شود. هم پوشانی نواحی برشی ایجاد شده در گروه شمع در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ - اثرات همپوشانی سایه‌ای و گوشه‌ای در گروه شمع‌های تحت بار جانبی [۳]

یکی از روش‌های بسیار متداول برای در نظر گرفتن اثرات گروه شمع در مدل وینکلر آن است که منحنی‌های  $p-y$  تک شمع‌ها را با استفاده از یک سری ضرایب  $P_m$  اصلاح کنیم. این روش توسط براون و همکاران در سال ۱۹۸۸ پیشنهاد گردیده است [۴]. در این روش مقاومت خاک ( $p$ ) همانگونه

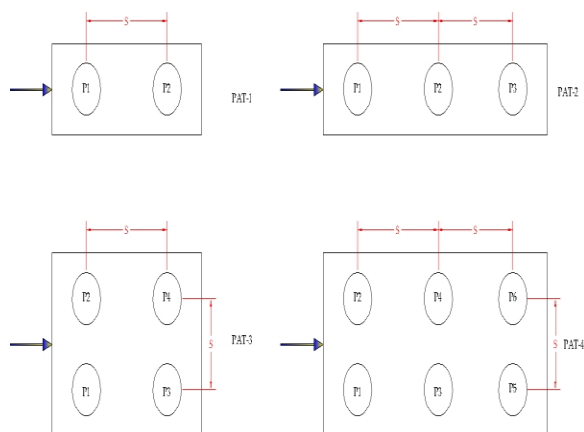
<sup>2</sup> - shadowing effect

<sup>1</sup> - edge effect

## ۲- مدل آزمایشگاهی گروه شمع:

### ۲-۱- تست مدل گروه شمع:

به منظور مدلسازی، شمع‌ها در لایه‌ای از ماسه در حالت تکی و در چهار نوع آرایش گروهی مطابق شکل ۳ با فواصل مرکز به مرکز شمع ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ برابر قطر شمع جایگذاری شده‌اند. (شکل ۳)



شکل ۳- آرایش شمع‌ها

بر اساس مطالعات انجام شده پیرامون مبحث باربری جانبی شمع‌ها، مشخص شده است که حضور مرزهای صلب قرار گرفته در فواصل بیشتر از ۱۰ برابر قطر شمع (فاصله از مرکز شمع)، تاثیری بر پاسخ سیستم ندارد. زیرا ناحیه تحت تنش مؤثر توده‌ی خاک در حدود ۱۰ برابر قطر شمع، در جهت اعمال بار جانبی به شمع گزارش شده است [۱۴]. بنابراین با توجه به مطالب ذکر شده، تخمین‌های اولیه برای انتخاب ابعاد جعبه آزمایش در نظر گرفته شد و برای اطمینان بیشتر از تناسب ابعاد تخمینی برای جعبه آزمایش، یک سری مطالعات تجزیه و تحلیل ابعادی با نرم افزار Abaqus 3D انجام شد. با توجه به مدلسازی عددی انجام شده با نرم افزار مذکور، مشخص شد که ناحیه تحت تنش مؤثر توده‌ی خاک به مرزهای مدل نرسیده و به نظر می‌رسد که این موضوع در جهت تأیید تناسب ابعاد جعبه به جهت اجتناب از اثرات مرزهای مدل بر باربری جانبی شمع می‌باشد. لذا بر اساس مطالب بیان شده، جعبه‌ی آزمایش به صورت مکعبی با طول ۱ متر و عرض و ارتفاع ۰/۸ متر از جنس فولاد با فریم مخصوص به ضخامت ورق ۳ میلی متر ساخته شده است. بر روی این مخزن محلی برای نصب جک پنوماتیک که از آن جهت بارگذاری در راستای افقی استفاده می‌شود در نظر گرفته شده است.

بر روی ضرایب کاهش گروه مورد استفاده قرار گیرد. [۶ و ۷]. در جدول (۱) تعدادی از مطالعات آزمایشگاهی بزرگ مقیاس و سانتیفریوژ انجام شده برای محاسبه ضرایب کاهش گروه ارائه و مورد مقایسه قرار گرفته است. بیشتر آزمایش‌های انجام شده بر روی گروه‌های شمع با آرایش ۳×۳ با شرایط انتهایی آزاد و با فواصل مرکز به مرکز ۳ برابر قطر شمع ها ( $=\frac{S}{3}$ ) و با جابجایی افقی سر شمع حدود ۵ سانتیمتر صورت گرفته است. از آنجایی که ضرایب  $p_m$  به طور معمول از نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی گروه‌های شمع با شرایط انتهایی آزاد بدست آمده‌اند، استفاده از این نتایج برای شمع‌هایی با شرایط انتهایی ثابت ۳ که در اجرا و عمل نیز بیشتر دیده می‌شوند مقداری با تردید مواجه است [۸].

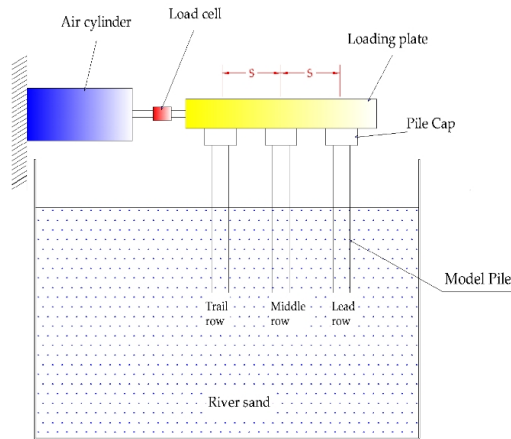
در ایران نیز تحقیقات مشابهی روی موضع رفتار شمع در گروه شمع صورت گرفته است که در ادامه تعدادی از آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد. مرنندی و نیلق به بررسی رفتار شمع تحت نیروهای افقی در داخل خاک‌های لایه‌ای با استفاده از روش المان محدود پرداختند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که چنانچه نسبت نیروهای جانبی به نیروهای قائم اعمال شده به شمع کوچک باشد از نیروهای جانبی می‌توان صرف‌نظر کرد. در غیر اینصورت تحلیل شمع تحت اثر بار جانبی الزامی بوده و بایستی با روش‌های مناسب اثر بار جانبی بر رفتار شمع تحلیل شود [۱۱]. سجودی و حاجی علیلو به بررسی آزمایشگاهی رفتار خاک در اطراف شمع‌های تحت بار جانبی پرداختند. در این تحقیق با استفاده از روش سرعت سنجی تصویری ذرات مقادیر جابجایی در خاک‌ها بدست آمده و از روی آن‌ها کرنش‌های خاک اطراف شمع تعیین گردیده است [۱۲]. کریمی و مردوخ پور به بررسی تاثیر عوامل مختلف بر رفتار بار-نشست گروه شمع تحت بار جانبی در خاک دو لایه پرداخته‌اند. آنها اثر لایه‌ای بودن خاک بر ظرفیت باربری گروه شمع تحت بارگذاری استاتیکی را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس مطالعات صورت گرفته نتیجه گردید که اگر خاک ضعیف روی خاک قوی باشد با افزایش ارتفاع لایه اول ظرفیت باربری جانبی گروه شمع کاهش می‌یابد [۱۳]. با مروری بر تحقیقات گذشته مشخص است که مطالعات بسیار کمی بر روی رفتار گروه شمع تحت بارهای جانبی در مدل‌های کوچک مقیاس در آزمایشگاه به خصوص با در نظر گرفتن تأثیر تغییر پارامترهایی از جمله فواصل مختلف شمع‌ها از یکدیگر در گروه‌هایی با چیدمان‌های مختلف صورت گرفته است. وجود این محدودیت‌ها در مطالعات آزمایشگاهی کوچک مقیاس لزوم این تحقیق و مطالعه را به منظور ارزیابی آزمایشگاهی رفتار گروه شمع تحت بارهای جانبی و همچنین تأثیر تغییر پارامترهای مختلف بر مقدار ضریب کاهش گروه را مشخص می‌کند.

جدول ۱- ضریب کاهش گروه پیشنهادی توسط مطالعات گذشته

Reference	Soil type	Test type	Pile configuration	Pile type	D(cm)	S/D	Pile head condition	Reported P-multiplier for row							Group reduction factor
								1	2	3	4	5	6	7	
Brown et al (1987)[4]	Stiff clay	Full scale	3*3	Steel pipe	27.3	3	Free	0.7	0.6	0.5	-	-	-	-	0.6
	Stiff clay	Full scale	3*3	Steel pipe	27.3	3	Free	0.7	0.5	0.4	-	-	-	-	0.53
Brown et al (1987)[4]	Medium dense sand	Full scale	3*3	Steel pipe	27.3	3	Free	0.8	0.4	0.3	-	-	-	-	0.5
Mc Yay et al (1995)[6]	Medium dense sand	Centrifuge	3*3	Steel pipe	43	5	Free	1	0.85	0.7	-	-	-	-	0.85
	Medium dense sand	Centrifuge	3*3	Steel pipe	43	5	Free	1	0.85	0.7	-	-	-	-	0.85
	Medium dense sand	Centrifuge	3*3	Steel pipe	43	3	Free	0.65	0.45	0.35	-	-	-	-	0.48
Mc Yay et al (1998)[7]	Medium dense sand	Centrifuge	3*3	Steel pipe	43	3	Free	0.8	0.4	0.3	-	-	-	-	0.5
	sand	Centrifuge	3*3	Square steel	42.9	3	Fixed	0.8	0.4	0.3	-	-	-	-	0.5
	sand	Centrifuge	3*3	Square steel	42.9	3	Fixed	0.8	0.4	0.3	0.3	-	-	-	0.45
	sand	Centrifuge	3*5	Square steel	42.9	3	Fixed	0.8	0.4	0.3	0.2	0.3	-	-	0.4
	sand	Centrifuge	3*6	Square steel	42.9	3	Fixed	0.8	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	-	0.37
	sand	Centrifuge	3*7	Square steel	42.9	3	Fixed	0.8	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.34
Rollins et al (1998)[9]	Clay and silt	Full scale	3*3	Steel pipe	40	3	Free	0.6	0.38	0.43	-	-	-	-	0.47
		Full scale	3*4	Precast RC	80	3	Fixed	0.89	0.61	0.61	0.66	-	-	-	0.69
Rollins and Sparks(2002)[8]	Silty and clay	Full scale	3*3	Steel pipe	32.4	3	Fixed	0.6	0.38	0.43	-	-	-	-	0.47
Rollins et al (2005)[10]	Sand	Full scale	3*3	Steel pipe	32.4	3.3	Free	0.8	0.4	0.4	-	-	-	-	0.53
Rollins et al (2005)[10]	Stiff clay	Full scale	3*5	Steel pipe	61	3	Free	0.82	0.61	0.45	-	-	-	-	0.62
	Stiff clay	Full scale	3*3	Steel pipe	32.4	5.65	Free	0.95	0.88	0.77	-	-	-	-	0.87
	Stiff clay	Full scale	3*4	Steel pipe	32.4	4.4	Free	0.9	0.8	0.69	0.73	-	-	-	0.78
	Stiff clay	Full scale	3*5	Steel pipe	32.4	3.3	Free	0.82	0.61	0.45	0.45	0.51	-	-	0.57

بدنی نیز از آنالیز ابعادی و قضیه p باکینگهام استفاده شده است. بدین منظور ۵ متغیر جابجایی، قطر شمع، مساحت، نیرو و سختی جانبی شمع در نظر گرفته شده است.

شکل ۴ نمایی شماتیک از مخزن و نحوه قرارگیری شمع‌ها و نحوه آزمایش را نشان می‌دهد که در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه آزاد اسلامی واحد بیضا مدلسازی و انجام شده است. با توجه به هدف پژوهش که در نظر گرفتن شمع‌ها در رده شمع‌های کوتاه و صلب بوده است لذا ابعاد شمع به گونه‌ای در نظر گرفته شد که این موضوع حاصل شود. در مورد مقیاس



شکل ۴- نمایی شماتیک از مخزن و سیستم بارگذاری و نحوه آزمایش

گردید. سرعت بارگذاری بر روی گروه شمع به گونه‌ای تنظیم گردید که میزان جابجایی از یک میلی‌متر در دقیقه تجاوز ننماید. همچنین جهت سرشمع از یک صفحه صلب برای گروه شمع استفاده گردید صلبیت این صفحه بایستی به اندازه‌ای باشد که تحت اثر بارگذاری تغییر شکل قابل توجهی در آن رخ ندهد تا این امر تداخلی در پاسخ‌های حاصل از تحلیل ایجاد ننماید. از آنجا که هدف اصلی این تحقیق بدست آوردن سهم تنش و نیروی قابل تحمل توسط هر یک از اجزای گروه می‌باشد لذا می‌بایست سنجش مناسب در خصوص بار جانبی کل و سهم باربری هر یک از شمع های گروه صورت پذیرد که این سنجش در این پژوهش از طریق ترنسدیوسرهای بار در مدل آزمایشگاهی انجام پذیرفت. دستیابی به محتوای سیگنال خروجی ابزار دقیق‌های نصب شده در آزمایش می‌بایست از دستگاهی مناسب برای جمع آوری اطلاعات استفاده نمود. اطلاعات ارسال شده به واحد جمع آوری اطلاعات می‌بایست به نحو مناسبی ثبت شوند تا بعداً در بخش تحلیل داده‌ها قابل استفاده و سنجش باشند این امر توسط یک کامپیوتر مناسب متصل به واحد جمع آوری اطلاعات صورت پذیرفت.

### ۳-۲- تهیه و آماده سازی ماسه

نوع خاک در این تحقیق ماسه سیلیسی خشک می‌باشد که به منظور و نتایج نزدیک به واقعیت برای این آزمایش از مصالح عبوری از الک نمره ۱۰۰ استفاده شده است. بر روی خاک موردنظر آزمایش‌های استاندارد جهت تعیین خصوصیات خاک انجام شد که نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است. آزمایش دانه بندی طبق استاندارد ASTM D 421-87 انجام و منحنی دانه بندی این خاک در شکل ۵ نشان داده شده به منظور تعیین وزن واحد حجم خشک ماسه، تراکم نسبی و زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب از آزمایش‌های بالن لاستیکی طبق استاندارد ASTM D 2167-84، آزمایش تراکم براساس استاندارد ASTM D 698-78 و آزمایش برش مطابق استاندارد ASTM D 3080-90 استفاده شد [۱۷].

بنابراین شمع‌های مورد استفاده در این تحقیق از لوله فولادی به قطر خارجی ۲۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۱۶ میلی‌متر ساخته شده است. در خاک‌های غیر چسبنده ضریب سختی (T) با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{n_h}} \quad (1)$$

در این رابطه  $E_p I_p$  سختی خمشی شمع (در این پژوهش ۱۳۶۰ نیوتن بر متر مربع) و  $n_h$  مدول ثابت عکس العمل افقی بستر است. مقادیر  $n_h$  برای ماسه‌های سست، نیمه متراکم و متراکم به ترتیب ۱۹۰۰، ۶۰۰۰ و ۱۳۵۰۰ کیلو نیوتن بر متر مکعب در نظر گرفته شده است [۱۵]. با توجه به اینکه طول مدفون شمع کوچکتر از 2T در نظر گرفته شده است لذا شمع‌های مدل در رده شمع‌های صلب کوتاه قرار می‌گیرند [۱۶]. مدل شمع مورد استفاده برای بارگذاری جانبی طبق مشخصات جدول شماره ۲ می‌باشد که از جنس فولاد ضد زنگ می‌باشد.

جدول ۲- مشخصات شمع‌های مدل

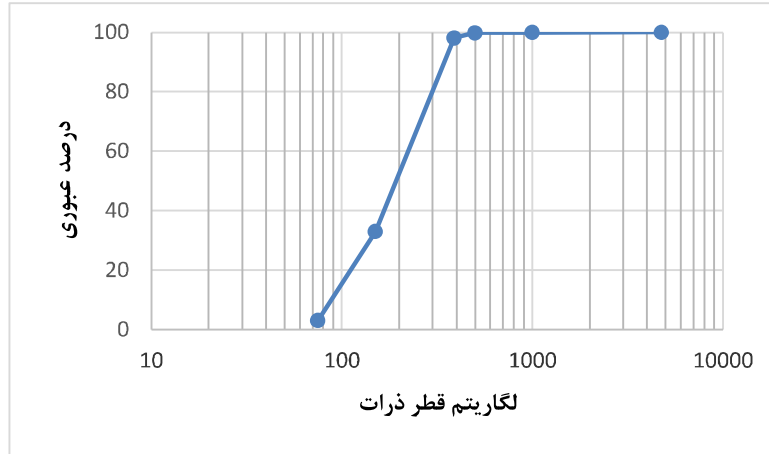
Diameter(cm)	Spacing/ Diameter	Length(cm)
2,0	1,5, 2,5, 3,5	15

### ۲-۲- روند آزمایش و تجهیزات:

سیستم بارگذاری باید به واسطه بارگذاری هیدرولیکی، پنوماتیکی (فشار هوا) و یا الکتریکی نیروی جانبی لازم جهت اعمال بار جانبی بر گروه شمع را فراهم آورد که در این پژوهش جهت اعمال نیروی کنترل شده بوسیله جک از یک پانل تنظیم فشار پنوماتیک و کمپرسور بادی که به آن متصل می‌شود استفاده گردید. بر روی این پانل یک رگلاتور برای تنظیم فشار خروجی و یک جفت شیر اتوماتیک جهت اعمال نیرو در دو جهت مخالف به کار برده شده است. برای اندازه گیری نیروی وارد بر گروه شمع از یک لودسل (Load Cell) با حداکثر ظرفیت باربری ۱۰۰ کیلوگرم استفاده

جدول ۳- مشخصات ماسه مورد استفاده

Parameters	Quantity	ASTM Standard	Comments
$G_s$	2,67	D854	Picnometer Test
$\phi [deg]$	34,5	D3080-90	Direct Shear Test
$\gamma_{d\_min} [KN/m^3]$	15,4	D4254	Dry Pour Test
$\gamma_{d\_max} [KN/m^3]$	17,6	D4253	Dynamic Cyclic Loading
$\gamma_d [KN/m^3]$	16,2	D7263	In-situ Density
$D_r [\%]$	39,50617	--	--



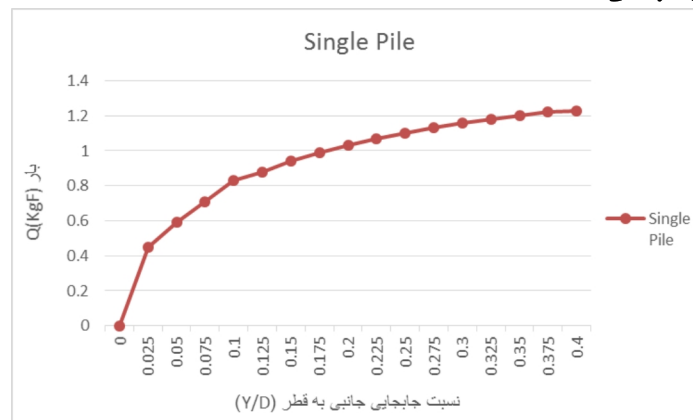
شکل ۵- نمودار دانه بندی ماسه مورد استفاده

در این مطالعه نتایج نمونه‌ها با تأکید بر اثر گروه شمع و رفتار گروه شمع مورد آنالیز قرار گرفته است. لازم به ذکر است که آزمایش‌ها بر روی تک شمع و همچنین گروه‌های شمع تا میزان جابجایی جانبی ۸ میلی‌متر (نسبت جابجایی جانبی به قطر برابر ۰/۴) ادامه یافته و نتایج آن ثبت شده است. شکل ۶ نمودار تغییرات بار وارد بر شمع در برابر جابجایی جانبی برای تک شمع را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد مقاومت تک شمع تا نسبت جابجایی جانبی به قطر تقریبی ۰/۱ با نرخ بیشتری افزایش می‌یابد و پس از آن میزان افزایش مقاومت با نرخ کمتری روبرو می‌شود. نسبت بین میانگین بار جانبی اعمال شده به یک شمع در هر ردیف و کل بار اعمال شده به گروه شمع (گروه شمع ۳×۲) برای سه ردیف شمع در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که این نسبت‌ها به تغییر مکان شمع وابسته نمی‌باشند و شمع‌های جلو، وسط و انتها به ترتیب ۲۲٪، ۱۶٪ و ۱۲٪ از کل بار گروه شمع را تحمل کرده‌اند.

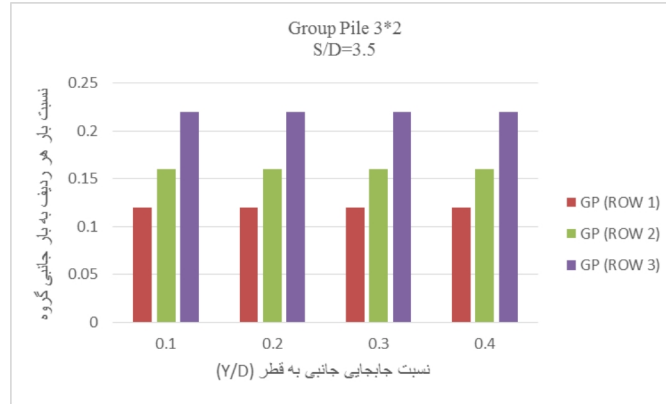
جهت پرکردن مخزن آزمایش از ظرفی با ابعاد مشخص که تقریباً ۲۰ کیلوگرم خاک در آن جای می‌گرفت استفاده شد. جهت دستیابی به تراکم نسبی ثابت در خاک ارتفاع ریزش (۸۰ cm) به گونه‌ای تنظیم شد که این مهم حاصل شود. همچنین به منظور چک کردن دانسیته نسبی تعداد زیادی جعبه مکعبی کوچک با ابعاد و حجم مشخص در انتهای مخزن مدل قرارداده شد و بعد از اینکه عملیات ریزش و پخش ماسه از ارتفاع معین صورت پذیرفت، وزن هر جعبه کوچک اندازه‌گیری شد تا با دانسیته مورد نیاز مقایسه شود خطای نسبی بین دانسیته مورد نیاز و اندازه‌گیری شده در مدل حدود ۲ درصد بدست آمد.

### ۳- نتایج آزمایشگاهی:

در این پژوهش یک سری از گروه‌های شمع جهت بررسی نوع چپش گروه شمع و فاصله شمع‌ها در گروه بر میانگین مقاومت جانبی گروه شمع و همچنین پاسخ شمع تکی مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت. بدین منظور بارگذاری بر تک شمع و گروه شمع‌ها به صورت افزایشی اعمال شد تا نمودار تغییر مکان افقی در برابر بار غیر خطی بدست آید.



شکل ۶ - نمودار تغییرات بار وارد بر شمع در برابر جابجایی جانبی تک شمع

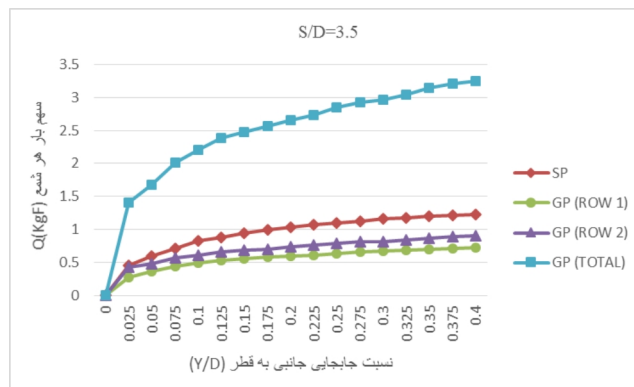
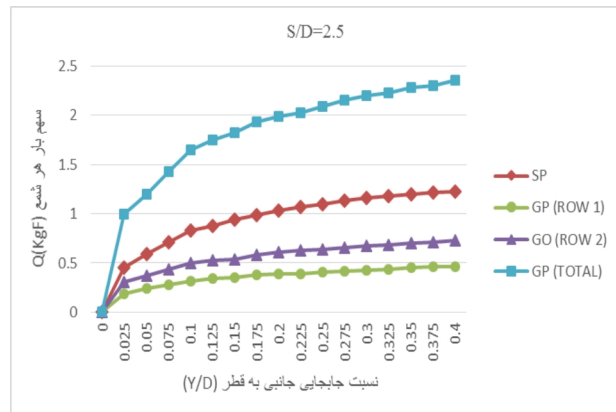
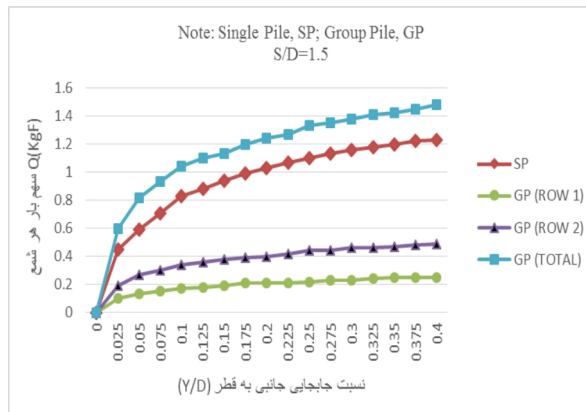


شکل ۷- روند تغییرات نسبت بار هر ردیف به بار جانبی گروه در برابر جابجایی جانبی برای گروه شمع ۳\*۲

۳-۱- پاسخ بار جانبی - تغییر مکان گروه های شمع:

این موضوع می‌باشد که سهم بار هر شمع در ردیف تا نسبت جابجایی جانبی به قطر تقریبی ۰/۱ با نرخ بیشتری افزایش می‌یابد و پس از آن میزان افزایش سهم بار هر شمع با نرخ کمتری روبرو می‌شود.

شکل ۸ تأثیر فاصله شمع‌ها در گروه بر پاسخ نسبت جابجایی جانبی به قطر برای گروه شمع ۲\*۲ با آرایش مربعی را نشان می‌دهد. از نمودارها مشخص است که هر چه فاصله شمع‌ها از یکدیگر در گروه بیشتر باشد میانگین مقاومت جانبی بالاتری به وجود می‌آید. همچنین نتایج بیانگر



شکل ۸- پاسخ تغییر مکان-بار جانبی برای گروه شمع ۲\*۲ در نسبت های فاصله به قطر متفاوت

جابجایی جانبی به قطر یکسان (حدود ۰/۴) مقاومت جانبی میانگین از گروه شمع ۲×۲، حدود ۳۴٪ کمتر از شمع تکی است و مقاومت جانبی میانگین از گروه شمع ۳×۲ حدود ۳۹٪ کمتر از شمع تکی می‌باشد.

در شکل ۹ پاسخ تغییرات نسبت جابجایی جانبی به قطر در برابر بار جانبی میانگین برای گروه شمع در دو حالت مربعی و موازی (در حالت  $\frac{S}{D}=3.5$ ) و شمع تکی نشان داده شده است. مشخص است که برای یک نسبت



شکل ۹- پاسخ تغییرات نسبت جابجایی جانبی به قطر در برابر بار جانبی میانگین برای گروه شمع در دو حالت ۲×۲ و ۳×۲

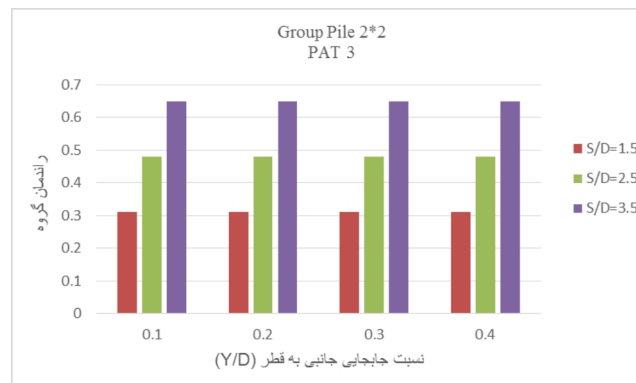
همکاران نشان داد که راندمان گروه بین ۰/۴۵ تا ۰/۷ متغیر بوده است هنگامی که تغییر مکان به  $0.1D$  برسد [۱۸]. لازم به ذکر است که راندمان گروه شمع بر اساس مقاومت جانبی نهایی گروه نسبت به مقاومت جانبی تک شمع در یک تغییر مکان یکسان در این تحقیق محدوده نتایج کمتر و بعضاً ثابتی را نشان داده است. این موضوع به این علت است که راندمان گروه به تغییر شکل شمع‌ها وابستگی نشان نمی‌دهد. در شکل ۱۰ رابطه نسبت جابجایی جانبی به قطر در مقابل راندمان را بر اساس یافته‌های این پژوهش برای شرایط مختلف نسبت فاصله به قطر شمع‌ها در گروه نشان داده شده است.

### ۳-۲- راندمان گروه:

راندمان گروه جهت تخمین مقاومت گروه شمع در مقابل مقاومت شمع تکی دارای اهمیت می‌باشد. راندمان گروه  $\eta$ ، در یک تغییر مکان مشخص، بر اساس ترم‌های مقاومت جانبی نهایی گروه شمع به شمع تکی به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود.

$$\eta = \frac{Q_{LG}}{n_1 n_2 Q_{LS}} \quad (2)$$

در این رابطه،  $Q_{LG}$  مقاومت جانبی گروه شمع،  $Q_{LS}$  مقاومت جانبی شمع تکی،  $n_1$  تعداد ردیف‌ها و  $n_2$  تعداد ستون‌ها در گروه شمع می‌باشد. براساس نتایج تحقیقات مک وی و همکاران راندمان گروه شمع عموماً به دانسیته خاک وابسته نیست [۶]. همچنین نتایج آزمایشات واکای و

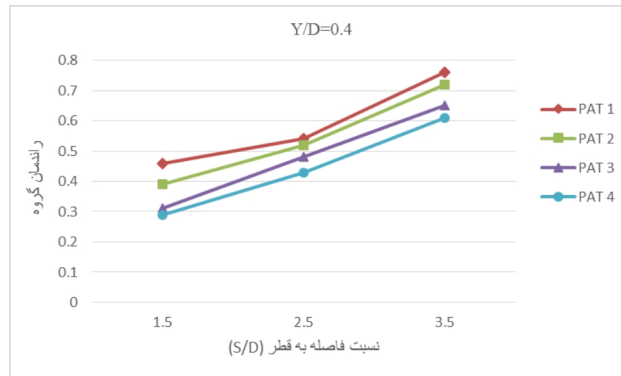


شکل ۱۰- پاسخ تغییرات نسبت جابجایی جانبی به قطر در مقابل راندمان گروه در شرایط مختلف نسبت فاصله به قطر شمع‌ها



به طور مثال، برای گروه شمع ۲×۲ میزان راندمان گروه با افزایش نسبت فاصله به قطر از ۱/۵ به ۳/۵، از حدود ۰/۳ تا ۰/۶۵ تغییر می‌نماید.

شکل ۱۱ رابطه بین راندمان گروه در مقابل نسبت فاصله به قطر شمع‌ها در گروه در چینش‌های مختلف را نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که با افزایش فاصله شمع‌ها، راندمان گروه نیز افزایش یافته است.



شکل ۱۱- رابطه بین راندمان گروه در مقابل نسبت فاصله به قطر شمع‌ها در گروه‌های با چینش مختلف

بر اساس نتایج آزمایش‌ها تعدادی از ضرایب کاهش گروه برای گروه‌های شمع با چیدمان‌های مختلف و با نسبت فاصله به قطر متفاوت در جدول ۴ ارائه شده است. مقادیر ضرایب  $p_m$  ارائه شده در جدول در واقع میانگین ضرایب کاهش گروه برای هر یک از شمع‌های تکی واقع در گروه می‌باشد. این ضرایب برای ردیف جلویی مستقل از نوع آرایش گروه شمع و فاصله شمع‌ها می‌باشد ولی برای ردیف‌های میانی و انتهایی از گروه شمع بسیار وابسته به نوع آرایش گروه و فاصله شمع‌ها می‌باشد.

#### ۴- محاسبه ضرایب کاهش گروه از آزمایش مدل:

همانگونه که قبلاً بیان شد، یکی از معمول‌ترین و پرکاربردترین روندها برای در نظر گرفتن اثرات اندرکنشی گروه‌های شمع آن است که منحنی-های  $p-y$  تک شمع‌ها را با استفاده از یک ضریب کاهش گروه ( $p_m$ ) برای هر ردیف شمع واقع در گروه ویرایش و اصلاح می‌کنند. در واقع در این روش مقاومت خاک با ضرب شدن در یک ضریب ثابت  $p_m$  کاهش می‌یابد.

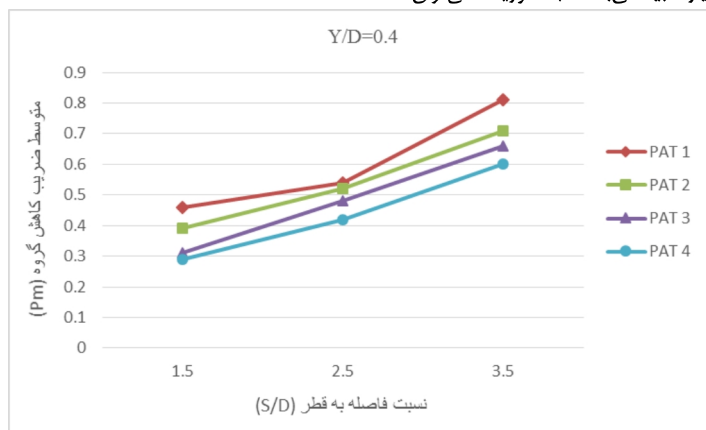
جدول ۴- تعدادی از ضرایب کاهش گروه برای گروه‌های شمع با چیدمان‌های مختلف

$\frac{Y}{D}$	$\frac{S}{D}$	چینش گروه	میانگین $P_m$	ضرایب کاهش گروه					
				$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$
0.40	1.5	2×1	0.46	0.38	0.54	--	--	--	--
0.40	2.5	2×1	0.54	0.46	0.62	--	--	--	--
0.40	3.5	2×1	0.81	0.74	0.87	--	--	--	--
0.40	1.5	3×1	0.39	0.24	0.33	0.59	--	--	--
0.40	2.5	3×1	0.52	0.37	0.50	0.71	--	--	--
0.40	3.5	3×1	0.71	0.53	0.69	0.93	--	--	--
0.40	1.5	2×2	0.31	0.20	0.20	0.41	0.41	--	--
0.40	2.5	2×2	0.48	0.37	0.37	0.59	0.59	--	--
0.40	3.5	2×2	0.66	0.59	0.59	0.74	0.74	--	--
0.40	1.5	3×2	0.29	0.18	0.18	0.25	0.25	0.45	0.45
0.40	2.5	3×2	0.42	0.27	0.27	0.42	0.42	0.57	0.57
0.40	3.5	3×2	0.60	0.44	0.44	0.58	0.58	0.80	0.80

ایجاد گردد. این نواحی برش با افزایش مقدار بار جانبی گسترش می‌یابد و به خصوص برای گروه‌های شمع خیلی متراکم و با فاصله نزدیک به هم تداخل پیدا می‌کنند. این هم پوشانی در نواحی برشی موجب تضعیف و کاهش مقاومت توده خاک شده و در نهایت موجب کاهش باربری جانبی

همانگونه که از نتایج جدول (۴) مشاهده می‌شود مقدار ضریب  $p_m$  برای ردیف‌های جلویی بیشتر و برای ردیف‌های عقبی کمتر بدست می‌آید. در گروه شمع هر یک از شمع‌ها توسط توده خاک واقع در جلوی شمع تحت فشار قرار می‌گیرد که باعث می‌شود یک ناحیه برش درون توده خاک

مقادیر تغییرات را نادیده گرفت. مقدار ضریب  $p_m$  برای گروه‌های شمع با چیدمان‌های مختلف با فاصله  $2/5$  برابر قطر در محدوده  $0/42$  تا  $0/54$  قرار گرفته است که این نتایج به مقدار ضریب  $p_m$  که توسط مک وی و همکاران در سال ۱۹۹۸ از آزمایش بزرگ مقیاس بدست آمده بسیار نزدیک می‌باشد [۶].



شکل ۱۲- نمودار تغییرات میانگین ضرایب کاهش گروه در برابر نسبت فاصله به قطر شمع‌ها در گروه‌های با چیدمان‌های متفاوت

دستورالعمل‌ها و مراجع مختلفی برای تعیین مقدار ضرایب کاهش گروه مورد استفاده در طراحی‌ها وجود دارد. این دستورالعمل‌ها بر اساس نتایج چندین مطالعه تجربی موجود و در دسترس و اغلب نیز بر روی مدل‌های گروه شمع بزرگ مقیاس با فواصل قرار گیری محدود و اکثراً تحت شرایط انتهایی آزاد تهیه و ارائه شده است. در تحقیق حاضر، تمرکز بر روی تحلیل گروه‌های شمع تحت بار جانبی و در مقیاس آزمایشگاهی با در نظر گرفتن تأثیر پارامترهایی مثل تعداد شمع‌ها در گروه، فاصله شمع‌ها در گروه، نحوه چپش شمع‌ها در گروه (تحت شرایط انتهایی ثابت) بوده است. همانگونه که بیان شد ضرایب کاهش گروه را می‌توان با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی از قبیل آزمایش‌های بارگذاری بزرگ مقیاس و یا کوچک مقیاس بدست آورد ولی به هر حال ایجاد و انجام یک آزمایش بزرگ مقیاس بر روی گروه‌های شمع کار بسیار سخت و پرهزینه‌ای است. لذا در تحقیق حاضر به مطالعه گروه شمع در مقیاس آزمایشگاهی کوچک مقیاس پرداخته شد. بدین منظور چندین مدل مختلف از گروه‌های شمع در چیدمان‌های متفاوت آماده شد و با تغییر فواصل شمع‌ها در گروه در هر حالت تحت مطالعه قرار گرفت. بر اساس نتایج مطالعات صورت گرفته، جمع بندی‌های زیر را می‌توان به صورت خلاصه ارائه نمود:

- برای یک فاصله مشخص شمع‌ها در گروه به طور کلی ضریب راندمان گروه و همچنین نسبت بار هر ردیف به بار جانبی گروه از میزان تغییر مکان جانبی گروه تأثیر نمی‌پذیرد و مقداری ثابت است.

- با افزایش نسبت فاصله به قطر در گروه ضریب راندمان گروه و همچنین ضرایب کاهش گروه ( $p_m$ ) افزایش می‌یابد. به طور مثال، برای گروه شمع

هر شمع مجزا در گروه می‌شود. تأثیر فاصله شمع‌ها در گروه، همچنین تعداد و چپش آنها بر مقدار میانگین ضرایب کاهش گروه ( $p_m$ ) در شکل ۱۲ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که مقدار ضریب  $p_m$  به طور قابل ملاحظه‌ای با افزایش فاصله شمع‌ها از  $1/5$  برابر قطر تا  $3/5$  برابر قطر افزایش یافته است. لازم به ذکر است که روند تغییرات ضریب  $p_m$  و ضریب راندمان در برابر نسبت فاصله به قطر شمع‌ها در گروه از یکدیگر تبعیت می‌کنند و با فاصله اندک بسیار شبیه می‌باشند به طوری که می‌توان

## ۵- اثرات مقیاس و محدودیت‌ها:

به دلیل نیاز به صرف وقت و هزینه زیاد برای انجام آزمایش بر روی مدل‌های بزرگ مقیاس در محل، آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی مدل‌های کوچک مقیاس، روشی است که مورد استفاده قرار می‌گیرد. در آزمایش‌های انجام شده شمع‌های مدل با مقیاس مشخصی کوچک شده‌اند، در حالی که ماسه‌ی به کار رفته در مدل کوچک مقیاس آزمایشگاهی همان مصالحی است که در مدل‌های واقعی استفاده می‌شود. بنابراین ممکن است خاک یا شمع، در مدل‌های کوچک مقیاس همان رفتاری را که در مدل‌های واقعی از آنها دیده می‌شود، نداشته باشد و به تبع آن تأثیراتی بر نتایج آزمایش‌ها بگذارد که به منزله‌ی اثرات مقیاس شناخته می‌شوند. در این تحقیق قطر شمع ( $D$ ) مورد استفاده در آزمایش‌ها بیش از  $100$  برابر قطر متوسط دانه‌ها ( $D_{50}$ ) می‌باشد و از مقدار  $40$  که توسط اوسن (۱۹۷۹) پیشنهاد گردیده است، بیشتر است [۱۹]. به هر حال نمی‌توان با تکیه بر نتایج بدست آمده از آزمایش بر روی مدل‌های کوچک مقیاس، رفتار واقعی در محل را پیش بینی نمود اما به طور کلی مطالعات انجام شده در این پژوهش نشان می‌دهد که نتایج آزمایش‌های کوچک مقیاس قابل مقایسه و تممیم به نتایج آزمایش‌های بزرگ مقیاس می‌باشد و می‌توان از نتایج آن بهره برد.

## ۶- خلاصه و جمع بندی:

ضریب کاهش گروه پارامتری است که به طور معمول در مدل‌های فیزیکی ایجاد شده از گروه‌های شمع به منظور در نظر گرفتن اثرات گروه در تحلیل‌های اندرکنش خاک-شمع مورد استفاده قرار می‌گیرد.

رفتار، زمانیکه فاصله شمع‌ها در گروه از یکدیگر زیاد می‌شود به دلیل کاهش اثرات هم پوشانی سایه‌ای کم می‌شود.

- نتایج مطالعات بر روی گروه شمع تحت بار جانبی در آزمایشگاه با مقیاس کوچک قابل مقایسه و صحت سنجی با نتایج آزمایش‌های بزرگ مقیاس گروه شمع می‌باشد. به طور مثال مقدار ضریب  $p_m$  برای گروه‌های شمع با چیدمان‌های مختلف با فاصله ۲/۵ برابر قطر در محدوده ۰/۴۲ تا ۰/۵۴ قرار گرفته است که این نتایج به مقدار ضریب  $p_m$  که توسط مک وی و همکاران [۶] از آزمایش‌های بزرگ مقیاس بدست آمده بسیار نزدیک می‌باشد. لذا می‌توان از نتایج آزمایشگاهی گروه شمع تحت بار جانبی در مقیاس کوچک با اطمینان بهره برداری نمود.

Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 124(6), 1998, pp 468-478.

[10]. Rollins, K.M., Lane, J.D., and Gerber, T.M., Measured and computed lateral response of a pile-group in sand, Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 131(1), 2005, pp 103-114.

[۱۱]. مرنودی، سید مرتضی، عباسی نیلق، عسگر، بررسی رفتار شمع تحت نیروهای افقی در داخل خاک‌های لایه‌ای با استفاده از روش المان محدود، یازدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، دانشگاه هرمزگان، دی ۱۳۸۳.

[۱۲]. سجودی، یونس، حاجی علیلو، مسعود، بررسی رفتار خاک در اطراف شمع‌های تحت بار جانبی، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، اردیبهشت ۱۳۸۷.

[۱۳]. کریمی، طاهّا، مردوخ پور، علیرضا، تاثیر عوامل مختلف بر رفتار بار نشست گروه شمع تحت بار جانبی در خاک دو لایه، نهمین سمپوزیسم پیشرفت‌های علوم و تکنولوژی، مشهد، آذر ۱۳۹۳.

[14]. Bharathi, M., R. N. Dubey, and Sanjay K. Shukla. Experimental investigation of vertical and batter pile groups subjected to dynamic loads. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 116, 2019, pp 107-119.

[15]. Terzaghi, K., Evolution of coefficients of subgrade reaction. Geo-technique, 5(4), 1995, pp 297-326.

[16]. Broms, Bengt B. Lateral resistance of piles in cohesionless soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division 90(3), 1964, pp 123-158.

[17] ASTM D-4253 & 4254, Annual book of ASTM standards, Baltimore, USA. 2002.

[18]. Wakai, A., Gose, S., and Ugai, K. 3-D elastoplastic finite element analysis of pile foundations

۲×۲ میزان راندمان گروه با افزایش نسبت فاصله به قطر از ۱/۵ به ۳/۵، از حدود ۰/۳ تا ۰/۶۵ تغییر می‌نماید.

- برای گروه‌های شمع با سر ثابت ردیف جلویی گروه بیشترین مقدار بار را تحمل می‌کند در حالیکه ردیف‌های میانی و عقبی مقدار بار کمتری را برای یک مقدار جابجایی مشخص تحمل می‌کند به طور مثال ضرایب کاهش گروه در یک گروه شمع با چیدمان ۳×۲ و در نسبت فاصله به قطر ۲/۵ برای ردیف‌های جلویی، میانی و عقبی به ترتیب ۰/۵۷، ۰/۴۲ و ۰/۵۷ برآورد شده است. رفتار بار - جابجایی شمع‌های واقع در یک گروه در مقایسه با رفتار تک شمع‌ها انعطاف پذیری بیشتری دارد. این اختلاف

## ۷- منابع و مراجع:

[1]. API, Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms, 15th ed., API RP2A, American Petroleum Institute, 1958, pp115.

[2]. API, Recommended practice for planning, designing, and constructing fixed offshore platform s, API Recommended Practice 2A-WSD, 21st ed. American petroleum Institute, Washington, D. C, 2007.

[3]. Elhakim, A., Elkhoully, M. and Awad, R., Three dimensional modeling of laterally loaded pile groups resting in sand. HBRC journal, 12(1), 2016, pp 78 -87.

[4]. Brown, Dan A., Clark Morrison, and Lymon C. Reese. Lateral load behavior of pile group in sand. Journal of Geotechnical Engineering 114 (11), 1988, pp. 1261-1276.

[5]. Brown, Dan A., et al. Static and dynamic lateral loading of pile groups. Washington, DC, USA: TRB, 2001.

[6]. McVay, M., Casper, R. and Shang, T.I. Lateral response of three-row groups in loose to dense sands at 3D and 5D pile spacing. Journal of Geotechnical Engineering, 121(5), 1995, pp 436-441.

[7]. McVay, M., Zhang, L., Molnit, T., and Lai, P., Centrifuge testing of large laterally loaded Pile groups in sands, Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 124(10), 1998, pp 1016-1026.

[8]. Rollins, Kyle M., and Andrew Sparks. Lateral resistance of full-scale pile cap with gravel backfill. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering 128(9), 2002, pp 711-723.

[9]. Rollins, K.M., Peterson, K.T., and Weaver, T.J., Lateral load behavior of full-scale pile group in clay,

subjected to lateral loading, *Soil and Foundation*, Tokyo, 39(1), 1999, pp 97-111.

[19]. Ovesen, N.K., The use of physical models in design: The scaling law relationship, *Proc., 7<sup>th</sup> European Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 4, 1979, pp 318-323.

## Laboratory Investigation of the Pile Group Behavior in Sandy Soils under Lateral Loads

Amir Vakili

Department of Civil Engineering, Beyza Branch, Islamic Azad University, Beyza, Iran

Mohammad Ali Zomorodian

Department of Civil Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

Mohammad Hossein Ahmadi

Department of Civil Engineering, Beyza Branch, Islamic Azad University, Beyza, Iran

### Abstract

Structures are often subjected to lateral loads due to earthquakes, winds, and waves of water. It is very necessary to predict and measure the "load-deflection" behavior of the pile group, as well as its strain behavior, in order to create a safe and economical design. The behavior of piles embedded in soil, placed under the lateral load, is typically modeled and analyzed using the Winkler nonlinear springs method. In this method, the soil-pile interaction is modeled by nonlinear curves of P-Y in a way that P-Y curve modifies and adjust the single pile using a p-multiplier ( $P_m$ ) for each row of piles in the group. The  $P_m$  factor depends upon the configuration of pile group and the pile spacing. The value of this factor for the leading rows are considered higher and for the trailing rows lower. The present study was conducted to investigate the effects of various parameters, such as the pile spacing in the group and different layouts on the  $P_m$  factor. The  $P_m$  factor obtained from this study has good compatibility with the results of the full-scale test on pile group. The results show that the value of the  $P_m$  factor for pile groups with different layouts of 2.5-diameter pile spacing was in the range of 0.42 to 0.54, which is very close to the value of  $P_m$  obtained by previous study.

**Key words:** Pile group, Lateral load, P-Y method, Group reduction factor