

ظرفیت باربری گروه شمع حفاری شده پس تزریق در مجاورت شیروانی ماسه‌ای

رضا محمد علی نژاد^{1*} و میثم بیات²

¹ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
² دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

(دریافت: 00/00/00، پذیرش: 00/00/00، نشر آنلاین: 00/00/00)

چکیده

از گروه شمع به عنوان پی ساختمان‌ها، پل‌ها و برج‌های انتقال استفاده می‌گردد. در محیط‌های شهری به دلیل عدم امکان استفاده از شمع کوبشی معمولاً از شمع‌های حفاری شده که دارای ظرفیت باربری کمتری نسبت به شمع کوبشی هستند، استفاده می‌گردد. یکی از روش‌های متداول افزایش ظرفیت باربری شمع‌های حفاری شده استفاده از روش تزریق پرفشار دوغاب سیمان در نوک شمع می‌باشد. در خصوص رفتار گروه‌های شمع پس تزریق شده در مجاورت شیروانی تاکنون تحقیقی صورت نگرفته است. در این تحقیق به کمک روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS3D به بررسی اثر شیروانی ماسه‌ای بر روی ظرفیت باربری، ضریب راندمان و میزان چرخش سرشمع گروه‌های شمع پس تزریق شده پرداخته می‌شود. در این تحقیق گروه‌های شمع پس تزریق شده 2x2، 2x1 و 3x1 با قطر 1، 1/5 و 2 متر، با نسبت طول مدفون به ارتفاع شیروانی 0/33، 0/67 و فواصل شمع 3، 4 و 5 برابر قطر شمع، در مجاورت شیروانی ماسه‌ای به ارتفاع 30 متر و شیب 30 درجه به صورت سه بعدی مدل گردیدند. اثر عوامل مختلفی همانند قطر شمع، نسبت طول مدفون به ارتفاع شیروانی و فاصله شمع‌ها از یکدیگر بر روی ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده در نوک شمع مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، پروسه پس تزریق باعث کاهش چرخش سرشمع گردید. با افزایش فاصله شمع‌ها از یکدیگر و افزایش قطر شمع‌ها، ضریب BCR افزایش یافت. اثر پروسه پس تزریق بر روی افزایش ظرفیت باربری و کاهش چرخش سرشمع گروه شمع خطی موازی راس شیروانی بیشتر از گروه شمع خطی عمود بر راس شیروانی بود.

کلیدواژه‌ها: گروه شمع، پس تزریق، شیروانی، المان محدود، ظرفیت باربری

1- مقدمه

کمتر می‌باشد (O'Neill, 1999). با توجه به اینکه اجرای شمع جزو بخش‌های پرهزینه ساختمان‌ها می‌باشد، مهندسين به دنبال روش‌هایی هستند که ظرفیت باربری شمع حفاری شده را افزایش داده و در نتیجه هزینه اجرای پی کاهش یابد.

یک روش متداول برای بهبود ظرفیت باربری شمع‌ها، تزریق پرفشار دوغاب سیمان در خاک زیر نوک شمع می‌باشد که از دهه 1960 میلادی در آسیا و اروپا رواج پیدا کرد (Bolognesi و Moretto, 1973؛ Gouvenot و Gabiax, 1975؛ Stocker, 1983). در این روش پس از این که مقاومت بتن شمع به حد معینی برسد، دوغاب سیمان از طریق لوله‌های از پیش تعبیه شده در بدنه شمع با فشار زیاد به خاک زیر نوک شمع و یا خاک اطراف جدار شمع تزریق می‌گردد. شمع‌های پس تزریق شده¹ را می‌توان به 3 دسته (1) شمع پس تزریق شده در نوک (2) شمع پس

در حال حاضر، از گروه شمع به عنوان پی بسیاری از سازه‌های مهندسی در دریا و خشکی استفاده می‌گردد. در گذشته به دلیل مقاومت زیاد جدار و نوک شمع کوبشی، به عنوان گزینه اول از شمع‌های کوبشی استفاده می‌گردید (Meyerhof, 1976؛ O'Neill, 1994). اما ارتعاش و آلودگی صوتی ناشی از کوبش دینامیکی شمع، یک مانع مهم جهت استفاده از شمع کوبشی در محیط‌های شهری می‌باشد (Selby, 1991؛ Woods, 1997؛ Deeks و همکاران، 2005؛ Svinkin, 2006). گزینه‌های دیگر اجرای شمع، استفاده از شمع‌های حفاری شده و ماریج می‌باشد که مشکلات اجرایی شمع کوبشی را ندارند (O'Neill, 1999؛ Brown و همکاران، 2007). ظرفیت باربری شمع‌های حفاری شده به دلیل نحوه اجرای آن‌ها نسبت به شمع‌های کوبشی و ماریج

¹ Post Grouted Drilled Pile

Hu و همکاران (2024) نتایج 708 آزمایش انجام شده بر روی شمع‌های پس تزریق شده را مورد بررسی قرار دادند و بر اساس نتایج آزمایش‌های بررسی شده، نمودارهایی برای محاسبه حجم دوغاب سیمان لازم برای تزریق در نوک شمع و فشار تزریق دوغاب سیمان، برحسب قطر شمع و نوع خاک ارائه کردند. Huang و همکاران (2022) به بررسی میزان ارتفاع صعود دوغاب سیمان در امتداد جدار شمع ناشی از تزریق پرفشار دوغاب سیمان در نوک شمع پرداختند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که ارتفاع صعود دوغاب سیمان در امتداد جدار شمع با افزایش قطر شمع و افزایش فشار تزریق دوغاب سیمان، افزایش می‌یابد و ارتفاع صعود دوغاب سیمان در امتداد جدار شمع با افزایش طول مدفون شمع، کاهش می‌یابد. Zhang و همکاران (2024) به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی به بررسی رفتار شمع‌های فولادی پس تزریق شده با مقطع دایره‌ای شکل در خاک چسبنده پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که با افزایش حجم دوغاب سیمان تزریق شده، ظرفیت باربری شمع پس تزریق شده افزایش می‌یابد و شمع‌های پس تزریق شده در جدار نسبت به شمع‌های پس تزریق شده در نوک و پس تزریق شده در نوک و جدار، در زمینه کنترل نشست شمع عملکرد بهتری دارند. Hu و همکاران (2022) به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی با مقیاس واقعی، اثر حجم دوغاب سیمان تزریقی بر روی ظرفیت باربری شمع پس تزریق شده در نوک را مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌های آن‌ها بر روی شمع منفرد با قطر 1/5 و طول مدفون 88 متر که نوک آن در خاک شنی مستقر بود، انجام گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش میزان دوغاب سیمان تزریقی از 250 کیلوگرم به 500 کیلوگرم، افزایش ظرفیت باربری شمع ناشی از پروسه پس تزریق دوغاب سیمان از 35% به 41/7% افزایش یافت و مدول الاستیسیته خاک شنی زیر نوک شمع با توجه به حجم دوغاب تزریقی تا 2 برابر افزایش یافت. Thiyyakkandi (2024) به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی با مقیاس بزرگ به بررسی رفتار شمع‌های پس تزریق شده در نوک پرداخت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزایش ظرفیت باربری شمع پس تزریق شده به فشار تزریق دوغاب سیمان و افزایش قطر شمع ناشی از پروسه تزریق دوغاب سیمان بستگی دارد. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در گروه شمع متشکل از شمع‌های پس تزریق شده در نوک، هنگامی که که فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها 3 برابر قطر شمع‌های بدون پس تزریق باشد، ضریب راندمان برابر با 1 می‌گردد. Su و همکاران (2023) اثر پس تزریق دوغاب سیمان در نوک شمع بر روی ظرفیت باربری شمع را با انجام آزمایش بر روی شمع با مقیاس واقعی و با قطر 1/2 متر و طول 60 متر را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که در خاک شنی، پروسه پس تزریق دوغاب سیمان در نوک شمع باعث افزایش 50 تا 60 درصدی مقاومت نوک و پروسه

تزریق شده در جدار شمع و 3) شمع پس تزریق شده در نوک و جدار شمع تقسیم‌بندی کرد (Nguyen و همکاران، 2019؛ Zhou و همکاران، 2024). 4) مکانیسم باعث افزایش ظرفیت باربری شمع پس تزریق شده در نوک می‌گردد (Loehr و همکاران، 2017): 1) بهبود مقاومت جدار شمع ناشی از حرکت رو به بالای شمع و بسیج شدن مقاومت اصطکاکی منفی شمع 2) بهبود مقاومت نوک شمع ناشی از بهبود خواص مقاومتی خاک زیر نوک شمع 3) بهبود مقاومت نوک شمع به دلیل پافیلی شدن نوک شمع 4) بهبود مقاومت جدار شمع ناشی از حرکت رو به بالای دوغاب تزریق شده در امتداد جدار شمع. اجرای پروسه تزریق پرفشار، علاوه بر افزایش ظرفیت باربری نوک و جدار شمع، باعث بسیج شدن مقاومت نوک شمع پس تزریق شده نسبت به شمع بدون تزریق در جابجایی قائم کمتری می‌گردد (Zheng، 2018).

اولین بار مؤسسه حمل‌ونقل فلوریدا در خصوص اثر تزریق دوغاب سیمان در نوک شمع بر روی کاهش جابجایی لازم جهت بسیج شدن ظرفیت باربری نوک شمع تحقیق نمود. در دهه اخیر در خصوص ظرفیت باربری و میزان کاهش نشست شمع‌های پس تزریق شده مستقر بر روی زمین مسطح تحقیقات آزمایشگاهی و عددی و تحلیلی زیادی صورت گرفته است (Kong و همکاران، 2022؛ Tao، 2022؛ Wan، 2022 و همکاران، 2023؛ Liu، 2022؛ Wu، 2023 و همکاران، 2023؛ Wang و همکاران، 2024؛ Wan و همکاران، 2024؛ Cao و همکاران، 2024؛ Wu و همکاران، 2024؛ Wang و همکاران، 2024؛ Huang و همکاران، 2024).

Thiyyakkandi و همکاران (2014) به کمک روش المان محدود به بررسی رفتار شمع پس تزریق شده در نوک و شمع بدون تزریق در خاک غیرچسبنده پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که منحنی بار-نشست شمع پس تزریق شده مشابه منحنی بارگذاری مجدد شمع بدون تزریقی می‌باشد که در ابتدا تحت باری معادل فشار تزریق دوغاب سیمان قرار گرفته است. Youn و Tonon (2010) به کمک روش المان محدود و به کمک نرم‌افزار PLAXIS، شمع پس تزریق شده پل رودخانه برازو در آمریکا را مدل کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که مقاومت جدار و نوک شمع پس از اجرای پروسه پس تزریق دوغاب سیمان به ترتیب 47% و 25% افزایش یافت. Salem و همکاران (2024) به کمک روش المان محدود و نرم‌افزار PLAXIS3D به بررسی اثر پروسه پس تزریق دوغاب سیمان در نوک شمع بر روی ظرفیت باربری شمع-های منفرد پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که اثر پروسه پس تزریق دوغاب سیمان بر روی افزایش ظرفیت باربری شمع‌ها با افزایش قطر شمع و افزایش قطر حباب دوغاب سیمان تشکیل شده در زیر نوک شمع، بیشتر می‌گردد.

که ظرفیت باربری گروه شمع در اثر پروسه پس تزریق تا 40% افزایش می‌یابد و عمق بهینه پس تزریق دوغاب سیمان در زیر نوک شمع، 2 برابر قطر شمع می‌باشد. Jianliang و همکاران (2021) به بررسی اثر پروسه پس تزریق بر روی رفتار گروه شمع در خاک ماسه‌ای پرداختند. نتایج بررسی‌های آنها نشان داد که با افزایش فاصله شمع‌ها از یکدیگر نسبت ظرفیت باربری نوک شمع به ظرفیت باربری افزایش می‌یابد.

Mohammad Alinejad و همکاران (2021, 2023, 2024)

به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی به بررسی اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری شمع منفرد و گروه شمع مجاور شیروانی پرداختند. نتایج بررسی آنها نشان داد که ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی از ظرفیت باربری گروه شمع مستقر بر روی زمین مسطح کمتر می‌باشد و گروه شمع مجاور شیروانی در اثر بارگذاری محوری به سمت شیروانی دوران می‌کند. همچنین نتایج بررسی آنها نشان داد که میزان تأثیر شیروانی بر روی کاهش ظرفیت باربری و دوران شمع مجاور شیروانی به طول مدفون شمع، تراکم نسبی خاک، قطر شمع و فاصله شمع از راس شیروانی دارد. با افزایش طول مدفون شمع، تراکم نسبی خاک، قطر شمع و فاصله شمع از راس شیروانی، اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری محوری گروه شمع کاهش پیدا می‌کند.

مطالعات گسترده‌ای در خصوص ظرفیت باربری پی‌های سطحی مجاور شیروانی‌های مسلح شده با مسلح کننده‌های پلیمری همچون ژئوگرید انجام شده است (Niazmandi, 2023). تاکنون تحقیقات کمی در خصوص تزریق دوغاب بر روی ظرفیت باربری انواع پی سطحی و عمیق مجاور شیروانی انجام گرفته است. Abedi و Hataf (2014) به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی به بررسی اثر تزریق دوغاب بر روی ظرفیت باربری پی نواری مجاور شیروانی پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که تزریق دوغاب سیمان باعث افزایش ظرفیت باربری پی نواری مجاور شیروانی ماسه‌ای می‌گردد و عمق بهینه تزریق دوغاب، دوبرابر عرض پی نواری می‌باشد. Xiang و همکاران (2015) به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی با مقیاس واقعی، رفتار شمع لوله‌ای فولادی تزریق شده با دوغاب سیمان واقع بر شیروانی را تحت بارگذاری افقی مورد بررسی قرار دادند. قطر شمع مورد استفاده در تحقیق ژانگ و همکاران، 140 میلیمتر بوده که به روش حفاری شده اجرا گردید. قطر گمانه حفاری شده در این تحقیق 180 میلیمتر بوده و شمع لوله‌ای فولادی در مرکز گمانه حفاری شده قرار گرفته و در مرحله پایانی، گمانه حفاری شده با دوغاب سیمان پر گردید. نتایج بررسی‌های Xiang و همکاران (2015) نشان داد که میزان جابجایی افقی گروه‌های شمع شامل 3 ردیف شمع 50%-35%

پس تزریق در جدار شمع باعث افزایش 26 تا 38 درصدی ظرفیت باربری جدار شمع می‌گردد. Wang و همکاران (2023) نتایج 23 آزمایش بارگذاری بر روی شمع‌های پس تزریق شده در پروژه بزرگراه تانژای² در نانتونگ³ چین را مورد بررسی قرار دادند. طول مدفون شمع‌ها 80-57 متر و قطر شمع‌ها 1/8 متر بود. نتایج نشان داد که پروسه پس تزریق دوغاب سیمان در نوک شمع باعث افزایش ظرفیت باربری نهایی شمع در محدوده 37%-10% و افزایش ظرفیت باربری نوک شمع در محدوده 139%-89% شمع می‌گردد. Li و همکاران (2024) به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی، اثر اضافه کردن مواد پلیمری به دوغاب سیمان بر روی ظرفیت باربری قائم شمع‌های پس تزریق در جدار را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج تحقیق لی و همکاران نشان داد که اضافه کردن مواد پلیمری، ظرفیت باربری قائم شمع‌های پس تزریق شده در جدار را تا 40% افزایش می‌دهد. Liu و همکاران (2022) اثر تزریق جدار بر روی ظرفیت باربری جانبی شمع در خاک ماسه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی آنها نشان داد که پروسه پس تزریق جدار، ظرفیت باربری نهایی شمع را تا 25% افزایش می‌دهد. Shalabi و همکاران (2023) به کمک روش المان محدود 3 بعدی به بررسی اندرکنش شمع حفاری شده و سرشمع در خاک ماسه‌ای پرداختند. نتایج آنها نشان داد که در یک نسبت طول به قطر شمع معین، با افزایش ضریب الاستیسیته خاک ظرفیت باربری نوک شمع اندکی کاهش می‌یابد و با افزایش نسبت طول به قطر شمع، ظرفیت باربری نوک شمع افزایش می‌یابد. همچنین نتایج بررسی - های Shalabi و همکاران (2023) نشان داد با افزایش نسبت طول به قطر شمع، نسبت مقاومت جدار به مقاومت نوک شمع کاهش می‌یابد.

Zhou و همکاران (2021) به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی به بررسی اثر پروسه پس تزریق بر روی ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که با افزایش فاصله شمع از یکدیگر تا 5 برابر قطر شمع، ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده در نوک افزایش می‌یابد و پروسه پس تزریق در نوک شمع باعث کاهش ضریب راندمان شمع می‌گردد. McVay و همکاران (2010) به کمک آزمایش‌های مدل فیزیکی با مقیاس بزرگ به بررسی اثر پروسه پس تزریق دوغاب سیمان در نوک شمع بر روی ضریب راندمان گروه شمع 2×2 پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که هنگامیکه فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها از یکدیگر 3 برابر قطر شمع گردد، ضریب راندمان گروه شمع پس تزریق شده در نوک برابر با 1 می‌گردد. Bo و همکاران (2011) به بررسی اثر پروسه پس تزریق دوغاب سیمان در نوک شمع بر روی ظرفیت باربری گروه شمع پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد

³ Nantong

² Tongqi

برای حالت‌ها و اندازه‌های مختلف هندسه مدل، آنالیز حساسیت برای تعیین ابعاد مدل و مش‌ها انجام داده شد. برای مدل‌سازی از شمع با قطر 1، 1/5 و 2 و نسبت طول مدفون شمع به ارتفاع شیروانی 0/33 (L/H)، 0/67 و 1 (طول مدفون شمع‌ها به ترتیب 10، 20 و 30 متر) در نظر گرفته شد. فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها 3، 4 و 5 برابر قطر شمع در نظر گرفته شد. شیب شیروانی 30 درجه و ارتفاع شیروانی 30 متر در نظر گرفته شد. کلیه شمع‌ها در فاصله‌ای برابر با قطر شمع از رأس شیروانی مستقر گردیدند. هرکدام از شمع‌ها در 2 حالت بدون پس تزریق، پس تزریق شده در نوک شمع مدل گردیدند.

برای تعیین ظرفیت باربری شمع‌های با قطر زیاد روش‌های مختلفی وجود دارد. در این تحقیق از روش O'Neill (1999) برای تعیین ظرفیت باربری گروه شمع استفاده گردید. بر اساس روش O'Neill (1999) ظرفیت باربری گروه شمع در نشست معادل 5% قطر شمع محاسبه می‌گردد.

خاک با استفاده از مدل رفتاری سخت شونده مدل گردید. در مدل‌سازی عددی، شمع و حباب دوغاب به کمک مدل الاستیک خطی مدل گردیدند (Salem و همکاران، 2024 و Thiyyakkandi و همکاران، 2014). پارامترهای خاک و شمع و دوغاب سیمان در جدول 1 ارائه شده است. شیروانی مدل شده برای گروه شمع با قطر 1 و طول مدفون 20 متر، شمع و حباب گروت مدل شده در شکل 1 نشان داده شده است. با توجه به اینکه شمع‌های این تحقیق در رده شمع‌های با قطر بزرگ قرار می‌گیرند، از المان حجمی برای مدل کردن شمع‌ها استفاده گردید. در جدول 1 چسبندگی ماسه، صفر در نظر گرفته شده است اما برای جلوگیری از ناپایداری عددی در حین آنالیز مدل، مقدار چسبندگی کوچکی (0/345 کیلوپاسکال) برای خاک ماسه‌ای در نظر گرفته شد (Salem و همکاران، 2024 و Thiyyakkandi و همکاران، 2014). به منظور مدل‌سازی پروسه اجرای شمع و پس تزریق دوغاب سیمان مراحل زیر در نظر گرفته شد (Thiyyakkandi و همکاران، 2014؛ Mohammad Ai Nejad و Bayat، 2025):

1- تعادل اولیه شیروانی: در این بخش به دلیل ناهمسانی مدل به دلیل وجود شیروانی، از گزینه بارهای گرانشی در بخش انتخاب نوع محاسبات استفاده گردید.

2- عملیات حفاری و کیسون گذاری: عملیات حفاری با غیرفعال کردن المان‌های مش محل استقرار شمع مدل گردید. برای مدل کردن کیسون گذاری، جابجایی پیش‌فرض صفر به صورت شعاعی در امتداد بخش حفاری شده اعمال گردید.

3- بتن‌ریزی شمع: جهت مدل کردن بتن‌ریزی شمع، فشار هیدرواستاتیکی شعاعی در امتداد جدار بیرونی شمع به خاک اطراف وارد گردید. فشار هیدرواستاتیکی تا عمق بحرانی (10 متر زیر سطح زمین) با شیب $22/5 \text{ KN/m}^2/\text{m}$ افزایش می‌یابد و در

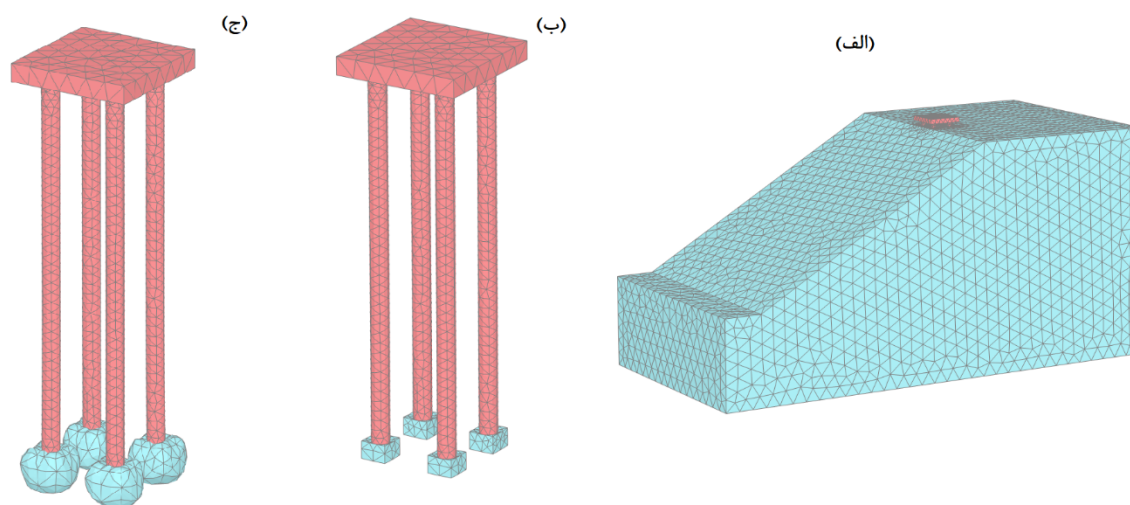
کمتر از جابجایی افقی گروه‌های شمع شامل 2 ردیف شمع می‌باشد. Wan و همکاران (2022) رفتار شمع لوله‌ای فولادی تزریق شده با دوغاب سیمان واقع بر شیروانی را تحت بارگذاری افقی مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی‌های آنها نشان داد که با افزایش فاصله بین شمع‌ها تا 6 برابر قطر شمع، ظرفیت باربری گروه شمع افزایش می‌یابد و در فواصل بیشتر شمع‌ها از یکدیگر، ظرفیت باربری افقی گروه شمع کاهش می‌یابد.

از گروه شمع به عنوان پی ساختمان‌های بلندمرتبه، پایه پل‌ها و سازه‌های انتقال نیرو استفاده می‌گردد. برخی این سازه‌ها در مجاورت و یا بر روی شیروانی قرار می‌گیرند. قرارگیری گروه شمع‌ها در مجاورت و یا بر روی شیروانی باعث کاهش ظرفیت باربری محوری گروه شمع می‌گردد. پروسه پس تزریق دوغاب در نوک شمع یکی از روش‌های اقتصادی می‌باشد که در چند دهه اخیر جهت بهبود ظرفیت باربری محوری شمع‌ها و گروه‌های شمع مورد توجه قرار گرفته است. تحقیقات انجام گرفته در خصوص اثر پروسه پس تزریق دوغاب بر روی ظرفیت باربری شمع‌ها، محدود به شمع‌های مستقر بر روی زمین مسطح بوده است و تاکنون تحقیقی در خصوص اثر پروسه پس تزریق دوغاب بر روی ظرفیت باربری، دوران و جابجایی افقی سرشمع گروه شمع مجاور شیروانی صورت پذیرفته است. لذا بررسی اثر پروسه پس تزریق دوغاب بر روی ظرفیت باربری و دوران و جابجایی افقی سرشمع گروه شمع مجاور شیروانی حائز اهمیت می‌باشد.

در این تحقیق به کمک روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS3D به بررسی ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده مستقر بر رأس شیروانی ماسه‌ای پرداخته می‌شود و اثر عواملی همانند قطر شمع، اثر نسبت طول مدفون شمع به ارتفاع شیروانی، فاصله شمع‌ها از یکدیگر و جهت گروه شمع خطی نسبت به راس شیروانی خاک بر روی ظرفیت باربری، ضریب راندمان و چرخش سرشمع، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این تحقیق گروه شمع با 3 قطر مختلف و 3 نسبت طول مدفون شمع به ارتفاع شیروانی و 3 فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها از یکدیگر، در فاصله‌ای برابر با قطر شمع از رأس شیروانی ماسه‌ای مدل گردید.

2- مدل عددی

در این تحقیق جهت مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار PLAXIS3D استفاده شده است (Salem و همکاران، 2024). با توجه به اینکه اندازه المان‌های تشکیل‌دهنده مش در مدل‌سازی عددی بر روی نتایج حاصل تأثیرگذار می‌باشد، ابعاد المان‌های مش به گونه‌ای در نظر گرفته شد که بر روی نتایج تأثیرگذار نباشد. ابعاد مدل به گونه‌ای انتخاب گردید که تنش‌های ناشی از بارگذاری به مرزها نزدیک نبوده و اثری روی تنش نهایی نداشته باشند و اثرات احتمالی مرزها را به حداقل برساند (Salem و همکاران، 2024).



شکل 1: الف) مدل شیروانی سه بعدی برای شمع با قطر 1 و طول مدفون 20 متر ب) گروه شمع و قسمتی از خاک زیر نوک که تحت تأثیر تزریق دوغاب سیمان خواهند گرفت (قبل از اعمال انبساط حجمی جهت مدل کردن پروسه پس تزریق دوغاب سیمان) ج) گروه شمع و حباب گروت تشکیل شده اطراف آن (پس از اعمال انبساط حجمی جهت مدل کردن پروسه پس تزریق دوغاب سیمان)

جدول 1: مشخصات خاک و شمع و دوغاب سیمان استفاده شده در آنالیز عددی (Tolooiyan و Gavin (2013))

گروت	شمع	ماسه	واحد	پارامتر
-	-	0	کیلو نیوتن	C چسبندگی خاک
20	25	16	کیلو نیوتن بر مترمکعب	γ وزن مخصوص
-	-	34	درجه	(ϕ^0) زاویه اصطکاک خاک
-	-	2/5	درجه	زاویه اتساع
0/2	0/2	0/3	-	μ ضریب پواسن
-	-	20	مگاپاسکال	E_{50}^{ref} سختی سکانتی
-	-	25	مگاپاسکال	E_{ode}^{ref} سختی مماسی
-	-	120	مگاپاسکال	E_{ur}^{ref} سختی باربرداری
-	-	0/5	-	m
-	-	0/6	-	n پوکی
20000	30000	-	مگاپاسکال	E مدول الاستیسیته

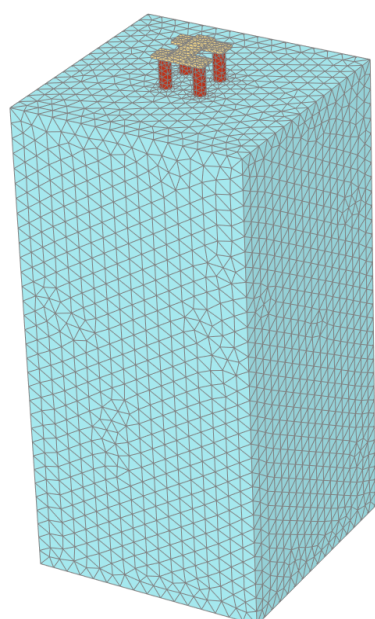
5- تزریق دوغاب سیمان: جهت مدل کردن تزریق دوغاب سیمان در زیر نوک و اطراف شمع، انبساط حجمی مثبت به خاک اطراف ناحیه تزریق گروت اعمال گردید. مدل سازی تزریق دوغاب به کمک اعمال کرنش حجمی مثبت در تمامی جهات در نرم افزار PLAXIS3D توسط محققین مختلفی پیشنهاد شده است. اعمال کرنش حجمی مثبت باعث فشرده شدن خاک زیر نوک شمع (مدل سازی پیش تنش اعمالی توسط فشار تزریق) و حرکت رو به

اعماق بزرگ تر از عمق بحرانی فشار هیدرو استاتیکی با شیب $10 \text{ KN/m}^2/\text{m}$ افزایش می یابد. در این مرحله جابجایی پیش فرض صفر وارد بر سطح بخش حفاری شده مرحله 2 غیر فعال می گردد. 4- عمل آوری بتن: در این مرحله المان های شمع که در مراحل قبل غیر فعال شده بودند، فعال گردیدند و به این المان ها مشخصات بتن اختصاص داده می شود و فشار هیدرو استاتیکی اعمال شده مرحله قبل غیر فعال می گردد.

سازی با نتایج آزمایش شمع که به صورت نمودار بار-نشست می-باشد، مقایسه گردید. از مدل سخت شونده برای مدل کردن رفتار خاک و از مدل الاستیک خطی برای مدل کردن شمع و حباب دوغاب استفاده گردید. پارامترهای مورد استفاده در مدل کردن خاک در جدول 3 و پارامترهای مورد استفاده برای مدل کردن شمع و حباب گروت در جدول 1 ارائه شده است. نتایج به دست آمده از آنالیز المان محدود با نتایج آزمایش مدل فیزیکی، همخوانی خوبی دارد (شکل 3) و نشان دهنده توانایی روش المان محدود و مدل رفتاری سخت شونده در مدل سازی رفتار شمع پس تزریق شده می باشد.

جدول 3: مشخصات خاک استفاده شده در آنالیز عددی

پارامتر	واحد	ماسبه
C چسبندگی خاک	کیلو نیوتن	0
γ وزن مخصوص مترمکعب	کیلو نیوتن بر مترمکعب	15/7
(ϕ^0) زاویه اصطکاک خاک	درجه	31
زاویه اتساع	درجه	1
μ ضریب پواسن	-	0/3
E_{50}^{ref} سختی سکانتی	مگاپاسکال	17
E_{ode}^{ref} سختی مماسی	مگاپاسکال	15
E_{ur}^{ref} سختی باربرداری	مگاپاسکال	51
m	-	0/5



شکل 2: گروه شمع مدل شده با ابعاد 5x5x10 متر به همراه تیرهای فولادی قرار گرفته در بالای شمع ها جهت اعمال بار

بالای شمع می گردد. حرکت رو به بالای شمع موجب بسیج شدن مقاومت اصطکاکی منفی در امتداد جدار شمع همانند شرایط واقعی می گردد. میزان انبساط حجمی اعمالی برای مدل سازی تزریق پرفشار دوغاب، وابسته به حجم دوغاب تزریقی و پوکی خاک می باشد. برای مدل سازی تزریق دوغاب در نوک شمع حجم مکعب مستطیلی از خاک که سطح مقطع آن برابر با 2/78 برابر قطر شمع و ارتفاع 0/7 متر باشد، در نظر گرفته می شود (شکل 1-ب) سپس با توجه به مقدار نسبت پوکی خاک، حجم حفرات مکعب مستطیل خاک مدنظر در زیر نوک شمع (شکل 1-ب) تعیین شده و با مقایسه حجم دوغاب تزریق شده، میزان کرنش حجمی مکعب مستطیل مشخص می گردد. جهت مدل سازی تزریق دوغاب در نرم افزار PLAXIS3D در فاز محاسبات، گزینه کرنش حجمی برای مکعب های ذکر شده در بالا فعال گردیده و مقدار کرنش حجمی مثبت مدنظر تعریف می گردد. با توجه به اینکه تزریق دوغاب در محدوده کرنش های بزرگ می باشد در مرحله مدل سازی دوغاب گزینه به روز رسانی مش فعال می گردد. آنالیز مش به روز شده در PLAXIS یک روش محاسباتی بر اساس فرمولاسیون لاگرانژی به-روز شده برای در نظر گرفتن تغییر شکل های بزرگ می باشد. در این حالت نرم افزار، مش های مدل المان محدود و ماتریس سختی را در محاسبات به روز کرده و به ارزیابی مجدد تنش ها و کرنش های درون مش ادامه می دهد.

6- عمل آوری دوغاب سیمان: در این مرحله مشخصات خاک بخش منبسط شده با مشخصات دوغاب سیمان جایگزین می گردد. 7- بارگذاری شمع: در این مرحله جهت مدل کردن بارگذاری، بارمحوری بر روی شمع اعمال می گردد.

حجم گروت تزریق شده در هر آنالیز به کمک آیین نامه JGJ106-2014 چین (Tolooiyan و Gavin, 2013) تعیین گردید و در جدول 2 ارائه شده است.

جدول 2: حجم دوغاب سیمان نوک و جدار شمع برای

قطرهای مختلف شمع

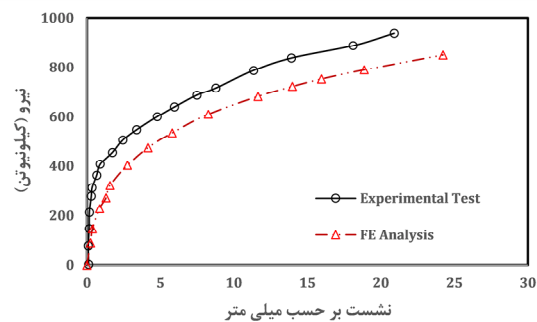
قطر شمع	حجم دوغاب سیمان نوک شمع (لیتر)
1	1200
1/5	1800
2	2400

2-1- اعتبار سنجی

برای بررسی توانایی مدل سازی 3 بعدی در نرم افزار PLAXIS3D جهت بررسی رفتار گروه شمع پس تزریق شده، آزمایش انجام شده توسط Thiyyakkandi و همکاران (2014) بر روی گروه شمع 2x2 و شمع پس تزریق شده در نوک شمع یا قطر 0/216 و طول مدفون 3/4 متر با فاصله شمع های 3d مدل گردید. نتایج مدل-

باشد. نتایج جدول 4 و شکل 4 نشان می‌دهند که، با افزایش فاصله شمع‌ها ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده افزایش می‌یابد. نتایج بدست آمده با نتایج Zhou و همکاران (2021) همخوانی دارد. افزایش ظرفیت باربری گروه‌های شمع پس تزریق شده به دلیل افزایش ناشی از افزایش فاصله بین شمع‌ها در گروه شمع مجاور شیروانی بیش از گروه‌های شمع مستقر بر روی زمین مسطح می‌باشند. افزایش فاصله شمع‌ها از 3d به 5d، ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده مستقر بر روی زمین مسطح و مجاور شیروانی به ترتیب 14% و 24% می‌باشد. این امر به دلیل این موضوع می‌باشد که، پروسه پس تزریق در شمع‌های مجاور شیروانی علاوه بر مکانیسم 4 گانه افزایش ظرفیت باربری شمع پس تزریق، باعث کاهش دوران شمع مجاور شیروانی می‌گردد و این امر باعث تأثیر بیشتر پروسه تزریق دوغاب بر روی افزایش ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده در مجاور شیروانی نسبت به گروه شمع مستقر بر روی زمین مسطح می‌شود. برای بیان میزان افزایش ظرفیت باربری گروه شمع ناشی از پروسه پس تزریق از ضریب نسبت ظرفیت باربری، BCR، (نسبت ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده به ظرفیت باربری گروه شمع بدون تزریق) استفاده می‌گردد. نتایج جدول 4 نشان می‌دهد که با افزایش فاصله شمع‌ها ضریب BCR افزایش می‌یابد و ضریب BCR گروه شمع مجاور شیروانی از ضریب BCR گروه شمع مستقر بر روی زمین مسطح بیشتر می‌باشد. این امر به دلیل اثر پروسه پس تزریق بر روی کاهش دوران سرشمع گروه شمع مجاور شیروانی می‌باشد. با افزایش فاصله شمع‌ها از 3d به 5d ضریب BCR برای گروه‌های شمع پس تزریق شده مستقر بر روی زمین مسطح و مجاور شیروانی به ترتیب در محدوده 1/30-1/35 و 1/39-1/35 می‌باشد.

برای بیان مقایسه نتایج جدول 4 نشان می‌دهد که در شمع‌های مستقر بر روی زمین مسطح، ضریب راندمان گروه شمع بدون تزریق از ضریب راندمان گروه شمع پس تزریق شده در نوک بیشتر می‌باشد. نتایج بدست آمده با نتایج آزمایش‌های Zhou و همکاران (2021) همخوانی دارد. نتایج جدول 4 نشان می‌دهد که در شمع‌های مجاور شیروانی، ضریب راندمان گروه‌های شمع بدون تزریق و پس تزریق شده با افزایش فاصله شمع‌ها از یکدیگر، افزایش می‌یابد. افزایش ضریب راندمان به دلیل افزایش فاصله شمع‌ها در گروه شمع پس تزریق شده در نوک از افزایش ضریب راندمان گروه شمع بدون تزریق بیشتر می‌باشد. دلیل این امر تأثیر پافیلی شدن نوک شمع پس تزریق بر روی کاهش دوران شمع‌ها می‌باشد. با افزایش فاصله شمع‌ها از 3d به 5d، ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع بدون تزریق و پس تزریق شده به ترتیب 20% و 24% افزایش یافت.



شکل 3: منحنی بار-نشست حاصل از آنالیز المان محدود تحقیق حاضر و آزمایش مدل فیزیکی (Thiyyakkandi و همکاران (2014))

3- نتایج عددی

3-1- مقایسه ظرفیت باربری شمع مجاور شیروانی و مستقر بر روی زمین مسطح

در این بخش گروه شمع پس تزریق شده در نوک و شمع بدون پس تزریق در زمین مسطح و در مجاورت شیروانی ماسه‌ای مدل گردید. ظرفیت باربری شمع در نسبت نشست 5% محاسبه گردید. فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها 3، 4 و 5 برابر قطر شمع (d)، ارتفاع شیروانی 30 متر و زاویه شیروانی 30 درجه، عمق مدفون شمع‌ها 20 متر و قطر شمع‌ها 1 متر در نظر گرفته شد. در شکل 4، مقادیر ظرفیت باربری گروه شمع مستقر بر روی زمین مسطح و مجاور شیروانی ارائه شده است. نتایج جدول 4 نشان می‌دهد که با افزایش فاصله بین شمع‌ها، دوران سرشمع (نسبت تفاوت جابجایی قائم دو لبه سرشمع به طول سرشمع) در گروه شمع‌های پس تزریق شده و بدون تزریق کاهش می‌یابد. دلیل این امر، افزایش سختی جانبی گروه شمع با افزایش فاصله بین شمع‌ها می‌باشد. مقایسه نتایج جدول 4 نشان می‌دهد دوران سرشمع گروه‌های شمع پس تزریق شده مجاور شیروانی از دوران سرشمع گروه شمع بدون تزریق کمتر می‌باشد. دلیل این امر، پافیلی شدن نوک شمع ناشی از پروسه پس تزریق می‌باشد. با افزایش فاصله شمع‌ها اثر پروسه پس تزریق بر روی کاهش دوران بیشتر می‌گردد. میزان کاهش دوران سرشمع گروه‌های شمع پس تزریق شده نسبت به دوران گروه‌های شمع بدون تزریق برای فواصل شمع 3d، 4d و 5d به ترتیب 47%، 53% و 60% می‌باشد.

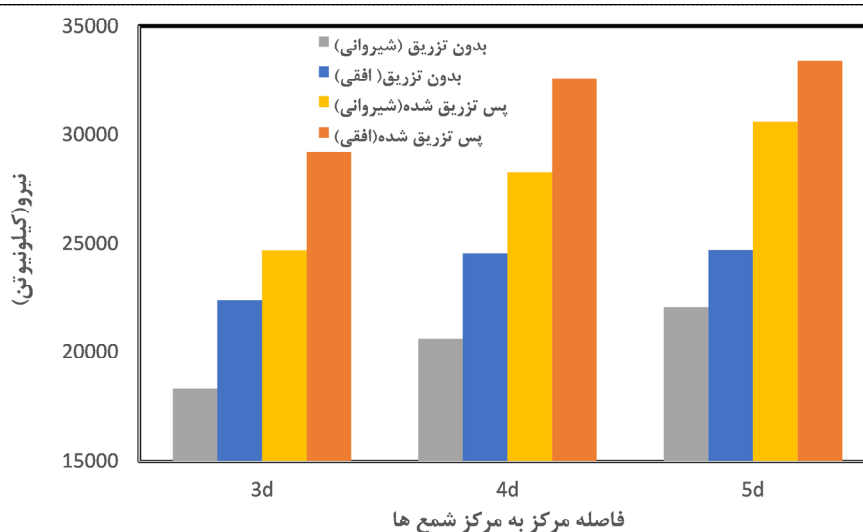
نتایج جدول 4 و شکل 4 نشان می‌دهند که، ظرفیت باربری گروه شمع بدون تزریق مستقر بر روی زمین مسطح، با شمع‌های 4d، از ظرفیت باربری گروه شمع با فواصل شمع‌های 3d و 5d بیشتر است. اما در گروه شمع بدون تزریق شده مجاور شیروانی با افزایش فاصله بین شمع‌ها ظرفیت باربری گروه شمع افزایش می‌یابد که با نتایج Mohammad Ali Nejad و همکاران (2021) همخوانی دارد. دلیل این امر، افزایش سختی جانبی گروه شمع با افزایش فاصله بین شمع‌ها و در نتیجه کاهش دوران سرشمع می‌باشد.

می باشد. این موضوع نشان می دهد که اثر شیروانی بر روی کاهش ظرفیت باربری گروه های شمع پس تزریق شده کمتر از شمع های بدون تزریق می باشد. نتایج شکل 4 نشان می دهد که، در یک قاصله شمع معین، ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده مجاور شیروانی از ظرفیت باربری گروه شمع بدون تزریق مستقر

اثر شیروانی بر روی کاهش ظرفیت باربری از ضریب کاهش ظرفیت باربری، RF (نسبت ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی به ظرفیت باربری گروه شمع مستقر بر روی زمین مسطح) استفاده می گردد. ضریب RF در گروه شمع پس تزریق شده مجاور شیروانی از ضریب RF در گروه شمع بدون تزریق بیشتر

جدول 4: ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع مستقر بر روی زمین مسطح و مجاور شیروانی

		فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها(برحسب قطر شمع‌ها)			
		3	4	5	
زمین مسطح	بدون تزریق	ظرفیت باربری	22392	25725	24682
		ضریب راندمان	0/78	0/9	0/86
	پس‌تزریق شده	ظرفیت باربری	29203	32603	33320
		ضریب راندمان	0/73	0/81	0/83
		BCR	1/30	1/33	1/35
مجاور شیروانی	بدون تزریق	ظرفیت باربری	18306	20639	22074
		ضریب راندمان	0/66	0/75	0/8
		RF	0/81	0/84	0/89
	پس‌تزریق شده	دوران سرشمع	0/0026	0/0019	0/0015
		ظرفیت باربری	24678	28369	30612
		ضریب راندمان	0/65	0/75	0/8
		RF	0/85	0/88	0/92
		BCR	1/35	1/37	1/39
		دوران سرشمع	0/0014	0/0009	0/0006



شکل 4: ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی و مستقر بر روی زمین مسطح

مدل گردیدند. ارتفاع شیب 30 متر و زاویه شیروانی 30 درجه در نظر گرفته شد. فاصله مرکز به مرکز شمع ها 4 برابر قطر شمع در نظر گرفته شد. شمع ها با طول مدفون 20 متر و نسبت طول مدفون به ارتفاع شیروانی 0/67، در 2 حالت بدون پس تزریق و پس تزریق شده در نوک مدل گردیدند. نتایج جدول 5 نشان می دهد که افزایش قطر شمع باعث افزایش ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع می گردد. افزایش ظرفیت باربری گروه شمع ناشی از افزایش قطر در گروه های شمع های پس تزریق شده از گروه های شمع های بدون تزریق بیشتر می باشد. با افزایش قطر

بر روی زمین مسطح بیشتر می باشد. ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده مجاور شیروانی نسبت به ظرفیت باربری گروه شمع بدون تزریق مستقر بر روی زمین مسطح برای فواصل شمع شمع ها 3d، 4d و 5d، به ترتیب 9%، 11% و 24% بیشتر می باشد.

3-2- اثر قطر شمع

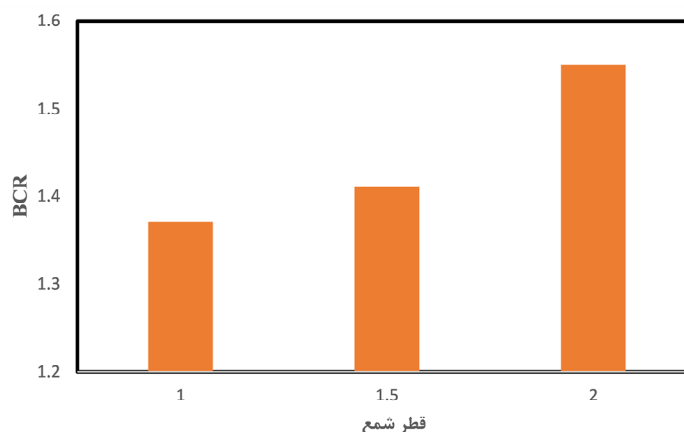
در این بخش تأثیر قطر شمع بر روی ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده مورد بررسی قرار گرفت. شمع ها با قطر 1، 1/5 و 2 متر در فاصله ای برابر با قطر شمع از رأس شیروانی ماسه ای

افزایش فشار دوغاب تزریقی باعث افزایش پیش فشردگی خاک زیر نوک شمع می‌باشد. ضریب BCR برای گروه شمع با قطر 1، 1/5 و 2 متر به ترتیب 1/37، 1/41 و 1/55 می‌باشد. با افزایش قطر شمع از 1 به 2 متر، ضریب BCR، 13% افزایش یافت. نتایج جدول 5 نشان داد که میزان چرخش سرشمع در شمع‌های پس تزریق شده کمتر از مقادیر پیشنهادی (0/002) بوده اما در گروه‌های شمع بدون تزریق با قطر 1/5 و 2 متر میزان چرخش سرشمع از مقدار حداکثر پیشنهادی بیشتر می‌باشد.

شمع از 1 به 2 متر ظرفیت باربری گروه‌های شمع بدون تزریق و پس تزریق شده به ترتیب 2/74 و 3/08 برابر می‌گردد. افزایش ضریب راندمان گروه شمع ناشی از افزایش قطر در گروه‌های شمع - های بدون تزریق از گروه‌های شمع‌های پس تزریق شده بیشتر می‌باشد. با افزایش قطر شمع از 1 به 2 متر ضریب راندمان گروه - های شمع بدون تزریق و پس تزریق شده به ترتیب 16% و 5% افزایش می‌یابد. نتایج جدول 5 و شکل 5 نشان داد که با افزایش قطر شمع ضریب BCR افزایش می‌یابد. این امر به دلیل افزایش فشار دوغاب تزریقی در نوک شمع با افزایش قطر شمع می‌باشد.

جدول 5: ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع بدون پس تزریق و پس تزریق شده واقع در زمین مسطح و مجاور شیروانی

		قطر شمع (متر)		
		1	1/5	2
بدون تزریق	ظرفیت باربری	20639	38201	56460
	ضریب راندمان	0/75	0/77	0/87
	چرخش سرشمع	0/0019	0/0023	0/003
پس تزریق شده	ظرفیت باربری	28369	53500	87354
	BCR	1/37	1/41	1/55
	ضریب راندمان	0/75	0/76	0/79
	چرخش سرشمع	0/0014	0/0015	0/0018



شکل 5: تغییرات ضریب BCR با قطر شمع

گروه شمع تزریق شده بیشتر می‌باشد. که این امر نشان دهنده کاهش تاثیر پروسه پس تزریق بر افزایش ظرفیت باربری با

افزایش طول مدفون شمع می‌باشد. با افزایش طول مدفون از 10 به 30 متر ظرفیت باربری گروه شمع بدون تزریق و پس تزریق شده به ترتیب 2/74 و 2/59 برابر گردید. برای درک بهتر اثر پروسه پس تزریق بر روی افزایش ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده، تغییرات ضریب BCR با قطر شمع در شکل 6 ترسیم شده است. نتایج شکل 6 نشان می‌دهد که، با افزایش طول مدفون شمع ضریب BCR کاهش می‌یابد. این نتایج با نتایج Ma و همکاران (2023) در خصوص شمع پس تزریق منفرد همخوانی دارد. با افزایش طول مدفون از 10 به 30 متر ضریب BCR، 31% کاهش

3-3- اثر نسبت طول مدفون شمع به ارتفاع شیروانی

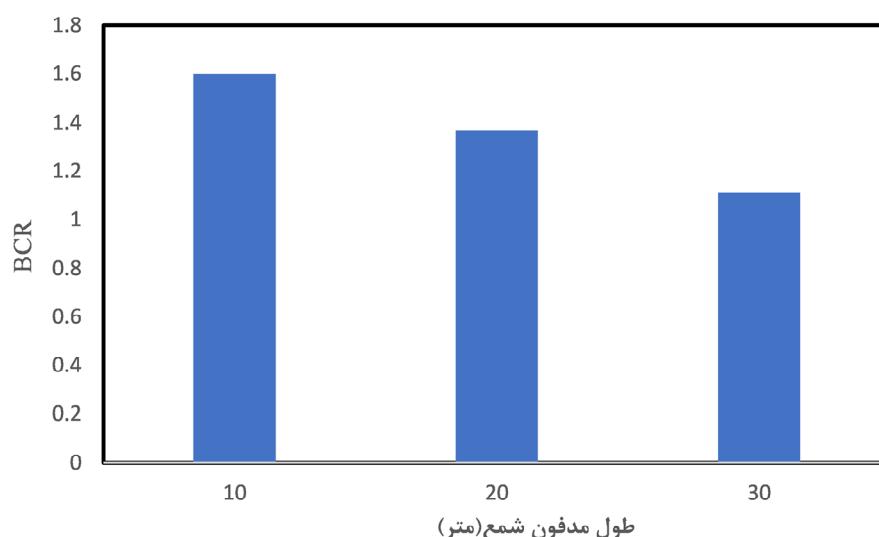
در این بخش به بررسی اثر نسبت طول مدفون شمع به ارتفاع شیروانی ماسه‌ای (L/H) بر روی ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده پرداخته می‌شود. شمع‌ها با نسبت‌های L/H، 0/33، 0/67 و 1 (با طول مدفون به ترتیب 10، 20 و 30 متر) در 2 حالت بدون پس تزریق، پس تزریق شده در نوک در مجاورت شیروانی ماسه‌ای مدل گردیدند. ارتفاع شیب 30 متر و زاویه شیروانی 30 درجه در نظر گرفته شد. نتایج جدول 6 نشان داد که با افزایش طول مدفون شمع ظرفیت باربری گروه شمع افزایش یافت و این افزایش ظرفیت باربری در گروه شمع بدون تزریق از

میزان اثر پروسه پس تزریق بر روی کاهش میزان چرخش سرشمع با افزایش طول مدفون سرشمع کاهش یافت. میزان کاهش چرخش سرشمع ناشی از پروسه پس تزریق برای گروه شمع با طول مدفون 10، 20 و 30 متر به ترتیب 37%، 26% و 20% می-باشد.

می‌یابد. نتایج جدول 6 نشان می‌دهد که، ضریب راندمان گروه‌های شمع با افزایش طول مدفون کاهش می‌یابد. با افزایش طول مدفون شمع از 10 متر به 30 متر، ضریب راندمان گروه شمع بدون تزریق و پس تزریق شده به ترتیب 20% و 22% کاهش می‌یابد. با افزایش طول مدفون شمع میزان چرخش سرشمع گروه شمع کاهش یافت.

جدول 6: ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع بدون پس تزریق و پس تزریق شده واقع در زمین مسطح و مجاور شیروانی

		طول مدفون شمع (متر)		
		10	20	30
بدون تزریق	ظرفیت باربری	9539	20639	35672
	ضریب راندمان	0/91	0/75	0/73
	چرخش سرشمع	0/0027	0/0019	0/001
پس تزریق شده	ظرفیت باربری	15302	28369	39674
	BCR	1/6	1/37	1/11
	ضریب راندمان	0/83	0/75	0/65
	چرخش سرشمع	0/0017	0/0014	0/0008



شکل 6: تغییرات ضریب BCR با طول مدفون شمع

جدول 7 نشان می‌دهد که میزان چرخش سرشمع گروه شمع پس تزریق شده از چرخش سرشمع گروه شمع بدون تزریق کمتر می-باشد. کاهش در چرخش سرشمع به دلیل پروسه پس تزریق در شمع‌های موازی راس شیروانی بیشتر می‌باشد. میزان کاهش در چرخش سرشمع ناشی از پروسه پس تزریق در گروه‌های شمع $2 \times 1(p)$ و $3 \times 1(p)$ به ترتیب 46% و 32% و میزان کاهش در چرخش سرشمع ناشی از پروسه پس تزریق در گروه‌های شمع $2 \times 1(v)$ و $3 \times 1(v)$ به ترتیب 25% و 23% می‌باشد. نتایج جدول 7 نشان می‌دهد که، ظرفیت باربری گروه شمع خطی عمود بر راس شیروانی از ظرفیت باربری گروه شمع موازی شیروانی بیشتر می-باشد. این امر به دلیل سختی بیشتر گروه‌های شمع عمود بر

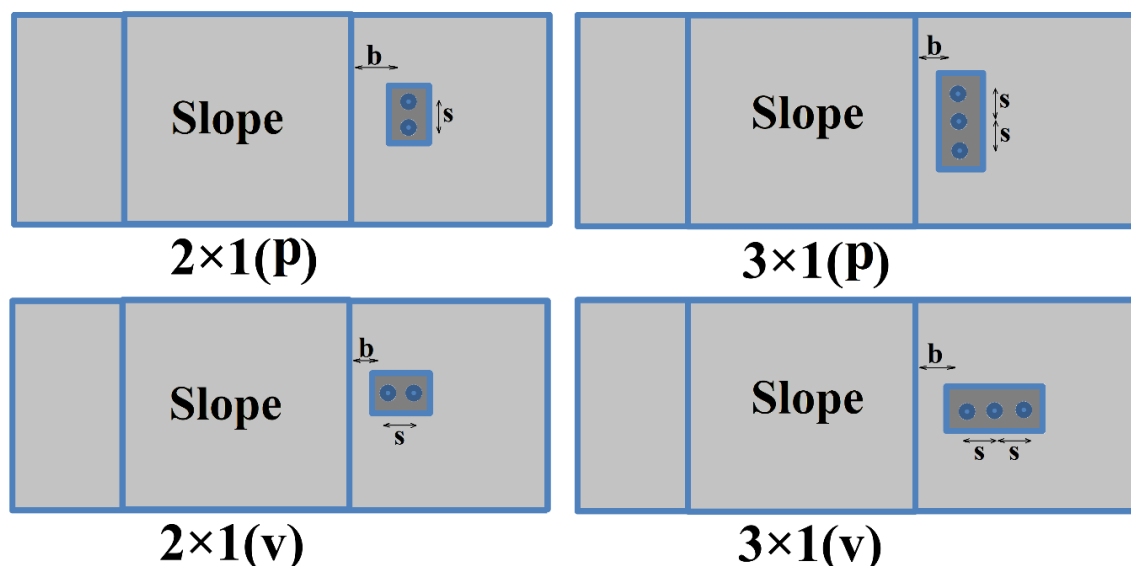
3-4- اثر جهت قرارگیری گروه شمع خطی نسبت به راس شیروانی

در این بخش تأثیر جهت قرارگیری گروه شمع خطی $2 \times 1(P)$, $2 \times 1(v)$, $3 \times 1(p)$, $3 \times 1(v)$ روی ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده مورد بررسی قرار گرفت (شکل 7). شمع‌ها با قطر 1 متر در فاصله‌ای برابر با قطر شمع از رأس شیروانی ماسه‌ای مدل گردیدند. ارتفاع شیب 30 متر و زاویه شیروانی 30 درجه در نظر گرفته شد. فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها 4 برابر قطر شمع در نظر گرفته شد. شمع‌ها با طول مدفون 20 متر و نسبت طول مدفون به ارتفاع شیروانی 0/67، در 2 حالت بدون پس تزریق، پس تزریق شده در نوک مدل گردیدند. نتایج

شمع $3 \times 1(v)$ می‌باشد. ضریب راندمان گروه شمع بدون تزریق موازی شیروانی از گروه شمع عمود بر راس شیروانی بیشتر می‌باشد و با افزایش تعداد شمع‌های گروه خطی ضریب راندمان کاهش می‌یابد. این نتایج با نتایج Mohammad AliNejad و همکاران (2021) همخوانی دارد. ضریب راندمان گروه‌های شمع بدون تزریق $2 \times 1(p)$ و $2 \times 1(v)$ به ترتیب $0/89$ و $0/89$ و ضریب راندمان گروه‌های $3 \times 1(p)$ و $3 \times 1(v)$ به ترتیب $0/86$ و $0/84$ می‌باشد. ضریب راندمان گروه شمع‌های پس تزریق شده به جهت گروه شمع بستگی ندارد و ضریب راندمان گروه شمع موازی و عمود بر راس شیروانی تقریباً برابر می‌باشند. ضریب راندمان گروه‌های شمع پس تزریق شده $2 \times 1(p)$ و $2 \times 1(v)$ به ترتیب $0/92$ و $0/93$ و ضریب راندمان گروه‌های $3 \times 1(p)$ و $3 \times 1(v)$ به ترتیب $0/85$ و $0/86$ می‌باشد.

شکل 9 کانتورهای جابجایی برای گروه شمع $3 \times 1(p)$ (برش عرضی از مدل) و برای حالت‌های بدون پس تزریق و پس تزریق شده در نوک را نشان می‌دهد. نتایج شکل 9 نشان می‌دهد که محدوده تحت تأثیر بارگذاری در بالای گروه شمع بزرگتر می‌باشد و این محدوده در حرکت به سمت نوک شمع کاهش می‌یابد. همچنین شکل 9 نشان می‌دهد که عرض محدوده تحت تأثیر در گروه شمع پس تزریق شده از گروه شمع بدون پس تزریق، بزرگتر می‌باشد.

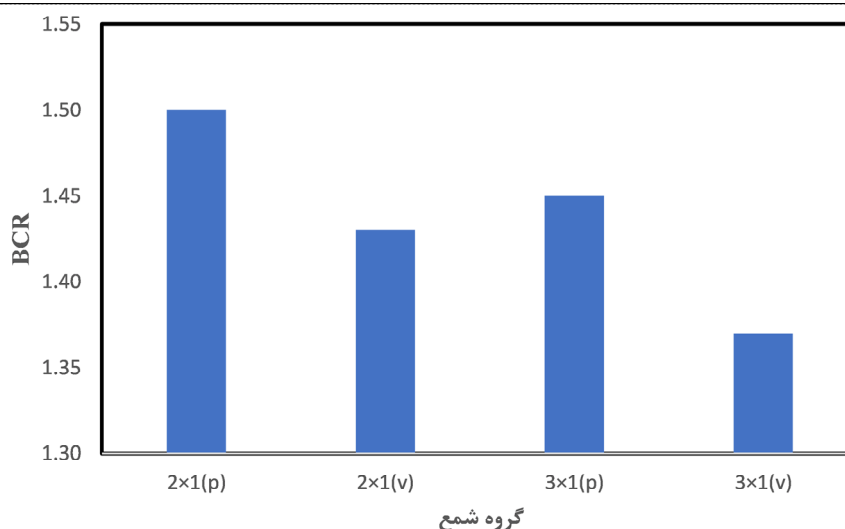
راستای شیروانی نسبت به گروه‌های شمع موازی راس شیروانی می‌باشد. مقایسه نتایج جدول 7 نشان می‌دهد که اثر جهت قرارگیری گروه شمع خطی نسبت به راس شیروانی بر روی ظرفیت باربری در گروه شمع پس تزریق شده کمتر از گروه شمع بدون تزریق می‌باشد. دلیل این امر تأثیر بیشتر پافیلی شدن نوک شمع بر روی کاهش چرخش سرشمع در شمع‌های موازی شیروانی نسبت به گروه شمع عمود بر راس شیروانی می‌باشد. ظرفیت باربری گروه شمع $2 \times 1(v)$ در گروه‌های شمع بدون تزریق و پس تزریق شده به ترتیب 11% و 6% بیشتر از ظرفیت باربری گروه شمع $2 \times 1(p)$ می‌باشد و ظرفیت باربری گروه شمع $3 \times 1(v)$ در گروه‌های شمع بدون تزریق و پس تزریق شده به ترتیب 15% و 8% بیشتر از ظرفیت باربری گروه شمع $3 \times 1(p)$ می‌باشد. برای درک بهتر اثر پروسه پس تزریق بر روی افزایش ظرفیت باربری گروه‌های شمع خطی، ضریب BCR گروه‌های شمع خطی در شکل 8 ترسیم شده است. ضریب BCR گروه‌های شمع موازی شیروانی از ضریب BCR گروه‌های شمع عمود بر شیروانی بیشتر می‌باشد. ضریب BCR گروه‌های $2 \times 1(p)$ و $2 \times 1(v)$ به ترتیب $1/50$ و $1/43$ و ضریب BCR گروه‌های $3 \times 1(p)$ و $3 \times 1(v)$ به ترتیب $1/45$ و $1/37$ می‌باشد. با افزایش تعداد شمع‌های گروه شمع خطی، ضریب BCR اندکی کاهش می‌یابد. ضریب BCR گروه شمع $2 \times 1(p)$ ، 3% بیشتر از ضریب BCR گروه شمع $3 \times 1(p)$ می‌باشد و ضریب BCR گروه شمع $2 \times 1(v)$ ، 4% بیشتر از ضریب BCR گروه



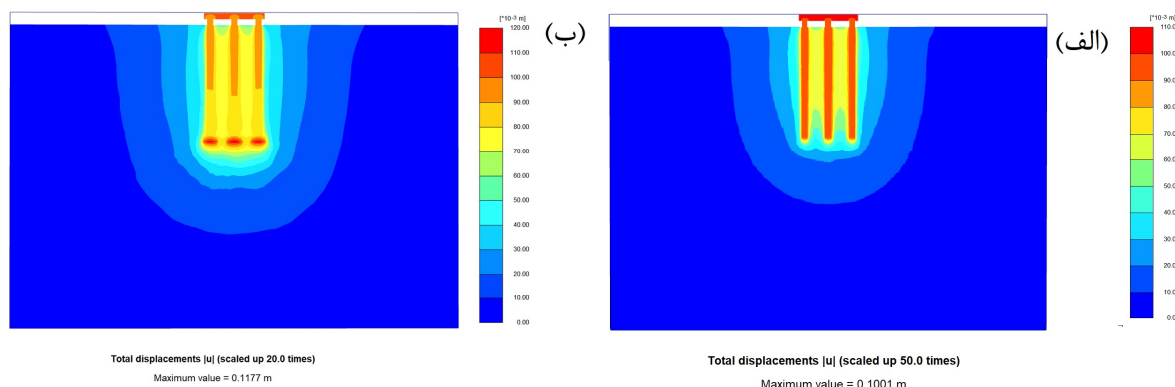
شکل 7: نحوه قرار گیری گروه‌های شمع خطی نسبت به راس شیروانی

جدول 6: ظرفیت باربری و ضریب راندمان گروه شمع خطی بر روی زمین مسطح و مجاور شیروانی

		گروه شمع			
		2×1(p)	2×1(v)	3×1(p)	3×1(v)
بدون تزریق	ظرفیت باربری	11066	12296	15854	18223
	ضریب راندمان	0/87	0/89	0/84	0/86
	چرخش سرشمع	0/0024	0/001	0/0019	0/00095
پس تزریق شده	ظرفیت باربری	16616	17613	22978	24927
	BCR	1/50	1/43	1/45	1/37
	ضریب راندمان	0/92	0/93	0/85	0/86
	چرخش سرشمع	0/0013	0/00075	0/0013	0/0007



شکل 8: تغییرات ضریب BCR گروه‌های شمع خطی



شکل 8: کانتور تغییرشکل (الف) گروه شمع بدون پس تزریق (ب) گروه شمع پس تزریق شده

4- نتیجه‌گیری

های اجرای شمع می‌باشند. یکی از روش‌های افزایش ظرفیت باربری شمع‌های حفاری شده استفاده از روش پس تزریق دوعاب سیمان می‌باشد. در این تحقیق اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده در نوک به کمک روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. در آنالیزهای انجام شده اثرات قطر شمع، نسبت طول مدفون به ارتفاع شیروانی و فاصله شمع‌ها از یکدیگر و جهت قرار گیری گروه شمع خطی نسبت به راس شیروانی بر

از گروه شمع به‌عنوان پی ساختمان‌ها، پل‌ها و برج‌های انتقال استفاده می‌گردد. برخی از این سازه‌ها در مجاورت شیروانی ساخته می‌شوند. استقرار گروه‌های شمع در مجاورت شیروانی، باعث کاهش ظرفیت باربری و دوران سرشمع گروه شمع به سمت شیروانی در اثر بارگذاری محوری می‌گردد. مهندسين به دنبال راهکارهایی برای افزایش ظرفیت باربری شمع‌ها و در نتیجه کاهش هزینه-

مدفون از 10 متر به 30 متر ضریب BCR از 1/6 به 1/11 کاهش یافت.

7- اثر شیروانی بر روی کاهش ظرفیت باربری در گروه شمع پس تزریق شده کمتر از شمع بدون تزریق می‌باشد. دلیل این امر اثر پروسه پس تزریق بر روی کاهش چرخش سرشمع گروه شمع می‌باشد. برای گروه شمع با طول مدفون 20 متر و فواصل شمع 3 تا 5 برابر قطر شمع، ضریب RF گروه شمع پس تزریق شده در مجاور شیروانی و مستقر بر روی زمین مسطح به ترتیب در محدوده 0/0-85/92 و 0/81-0/89 می‌باشد.

5-مراجع

- Abedi, A. S. Hataf, N. "Bearing capacity of strip footings located on grouted soil slopes". *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 19(Z4), 16827-16837.
- Bo, Z., Weijie, N., Huabin, W., & Zhifeng, L. "Research on bearing capacity of post-grouting pile groups as bridge foundations in karst areas". *The International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE)* (pp. 6115-6120). 2011
- Bolognesi, A.J.L., Moretto, O. "Stage grouting preloading of large piles on sand". 8th ICSME, Moscow, 1978
- Brown, D. A., Dapp, S. D., Thompson, W.R., and Lazarte, C. A. "Design and construction of continuous flight auger piles". Washington, Federal Highway Administration, 33-35.2007
- Cao, S., Wang, Q., Ma, J., Xiao, Z., Li, C., Yang, Y., & Wang, J. "Experimental Investigation of Vertical Bearing Characteristics of Composite Post-grouting Piles in Sandy Soil". *International Journal of Civil Engineering*, 2024, 22(2), 303-315.
<http://dx.doi.org/10.1007/s40999-023-00899-1>
- Deeks, A. D., White, D. J., & Bolton, M. D. "A comparison of jacked, driven and bored piles in sand". The 16th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering. Amsterdam. 2005.
- Gouvenot D, Gabiax, F.D. "A new foundation technique using piles sealed by concrete under high pressure". The 7th annual offshore technical conference, vol 2, Houston, Texas, 1974.
- Hu, H., Jin, Q., Yang, F., Zhou, J., Ma, J., Gong, X., & Guo, J. "A novel method for testing the effect of base post-grouting of super-long piles". *Applied Sciences*, 202, 12(21), 10996.
<https://doi.org/10.3390/app122110996>
- Hu, T. Wan, Z. Dai, G., Gong, W. Fang, B. "Prediction and design of grouting parameters for long and large-diameter postgrouted drilled shafts". *International Journal of Geomechanics*, 2024, 24(2).
<http://dx.doi.org/10.1061/IJGNALGMENG-8965>
- Huang, L., Gao, R., Chi, J., & Yan, X. "Study on load-bearing behaviors of prestressed post-grouting tubular piles in the karst region of northern Fujian Province, China". *Frontiers in Earth Science*, 2024, 12,.
<http://dx.doi.org/10.3389/feart.2024.1387028>
- Huang, S. G. Zhang, T., Cao, H. "A calculation model of grout migration height for post-grouting technology". *Applied Sciences*, 2022, 12(13), 6327.
<https://doi.org/10.3390/app12136327>

ظرفیت باربری گروه شمع پس تزریق شده در نسبت نشست 5% میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق می‌تواند برای بهبود ظرفیت باربری گروه شمع‌های پی پل‌ها و سازه‌های مجاور شیروانی و در نتیجه کاهش تعداد شمع‌ها و کاهش هزینه اجرای پی توسط مهندسین مورد استفاده قرار گیرد.

1- میزان چرخش سرشمع در گروه‌های شمع پس تزریق شده از میزان چرخش سرشمع گروه شمع بدون تزریق کمتر می‌باشد. این موضوع در تمامی قطرهای شمع و تمامی فواصل شمع‌ها از یکدیگر و طول‌های مدفون مشاهده گردید. دلیل این موضوع پافیلی شدن نوک شمع ناشی از پروسه تزریق و تشکیل حباب دوغاب سیمان می‌باشد.

2- اثر پروسه پس تزریق بر روی افزایش ظرفیت باربری گروه شمع مجاور شیروانی بیشتر از گروه شمع مستقر بر روی زمین مسطح می‌باشد. این امر به دلیل این موضوع می‌باشد که، پروسه پس تزریق در شمع‌های مجاور شیروانی علاوه بر مکانیسم 4 گانه افزایش ظرفیت باربری شمع پس تزریق، باعث کاهش دوران شمع مجاور شیروانی می‌گردد. برای گروه شمع با طول مدفون 20 متر و فواصل شمع 3 تا 5 برابر قطر شمع، ضریب BCR گروه شمع پس تزریق شده در مجاور شیروانی و مستقر بر روی زمین مسطح به ترتیب در محدوده 1/35-1/39 و 1/30-1/35 می‌باشد.

3- اثر پروسه پس تزریق بر روی افزایش ظرفیت باربری گروه شمع خطی موازی راس شیروانی بیشتر از گروه شمع عمود بر راس شیروانی می‌باشد. این امر به دلیل اثر بیشتر پروسه پس تزریق بر روی کاهش دوران سرشمع گروه شمع خطی موازی شیروانی می‌باشد. ضریب BCR گروه‌های شمع $2 \times 1(p)$ و $2 \times 1(v)$ به ترتیب 1/50 و 1/43 و ضریب BCR گروه‌های شمع $3 \times 1(p)$ و $3 \times 1(v)$ به ترتیب 1/45 و 1/37 می‌باشد

4- با افزایش تعداد شمع‌های گروه شمع خطی، اثر پروسه پس تزریق بر روی افزایش ظرفیت باربری گروه شمع کاهش می‌یابد. ضریب BCR گروه شمع $2 \times 1(p)$ ، 3% بیشتر از ضریب BCR گروه شمع $3 \times 1(p)$ می‌باشد و ضریب BCR گروه شمع $2 \times 1(v)$ ، 4% بیشتر از ضریب BCR گروه شمع $3 \times 1(v)$ می‌باشد.

5- افزایش قطر شمع باعث افزایش اثر پروسه پس تزریق بر روی افزایش ضریب BCR گروه شمع می‌گردد. این امر به دلیل افزایش فشار دوغاب تزریقی در نوک شمع با افزایش قطر شمع می‌باشد. افزایش فشار دوغاب تزریقی باعث افزایش پیش فشردگی خاک زیر نوک شمع می‌باشد. ضریب BCR برای گروه شمع با قطر 1، 1/5 و 2 متر به ترتیب 1/37، 1/41 و 1/55 می‌باشد. با افزایش قطر شمع از 1 به 2 متر، ضریب BCR، 13% افزایش یافت.

6- با افزایش طول مدفون شمع تاثیر پروسه پس تزریق بر افزایش ظرفیت باربری گروه شمع، کاهش یافت. با افزایش طول

- Mohammad Alinejad, R. M., Bayat, M., Nadi, B., & Pakbaz, M. S. "Experimental Study of Axially Loaded Pile Group Near a Sloping Ground". *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2023, 67(2), 382-391. <https://doi.org/10.3311/PPci.18334>
- Mohammad Alinejad, R., & Bayat, M. "Investigating the Behavior of Single Pile and Adjacent Pile Group of Sandy Slope under Uplift Loading". *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, <https://doi.org/10.22034/ceej.2024.61105.2343>
- Mohammad-Alinejad, R., Bayat, M., Nadi, B., & Pakbaz, M. S. "Effect of degree of freedom of movement on the bearing capacity and efficiency coefficient of pile group adjacent to sandy slope". *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2023, 10(1), 95-113. <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.321897.2678>
- Nguyen TD, Lai VQ, Phung DL, Duong, TP. "Shaft resistance of shaft-grouted bored piles and barrettes recently constructed in Ho Chi Minh city". *Geotech Eng J SEAGS AGSSEA*, 2019, 50(3):155-162.
- O'Neill, M. W. "Review of augured pile practice outside the United States". Washington, Transportation Research Board, 1994, 3-9.
- O'Neill, M. W., and Reese, L. C. "Drilled shafts: Construction procedures and design methods". Washington, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 1999, 243-251
- Salem, T. El-Basset, O. H. Hassan, R. "3D Numerical Analysis of Post-Grouted Piles". *Indian Geotechnical Journal*, 2024 54(4), 1562-1583. <http://dx.doi.org/10.1007/s40098-023-00832-2>
- Selby, A. R. . Ground vibrations caused by pile installation. The 4th Int. Conf. on Piling and Deep Foundations, Deep Foundation Institute, Stresa, 1991, Italy.
- Shalabi, F. I., Saleem, M. U., Qureshi, H. J., Arifuzzaman, M., Khan, K., & Rahman, M. M. "3D FE analysis of bored pile-pile cap interaction in sandy soils under axial compression-parametric study". *Journal of Engineering Research*, 2023, 11(4), 301-313. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.07.011>
- Stocker, M. "Influence of post-grouting on the load-bearing capacity of bored piles". The Proceedings of the European conference on soil mechanics and foundation engineering. 1983, Balkema, Helsinki.
- Svinkin, M. R. "Mitigation of soil movements from pile driving". *Pract. Period. Struct. Des. Constr.*, 2006, 11(2), 80-85. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0680\(2006\)11:2\(80\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0680(2006)11:2(80))
- Su, S., Wang, X. Lv, S. "Experimental Study on the Bearing Behaviour of Super-Long Post-Gouting Cast-in-Place Pile in Deep Soft Soil". The 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2023, New Delhi. <http://dx.doi.org/10.3233/ATDE230244>
- Tao, H., Zhihui, W., Guoliang, D., Weiming, G., & Zheng, Z. "Regression analysis and optimization for grouting pressure of post-grouting pile in saturated soil". *Journal of Southeast University/Dongnan Daxue Xuebao*, 2022, 52(5). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-0505.2022.05.007>
- Thiyyakkandi S, McVay M, Bloomquist D, Lai P. "Experimental study, numerical modeling of and axial prediction approach to base grouted drilled
- Jianliang, YE. Shicai1, C, Xiaohu Wu, "Pile Group Effect for Base Post-grouting", *Structural Engineers*, 2021, vol 30.
- JGJ 106-2014, Technical Code for Testing of Building Foundation Piles. Beijing, China Architecture & Building Press, Beijing.
- Kong, D., Li, H., Gan, W. "Study on Vertical Load-Carrying Capacity of Post-Grouting Bored Piles". *Applied Sciences*, 2022 12(15), 7452. <https://doi.org/10.3390/app12157452>
- Loehr, J. E., Marinucci, A., Duffy, P. H., Gomez, J., Robinson, H., Day, T. Cadden, A. "Evaluation and guidance development for post-grouted drilled shafts for highways". Washington, Federal Highway Administration. 2017, 30-35.
- Li, P., Xia, Y., Xie, X., Wang, J., Wang, C., Shi, M. Wu, H. "Study on Vertical Bearing Capacity of Pile Foundation with Distributed Geopolymer Post-Grouting on Pile Side". *Materials*, 2024, 17(2), 398. <https://doi.org/10.3390/ma17020398>
- Liu, X., Liu, Y., Liu, K., & Su, Y. "Experimental investigation on anti-sliding performance of grouted micro-pipe pile groups". *Natural Hazards*, 2022, 113(2), 1367-1384. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05351-6>
- Liu, S. W., Zhang, Q. Q., Li, H. T., Yu, X. T., Liu, G. H., & Cui, W. "An analysis method for the response of combined side-and-tip grouting pile". *Acta Geotechnica*, 2023, 18(7), 3715-3729. <http://dx.doi.org/10.1007/s11440-022-01788-y>
- Mahboubi Niazmandi, M. "Estimation of the undrained bearing capacity of strip foundations on two-layer clay soils adjacent to the geogrid-stabilized slope under the effect of combined loading". *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2023, 11(3). <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.402512.3146>
- Mahboubi Niazmandi, M., Mirasi, S., Hashemi jokar, M., & Momeni, M. "The effect of combined loading on the bearing capacity of strip footings located on two-layered clayey soils adjacent to geogrid-reinforced slopes". *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 2023, 55(9), 1825-1844. <https://doi.org/10.22060/ceej.2023.21741.7812>
- McVay, M., Thiyyakkandi, S., Joiner, J., & Adams, V. "Group efficiencies of grout-tipped drilled shafts and jet-grouted piles (No. UF Project 73980/74027)". University of Florida. Department of Civil and Coastal Engineering. 2010
- Ma H, Ma Y, Yao W, Chen C (2021) Research on bearing capacity of post-grouting super-long bored pile. In: earth and environmental science, Bristol, IOP Publishing vol 634, no. 1, p 012111. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/634/1/012111>
- Meyerhof, G. G" Bearing capacity and settlement of pile foundations". *J. Geotech. Engrg. Div.*, 1976, 102(3), 197-228.
- Mohammad Alinejad, R., Bayat, M, "Bearing Capacity of Post Grouted Drilled Pile Near a Sandy Slope" *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2025 <https://doi.org/10.22065/jsce.2025.484828.3551>
- Mohammad Alinejad, R., Bayat, M., Nadi, B., & Pakbaz, M. S. "Response of pile group adjacent to a slope crest under static axial loading". *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09123-7>

04014124. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001220](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001220)
- Ye JL, Chen SC, Wu XH, Wang Q, Chen RR, Bao LQ. "Pile group effect for base postgrouting". *Struct Eng* 2014;30(4):94–8. <https://doi.org/10.15935/j.cnki>
- Youn, H. Tonon, F. "Numerical analysis on post-grouted drilled shafts: a case study at the Brazo River Bridge, TX". *Comput Geotech*, 2014, 37:456–465. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.01.005>.
- Zhang, J., Zhao, C., Zhao, C. Wu, Y. "Field test on application of tip grouting in enlarged head cast-in-place bored pile. In: *Earth and Environmental Science*". IOP Publishing, 2024, Vol. 1336, No. 1, p. 012041 <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/1336/1/012041>
- Zheng. "Finite element analysis on bearing capacity of post-grouting bored pile with the HS-small model and the HS model". *The International conference on civil and hydraulic engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/189/2/022087>
- Zhou, Z., Xu, F., Lei, J., Bai, Y., Chen, C., Xu, T., Liu, T. "Experimental study of the influence of different hole-forming methods on the bearing characteristics of post-grouting pile in Loess Areas". *Transportation Geotechnics*, 2021, 27, 100423. <http://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100423>
- Zhou, Z., Wang, K., Feng, H., Tian, Y., & Zhu, S. "Centrifugal model test of post-grouting pile group in loess area". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 151, 106985.
- shafts in cohesionless soils. *Acta Geotech*, 2014 9:439–454.
- <http://dx.doi.org/10.1007/s11440-013-0246-3>
- Thiyyakkandi, S. "Post-Grouted Deep Foundations: Individual and Group Responses". *Indian Geotechnical Journal*, 2024, 54(1), 301-314. <http://dx.doi.org/10.1007/s40098-023-00739-y>
- Tolooiyan, A., Gavin, K. "The base resistance of non-displacement piles in sand. Part II: finite-element analyses". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 2013, 166(6), 549-560. <https://doi.org/10.1680/geng.11.00101>
- Wan, Z., Liu, H., Zhou, F., & Dai, G. "Axial bearing mechanism of post-grouted piles in calcareous sand". *Applied Sciences*, 2022, 12(5), 2731. <https://doi.org/10.3390/app12052731>
- Wan, Z. H., Dai, G. L. Gong, W. M. "Study on the response of postside-grouted piles subjected to lateral loading in calcareous sand". *Acta Geotechnica*, 2022, 17(7), 3099-3115. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01392-6>
- Wan, Z. H. Qi, K. Hu, T., Guo, Z. L, Zhou, F. Dai, G. L. "Experimental study on the durability of cement-stabilized soil for post-grouted piles in calcareous sand under marine environment". *Marine Georesources & Geotechnology*, 2024, 1-18. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2024.2434055>
- Wang, W., Dai, G., Wei, J., Rahimi, A. Zhai, Q. (2023). Effect of Base Grouting on the Bearing Capacity of Bored Piles. *Sustainability*, 15(5), 4148. <https://doi.org/10.3390/su15054148>
- Wang, Z., Huang, L., Dai, G., Li, F., & Ma, T. "Experimental Study on Grouting Effect of Combined Post-Grouting Piles in Cohesive Soil". *Journal of Testing and Evaluation*, 2024, 52(1). <http://dx.doi.org/10.1520/JTE20230341>
- Wang, J., Jin, T., Qin, W., & Zhang, F. "Performance evaluation of post-grouting for bored piles installed in inhomogeneous gravel pebble stratum overlaid by deep and soft soil" layers. *Geomechanics and Geoengeering*, 2024, 19(1), 77-95. <https://doi.org/10.1080/17486025.2023.2181406>
- Woods, R. D. "Dynamic effects of pile installations on adjacent structures". *Washington. Washington, Transportation Research Board*, 1997, 11–18.
- Wu, Y., Deng, Y., Zhang, X., Zhao, C., & Zhao, C. "Modeling of Grout Returned Height for Postgrouting at Pile Tip Considering the Soil Unloading and Time-Dependent Behavior of Cement Viscosity Effects". *International Journal of Geomechanics*, 2023, 23(8), 04023127. <https://doi.org/10.1061/IJGNAL.GMENG-8438>
- Wu, Y., Zhang, X., Zhao, C., & Zhao, C. "Effects of soil unloading and grouting on the vertical bearing mechanism for compressive piles". *Ocean Engineering*, 2023, 271, 113754. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113754>
- Wu, Y., Deng, Y., Zhang, X., Liu, L., Zhao, C., & Zhang, J. "Grout Diffusion Mechanism along the Pile Shaft during the Process of Pile Tip Post-Grouting in Sand". *Applied Sciences*, 2023, 14(13), 5389. <https://doi.org/10.3390/app14135389>
- Xiang, B., Zhang, L. M., Zhou, L. R. He, Y. Y. Zhu, L. "Field lateral load tests on slope-stabilization grouted pipe pile groups". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, 141(4),