

بررسی رفتار شمع منفرد و گروه شمع مستقر بر رأس شیروانی ماسه‌ای تحت بارگذاری کششی

رضا محمد علی نژاد*^۱ و میثم بیات^۲

^۱ استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
^۲ دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۶، نشر آنلاین: ۰۰/۰۰/۰۰)

چکیده

گروه شمع به‌عنوان پی سازه‌هایی مانند دکل‌های انتقال، پایه‌های پل استفاده می‌گردد. این سازه‌ها اغلب در کنار و یا روی شیروانی مستقر می‌گردند و تحت اثر بارهای کششی قرار می‌گیرند. در خصوص ظرفیت باربری کششی شمع منفرد و گروه شمع مجاور شیروانی تحقیقاتی صورت نپذیرفته است، لذا بررسی رفتار گروه شمع مجاور شیروانی تحت بارگذاری کششی از اهمیت خاصی برخوردار است. هدف از این تحقیق بررسی ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع قائم تحت بارگذاری کششی واقع در رأس شیروانی ماسه‌ای به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی می‌باشد. به این منظور یک سری آزمایش‌های مدل فیزیکی تحت بارگذاری کششی بر روی شمع منفرد و گروه‌های شمع ۲×۲، ۲×۱، ۳×۱ و ۳×۳ واقع در رأس شیروانی ماسه‌ای خشک انجام گرفت و اثر عوامل مختلفی، همانند تراکم خاک، طول مدفون شمع‌ها، جهت قرارگیری گروه شمع خطی نسبت به رأس شیروانی و فاصله گروه شمع از راس شیروانی بر روی ظرفیت باربری و ضریب راندمان کششی گروه شمع مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌های مدل فیزیکی نشان داد، ظرفیت باربری و ضریب راندمان کششی گروه شمع به عواملی همانند فاصله شمع‌ها از راس شیروانی، تعداد شمع‌ها و جهت قرارگیری گروه شمع خطی نسبت به رأس شیروانی بستگی دارد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ضریب راندمان گروه شمع در تراکم‌ها و طول‌های مدفون مختلف شمع، با افزایش تعداد شمع‌ها کاهش می‌یابد. با افزایش طول مدفون شمع و تراکم نسبی خاک، اثر جهت قرارگیری گروه خطی نسبت به راس شیروانی بر روی ظرفیت باربری کششی و ضریب راندمان گروه شمع کاهش یافت.

کلیدواژه‌ها: ماسه، ظرفیت باربری کششی، شیروانی، ضریب راندمان

۱- مقدمه

در تحقیقات گذشته، محققین مختلفی اثر عوامل مختلفی همانند درصد تراکم نسبی خاک، نسبت طول مدفون شمع، فاصله شمع‌ها از یکدیگر و شکل سطح مقطع شمع بر روی ظرفیت باربری شمع را مورد بررسی قرار دادند (Kumar و همکاران، ۲۰۲۲، Cai و همکاران، ۲۰۲۳؛ Tolun و همکاران، ۲۰۲۴؛ Xu و همکاران، ۲۰۲۴؛ Jerin و همکاران، ۲۰۲۲؛ Khan و همکاران، ۲۰۲۳؛ Guang و همکاران، ۲۰۲۱؛ TEL-Nemr و همکاران، ۲۰۲۴؛ Yang و همکاران، ۲۰۲۴؛ Xu و همکاران، ۲۰۲۴). نتایج تحقیقات برخی از محققین نشان می‌دهد که ظرفیت باربری اصطکاکی جدار شمع تحت بار فشاری از بار کششی بیشتر بوده و این موضوع اهمیت بررسی ظرفیت باربری کششی شمع بصورت مجزا را دوچندان می‌نماید.

Shanker و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی عوامل مختلف بر روی ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع تحت بارگذاری کششی به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی پرداختند. نتایج

گروه شمع به‌عنوان پی سازه‌هایی همانند دکل‌های انتقال، پایه‌های پل، ابرسازه‌های دریایی و ... استفاده می‌گردد. این سازه‌ها اغلب در کنار و یا روی شیروانی مستقر می‌گردند و تحت اثر بارهای کششی قرار می‌گیرند. مکانیسم انتقال بار در گروه شمع به دلیل اثرات متقابل شمع-خاک و شمع-شمع به‌طور کلی با شمع منفرد متفاوت است (Meyerhof، ۱۹۷۶؛ Nourlund، ۱۹۶۳؛ Paik و Salgado، ۲۰۰۳؛ Conte و همکاران، ۲۰۲۱). نتایج مطالعات قبلی نشان داد که، اثر متقابل شمع-خاک یک پدیده پیچیده است که می‌تواند به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر عوامل زیادی قرار گرفته و تأثیر قابل توجهی بر روی پاسخ فنداسیون بگذارد (Nasrollahzadeh و Hatef، ۲۰۲۲؛ Sharafkhan و Shooshpasha، ۲۰۱۸؛ Sun و همکاران، ۲۰۲۱؛ Tianzhing و همکاران، ۲۰۲۰). در صورت قرار گرفتن شمع منفرد و گروه شمع در مجاورت شیروانی بر پیچیدگی‌های پاسخ فنداسیون می‌افزاید.

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۶۶۹۱۰۰۵۱

فاصله شمع‌ها از یکدیگر بر روی ظرفیت باربری جانبی گروه شمع ۲ تایی مجاور شیروانی ماسه‌ای پرداختند. Liu و Jiang (۲۰۲۴) به کمک روش آنالیز عددی به بررسی اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری جانبی شمع‌های کوتاه پرداختند.

با توجه به مطالب ذکر شده در بالا، تحقیقات انجام شده بر روی رفتار شمع منفرد و گروه شمع مجاور شیروانی تاکنون در خصوص اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری جانبی و ظرفیت باربری قائم شمع تحت بار فشاری می باشد و تاکنون اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری کششی شمع منفرد و گروه شمع مورد بررسی و مطالعه قرار نگرفته است. لذا بررسی رفتار گروه شمع مجاور شیروانی تحت بارگذاری کششی از اهمیت خاصی برخوردار است. هدف اصلی این تحقیق بررسی ظرفیت باربری کششی و ضریب راندمان گروه شمع مجاور شیروانی ماسه‌ای خشک می باشد. در این بررسی اثر عوامل مختلفی همانند اثرات جهت قرارگیری گروه شمع خطی نسبت به شیروانی و چینش گروه شمع، تراکم نسبی خاک و طول مدفون شمع بر روی ظرفیت باربری کششی و ضریب راندمان گروه شمع مجاور شیروانی ماسه‌ای بررسی شده است. برای نیل به این هدف مجموعه‌ای از آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی مدل فیزیکی شمع منفرد و گروه شمع مستقر در مجاور شیروانی ماسه‌ای خشک انجام شده است و نتایج حاصل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۲- آزمایش‌های آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح و روش انجام کار

۲-۱-۱- خاک

در این تحقیق از ماسه ریزدانه خشک شهرستان رامهرمز واقع در جنوب غرب کشور استفاده گردید. نمودار دانه‌بندی ماسه مورد استفاده، در شکل شماره ۱ و ویژگی‌های این ماسه در جدول شماره ۱ ارائه شده است. دانه بندی خاک به کمک آزمایش دانه‌بندی به روش خشک تعیین گردید (مطابق آیین نامه ASTM D422-63). ماسه بر اساس روش طبقه‌بندی متحد (مطابق آیین نامه ASTM D2487-17) از نوع SP بوده و از آزمایش برش مستقیم (مطابق آیین نامه ASTM D3080) جهت تعیین زاویه اصطکاک ماسه استفاده گردید.

۲-۱-۲- روش انجام آزمایش

در این مطالعه از شمع‌های فولادی توپر به قطر ۱۸ میلی‌متر و به طول ۳۰، ۴۵ و ۶۵ سانتیمتر و از سرشمع فولادی به ابعاد ۱۶×۱۶ سانتیمتر و ضخامت ۲ سانتیمتر استفاده گردید. طول مدفون شمع‌ها در آزمایش‌ها برابر با ۱۵، ۳۰ و ۵۰ سانتیمتر و زاویه شیروانی ۳۳/۷ درجه در نظر گرفته شده بود. به منظور تامین

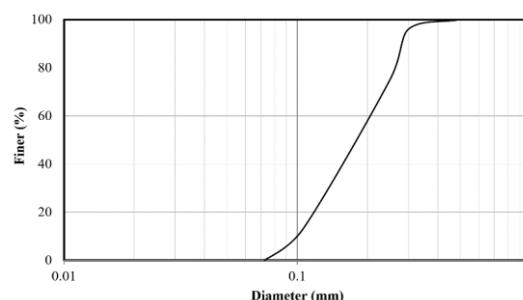
آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش فاصله شمع‌ها از یکدیگر ضریب راندمان گروه شمع افزایش می‌یابد و با افزایش نسبت طول مدفون شمع به قطر شمع، ضریب راندمان گروه شمع کاهش می‌یابد. Gaaver (۲۰۱۳) به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی به بررسی اثر تراکم نسبی و طول مدفون شمع بر روی ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع ۴، ۶ و ۸ تایی تحت بارگذاری کششی پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ظرفیت باربری کششی شمع منفرد (با نسبت طول مدفون شمع به قطر شمع برابر با ۱۴) با افزایش تراکم نسبی از ۷۵٪ به ۸۵٪ به میزان ۳۷٪ افزایش یافت و ظرفیت باربری شمع منفرد با افزایش تراکم نسبی از ۸۵٪ به ۹۵٪ به میزان ۱۴٪ افزایش یافت. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش تراکم نسبی خاک ضریب راندمان گروه شمع افزایش می‌یافت. Emirler و همکاران (۲۰۲۰) به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی به بررسی اثر زبری سطح شمع بر روی ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع تحت بارگذاری کششی پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ظرفیت باربری کششی شمع منفرد با سطح زبر از ظرفیت باربری کششی شمع منفرد با سطح صاف بیشتر می‌باشد. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان داد ضریب راندمان گروه شمع با سطح زبر از ضریب راندمان گروه شمع با سطح زبر صاف کمتر می‌باشد. Emirler و همکاران (۲۰۲۰) به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی به بررسی اثر درصد تراکم نسبی خاک و نسبت طول مدفون شمع به قطر شمع بر روی ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع تحت بارگذاری کششی پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد در درصد تراکم نسبی‌های مختلف خاک، با افزایش نسبت طول مدفون شمع به قطر شمع، ظرفیت باربری کششی شمع منفرد بطور چشمگیری افزایش می‌یابد و با افزایش درصد تراکم خاک اثر نسبت طول مدفون شمع به قطر شمع بر روی افزایش ظرفیت باربری کششی بیشتر می‌گردد. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان داد که هنگامیکه فاصله شمع‌ها در گروه شمع از یکدیگر برابر با ۸ برابر قطر شمع می‌گردد، ضریب راندمان گروه شمع برابر با ۱ می‌گردد. Mohammad Ali Nejad و همکاران (۲۰۲۱ و ۲۰۲۳) به کمک آزمایش‌های آزمایشگاهی به بررسی اثر عوامل مختلف همانند فاصله شمع‌ها از یکدیگر، طول مدفون شمع، شیب شیروانی و فاصله گروه شمع از راس شیروانی بر روی ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی تحت بار فشاری پرداختند. Swant و Khati (۲۰۱۸ و ۲۰۲۰) به کمک آزمایش‌های آزمایشگاهی به بررسی اثر شیروانی ماسه‌ای بر روی ظرفیت باربری جانبی گروه شمع با آرایش خطی و مربعی پرداختند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که گروه شمع عمود بر شیروانی ظرفیت باربری بیشتری دارد. Chen و همکاران (۲۰۲۲) به کمک آزمایش‌های آزمایشگاهی به بررسی اثر شیب شیروانی و

برای به حداقل رساندن اثر مقیاس، می‌بایست نسبت قطر شمع به قطر متوسط ذرات ماسه از حداقل مقدار پیشنهادی، بیشتر گردد. حداقل مقدار پیشنهادی توسط محققین مختلف ۵۰، ۸۰ و ۱۰۰ می باشد (Choi و همکاران، ۲۰۱۷). در این مطالعه نسبت قطر شمع به قطر متوسط دانه‌های ماسه ۱۰۵ می‌باشد.

نحوه قرارگیری گروه شمع و اعمال بار به گروه شمع در شکل شماره ۲ نشان داده شده است. به منظور مشاهده و کنترل اجرای شیروانی، در وجه جلویی باکس از ورق پلکسی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر استفاده شده بود. جابجایی قائم سرشمع توسط دو گیج با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر که در دو لبه سرشمع قرار داشتند، اندازه‌گیری گردید و متوسط جابجایی قائم اندازه‌گیری شده توسط دو گیج قرار داده شده بر روی دو لبه سرشمع به عنوان جابجایی قائم گروه شمع در نظر گرفته شد. از جک اسکرو برقی جهت بارگذاری قائم استفاده گردید و در تمامی آزمایش‌ها، بارگذاری به صورت جابجایی با سرعت ثابت ۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه بر مرکز سرشمع اعمال گردید و نیرو اعمال شده به وسیله یک نیروسنج که مابین سرشمع و قاب فولادی قرار داده شده بود، اندازه‌گیری می‌گردید.

برنامه آزمایش‌های انجام شده در جدول ۲ ارائه شده است. در این تحقیق از گروه‌های شمع ۱×۱، ۲×۲، ۳×۳ (شکل شماره ۴) استفاده گردید. در این آزمایش‌ها فاصله شمع‌ها در گروه شمع‌ها 3dp در نظر گرفته شد (dp قطر شمع می‌باشد). از روش تراکم کاهش یافته به منظور دستیابی به یک تراکم یکسان در تمامی لایه‌ها، جهت اجرای شیروانی استفاده گردید. خاک ماسه‌ای خشک در لایه‌هایی به ضخامت ۵ سانتیمتر تا رسیدن به تراکم موردنظر کوبیده می‌گردید. تراکم نهایی موردنظر برای لایه‌ها ۴۰٪، ۶۵٪ و ۸۵٪ در نظر گرفته شد. به هنگام رسیدن شیروانی به تراز نوک شمع، گروه شمع در محل موردنظر مستقر می‌گردید به این منظور در این تحقیق از دو میله استفاده گردید که از زیر سرشمع در جهت عرضی جعبه آزمایش عبور کرده و انتهای آن‌ها توسط ۴ گیره به لبه‌های جعبه محکم می‌گردیدند (شکل شماره ۳) و سپس سایر لایه‌های خاک تا تراز نهایی اجرا می‌گردید.

شرایط اتصال گیردار شمع به سرشمع، بالای شمع‌ها به طول ۲ سانتیمتر در سرشمع ثابت گردیده بود؛ از این رو فاصله قائم مرکز سرشمع تا سطح خاک ۱۴ سانتیمتر بوده است.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در مدل فیزیکی

ابعاد داخلی باکس مورد استفاده در این تحقیق ۹۰×۹۰×۱۸۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد. ابعاد باکس به گونه‌ای تعیین گردیده بود تا مرزهای جانبی اثری بر روی نتایج آزمایش‌ها نداشته باشد. بر اساس پیشنهاد محققین جهت عدم تاثیرگذاری مرزها بر روی نتایج آزمایش‌های کششی، فاصله مرزها از لبه خارجی شمع‌ها می‌بایست حداقل ۳ تا ۸ برابر قطر شمع‌ها و فاصله نوک شمع‌ها از کف مدل ۸ برابر قطر شمع فاصله داشته باشد (shanker و همکاران، ۲۰۰۷؛ Gaaver؛ ۲۰۱۳؛ kishida؛ ۱۹۶۳). در این تحقیق فاصله مرزها از لبه خارجی شمع‌های بزرگترین گروه شمع (گروه شمع ۳×۳)، ۲۱ برابر قطر شمع‌ها و فاصله بلندترین شمع از کف مدل (با طول مدفون ۵۰ سانتیمتر)، ۲۲ برابر قطر شمع می‌باشد. عدم تاثیرپذیری نتایج از مرزهای جانبی به کمک آنالیز حساسیت و با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS3D کنترل گردید. قبل از هر آزمایش جهت کاهش اصطکاک بین خاک و دیواره باکس، یک لایه نازک روغن بر روی دیواره‌های باکس اجرا گردید (MARALAPALLE و همکاران، ۲۰۲۳).

جدول ۱- پارامترهای خاک ماسه‌ای استفاده شده در مدل فیزیکی

$\gamma_{max} (KN / m^3)$	$\gamma_{min} (KN / m^3)$	G_s	$\Phi (^{\circ})$	D_{10}	D_{50}	C_u	C_c
۱۶/۹	۱۳/۸۸	۲/۶۵	۳۵	۰/۱	۰/۱۸	۲/۰۲	۰/۸۲



شکل ۲- جزئیات مدل فیزیکی استفاده شده در تحقیق الف) مدل فیزیکی اجرا شده ب) طرح شماتیک نحوه اجرای مدل فیزیکی



شکل ۳- نحوه استقرار گروه شمع هنگام اجرای شیروانی ماسه‌ای

فاصله گروه شمع از راس شیروانی را تا مرحله‌ای که ظرفیت باربری کششی با حالت زمین مسطح برابر گردد، افزایش داده شد. نمودار جابجایی در مقابل نیرو برای گروه شمع ۲×۲ و ۳×۳ واقع در راس شیروانی به عنوان نمونه در شکل ۵ ارائه شده است. نحوه محاسبه ظرفیت باربری کششی برای گروه شمع ۳×۳ به عنوان نمونه در شکل ۵ ارائه شده است. از ضرایب راندمان جهت بررسی رفتار گروه شمع که بصورت زیر تعریف می‌گردد، استفاده گردید:

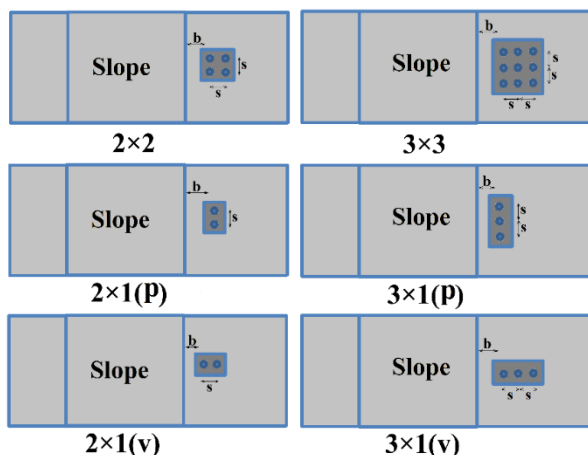
$$\eta_t = \frac{Q_t}{\sum_1^n Q_{i,t}} \quad (1)$$

ضریب راندمان کششی گروه شمع	η_t
ظرفیت باربری کششی گروه شمع	Q_t
ظرفیت باربری کششی شمع منفرد	$Q_{i,t}$

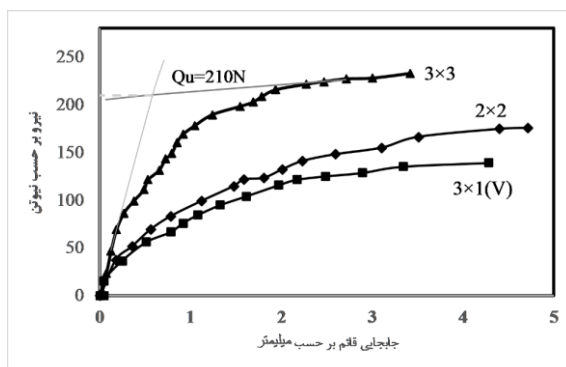
از مفاهیم آنالیز عددی به منظور استفاده از نتایج این تحقیق، جهت نمونه‌هایی با مقیاس بزرگ می‌توان استفاده نمود. در صورتی که λ ضریب مقیاس هندسه مدل (نسبت اندازه واقعی به اندازه مدل آزمایشگاهی) باشد و از خاک واقعی در مدل‌سازی استفاده گردد، برای آزمایش‌های تحت شتاب $1g$ ، ضرایب مقیاس را می‌توان از جدول (۳) استخراج نمود.

۲-۲- نتایج

در این تحقیق در مجموع ۱۲۶ آزمایش برای شمع منفرد و گروه شمع مستقر بر رأس شیروانی و زمین مسطح ماسه‌ای انجام داده شد. در این مطالعه ابتدا ظرفیت باربری گروه شمع در حالت زمین مسطح اندازه‌گیری گردید و سپس گروه شمع مورد نظر در فاصله $0.5d_p$ از رأس شیب قرار داده شد و ظرفیت باربری گروه شمع تحت بار قائم اندازه‌گیری گردید. در حالت تراکم نسبی 65%



شکل ۴- نحوه قرار گروه‌های شمع نسبت به رأس شیروانی



شکل ۵- نمودار جابجایی در مقابل نیرو برای گروه شمع ۳×۳، ۲×۲ و ۳×۱ واقع در رأس شیروانی

جدول ۲- برنامه آزمایش‌های مدل فیزیکی

هدف	تعداد آزمایش‌های کششی	فاصله شمع‌ها	گروه شمع
بررسی اثر فاصله از رأس شیروانی بر روی ظرفیت باربری گروه شمع	۶۶	$3d_p$	$2 \times 1, 3 \times 1, 2 \times 2, 3 \times 3$
بررسی اثر طول مدفون بر روی ظرفیت باربری و ضریب راندمان	۱۲	$3d_p$	$2 \times 1, 3 \times 1, 2 \times 2, 3 \times 3$
بررسی اثر تراکم نسبی خاک بروی ظرفیت باربری و ضریب راندمان	۱۲	$3d_p$	$2 \times 1, 3 \times 1, 2 \times 2, 3 \times 3$
شمع منفرد در تراکم ۴۰٪	۵	-	-
شمع منفرد در تراکم ۶۵٪	۸	-	-
شمع منفرد در تراکم ۸۵٪	۸	-	-
شمع منفرد با طول مدفون ۱۵ سانتیمتر	۷	-	-
شمع منفرد با طول مدفون ۵۰ سانتیمتر	۷	-	-

جدول ۳- خلاصه ضرایب مقیاس آنالیز عددی

ضریب مقیاس	پارامتر
λ	طول
1	دانسیته
λ	تنش
$\lambda^{1/2}$	کرنش
$\lambda^{3/4}$	سرعت
$\lambda^{1/2}$	مدول برشی

۲-۲-۱- شمع منفرد

با توجه به اینکه جهت محاسبه ضریب راندمان نیاز به تعیین مقدار ظرفیت باربری شمع منفرد می‌باشد به همین دلیل در این بخش، ۳۵ آزمایش بر روی شمع منفرد صورت پذیرفت. در این بخش اثر فاصله از راس شیروانی، تراکم نسبی خاک و طول مدفون شمع بر روی ظرفیت باربری کششی شمع منفرد مورد بررسی قرار گرفت. تراکم نسبی خاک ماسه‌ای خشک ۰.۴۰، ۰.۶۵ و ۰.۸۵ و طول مدفون شمع ۱۵، ۳۰ و ۵۰ سانتیمتر (با تراکم ۰.۶۵) در نظر گرفته شده بود. نتایج آزمایش‌ها در شکل ۶ ارائه شده است. برای انجام آزمایش‌ها ابتدا ظرفیت باربری کششی شمع بر روی زمین مسطح اندازه‌گیری می‌گردید و در گام بعدی شمع منفرد در فاصله 0.5dp از راس شیروانی قرار داده می‌شد و ظرفیت باربری کششی آن اندازه‌گیری می‌گردید. در گام‌های بعدی با قرار دادن شمع منفرد در فواصل بیشتر از راس شیروانی ظرفیت باربری کششی شمع منفرد اندازه‌گیری می‌گردید. افزایش فاصله شمع منفرد از راس شیروانی تا مرحله‌ای که ظرفیت باربری کششی شمع منفرد مجاور شیروانی با ظرفیت باربری کششی شمع منفرد مستقر در زمین مسطح برابر می‌گردید، ادامه پیدا می‌کرد.

نتایج نشان داد که ظرفیت باربری کششی شمع در هنگام قرار گرفتن شیروانی در مجاورت شیروانی کاهش یافت. این امر به علت کاهش فشار محصورکننده شمع هنگام قرارگیری در مجاورت شیروانی می‌باشد.

نتایج نشان داد که با افزایش تراکم نسبی، میزان کاهش ظرفیت باربری شمع منفرد نسبت به حالت زمین مسطح، کاهش

می‌یابد بطوریکه با افزایش تراکم نسبی خاک از ۰.۴۰ به ۰.۶۵ و ۰.۸۵ میزان کاهش ظرفیت باربری کششی شمع نسبت به حالت زمین مسطح از ۰.۴۰ به ترتیب به ۰.۲۹ و ۰.۲۲ کاهش می‌یابد. که این امر نشان دهنده کاهش اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری کششی شمع منفرد مستقر در مجاورت شیروانی می‌باشد.

نتایج همچنین نشان داد که با افزایش طول مدفون شمع در یک تراکم نسبی یکسان، میزان کاهش ظرفیت باربری کششی شمع نسبت به حالت زمین مسطح کاهش می‌یابد. بطوریکه در تراکم نسبی ۰.۶۵ با افزایش طول مدفون شمع از ۱۵ سانتیمتر به ۳۰ و ۵۰ سانتیمتر میزان کاهش ظرفیت باربری کششی شمع نسبت به حالت زمین مسطح از ۵۱٪ به ترتیب به ۲۹٪ و ۱۶٪ کاهش پیدا می‌کند.

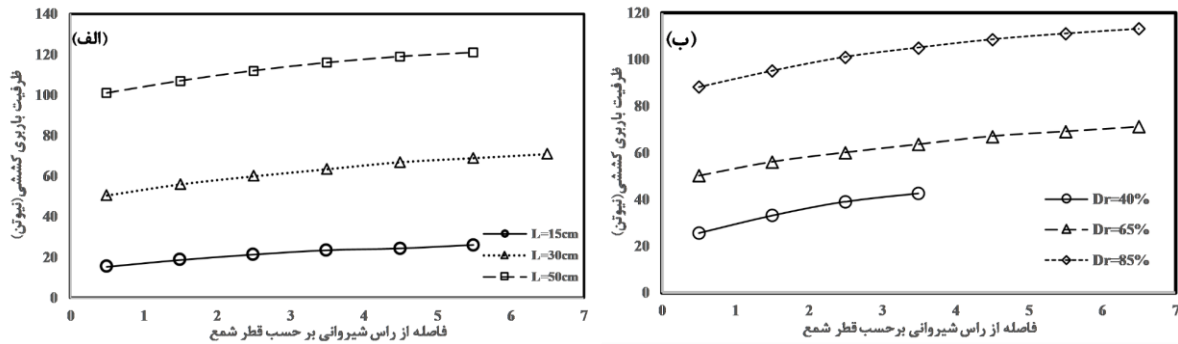
نتایج نشان داد که با افزایش فاصله از راس شیروانی ظرفیت باربری کششی شمع افزایش یافت و اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری کششی کاهش یافت.

در جدول ۴ میزان کاهش ظرفیت باربری شمع منفرد مستقر در راس شیروانی نسبت به حالت زمین مسطح ارائه شده است.

در جدول ۴ فاصله بحرانی برای شمع منفرد (فاصله ای از راس شیروانی که ظرفیت باربری با حالت زمین مسطح برابر می‌شود) با فاصله افقی سطح گسیختگی از وجه خارجی شمع بر روی سطح زمین (X_G) که از روش Chattopadhyay و Pise (۱۹۸۶) محاسبه گردیده است، مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که فاصله بحرانی شمع منفرد از فاصله افقی سطح گسیختگی تئوری بیشتر می‌باشد به عبارت دیگر تا زمانیکه سطح گسیختگی تئوری شمع منفرد راس شیروانی را قطع می‌نماید؛ از اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری کششی نمی‌توان صرف‌نظر نمود.

۲-۲-۲- اثر فاصله گروه شمع از راس شیروانی

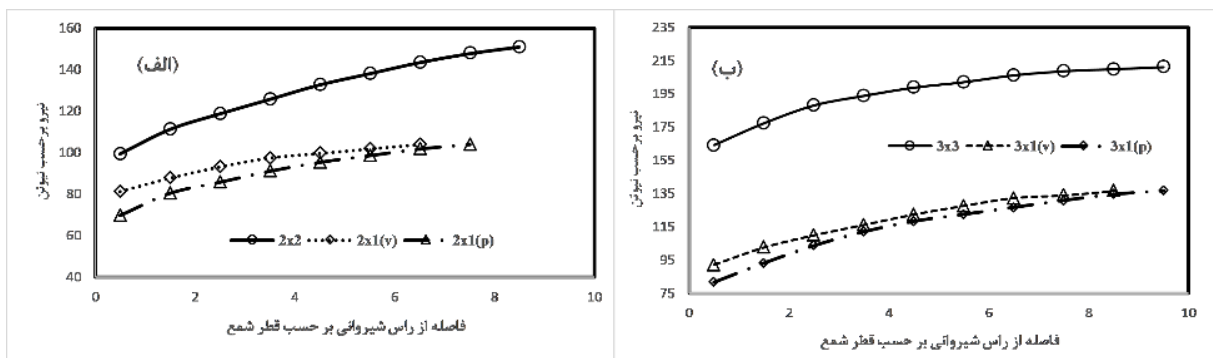
در این بخش اثر فاصله گروه‌های شمع ۱×۲، ۱×۳، ۲×۲ و ۳×۳ از راس شیروانی بر روی ظرفیت باربری گروه شمع مورد بررسی قرار گرفت. تراکم خاک ۰.۶۵ و طول مدفون شمع‌ها ۳۰ سانتیمتر و فاصله شمع‌ها از یکدیگر ۳ برابر قطر شمع در نظر گرفته شد.



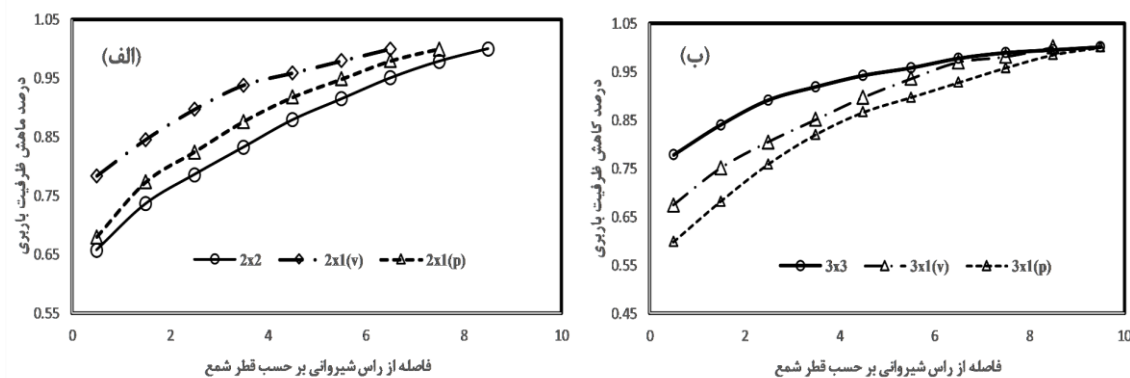
شکل ۶- نمودار جابجایی- نیرو برای شمع منفرد (الف) برای شمع با طول های مدفون مختلف (ب) خاک ب تراکم نسبی مختلف

جدول ۴- میزان کاهش ظرفیت باربری شمع منفرد مستقر در راس شیروانی نسبت به حالت زمین مسطح

	طول مدفون شمع ۳۰ سانتیمتر			طول مدفون شمع ۱۵ سانتیمتر	طول مدفون شمع ۵۰ سانتیمتر
	Dr=40%	Dr=65%	Dr=85%	Dr=65%	Dr=65%
درصد کاهش ظرفیت باربری	۴۰	۲۹	۲۲	۵۱	۱۶
طول بحرانی (s/dp)	۳/۵	۶/۵	۶/۵	۵/۵	۵/۵
XG (فاصله بر حسب قطر شمع)	۲/۸	۴/۵	۶	۳/۶	۴/۸



شکل ۷- تغییرات ظرفیت باربری گروه شمع نسبت به فاصله از راس شیروانی (الف) گروه شمع ۲ و ۴ تایی (ب) گروه شمع ۳ و ۹ تایی



شکل ۸- تغییرات درصد کاهش ظرفیت باربری گروه شمع نسبت به فاصله از راس شیروانی (الف) گروه شمع ۲ و ۴ تایی (ب) گروه شمع ۳ و ۹ تایی

جدول ۵- مقایسه ضریب راندمان کششی گروه شمع در دو حالت واقع در رأس شیروانی و زمین مسطح

	2x1(p)	2x1(v)	3x1(p)	3x1(v)	2x2	3x3
در رأس شیروانی	۰/۶۶	۰/۶۹	۰/۵۲	۰/۴۹	۰/۴۳	۰/۳۰
زمین مسطح	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۶۴	۰/۶۴	۰/۵۳	۰/۳۳
درصد تغییرات	۸/۵	۴/۲	۳۳	۲۳	۱۹	۱۲/۳

کششی در گروه‌های شمع خطی (۲×۱ و ۳×۱) به جهت قرارگیری گروه شمع نسبت به رأس شیروانی بستگی دارد. میزان کاهش ضریب راندمان در گروه شمع موازی با رأس شیروانی نسبت به گروه شمع عمود بر رأس شیروانی بیشتر می‌باشد. میزان کاهش در ضریب راندمان کششی گروه شمع ۲×۱ و ۳×۱ در حالت موازی با رأس شیروانی نسبت به حالت زمین مسطح به ترتیب ۸٪ و ۳۳٪ می‌باشد و در حالت عمود بر رأس شیروانی به ترتیب ۴/۲٪ و ۲۳٪ می‌باشد. نتایج نشان داد با افزایش تعداد شمع‌ها در گروه شمع خطی، میزان کاهش ضریب راندمان افزایش یافت.

نتایج نشان داد که با افزایش تعداد شمع از ۴ به ۹ عدد، میزان کاهش ضریب راندمان گروه شمع مستقر بر روی رأس شیروانی نسبت به حالت زمین مسطح از ۱۹٪ به ۱۲/۳٪ کاهش می‌یابد.

۲-۲-۳- اثر تراکم نسبی خاک

در این بخش اثر تراکم نسبی خاک بر روی ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع مستقر بر رأس شیروانی مورد بررسی قرار گرفت. تراکم خاک ۴۰٪، ۶۵٪ و ۸۵٪ و طول مدفون شمع‌ها ۳۰ سانتیمتر و فاصله شمع‌ها از یکدیگر ۳ برابر قطر شمع در نظر گرفته شد. برای انجام آزمایش‌ها برای هر کدام از تراکم‌های ذکر شده در بالا، ابتدا ظرفیت باربری کششی گروه‌های شمع بر روی زمین مسطح اندازه‌گیری می‌گردید و در گام بعدی گروه شمع در فاصله 0.5d_p از رأس شیروانی مستقر می‌گردید و ظرفیت باربری کششی آن اندازه‌گیری می‌گردید.

نتایج حاصل در جدول ۶ و شکل ۹ ارائه شده است. نتایج نشان داد که میزان کاهش ظرفیت باربری کششی نسبت به حالت زمین مسطح در گروه‌های شمع خطی (۲×۱ و ۳×۱) مستقر در رأس شیروانی با تراکم نسبی‌های مختلف به جهت قرارگیری گروه شمع نسبت به رأس شیروانی بستگی دارد و میزان کاهش ظرفیت باربری در گروه شمع موازی با رأس شیروانی نسبت به گروه شمع عمود بر رأس شیروانی بیشتر می‌باشد. افزایش تراکم نسبی، تاثیر بیشتری بر روی افزایش ظرفیت باربری کششی گروه شمع موازی با رأس شیروانی دارد و با افزایش تراکم نسبی، خاک مقدار عددی نسبت ظرفیت باربری کششی گروه شمع موازی شیروانی نسبت به ظرفیت باربری کششی گروه شمع عمود بر شیروانی، افزایش

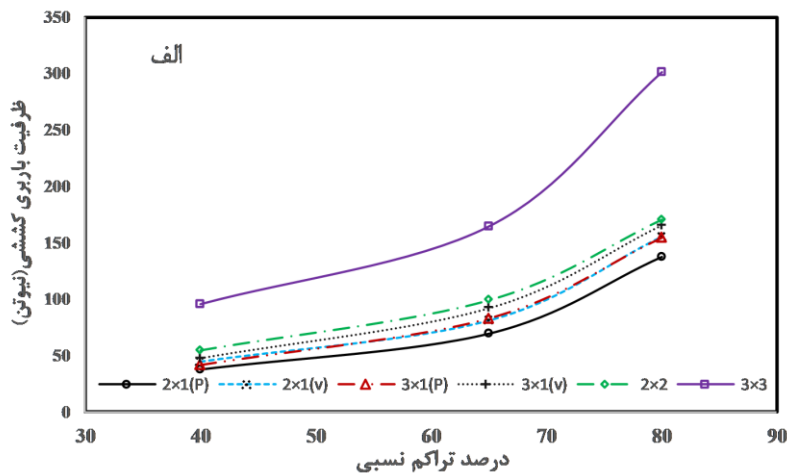
برای انجام آزمایش‌ها ابتدا ظرفیت باربری کششی گروه‌های شمع بر روی زمین مسطح اندازه‌گیری می‌گردید و در گام بعدی، گروه شمع در فاصله 0.5d_p از رأس شیروانی قرار داده می‌شد و ظرفیت باربری کششی آن اندازه‌گیری می‌گردید. در گام های بعدی با قرار دادن گروه شمع در فواصل بیشتر از رأس شیروانی، ظرفیت باربری کششی گروه شمع اندازه‌گیری می‌گردید. افزایش فاصله گروه شمع از رأس شیروانی تا مرحله‌ای که ظرفیت باربری کششی گروه شمع مجاور شیروانی با ظرفیت باربری کششی گروه شمع مستقر در زمین مسطح برابر می‌گردید، ادامه پیدا می‌کرد. نتایج حاصل در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است.

نتایج نشان داد که ظرفیت باربری کششی گروه شمع مجاور شیروانی نسبت به حالت زمین مسطح کمتر می‌باشد. میزان کاهش ظرفیت باربری کششی در گروه‌های شمع خطی (۲×۱ و ۳×۱) به جهت قرارگیری گروه شمع نسبت به رأس شیروانی بستگی دارد. میزان کاهش ظرفیت باربری در گروه شمع موازی با رأس شیروانی نسبت به گروه شمع عمود بر رأس شیروانی بیشتر می‌باشد. میزان کاهش در ظرفیت باربری کششی گروه شمع ۲×۱ و ۳×۱ در حالت موازی نسبت به حالت زمین مسطح به ترتیب ۳۳٪ و ۳۹٪ می‌باشد و در حالت عمود بر رأس شیروانی به ترتیب ۲۲٪ و ۳۲٪ می‌باشد. نتایج نشان داد، با افزایش تعداد شمع‌ها در گروه شمع خطی میزان کاهش در ظرفیت باربری گروه شمع نسبت به حالت زمین مسطح افزایش می‌یابد. برای گروه شمع ۲ تایی در فاصله ۵/۵ برابر قطر شمع و برای گروه شمع ۳ تایی در فاصله ۶/۵ برابر قطر شمع از رأس شیروانی، اثر جهت قرارگیری گروه شمع نسبت به شیروانی قابل صرف نظر کردن می‌باشد.

نتایج نشان داد که با افزایش تعداد شمع از ۴ به ۹ عدد میزان کاهش ظرفیت باربری گروه شمع مستقر بر روی رأس شیروانی نسبت به حالت زمین مسطح از ۳۵٪ به ۲۳٪ کاهش یافت و در فاصله ۶/۵ برابر قطر شمع از رأس شیروانی، میزان درصد کاهش ظرفیت باربری کششی گروه‌های شمع ۴ و ۹ تایی تقریباً برابر شده و می‌توان از اثر تعداد شمع‌های موجود در گروه شمع بر روی کاهش ظرفیت باربری جانبی شمع مجاور شیروانی صرف نظر کرد. مقادیر ضریب راندمان در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج نشان داد که در ضریب راندمان کششی گروه شمع مجاور شیروانی نسبت به حالت زمین مسطح کمتر می‌باشد. میزان کاهش ضریب راندمان

از ۰/۴۰ به ۰/۶۵ و ۰/۸۵ نسبت ظرفیت باربری کششی گروه شمع موازی شیروانی نسبت به ظرفیت باربری کششی گروه شمع عمود بر راس شیروانی از مقدار ۰/۸۴ به ترتیب به مقادیر ۰/۸۷ و ۰/۸۹ افزایش یافت و این نسبت در گروه شمع ۳×۱ از مقدار ۰/۸۹ به ترتیب به مقادیر ۰/۹۱ و ۰/۹۳ افزایش یافت.

یافت و در نتیجه با افزایش تراکم نسبی تاثیر جهت گروه شمع نسبت به راس شیروانی بر روی ظرفیت باربری کششی کمتر گردید. مقادیر ظرفیت باربری کششی گروه شمع در حالت زمین مسطح و در راس شیروانی برای تراکم‌های مختلف در جدول ۶ و شکل ۹ ارایه شده است. در گروه شمع ۲×۱ با افزایش تراکم نسبی



شکل ۹- تغییرات ظرفیت باربری کششی در مقابل درصد تراکم نسبی

جدول ۶- مقایسه ظرفیت باربری کششی گروه شمع در دو حالت واقع در رأس شیروانی و زمین مسطح برای تراکم نسبی‌های مختلف

	2×1(p)	2×1(v)	3×1(p)	3×1(v)	2×2	3×3	
Dr=40%	در رأس شیروانی	۳۸	۴۵	۴۲	۴۸	۵۵	۹۵
	زمین مسطح	۵۳	۵۳	۶۹	۶۹	۷۱/۵	۱۱۱
	درصد کاهش ظرفیت باربری	۲۸	۱۵	۳۹	۳۰	۲۳	۱۴
Dr=65%	در رأس شیروانی	۶۹/۵	۸۱/۲	۸۳	۹۲	۹۹/۱	۱۶۴
	زمین مسطح	۱۰۳/۷	۱۰۳/۷	۱۳۶/۳	۱۳۶/۳	۱۵۰/۹	۲۱۱
	درصد کاهش ظرفیت باربری	۳۳	۲۲	۳۹	۳۲	۳۴	۲۲
Dr=85%	در رأس شیروانی	۱۳۷	۱۵۵	۱۵۴	۱۶۵	۱۷۰	۳۰۱
	زمین مسطح	۱۷۲	۱۷۲	۲۳۰/۵	۲۳۰/۵	۲۵۳	۳۷۶/۳
	درصد کاهش ظرفیت باربری	۲۱	۱۰	۳۳	۲۸	۳۳	۲۰
زمین مسطح	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۶۸	۰/۶۸	۰/۵۶	۰/۳۷	

نتایج نشان داد که افزایش تراکم نسبی باعث افزایش ظرفیت باربری کششی گروه‌های شمع ۲×۲ و ۳×۳ مستقر در راس شیروانی گردید. در گروه شمع ۲×۲ با افزایش تراکم نسبی از ۰/۴۰ به ۰/۶۵ و ۰/۸۵ ظرفیت باربری کششی به ترتیب ۰/۸۰ و ۰/۲۰۹ افزایش یافته بود و در گروه شمع ۳×۳ این درصد افزایش به ترتیب ۰/۷۲ و ۰/۲۱۶ بود.

مقادیر ضریب راندمان کششی برای تراکم‌های مختلف در جدول ۷ ارایه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در گروه‌های شمع خطی ۲ و ۳ تایی ضریب راندمان گروه شمع بستگی به جهت گروه

۲-۲-۴- اثر طول مدفون شمع

در این بخش اثر طول مدفون شمع بر روی ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع مستقر بر راس شیروانی مورد بررسی قرار گرفت. تراکم خاک ۰/۶۵ و طول مدفون شمع‌ها ۱۵ و ۳۰ و ۵۰ سانتیمتر و فاصله شمع‌ها از یکدیگر ۳ برابر قطر شمع در نظر

گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که در گروه‌های شمع خطی ۲ و ۳ تایی ضریب راندمان گروه شمع بستگی به جهت گروه

نتایج نشان داد که میزان کاهش ظرفیت باربری کششی نسبت به حالت زمین مسطح در گروه‌های شمع خطی (2×1 و 3×1) مستقر در راس شیروانی با طول‌های مختلف مدفون شده به جهت قرارگیری گروه شمع نسبت به راس شیروانی بستگی دارد.

گرفته شد. برای انجام آزمایش‌ها برای هر کدام از طول‌های مدفون ذکر شده در بالا، ابتدا ظرفیت باربری کششی گروه‌های شمع بر روی زمین مسطح اندازه‌گیری می‌گردید و در گام بعدی گروه شمع در فاصله $0.5d_p$ از راس شیروانی قرار مستقر می‌گردید و ظرفیت باربری کششی آن اندازه‌گیری می‌گردید. نتایج حاصل در جدول ۸ و شکل ۱۰ ارایه شده است.

جدول ۷- مقایسه ضریب راندمان کششی گروه شمع در دو حالت واقع در راس شیروانی و زمین مسطح

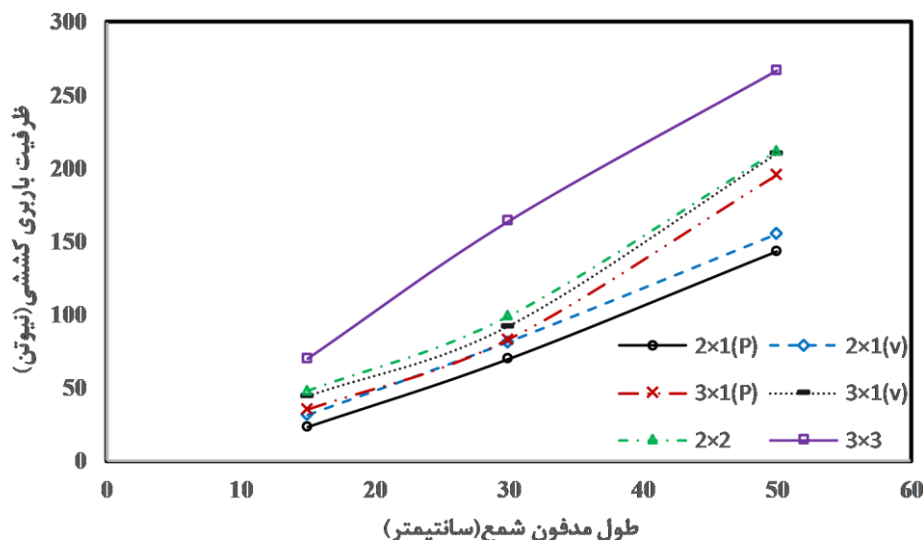
		2×1(p)	2×1(v)	3×1(p)	3×1(v)	2×2	3×3
Dr=40%	در راس شیروانی	۰/۷۵	۰/۷	۰/۵۵	۰/۴۵	۰/۴۳	۰/۳
	زمین مسطح	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۵۴	۰/۵۴	۰/۴۲	۰/۳۳
Dr=65%	در راس شیروانی	۰/۶۶	۰/۶۹	۰/۵۲	۰/۴۹	۰/۴۳	۰/۳۰
	زمین مسطح	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۶۴	۰/۶۴	۰/۵۲	۰/۳۳
Dr=85%	در راس شیروانی	۰/۷۸	۰/۸	۰/۵۸	۰/۵۴	۰/۴۴	۰/۳۳
	زمین مسطح	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۶۸	۰/۶۸	۰/۵۶	۰/۳۷

جدول ۸ (مقایسه ظرفیت باربری کششی گروه شمع در دو حالت واقع در راس شیروانی و زمین مسطح)

		2×1(p)	2×1(v)	3×1(p)	3×1(v)	2×2	3×3
L _d =15cm	در راس شیروانی	۲۳	۳۱	۳۵	۴۴	۴۸	۷۰
	زمین مسطح	۴۰	۴۰	۵۲	۵۲	۵۷	۸۴
	درصد کاهش ظرفیت باربری	۴۳	۲۳	۳۴	۱۵	۱۶	۱۷
L _d =30cm	در راس شیروانی	۶۹/۵	۸۱/۲	۸۳	۹۲	۹۹	۱۶۴
	زمین مسطح	۱۰۳/۷	۱۰۳/۷	۱۳۶/۳	۱۳۶/۳	۱۶۰	۲۱۱
	درصد کاهش ظرفیت باربری	۳۳	۲۲	۳۹	۳۲	۳۴	۲۲
L _d =50cm	در راس شیروانی	۱۴۳	۱۵۵	۱۹۵	۲۱۰	۲۱۲	۲۶۷
	زمین مسطح	۱۶۴	۱۶۴	۲۱۸	۲۱۸	۲۳۸	۳۰۰
	درصد کاهش ظرفیت باربری	۱۳	۶	۷	۴	۱۱	۱۱

جدول ۹- مقایسه ضریب راندمان کششی گروه شمع در دو حالت واقع در راس شیروانی و زمین مسطح

		2×1(p)	2×1(v)	3×1(p)	3×1(v)	2×2	3×3
L _d =15cm	در راس شیروانی	۰/۷۷	۰/۸۰	۰/۷۵	۰/۶۸	۰/۶۱	۰/۳۶
	زمین مسطح	۰/۷۷	۰/۷۷	۰/۶۷	۰/۶۷	۰/۵۵	۰/۳۶
L _d =30cm	در راس شیروانی	۰/۶۶	۰/۶۹	۰/۵۲	۰/۴۹	۰/۴۳	۰/۳۰
	زمین مسطح	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۶۴	۰/۶۴	۰/۵۳	۰/۳۳
L _d =50cm	در راس شیروانی	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۶۴	۰/۶۱	۰/۴۹	۰/۲۷
	زمین مسطح	۰/۶۹	۰/۶۹	۰/۶۱	۰/۶۱	۰/۵۰	۰/۲۸



شکل ۱۰: تغییرات ظرفیت باربری کششی در مقابل طول مدفون شمع

گروه شمع بستگی به جهت گروه شمع به راس شیروانی دارد. نتایج نشان داد برای هر ۳ طول مدفون شمع، ضریب راندمان گروه شمع مستقر در راس شیروانی با افزایش تعداد شمع‌ها، کاهش می‌یابد.

۳- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- با افزایش تراکم نسبی خاک میزان تاثیر شیروانی بر روی ظرفیت باربری کششی شمع منفرد واقع در راس شیروانی کمتر می‌گردد.

۲- با افزایش طول مدفون شمع منفرد تاثیر شیروانی بر روی ظرفیت باربری کششی شمع منفرد واقع در راس شیروانی کمتر می‌گردد.

۳- نحوه قرارگیری گروه شمع خطی نسبت به رأس شیروانی در مقدار ضریب راندمان و ظرفیت باربری کششی گروه شمع تأثیرگذار است. گروه شمع عمود بر راس شیروانی ظرفیت باربری کششی و ضریب راندمان بیشتری نسبت به گروه شمع موازی با راس شیروانی دارد.

۴- افزایش تراکم نسبی خاک بر روی افزایش ظرفیت باربری کششی شمع خطی موازی با راس شیروانی نسبت به گروه شمع عمود بر راس شیروانی تأثیر بیشتری داشته و با افزایش تراکم نسبی خاک، تأثیر جهت قرارگیری گروه شمع خطی نسبت به راس شیروانی کمتر می‌شود.

۵- با افزایش تعداد شمع از ۴ به ۹ عدد میزان کاهش در ظرفیت باربری گروه شمع مستقر بر روی راس شیروانی کاهش می‌یابد و در فاصله ۶/۵ برابر قطر شمع از راس شیروانی این اختلاف کمتر شده و می‌توان از اثر تعداد شمع‌های موجود در

میزان کاهش ظرفیت باربری در گروه شمع موازی با راس شیروانی نسبت به گروه شمع عمود بر راس شیروانی، بیشتر می‌باشد. افزایش طول مدفون شمع، تأثیر بیشتری بر روی افزایش ظرفیت باربری کششی گروه شمع موازی با راس شیروانی دارد. با افزایش طول مدفون شمع، مقدار عددی نسبت ظرفیت باربری کششی گروه شمع موازی شیروانی نسبت به ظرفیت باربری کششی گروه شمع عمود بر شیروانی، افزایش یافت و در نتیجه با افزایش طول مدفون شمع، تأثیر جهت گروه شمع نسبت به راس شیروانی بر روی ظرفیت باربری کششی کمتر می‌شود.

در گروه شمع ۲×۱ با افزایش طول مدفون شمع از ۱۵ سانتیمتر به ۳۰ و ۵۰ سانتیمتر، مقدار نسبت ظرفیت باربری کششی گروه شمع موازی شیروانی به ظرفیت باربری کششی گروه شمع عمود بر شیروانی از مقدار ۰/۷۴ به ترتیب به مقادیر ۰/۸۶ و ۰/۹۲ افزایش می‌یابد و این نسبت در گروه شمع ۳×۱ از مقدار ۰/۸۰ به ترتیب به مقادیر ۰/۹۰ و ۰/۹۳ افزایش می‌یابد.

نتایج نشان داد که افزایش طول مدفون شمع باعث افزایش ظرفیت باربری کششی گروه‌های شمع مربعی ۲×۲ و ۳×۳ گردید. تأثیر افزایش طول مدفون شمع بر روی افزایش ظرفیت باربری کششی در گروه شمع ۳×۳ از گروه شمع ۲×۲ بیشتر بود. در گروه شمع ۲×۲ با افزایش طول مدفون شمع از ۱۵ سانتیمتر به ۳۰ و ۵۰ سانتیمتر ظرفیت باربری کششی به ترتیب ۱۰۶٪ و ۳۴۱٪ افزایش یافته بود و این درصد افزایش در گروه شمع ۳×۳ به ترتیب ۱۳۴٪ و ۳۸۱٪ بود.

مقادیر ضریب راندمان کششی گروه شمع برای طول‌های مدفون ۱۵، ۳۰ و ۵۰ سانتیمتر در جدول ۹ ارائه شده است. نتایج نشان داد که در گروه‌های شمع خطی ۲ و ۳ تایی ضریب راندمان

- GAVER, Khaled E. Uplift capacity of single piles and pile groups embedded in cohesionless soil. *Alexandria Engineering Journal*, 2013, 52.3: 365-372.
- Jerin, Joseph, et al. "An experimental and numerical comparative study on the uplift capacity of single granular pile anchor and rough pile in sand." *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 16.4: 499-513.
- Kang, Jung-goo, Young-sang Kim, and Gyeongoo Kang. "Uplift capacity of single vertical belled pile embedded at shallow depth." *Geomechanics and Engineering*, 2023, 35.2: 165-179.
- KHATI, Bhishm Singh; SAWANT, Vishwas Abhimanyu. Experimental study of laterally loaded pile group in square arrangement near sloping ground. *International Journal of Geomechanics*, 2021, 21.2: 04020257.
- KHATI, Bhishm Singh; SAWANT, Vishwas Abhimanyu. Variation in lateral load capacity of pile embedded near slope with ground inclination and edge distance. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2018.
- KHATI, Bhishm Singh; SAWANT, Vishwas Abhimanyu. Comparison of lateral response of pile group in series and parallel arrangement near sloping ground. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 14.6: 686-695.
- Kishida, H.. Stress distribution by model piles in sand. *Soils and Foundations*, 1963, 4(1), 1-23.
- KUMAR, Ajay; KHATRI, Vishwas N.; GUPTA, Sunil K. Numerical and analytical study on uplift capacity of under-reamed piles in sand. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2022, 40.1: 104-124.
- LIU, Pan; JIANG, Chong. Analytical method for laterally loaded short piles near clay slopes considering the soil-pile-slope surface deformation mechanism. *Ocean Engineering*, 2024, 296: 117036.
- MARALAPALLE, Vedprakash C., et al. Load-settlement and skin friction behaviour of piles in dry sand: experimental and numerical study. *Sādhanā*, 2023, 49.1: 4.
- MEYERHOF, George Geoffrey. Bearing capacity and settlement of pile foundations. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1976, 102.3: 197-228.
- MOHAMMAD ALINEJAD, Reza, et al. Response of pile group adjacent to a slope crest under static axial loading. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14: 1-12.
- Mohammad ALINEJAD, Reza, et al. Experimental Study of Axially Loaded Pile Group Near a Sloping Ground. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2023, 67.2: 382-391.
- NASROLLAHZADEH, Ehsan; HATAF, Nader. Experimental and numerical study on the bearing capacity of single and groups of tapered and cylindrical piles in sand. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 16.4: 426-437.
- NORLUND, R. L. Bearing capacity of piles in cohesionless soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1963, 89.3: 1-35.
- گروه شمع بر روی کاهش ظرفیت باربری کششی شمع مجاور شیروانی صرفنظر کرد.
- ۶- افزایش طول مدفون شمع بر روی افزایش ظرفیت باربری کششی شمع خطی موازی با راس شیروانی نسبت به گروه شمع عمود بر راس شیروانی تاثیر بیشتری داشته و با افزایش طول مدفون شمع، تاثیر جهت قرارگیری شمع خطی نسبت به راس شیروانی کمتر می شود.
- ۷- افزایش طول مدفون شمع بر روی افزایش ظرفیت گروه 3×3 مستقر در راس شیروانی نسبت به گروه شمع 2×2 بیشتر می باشد.

۴- منابع

- ASTM D3080-04 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions", ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2012. <https://doi.org/10.1520/D3080-04>
- ASTM D 422-63, Standard Test Method for Particle Size Analysis of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2007.
- ASTM 2487-17E01, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)", ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2020. <https://doi.org/10.1520/D2487-17E01>
- CAI, Yongmin, et al. A CPT-Based Design Framework for Uplifted Open-Ended Piles Installed in Spatially Variable Sandy Soils. I: Soil Resistance Design Line Optimization. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2023, 149.11: 04023097.
- CHATTOPADHYAY, B. C.; PISE, P. J. Uplift capacity of piles in sand. *Journal of geotechnical engineering*, 1986, 112.9: 888-904.
- CHEN, Lujie, et al. Lateral capacity of a two-pile group foundation model located near slope in sand. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 112847.
- CHOI, Yoon Seok, et al. Response of pile groups driven in sand subjected to combined loads. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2017, 35: 1587-1604.
- CONTE, Enrico, et al. A simple approach for evaluating the bearing capacity of piles subjected to inclined loads. *International Journal of Geomechanics*, 2021, 21.11: 04021224.
- DE SANCTIS, L., et al. Centrifuge modelling of the behaviour of pile groups under vertical eccentric load. *Soils and Foundations*, 2021, 61.2: 465-479.
- Emirler, Buse, Mustafa Tolun, and Abdulazim Yildiz. "Investigation on determining uplift capacity and failure mechanism of the pile groups in sand." *Ocean Engineering*, 2020, 218: 108145.
- EMIRLER, Buse; TOLUN, Mustafa; YILDIZ, Abdulazim. An experimental study of rough single pile and pile group under uplift loading in sand. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2021, 25.3: 557-574.

- PAIK, Kyuho; SALGADO, Rodrigo. Determination of bearing capacity of open-ended piles in sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129.1: 46-57.
- Robinsky E.L, Morrison C.F, Sand displacement and compaction around model friction piles, Canadian Geotechnical Journal 1 (2) ,1964, 81-93
- Sun, T., Yang, F., Cui, X., Huang, Z., Lyu, X., Ma, R., ... & Zhang, X. . Model Test Study on the Vertical Uplift Bearing Characteristics of Soil Continuous Solidified Pile Group Foundations *Buildings*, 2024, 14(3), 849.
- Shanker, K., P. K. Basudhar, and N. R. Patra. "Uplift capacity of single piles: predictions and performance." *Geotechnical and Geological Engineering*, 2007, 25 : 151-161.
- SHARAFKHAH, M.; SHOOSH PASHA, I. Physical modeling of behaviors of cast-in-place concrete piled raft compared to free-standing pile group in sand. *J Rock Mech Geotech Eng* , 2018, 10: 703-716..
- T EL-Nemr, M., R Azzam, W., K Gaber, E., & Ashour, O. Numerical Investigation of the Behavior of Group-Finned Piles in Sandy Soil Subjected to Tensile Loads. *Nile Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2024, 4(1), 1-21.
- Tolun, M., Emirler, B., Ertugrul, O. L., & Yildiz, A.. Effect of dilatancy on tension response of completely rough piles embedded in granular soils. *Ocean Engineering*, 2024, 292, 116507
- Tianzhong, MA; Yanpeng, ZHU; Xiaohui, YANG . Calculation of bearing capacity and deformation of composite pile foundation with long and short piles in loess areas. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 1-10.
- Xu, Yunsheng, et al. "Experimental study and design formula of the uplift performance of screw anchor foundations in silty clays." *Acta Geotechnica* ,2024: 1-12.
- Xu, Y., Fu, Y., Chen, Z., Qin, R., Wang, L., & Wang, X.. Experimental study and design formula of the uplift performance of screw anchor foundations in silty clays. *Acta Geotechnica*, 2024, 1-12.