

Investigating the Behavior of Post Grouted Drilled Pile Near a Sandy Slope

Reza Mohammad Ali Nejad¹, Meysam Bayat^{2*}

1- Assistant professor, Department of Civil Engineering, ahvaz Branch, Islamic Azad University, ahvaz, Iran

2-Assistant professor, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

ABSTRACT

Pile foundations are extensively used to support buildings, bridges and transmission towers. In urban environments, due to the impossibility of using driven piles, drilled piles are usually used, which have a lower bearing capacity than driven piles. One of the common methods of increasing the bearing capacity of drilled piles is the use of high-pressure grout injection in the tip or side of the pile or the combination of the tip and the side pile. No research has been done on the behavior of post grouted piles in the near of the slope. In this research, with the help of finite element method and using PLAXIS3D software, the effect of sandy slope on the bearing capacity of post-grouted pile is investigated. In this research, post grouted piles with diameters of 0.8, 1, 1.2, 1.5, 2 and 2.5 meters and with the ratio of buried length to slope height of 0.67, 0.83, 1 and 1.17 in The vicinity of a slope with a height of 30 meters and a slope of 30 degrees was modeled in three dimensions, and the effect of various factors such as pile diameter, the ratio of the buried length to the height of the slope, and the percentage of soil density on the bearing capacity of the post grouted pile was investigated. The results showed that the increase in bearing capacity caused by post grouting in sandy soil with medium density is more than dense sandy soil. The results showed that with the increase of the diameter of the pile, the effect of post-grouting in increasing the bearing capacity increases, and this increase of the bearing capacity in the tip-side post grouted piles is more than the tip post grouted piles.

ARTICLE INFO

Receive Date: 23 October 2024

Revise Date: 30 December 2024

Accept Date: 20 January 2025

Keywords:

Post Grouted Pile
Bearing Capacity
Slope
Sand
Finite Element

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2025.484828.3551](https://doi.org/10.22065/jsce.2025.484828.3551)

*Corresponding author: Reza Mohammad Ali Nejad.

Email address: Reza@iaut.ac.ir

ظرفیت باربری شمع حفاری شده پس تزریق در مجاورت شیروانی ماسه‌ای

رضا محمدعلی نژاد^{۱*}، میثم بیات^۲

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

چکیده

از شمع به‌عنوان 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 یا جدار شمع و یا ترکیب نوک و جدار شمع می‌باشد. در خصوص رفتار شمع‌های 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 ضریب ظرفیت باربری شمع پس تزریق شده پرداخته می‌شود. در این تحقیق شمع پس تزریق شده با قطر ۰/۸، ۱، ۱/۲، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ متر و با نسبت طول مدفون به ارتفاع شیروانی ۰/۶۷، ۰/۸۳، ۱ و ۱/۱۷ در مجاورت شیروانی به ارتفاع ۳۰ متر و شیب ۳۰ درجه به صورت سه‌بعدی مدل گردید و اثر عوامل مختلفی همانند قطر شمع، نسبت طول مدفون به ارتفاع شیروانی بر روی ظرفیت باربری شمع پس تزریق شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش ظرفیت باربری ناشی از پس تزریق در خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط از خاک ماسه‌ای متراکم بیشتر است. نتایج نشان داد که اثر تزریق دوغاب سیمان در افزایش ظرفیت باربری شمع با افزایش قطر شمع بیشتر می‌شود و این افزایش ظرفیت باربری در شمع‌های پس تزریق شده در نوک و جدار از شمع‌های پس تزریق شده در نوک بیشتر می‌باشد.

کلمات کلیدی: شمع پس تزریق شده، ظرفیت باربری، شیروانی، ماسه، المان محدود

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/jsce.2025.484828.3551	۱۴۰۴/۰۲/۳۱	۱۴۰۳/۱۱/۰۱	۱۴۰۳/۱۱/۰۱	۱۴۰۳/۱۰/۱۰	۱۴۰۳/۰۸/۰۲
رضا محمدعلی نژاد Reza@iau.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

در حال حاضر، از 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 [۲۰۱]. اما ارتعاش و آلودگی صوتی ناشی از کوبش دینامیکی شمع، یک مانع مهم جهت استفاده از شمع کوبشی در محیط‌های شهری می‌باشد [۳-۶]. گزینه‌های دیگر اجرای شمع، استفاده از شمع‌های حفاری شده و مارپیچ می‌باشد که مشکلات اجرایی شمع کوبشی را ندارند [۸ و ۷]. ظرفیت باربری شمع‌های حفاری شده به دلیل نحوه اجرای آن‌ها نسبت به شمع‌های کوبشی و مارپیچ کمتر می‌باشد [۷].

ظرفیت باربری شمع از مجموع ظرفیت باربری نوک و جدار شمع به دست می‌آید. در شمع‌های حفاری شده جابجایی لازم جهت بسیج شدن ظرفیت باربری نهایی جدار شمع حدود ۱-۵٪ درصد قطر شمع و جابجایی لازم جهت بسیج شدن ظرفیت باربری نهایی نوک شمع حدود ۱۵-۱۰٪ درصد قطر شمع می‌باشد [۱۰ و ۹]. اکثر آیین‌نامه‌های مختلف برای تأمین شرایط سرویس پذیری سازه، میزان نشست مجاز شمع را به میزان ۵۰ میلی‌متر محدود می‌کنند [۱۱]. میزان نشست ۵۰ میلی‌متر در شمع‌های حفاری شده مرسوم از مقدار ۱۵-۱۰ درصد قطر شمع کمتر می‌باشد. این محدودیت نشست باعث می‌گردد تا ظرفیت باربری نهایی نوک شمع بسیج نگردد [۱۲]. علاوه بر این به دلیل عملیات حفاری، خاک کف چاه حفاری شده دچار دست‌خوردگی می‌گردد و همچنین به دلیل برخی روش‌های حفاری، رسوباتی در کف و یا جدار چاه حفاری شده ایجاد می‌گردد که باعث کاهش ظرفیت باربری شمع می‌شود [۱۳ و ۱۴].

محققین مختلفی به بررسی ظرفیت باربری شمع‌های حفاری شده و اثر عوامل مختلف بر روی ظرفیت باربری شمع‌های حفاری شده پرداختند [۲۰-۱۵]. هان و همکاران^۱ [۲۱] به کمک آنالیز عددی به بررسی ظرفیت باربری شمع‌های حفاری شده در ماسه پرداختند. نتایج بررسی‌های آنها نشان داد که با افزایش دانسیته نسبی خاک و افزایش تنش‌های محدود کننده در نوک شمع، ظرفیت باربری نوک شمع افزایش می‌یابد و ظرفیت باربری نوک شمع برای نسبت‌های طول به قطر شمع کوچکتر از ۵۰ به قطر شمع بستگی ندارد. ژانگ و همکاران^۲ [۲۲] به بررسی اثر زاویه اصطکاک خاک در حالت بحرانی و دانسیته نسبی بر روی ظرفیت باربری شمع در خاک ماسه‌ای پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد با افزایش زاویه اصطکاک خاک در حالت بحرانی، ظرفیت باربری شمع افزایش و نشست شمع کاهش می‌یابد و با افزایش دانسیته نسبی از ۱۵٪ به ۸۵٪، ظرفیت باربری شمع ۲ برابر می‌گردد. شلی و همکاران^۳ [۲۳] به کمک روش المان محدود ۳ 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 بررسی‌های شلی و همکاران نشان داد با افزایش نسبت طول به قطر شمع، نسبت مقاومت جدار به مقاومت نوک شمع کاهش می‌یابد. محمد علی نژاد و همکاران^۴ [۲۷-۲۴] 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 شمع منفرد مجاور شیروانی از ظرفیت باربری شمع منفرد مستقر بر روی زمین مسطح کمتر می‌باشد و شمع مجاور شیروانی دز اثر بارگذاری محوری به سمت شیروانی دوران می‌کند. همچنین نتایج بررسی آنها نشان داد که میزان تاثیر 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 شمع کاهش پیدا می‌کند.

یک روش متداول برای بهبود ظرفیت باربری شمع‌ها تزریق پرفشار دوغاب سیمان در خاک زیر نوک شمع می‌باشد که از دهه ۱۹۶۰ میلادی در آسیا و اروپا رواج پیدا کرد [۲۸-۳۰]. 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

¹ Han et al

² Zhang et al

³ Shalabi et al

⁴ Mohammad Ali Nejad et al

پس تزریق شده^۵ را می توان به ۳ دسته (۱) شمع پس تزریق شده در نوک (۲) شمع پس تزریق شده در جدار شمع و (۳) شمع پس تزریق شده در نوک و جدار شمع تقسیم بندی کرد [۳۱ و ۳۲]. ۴ مکانیسم باعث افزایش ظرفیت باربری شمع پس تزریق شده در نوک می گردد [۳۳] (۱) بهبود مقاومت جدار شمع ناشی از حرکت رو به بالای شمع و بسیج شدن مقاومت اصطکاکی منفی شمع (۲) بهبود مقاومت نوک شمع ناشی از بهبود خواص مقاومتی زیر نوک شمع (۳) بهبود مقاومت نوک شمع به دلیل پافیلی شدن نوک شمع (۴) بهبود مقاومت جدار شمع ناشی از حرکت رو به بالای دوغاب تزریق شده در امتداد جدار شمع. پس از اجرای پروسه تزریق پرفشار، علاوه بر افزایش ظرفیت باربری نوک و جدار شمع، مقاومت نوک شمع پس تزریق شده نسبت به شمع بدون پس تزریق شده در جابجایی قائم کمتری بسیج می گردد [۳۴].

اولین بار مؤسسه حمل و نقل فلوریدا در خصوص اثر تزریق دوغاب سیمان در نوک شمع بر روی کاهش جابجایی لازم جهت بسیج شدن ظرفیت باربری نوک شمع تحقیق نمودند. در دهه اخیر در خصوص ظرفیت باربری و میزان کاهش نشست شمع های پس تزریق شده مستقر بر روی زمین مسطح تحقیقات آزمایشگاهی و عددی و تحلیلی زیادی صورت گرفته است [۴۶-۳۵].

تیاک کندی و همکاران^۶ [۴۷] به کمک روش المان محدود به بررسی رفتار شمع پس تزریق شده در نوک و شمع بدون تزریق در خاک غیرچسبنده پرداختند. نتایج تحقیق آن ها نشان داد که منحنی بار-نشست شمع پس تزریق شده مشابه منحنی بارگذاری مجدد شمع بدون تزریق می باشد که در ابتدا تحت باری معادل فشار تزریق دوغاب سیمان قرار گرفته است. یوان و تونان^۷ [۴۸] به کمک روش المان محدود و به کمک نرم افزار PLAXIS، شمع پس تزریق شده در نوک در پل رودخانه برازو در آمریکا را مدل کردند. نتایج تحقیق آن ها نشان داد که مقاومت جدار و نوک شمع پس از اجرای پروسه پس تزریق دوغاب سیمان به ترتیب ۴۷٪ و ۲۵٪ افزایش یافت. سالم و همکاران^۸ [۴۹] به کمک روش المان محدود و نرم افزار PLAXIS3D به بررسی اثر پس تزریق دوغاب سیمان در نوک شمع بر روی ظرفیت باربری شمع پرداختند. نتایج تحقیق آن ها نشان داد که با افزایش قطر شمع و افزایش قطر حباب دوغاب سیمان تشکیل شده زیر نوک شمع، اثر پروسه پس تزریق دوغاب سیمان بر روی افزایش ظرفیت باربری شمع، بیشتر می گردد.

هو و همکاران^۹ [۵۰] نتایج ۷۰۸ آزمایش انجام شده بر روی شمع های پس تزریق شده را مورد بررسی قرار دادند و بر اساس نتایج آزمایش های بررسی شده، نمودارهایی برای محاسبه حجم دوغاب لازم برای تزریق دوغاب در نوک و تزریق دوغاب در جدار شمع و فشار تزریق دوغاب، برحسب قطر شمع و نوع خاک ارائه کردند. هانگ و همکاران^{۱۰} [۵۱] به بررسی میزان ارتفاع صعود دوغاب در امتداد جدار شمع در هنگام تزریق دوغاب در نوک شمع پرداختند. نتایج بررسی آن ها نشان داد که ارتفاع صعود دوغاب سیمان در امتداد جدار شمع با افزایش قطر شمع و افزایش فشار تزریق دوغاب سیمان، افزایش می یابد و ارتفاع صعود دوغاب سیمان در امتداد جدار شمع با افزایش طول مدفون شمع، کاهش می یابد. ژانگ و همکاران^{۱۱} [۵۲] به کمک آزمایش های مدل فیزیکی به بررسی رفتار شمع های فولادی پس تزریق شده با مقطع دایره ای شکل در خاک چسبنده پرداختند. نتایج تحقیق آن ها نشان داد که با افزایش حجم دوغاب سیمان تزریق شده، ظرفیت باربری شمع پس تزریق شده افزایش می یابد و شمع های پس تزریق شده در جدار نسبت به شمع های پس تزریق شده در نوک و پس تزریق شده در نوک و جدار، در زمینه کنترل نشست شمع عملکرد بهتری دارند. هو و همکاران^{۱۲} [۵۳] به کمک آزمایش های 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. آزمایش های آن ها بر روی شمع منفرد با قطر ۱/۵ و طول مدفون ۸۸ متر که نوک آن در خاک شنی مستقر بود، انجام گرفت. نتایج آزمایش ها نشان داد که با افزایش میزان دوغاب سیمان تزریقی از ۲۵۰ کیلوگرم به ۵۰۰ کیلوگرم، افزایش ظرفیت باربری شمع ناشی از پروسه پس تزریق از ۳۵٪ به ۴۱/۷٪ افزایش یافت و با توجه به حجم دوغاب تزریقی مدول الاستیسیته خاک شنی زیر نوک شمع تا ۲ برابر افزایش یافت. تیاک -

⁵ Post Grouted Drilled Pile

⁶ Thiyyakkandi et al

⁷ Youn and Tonon

⁸ Salem et al

⁹ Hu et al

¹⁰ Huang et al

¹¹ Zhang et al

¹² Hu et al

کندی^{۱۳} [۵۴] 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 ۳ برابر قطر شمع‌های بدون پس تزریق باشد، ضریب راندمان برابر با ۱ می‌گردد. سو و همکاران^{۱۴} [۵۵] 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 ۱/۲ متر و طول ۶۰ 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 ۵۰ تا ۶۰ درصدی مقاومت نوک و پروسه پس تزریق در جدار شمع باعث افزایش ۲۶ تا ۳۸ درصدی ظرفیت باربری جدار شمع می‌گردد. وانگ و همکاران^{۱۵} [۵۶] به بررسی نتایج ۲۳ آزمایش بارگذاری بر روی شمع‌های پس تزریق شده در نوک شمع اجرا شده در بزرگراه تانژای^{۱۶} در نانتونگ^{۱۷} چین پرداختند. طول مدفون شمع‌ها ۸۰-۵۷ متر و قطر شمع‌ها ۱/۸ متر بود. نتایج نشان داد که پروسه پس تزریق دوغاب سیمان در نوک شمع باعث افزایش ظرفیت باربری نهایی شمع در محدوده ۳۷/۴-۱۰/۴٪ و افزایش ظرفیت باربری نوک شمع در محدوده ۱۳۹-۸۹٪ شمع می‌گردد. لی و همکاران^{۱۸} [۵۷] 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 ۴۰٪ افزایش می‌دهد. لیو و همکاران^{۱۹} [۵۸] 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 ۲۵٪ افزایش می‌دهد.

مطالعات گسترده‌ای در خصوص ظرفیت باربری پی‌های سطحی مجاور شیروانی‌های مسلح شده با مسلح کننده‌های پلیمری همچون ژئوگرید انجام شده است [۵۹]. تاکنون تحقیقات کمی در خصوص تزریق دوغاب بر روی ظرفیت باربری انواع پی سطحی و عمیق مجاور شیروانی انجام گرفته است. عابدی و هاتف^{۲۰} [۶۰] 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 باعث افزایش ظرفیت باربری پی نواری مجاور شیروانی ماسه‌ای می‌گردد و عمق بهینه تزریق دوغاب، دوبرابر عرض پی نواری می‌باشد. ژانگ و همکاران^{۲۱} [۶۱] 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، ۱۴۰ میلی‌متر بوده که به روش حفاری شده اجرا گردید. قطر گمانه حفاری شده در این تحقیق ۱۸۰ 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 ژانگ و همکاران نشان داد که میزان جابجایی افقی گروه‌های شمع شامل ۳ ردیف شمع ۵۰٪- ۳۵٪ کمتر از جابجایی افقی گروه‌های شمع شامل ۲ ردیف شمع می‌باشد. وان و همکاران^{۲۲} [۶۲] 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 ۶ برابر قطر شمع، ظرفیت باربری گروه شمع افزایش می‌یابد و در فواصل بیشتر شمع‌ها از یکدیگر، ظرفیت باربری افقی گروه شمع کاهش می‌یابد.

از 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 شمع‌ها در مجاورت و یا بر روی شیروانی باعث کاهش ظرفیت باربری محوری شمع منفرد و

¹³ Thiyyakkandi

¹⁴ Su et al

¹⁵ Wang et al

¹⁶ Tongqi

¹⁷ Nantong

¹⁸ Li et al

¹⁹ Liu et al

²⁰ Abedi and Hataf

²¹ Xiang et al

²² Wan et al

گروه شمع می‌گردد. یکی از روش‌های افزایش ظرفیت باربری محوری شمع استفاده از پروسه پس تزریق دوغاب می‌باشد. در چند دهه اخیر در خصوص ظرفیت باربری شمع پس تزریق شده مستقر بر روی زمین مسطح تحقیقات زیادی شده است، ولی در خصوص اثر شیروانی بر روی رفتار شمع‌های پس تزریق شده در مجاورت شیروانی تاکنون تحقیقاتی صورت نپذیرفته است لذا بررسی اثر شیروانی بر روی رفتار شمع پس تزریق شده، حائز اهمیت می‌باشد.

در این تحقیق به کمک روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS3D به بررسی ظرفیت باربری 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 و تراکم خاک بر روی ظرفیت باربری و کاهش نشست شمع، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این تحقیق شمع با ۵ قطر مختلف و ۴ نسبت طول مدفون شمع به ارتفاع شیروانی در فاصله‌ای برابر با قطر شمع از رأس شیروانی ماسه‌ای متراکم و با تراکم متوسط مدل گردید.

۲- مدل عددی

در این تحقیق جهت مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار PLAXIS3D استفاده شده است [۴۹]. 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 [۶۵]. برای حالت‌ها و اندازه‌های مختلف هندسه مدل، آنالیز حساسیت برای تعیین ابعاد مدل و مش‌ها انجام داده شد. برای مدل‌سازی از شمع با قطر ۰/۸، ۱، ۱/۲، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ و نسبت طول مدفون شمع به ارتفاع شیروانی (L/H) ۰/۶۷، ۰/۸۳، ۱ و ۱/۱۷ (طول مدفون شمع‌ها به ترتیب ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ متر) در نظر گرفته شد. شیب شیروانی ۳۰ درجه و ارتفاع شیروانی ۳۰ متر در نظر گرفته شد. کلیه شمع‌ها در فاصله‌ای برابر با قطر شمع از رأس شیروانی مستقر گردیدند. هرکدام از شمع‌ها در ۳ حالت بدون پس تزریق، پس تزریق شده در نوک شمع و پس تزریق شده در نوک و سطح جانبی مدل گردیدند. خاک ماسه‌ای در دو حالت متراکم و با تراکم متوسط در نظر گرفته شد.

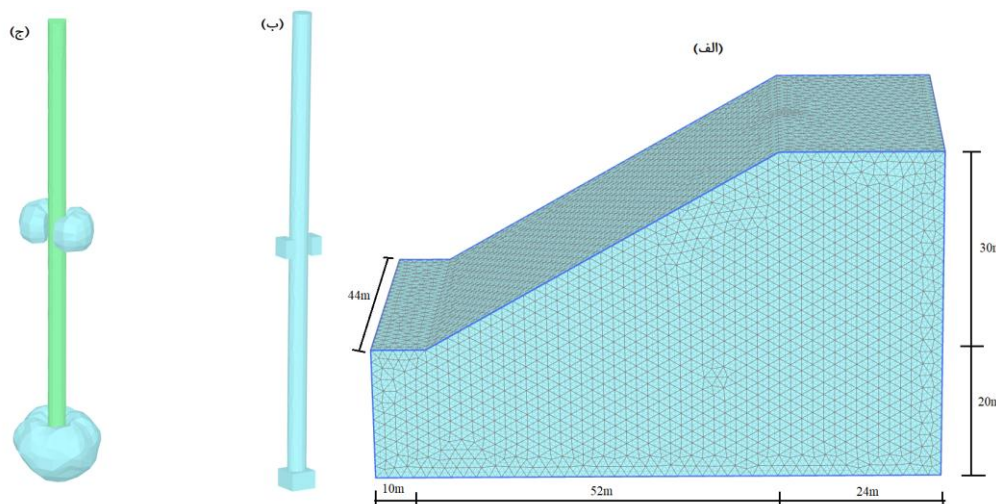
نسبت نشست شمع (نسبت نشست شمع به قطر شمع) جهت مقاصد عملی در محدوده ۰/۴-۰/۱ پیشنهاد می‌گردد [۴۹]. حد پایین این محدوده (۰/۱) توسط وسیک^{۲۳} [۶۳] برای تأمین معیار سرویس‌پذیری و حد بالای این محدوده (۰/۴) توسط کولهوی^{۲۴} [۶۴] جهت تعیین بار نهایی شمع پیشنهاد گردید. آیین‌نامه آشتو^{۲۵} [۱۱] حداکثر نشست پایه پل‌ها را به ۵۰ میلی‌متر محدود کرده است. در این تحقیق نیروی لازم برای نشست معادل ۰/۱، ۰/۴ و نشست ۵۰ میلی‌متر شمع اندازه‌گیری گردید.

خاک با استفاده از مدل رفتاری سخت شونده مدل گردید. در بخش اعتبار سنجی منحنی‌های بار-نشست حاصل از آزمایش بارگذاری شمع و نرم افزار PLAXIS3D برای توانایی مدل سخت شونده در شبیه‌سازی رفتار شمع، مقایسه گردید. نتایج آنالیز عددی انطباق خوبی با نتایج آزمایش بارگذاری شمع دارد. نتایج مقایسه نشان داد که مدل سخت شونده یک مدل مناسب برای شبیه‌سازی رفتار شمع پس تزریق می‌باشد. پارامترهای ورودی خاک برای مدل سخت شونده از تحقیقات سایر محققین که صحت این پارامترها برای مدل - سازی رفتار شمع بررسی شده بود انتخاب گردید. در مدل‌سازی عددی، شمع و حباب دوغاب به کمک مدل الاستیک خطی مدل گردیدند [۴۹-۴۷]. پارامترهای خاک و شمع و دوغاب در جدول ۱ ارائه شده است. شیروانی مدل شده برای شمع با قطر ۱ و طول مدفون ۲۰ متر، شمع و حباب گروت مدل شده در شکل ۱ 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 ۱ چسبندگی ماسه، صفر در نظر گرفته شده است اما برای جلوگیری از ناپایداری عددی در حین آنالیز مدل، مقدار چسبندگی کوچکی (۰/۳۴۵ کیلوپاسکال) برای خاک ماسه‌ای در نظر گرفته شد [۴۷ و ۴۹].

²³ Vesic

²⁴ Kulhawy

²⁵ AASHTO



شکل ۱: الف) مدل شبروانی سه بعدی برای شمع با قطر ۱ و طول مدفون ۲۰ متر ب) شمع و قسمتی از خاک زیر نوک و اطراف جدار شمع که تحت تأثیر تزریق دوغاب سیمان خواهند گرفت (قبل از اعمال انبساط حجمی جهت مدل کردن پروسه پس تزریق دوغاب سیمان) ج) شمع و حباب گروت تشکیل شده اطراف آن (پس از اعمال انبساط حجمی جهت مدل کردن پروسه پس تزریق دوغاب سیمان)

جدول ۱: مشخصات خاک و شمع و گروت استفاده شده در آنالیز عددی

پارامتر	واحد	ماسه متراکم [۲۲]	ماسه با تراکم متوسط [۶۶]	شمع [۳۵]	گروت [۳۵]
C چسبندگی خاک	کیلو نیوتن	۰	۰	-	-
γ وزن مخصوص	کیلونیوتن بر مترمکعب	۱۷	۱۶	۲۵	۲۰
(ϕ^0) زاویه اصطکاک خاک	درجه	۴۰/۸	۳۴	-	-
زاویه اتساع	درجه	۱۰/۸	۲/۵	-	-
μ ضریب پواسن	-	۰/۳	۰/۳	۰/۲	۰/۲
E_{50}^{ref} سختی سکانتی	مگاپاسکال	۵۰	۲۰	-	-
E_{ode}^{ref} سختی مماسی	مگاپاسکال	۵۰	۲۵	-	-
E_{ur}^{ref} سختی باربرداری	مگاپاسکال	۱۵۰	۱۲۰	-	-
m	-	۰/۶۲۵	۰/۵	-	-
n	-	۰/۵	۰/۶	-	-
E مدول الاستیسیته	مگاپاسکال	-	-	۳۰۰۰۰	۲۰۰۰۰

به منظور مدل سازی پروسه اجرای شمع و پس تزریق دوغاب سیمان مراحل زیر در نظر گرفته شد [۵۷]:

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

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

۳- بتن ریزی شمع: جهت مدل کردن بتن ریزی شمع، فشار هیدرواستاتیکی شعاعی در امتداد دیوار شمع به خاک اطراف وارد گردید. فشار هیدرو استاتیکی تا عمق بحرانی (۱۰ متر زیر سطح زمین) با شیب $22/5 \text{ KN/m}^2/\text{m}$ افزایش می یابد و در اعماق بزرگتر 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 ۲ غیرفعال می گردد.

۴- عمل آوری بتن: در این مرحله المان‌های شمع که در مراحل قبل غیرفعال شده بودند، فعال گردیدند و به این المان‌ها مشخصات بتن اختصاص داده می‌شود و فشار هیدرواستاتیکی اعمال شده مرحله قبل غیرفعال می‌گردد.

۵- 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. مدل‌سازی تزریق دوغاب به کمک اعمال کرنش حجمی مثبت در تمامی جهات در نرم‌افزار 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 بالای شمع می‌گردد. حرکت رو به بالای شمع موجب بسیج شده مقاومت اصطکاکی منفی در امتداد جدار شمع همانند شرایط واقعی می‌گردد. میزان انبساط حجمی اعمالی برای مدل‌سازی تزریق پرفشار دوغاب، وابسته به حجم دوغاب تزریقی و پوکی خاک می‌باشد. برای مدل‌سازی 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 می‌شود (شکل ۱-ب) سپس با توجه به مقدار نسبت پوکی خاک، حجم حفرات مکعب مستطیل خاک مدنظر در زیر نوک شمع (شکل ۱-ب) تعیین شده و با مقایسه حجم دوغاب تزریق شده، میزان کرنش حجمی مکعب مستطیل مشخص می‌گردد. برای مدل‌سازی تزریق دوغاب در جدار شمع حجم مکعب مستطیل از خاک که سطح مقطع آن برابر با $1/45$ برابر قطر شمع و ارتفاع $0/4$ متر باشد، در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱-ب) سپس با توجه به مقدار نسبت پوکی خاک، حجم حفرات مکعب مستطیل خاک مدنظر اطراف جدار شمع تعیین شده و با مقایسه حجم دوغاب تزریق شده، میزان کرنش حجمی مکعب مستطیل مشخص می‌گردد. جهت مدل‌سازی تزریق دوغاب در نرم‌افزار PLAXIS3D در فاز محاسبات در این مرحله، گزینه کرنش حجمی برای مکعب‌های ذکر شده در بالا فعال گردیده و مقدار کرنش حجمی مثبت مدنظر تعریف می‌گردد. با توجه به اینکه تزریق دوغاب در محدوده کرنش‌های بزرگ می‌باشد در مرحله مدل‌سازی دوغاب گزینه به‌روز رسانی مش فعال می‌گردد. آنالیز مش به‌روز شده در PLAXIS یک روش محاسباتی بر اساس فرمولاسیون لاگرانژی به‌روز شده برای در نظر گرفتن تغییر شکل‌های بزرگ می‌باشد. در این حالت نرم‌افزار، مش‌های مدل المان محدود و ماتریس سختی را در محاسبات به‌روز کرده و به ارزیابی مجدد تنش‌ها و کرنش‌های درون مش ادامه می‌دهد.

۶- عمل آوری دوغاب سیمان: در این مرحله مشخصات خاک بخش منبسط‌شده با مشخصات دوغاب سیمان جایگزین می‌گردد.

۷- بارگذاری شمع: در این مرحله جهت مدل کردن بارگذاری، بارمخوری بر روی شمع اعمال می‌گردد.

حجم گروت تزریق شده در هر آنالیز به کمک آیین‌نامه JGJ 106-2014 چین [۶۷] تعیین گردید و در جدول ۲ ارائه شده است [۶۸].

جدول ۲: حجم دوغاب سیمان نوک و جدار شمع برای قطرهای مختلف شمع

قطر شمع	حجم دوغاب سیمان نوک شمع (لیتر)	حجم دوغاب سیمان هر سمت شمع (لیتر)
۱	۱۲۰۰	۳۶۰
۱/۲	۱۴۴۰	۴۳۲
۱/۵	۱۸۰۰	۵۴۰
۲	۲۴۰۰	۷۲۰
۲/۵	۳۰۰۰	۹۰۰

۲-۱- اعتبار سنجی مدل

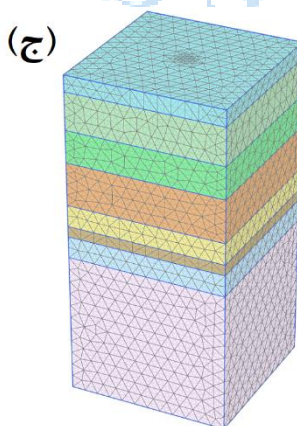
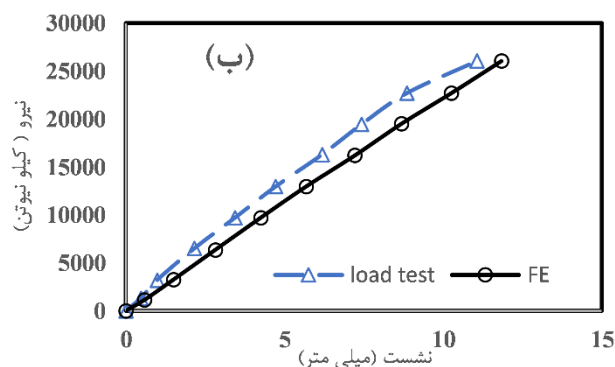
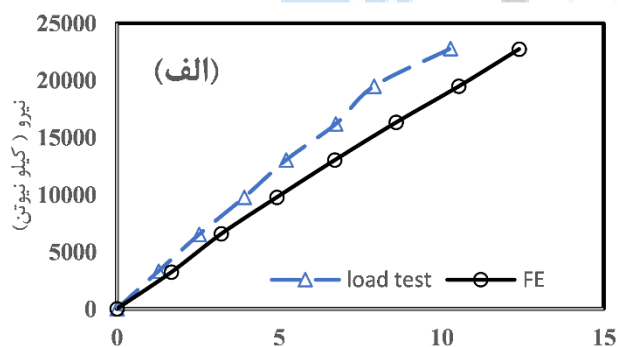
برای بررسی توانایی مدل‌سازی ۳ بعدی در نرم‌افزار PLAXIS3D جهت بررسی رفتار شمع پس تزریق شده، دو آزمایش انجام شده بر روی شمع بدون پس تزریق و شمع پس تزریق شده در نوک شمع یا قطر $1/2$ و طول 38 متر، واقع در پروژه برج 48 طبقه واقع در شهر قاهره مصر مدل گردید [۳۶] و نتایج مدل‌سازی با نتایج آزمایش شمع که به صورت نمودار بار-نشست می‌باشد، 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، شمع و حباب گروت در جدول ۳ و ۴ ارائه شده است.

جدول ۳: پارامترهای ورودی شمع و حباب گروت جهت مدل الاستیک خطی [۴۹]

حباب گروت	شمع	واحد	قطر شمع
۲۹۰۰۰	۲۲۰۰۰	مگاپاسکال	E مدول الاستیسیته
۲۲	۲۵	کیلونیوتن بر مترمکعب	γ وزن مخصوص
۰/۳	۰/۳	-	U ضریب پواسن
۰/۸	۰/۸	-	ضریب اینترفیس

جدول ۴: پارامترهای ورودی خاک جهت مدل سخت شونده [۴۹]

پارامتر	واحد	لایه ۱	لایه ۲	لایه ۳	لایه ۴	لایه ۵	لایه ۶	لایه ۷	لایه ۸
نوع خاک	-	ماسه	ماسه سنگ	ماسه همراه با شن	رس	ماسه	ماسه سنگ	ماسه	ماسه سنگ
ضخامت لایه	متر	۳	۷	۶	۸	۴	۲	۴	۱۶
γ_d وزن مخصوص خشک خاک	کیلونیوتن بر مترمکعب	۱۸	۱۹	۱۸	۱۶	۱۸	۱۹	۱۸	۱۹
γ_{sat} وزن مخصوص اشباع خاک	کیلونیوتن بر مترمکعب	۱۹	۲۰	۱۹	۱۸	۱۹	۲۰	۱۹	۲۰
E_{s0}^{ref} سختی سکانتی	مگاپاسکال	۷۵	۲۵۰۰	۱۲۰	۳۰	۱۲۰	۲۵۰۰	۱۲۰	۲۵۰۰
E_{ode}^{ref} سختی مماسی	مگاپاسکال	۷۵	۲۵۰۰	۱۲۰	۳۰	۱۲۰	۲۵۰۰	۱۲۰	۲۵۰۰
E_{ur}^{ref} سختی باربرداری	مگاپاسکال	۲۲۵	۷۵۰۰	۳۶۰	۱۵۰	۳۶۰	۷۵۰۰	۳۶۰	۷۵۰۰
m	-	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۱	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
C چسبندگی	کیلوپاسکال	۰	۲۰۰	۰	۲۰	۰	۲۰۰	۰	۲۰۰
ϕ زاویه اصطکاک خاک	درجه	۴۰	۲۰	۴۰	۲۸	۴۰	۲۰	۴۰	۲۰
ν زاویه اتساع	درجه	۱۰	-	۱۰	-	۱۰	-	۱۰	-
U ضریب پواسن	-	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳
ضریب اینترفیس	-	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸



شکل ۲: مقایسه نتایج آنالیز المان محدود و آزمایش شمع پس تزریق شده و بدون تزریق الف) مقایسه نتایج برای شمع بدون پس تزریق ب) مقایسه نتایج برای شمع پس تزریق شده ج) مدل استفاده شده در آنالیز عددی با ابعاد $30 \times 30 \times 60$ متر

نتایج به دست آمده از آنالیز المان محدود با نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده همخوانی مناسب نتایج می‌باشد و نشان‌دهنده توانایی روش المان محدود و مدل رفتاری سخت شونده در مدل‌سازی رفتار شمع پس تزریق شده می‌باشد.

۳- نتایج

۳-۱- مقایسه ظرفیت باربری شمع مجاور شیروانی و مستقر بر روی زمین مسطح

در این بخش 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 ۱٪ و ۴٪ و نشست ۵۰ میلی‌متر محاسبه گردید. عمق مدفون شمع‌ها ۲۰ متر و قطر شمع‌ها ۱ و ۲ متر در نظر گرفته شد. مقادیر میزان دوران شمع‌های مجاور شیروانی و ظرفیت باربری شمع‌های بدون پس تزریق و پس تزریق شده در نوک در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج حاصل از جدول ۵ نشان می‌دهد که پروسه پس تزریق دوغاب در نوک شمع به دلیل ایجاد حباب دوغاب پیرامون نوک شمع، باعث کاهش دوران شمع‌های مجاور شیروانی تحت بارهای اعمال شده می‌گردد. به دلیل اندازه بزرگ‌تر حباب دوغاب نوک شمع‌های مستقر در خاک متراکم نسبت به اندازه حباب دوغاب شمع‌های مستقر در خاک با تراکم متوسط، اثر پروسه پس تزریق بر روی میزان کاهش دوران در شمع مستقر در خاک ماسه‌ای متراکم بیشتر است. میزان کاهش دوران شمع مجاور شیروانی ناشی از پروسه تزریق در شمع‌های با قطر ۱ متر در خاک‌های با تراکم متوسط و متراکم در نسبت نشست ۱٪ به ترتیب ۵۱٪ و ۵۴٪ و در نسبت نشست ۴٪ به ترتیب ۱۶٪ و ۳۲٪ و در نشست ۵۰ میلی‌متر به ترتیب ۱۱٪ و ۲۸٪ می‌باشد. میزان کاهش دوران ناشی از پروسه پس تزریق در شمع با قطر ۲ متر از شمع با قطر ۱ متر بیشتر می‌باشد. میزان کاهش دوران شمع مجاور شیروانی ناشی از پروسه تزریق در شمع‌های با قطر ۱ و ۲ متر در خاک‌های متراکم در نسبت نشست ۱٪ به ترتیب ۵۴٪ و ۶۲٪ و در نسبت نشست ۴٪ به ترتیب ۳۲٪ و ۴۰٪ و در نشست ۵۰ میلی‌متر به ترتیب ۲۸٪ و ۵۱٪ می‌باشد. برای بیان میزان افزایش ظرفیت باربری شمع ناشی از پروسه پس تزریق از ضریب نسبت بهبود، IR، (نسبت ظرفیت باربری شمع پس تزریق شده به ظرفیت باربری شمع بدون تزریق) استفاده می‌گردد. نتایج نشان داد که ضریب IR شمع‌های پس تزریق شده مجاور شیروانی از ضریب IR شمع‌های مستقر بر زمین مسطح بیشتر می‌باشد. پروسه پس تزریق در شمع‌های مجاور شیروانی علاوه بر ۴ مکانیسم افزایش ظرفیت باربری شمع پس تزریق شده، باعث کاهش میزان دوران شمع‌های مجاور شیروانی می‌گردد که این امر باعث افزایش تاثیر پروسه پس تزریق بر روی افزایش ظرفیت باربری شمع‌های پس تزریق شده مجاور شیروانی می‌گردد. با افزایش قطر شمع از ۱ به ۲ متر، تاثیر شیروانی بر افزایش ضریب IR بیشتر گردید. میزان افزایش ضریب IR برای شمع با قطر ۱ و ۲ متر در مجاورت شیروانی ماسه‌ای با تراکم متوسط نسبت به ضریب IR شمع‌های مستقر در زمین مسطح، در نسبت نشست ۱٪ به ترتیب ۳٪ و ۸٪ و در نسبت نشست ۴٪ به ترتیب ۸٪ و ۱۹٪ و در نشست ۵۰ میلی‌متر به ترتیب ۱۰٪ و ۱۳٪ می‌باشد. نتایج حاصل از جدول ۵ نشان داد که به دلیل کاهش فشار محدود کننده وارد بر شمع‌ها در مجاورت شیروانی نسبت به حالت زمین مسطح، ظرفیت باربری شمع‌های مستقر در مجاورت شیروانی از ظرفیت باربری شمع‌های مستقر بر روی زمین مسطح، کمتر می‌باشد. در شمع‌های مجاور شیروانی به دلیل تاثیر بیشتر پروسه پس تزریق بر روی کاهش میزان دوران شمع با قطر ۲ متر نسبت به شمع با قطر ۱ متر، با افزایش قطر شمع از ۱ به ۲ متر، ضریب IR افزایش می‌یابد. افزایش ضریب IR در شمع‌های با قطر ۱ و ۲ متر در مجاورت شیروانی ماسه‌ای با تراکم متوسط به ترتیب در محدوده ۱۰٪-۳٪ و ۱۲٪-۸٪ و برای شیروانی ماسه‌ای متراکم به ترتیب در محدوده ۵٪-۲٪ و ۱۱٪-۴٪ قرار دارد. برای بیان میزان کاهش ظرفیت باربری شمع مجاور شیروانی نسبت به ظرفیت باربری شمع مستقر بر روی زمین مسطح، از ضریب کاهش ظرفیت باربری، IF، (نسبت ظرفیت باربری شمع مجاور شیروانی نسبت به ظرفیت باربری شمع مستقر بر روی زمین مسطح) استفاده می‌گردد. به دلیل اثر پروسه پس تزریق نوک شمع در کاهش دوران شمع مجاور شیروانی، ضریب IF شمع‌های پس تزریق شده از شمع‌های بدون تزریق بیشتر می‌باشد.

جدول ۵: مقایسه ظرفیت ظرفیت باربری شمع بدون پس تزریق و پس تزریق شده در نوک در مجاور شیروانی و زمین مسطح و میزان دوران شمع مجاور شیروانی

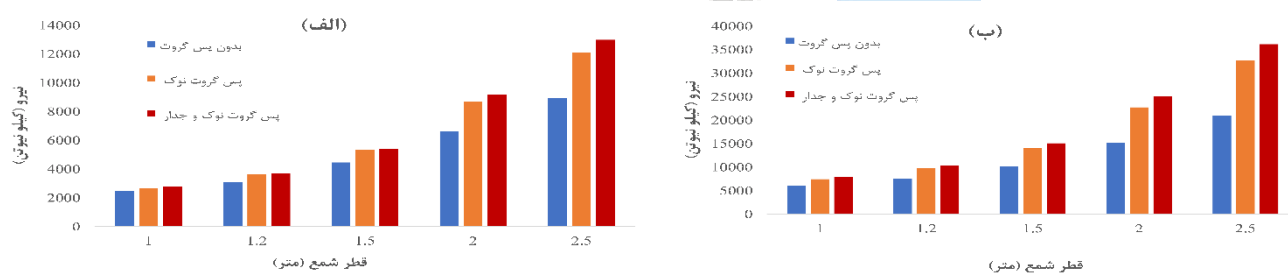
قطر شمع (متر)	نشست	تراکم	مجاور شیروانی						زمین مسطح					
			ظرفیت باربری (کیلو نیوتن)			ظرفیت باربری			بدون پس تزریق		پس تزریق		درصد کاهش	
			IF	پس تزریق نوک	بدون پس تزریق	IR	پس تزریق نوک	بدون پس تزریق	پس تزریق نوک	بدون پس تزریق	پس تزریق نوک			
دوران بر حسب درصد ($\times 10^{-3}$)	بدون پس تزریق	پس تزریق نوک	بدون پس تزریق	پس تزریق نوک	بدون پس تزریق	پس تزریق نوک	بدون پس تزریق	پس تزریق نوک	بدون پس تزریق	پس تزریق نوک	درصد			
۱	۱٪	متوسط	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۲	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۵۱٪	
		متراکم	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۵۴٪	
	۴٪	متوسط	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۷۴	۰/۷۴	۰/۷۴	۰/۷۴	۰/۷۴	۰/۷۴	۰/۷۴	۰/۷۴	۱۶٪	
		متراکم	۰/۸۳	۰/۸۳	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۷۹	۳۲٪	
	۵۰ میلیمتر	متوسط	۰/۷۸	۰/۷۸	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۷۱	۱۱٪	
		متراکم	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۷۶	۲۸٪	
	۲	۱٪	متوسط	۰/۸۲	۰/۸۲	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۷۶	۵۶٪
			متراکم	۰/۸۶	۰/۸۶	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۸۰	۶۲٪
		۴٪	متوسط	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۶۳	۱۶٪
			متراکم	۰/۷۸	۰/۷۸	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۷۱	۴۰٪
		۵۰ میلیمتر	متوسط	۰/۷۷	۰/۷۷	۰/۶۸	۰/۶۸	۰/۶۸	۰/۶۸	۰/۶۸	۰/۶۸	۰/۶۸	۰/۶۸	۴۱٪
			متراکم	۰/۸	۰/۸	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۵۱٪

۳-۲- اثر قطر شمع

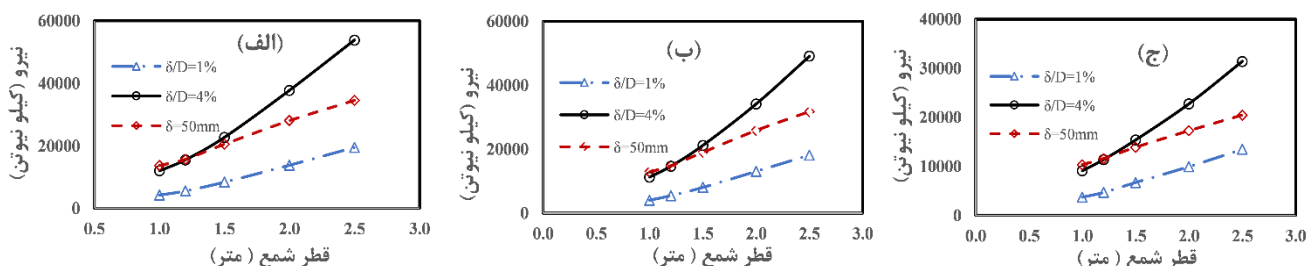
در این بخش تأثیر قطر شمع بر روی ظرفیت باربری شمع پس تزریق شده مورد بررسی قرار گرفت. شمع‌ها با قطر ۱، ۱/۲، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ متر در فاصله‌ای برابر با قطر شمع از رأس شیروانی ماسه‌ای متراکم مدل گردیدند. ارتفاع شیب ۳۰ متر و زاویه شیروانی ۳۰ درجه در نظر گرفته شد. شمع‌ها با طول مدفون ۲۰ متر و نسبت طول مدفون به ارتفاع شیروانی ۰/۶۷، در ۳ حالت بدون پس تزریق، پس تزریق شده در نوک و پس تزریق شده در نوک و جدار، مدل گردیدند. پس تزریق جدار در عمق ۱۰ متری از سطح زمین مدل گردید. در شکل ۳ ظرفیت باربری شمع‌های بدون تزریق و شمع‌های پس تزریق شده در نوک و پس تزریق در نوک و جدار در نسبت نشست ۱٪ و ۴٪ نشان داده شده است. نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد که در تمامی قطرهای شمع، ظرفیت باربری شمع پس تزریق در نوک و جدار از ظرفیت باربری شمع

پس تزریق در نوک بیشتر می‌باشد. دلیل امر بسیج شدن مقاومت نوک (qb) در محل حباب دوغاب تشکیل شده در اطراف بدنه شمع می‌باشد. بنابراین در شمع پس تزریق در نوک و جدار ظرفیت باربری شمع از مجموع ظرفیت باربری اصطکاکی جدار شمع، ظرفیت باربری نوک شمع و ظرفیت باربری حباب دوغاب اطراف جدار شمع بدست می‌آید.

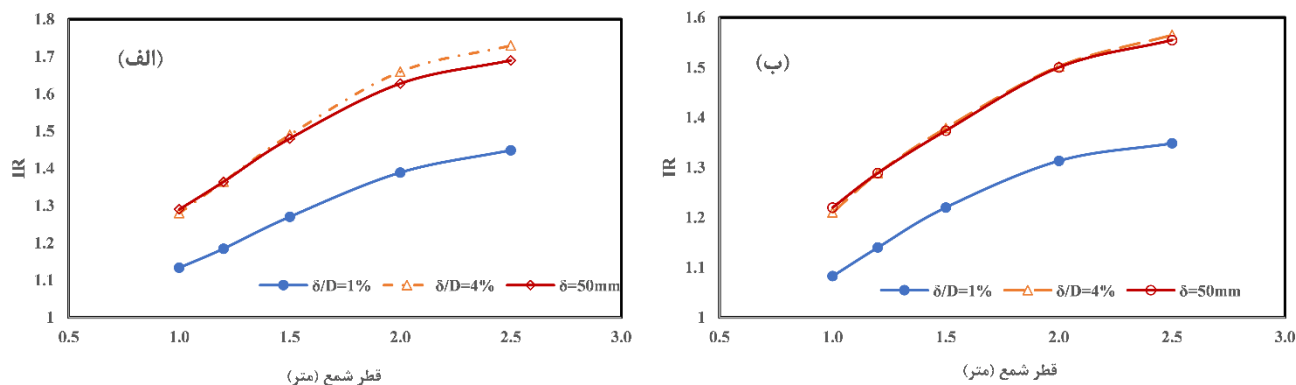
در شکل ۴ تغییرات ظرفیت باربری با افزایش قطر شمع در نسبت‌های نشست ۱٪ و ۴٪ و نشست ۵۰ میلی‌متر را برای شمع‌های بدون پس تزریق و شمع‌های تزریق شده در نوک و پس تزریق شده در نوک و جدار نشان داده شده است. نتایج بدست آمده از شکل ۴ نشان می‌دهد که شیب منحنی افزایش ظرفیت باربری در شمع‌های پس تزریق شده از شیب منحنی‌های شمع بدون پس تزریق بیشتر می‌باشد. این مطلب بیانگر افزایش ضریب IR با افزایش قطر شمع می‌باشد. برای درک بهتر این مطلب در شکل ۵ تغییرات ضریب IR برای شمع‌های پس تزریق شده در نوک و پس تزریق شده در نوک و جدار، در نسبت‌های نشست ۱٪ و ۴٪ و نشست ۵۰ میلی‌متر ارائه شده است. نتایج شکل ۵ نشان داد که ضریب IR، با افزایش قطر شمع بیشتر می‌شود. این امر به دلیل افزایش فشار دوغاب تزریقی با افزایش قطر شمع و در نتیجه افزایش پیش فشردگی خاک زیر نوک شمع می‌باشد. همچنین با افزایش قطر شمع اثر پروسه پس تزریق در کاهش دوران شمع بیشتر می‌گردد. در همه قطرهای شمع، با افزایش نسبت نشست از ۱ به ۴ درصد، میزان افزایش ضریب IR، بیشتر گردید. دلیل این امر پافیلی شدن نوک شمع در اثر پروسه پس تزریق دوغاب سیمان و افزایش ظرفیت باربری نوک شمع پافیلی، با افزایش نسبت نشست می‌باشد. در نسبت نشست ۱٪ با افزایش قطر شمع از ۱ به ۲/۵ متر، ضریب IR شمع پس تزریق شده نوک و پس تزریق شده نوک و جدار به ترتیب از ۱/۰۸ و ۱/۱۳ به ۱/۳۵ و ۱/۴۵ افزایش یافت. در نسبت نشست ۴٪ با افزایش قطر شمع از ۱ به ۲/۵ متر، ضریب IR شمع پس تزریق شده نوک و پس تزریق شده نوک و جدار به ترتیب از ۱/۲۴ و ۱/۳۲ به ۱/۵۷ و ۱/۷۳ افزایش یافت. نتایج حاصل از شکل ۴ نشان داد که در نسبت نشست ۴٪ و نشست ۵۰ میلی‌متر، میزان افزایش ظرفیت باربری شمع ناشی از افزایش قطر شمع در شمع‌های پس تزریق شده از شمع‌های بدون پس تزریق، بیشتر می‌شود. در نسبت نشست ۴٪ با افزایش قطر شمع از ۱ به ۲/۵ متر، میزان افزایش ظرفیت باربری شمع بدون پس تزریق، پس تزریق شده نوک و پس تزریق شده نوک و جدار به ترتیب ۳/۴۶، ۴/۳۷ و ۴/۵۲ برابر گردید و در نسبت ۵۰ میلی‌متر، با افزایش قطر شمع از ۱ به ۲/۵ متر، میزان افزایش ظرفیت باربری شمع بدون پس تزریق، پس تزریق شده نوک و پس تزریق شده نوک و جدار به ترتیب از ۱/۹۶، ۲/۴۶ و ۲/۵۲ برابر گردید.



شکل ۳: ظرفیت باربری شمع در قطرهای مختلف برای نسبت‌های نشست ۱٪ و ۴٪ (الف) نسبت نشست ۱٪ (ب) نسبت نشست ۴٪



شکل ۴: تغییرات ظرفیت باربری شمع برای نسبت نشست‌های ۱٪، ۴٪ و نشست ۵۰ میلی‌متر (الف) پس تزریق در نوک و (ب) بدون پس تزریق



شکل ۵: تغییرات ضریب IR با قطر شمع برای نسبت نشست‌های ۱٪، ۴٪ و نشست ۵۰ میلی‌متر (الف) شمع پس تزریق در نوک و (ب) شمع پس تزریق در نوک

مقایسه نتایج شکل‌های ۴-ب و ۴-ج نشان داد که ظرفیت باربری شمع بدون تزریق در نسبت نشست ۴٪ با ظرفیت باربری شمع پس تزریق شده در نوک با یک سایز قطر کوچک‌تر برابر می‌باشد که در نتیجه پروسه پس تزریق در نوک شمع باعث کاهش قطر شمع می‌گردد. ظرفیت باربری شمع بدون تزریق با قطر ۲/۵ متر و شمع پس تزریق شده در نوک با قطر ۲ متر در نسبت نشست ۴٪ به ترتیب ۳۱۳۹۵ و ۳۵۳۰۵ کیلو نیوتن می‌باشد. این نتایج با نتایج به دست آمده از سالم و همکاران^{۲۶} [۴۹] مطابقت دارد.

با توجه به اینکه پروسه پس تزریق در نوک شمع باعث افزایش ظرفیت باربری نوک شمع می‌گردد از ضریب افزایش ظرفیت باربری نوک λ_p (نسبت ظرفیت باربری نوک شمع پس تزریق شده در نوک به ظرفیت باربری نوک شمع بدون پس تزریق) برای بیان میزان افزایش ظرفیت باربری نوک شمع پس تزریق استفاده می‌گردد. مقادیر λ_p برای شمع‌های پس تزریق در نوک برای نسبت نشست ۴٪ در جدول ۶ ارائه شده است. مقدار λ_p در محدوده ۳/۶۵-۳/۱۴ قرار دارد. آیین‌نامه طراحی پی شمعی چین [۶۹] برای شمع‌های مستقر بر روی زمین ماسه‌ای سطح، مقدار λ_p را در محدوده ۳-۳/۵ پیشنهاد می‌کند. پروسه پس تزریق در شمع‌های مجاور شیروانی علاوه بر مکانیسم ۴ گانه افزایش ظرفیت باربری شمع پس تزریق، باعث کاهش دوران شمع مجاور شیروانی می‌گردد و این امر باعث تاثیر بیشتر پروسه تزریق دوغاب بر روی ظرفیت باربری نوک شمع پس تزریق شده در مجاور شیروانی نسبت به شمع مستقر بر روی زمین مسطح می‌شود. نحوه تغییرات λ_p برای قطرهای مختلف شمع در نسبت نشست ۱٪ و ۴٪ و نشست ۵۰ میلی‌متر در شکل ۶ ارائه شده است. نتایج شکل ۶ نشان داد که λ_p با افزایش قطر شمع تا ۱/۵ متر افزایش یافته و برای شمع با قطرهای ۲ و ۲/۵ متر کاهش می‌یابد که نشان دهنده کاهش اثر پس تزریق دوغاب بر روی شمع‌ها با قطر زیاد می‌باشد. اثر پروسه تزریق دوغاب سیمان بر روی ظرفیت باربری نوک شمع با افزایش مقاومت جدار بسیج شده در حالت دوغاب افزایش می‌یابد. با افزایش مقاومت جدار بسیج شده در حالت بدون تزریق دوغاب، فشار دوغاب مورد نیاز برای غلبه بر مقاومت اصطکاکی جدار جهت حرکت رو به بالای شمع افزایش یافته و در نتیجه پیش فشردگی خاک زیر نوک شمع بیشتر می‌گردد و ظرفیت باربری نوک شمع پس تزریق افزایش می‌یابد [۱۰]. مقاومت جدار شمع‌های بدون تزریق مجاور شیروانی در نسبت نشست ۴٪ برای قطرهای ۱، ۱/۲، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ به ترتیب ۱۲۵، ۱۳۵، ۱۴۴، ۱۴۱ و ۱۳۸ کیلو پاسکال می‌باشد. کاهش ظرفیت باربری بسیج شده جدار برای شمع‌های با قطر ۲ و ۲/۵ متر باعث کاهش λ_p گردید. نتایج بدست آمده از شکل ۶ نشان داد با افزایش میزان نشست شمع‌ها، مقدار λ_p افزایش یافت. افزایش λ_p با افزایش میزان نشست با نتایج تحقیق مولینز و وینتر^{۲۷} [۱۰] برای شمع‌های مستقر بر روی زمین مسطح همخوانی دارد. در روش TCP ارائه شده توسط مولینز و وینتر [۱۰] برای محاسبه ظرفیت باربری نوک شمع پس تزریق شده

²⁶ Salem et al

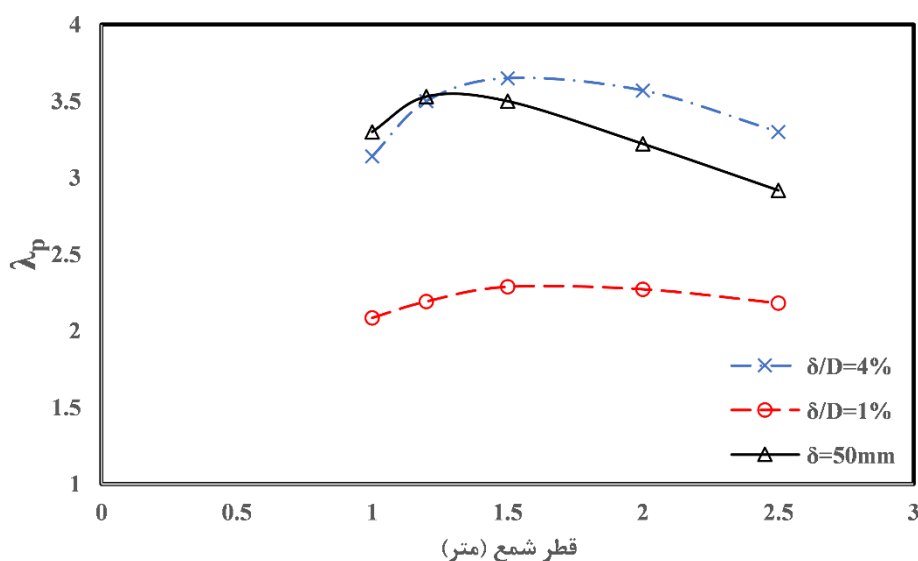
²⁷ Mullins and Winters

در خاک غیرچسبیده، ظرفیت باربری نوک شمع پس تزریق شده از حاصل ضرب ضریب ظرفیت باربری نوک (TCP) در ظرفیت باربری نوک شمع بدون پس تزریق به دست می‌آید. ضریب TCP به نسبت نشست شمع و شاخص فشار دوغاب بستگی دارد. با استفاده نمودارهای ارائه شده توسط مولینز و وینتر [۱۰] برای محاسبه TCP، مقدار ضریب TCP برای شمع‌های مدل شده در این قسمت، برای نسبت‌های نشست ۱٪ و ۴٪ به ترتیب ۲/۱۴ و ۳/۳۶ به دست می‌آید. مقادیر ضریب λ_p شمع‌های مدل شده، در نسبت‌های نشست ۱٪ و ۴٪ به ترتیب حداکثر ۷٪ و ۸٪ با مقدار ضریب TCP محاسباتی اختلاف دارند.

در شکل ۷، مقاومت جدار شمع برای شمع بدون تزریق و پس تزریق شده در نوک در نشست ۴٪ ارائه شده است. نتایج بدست آمده از شکل ۷ نشان داد که مقاومت جدار شمع پس تزریق شده در نوک از مقاومت جدار شمع بدون تزریق نشده، کمتر است و نسبت مقاومت جدار شمع پس تزریق در نوک به مقاومت جدار شمع بدون پس تزریق ($Q_{s-grout}/Q_s$) در محدوده ۰/۹۴-۰/۸۵ می‌باشد. تیاک-کندی و همکاران^{۲۸} [۳۴] نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی شمع پس تزریق شده در نوک با مقیاس واقعی توسط سایر محققین را بررسی نمودند و مشاهده نمودند که نسبت $Q_{s-grout}/Q_s$ در شمع‌های مورد آزمایش در محدوده ۱/۱۲-۰/۸۵ می‌باشد. نسبت $Q_{s-grout}/Q_s$ شمع‌های مدل شده در محدوده بیان شده توسط تیاک-کندی و همکاران [۴۷] می‌باشد.

جدول ۶: ظرفیت باربری نوک شمع بدون پس تزریق و شمع پس تزریق شده در نوک شمع در نسبت نشست ۴٪ (برحسب کیلونیوتن)

	۱	۱/۲	۱/۵	۲	۲/۵
شمع بدون تزریق	۱۱۲۵	۱۷۲۲	۲۸۲۸	۵۲۶۸	۸۹۶۰
شمع پس تزریق شده در نوک	۳۷۵۰	۶۰۵۴	۱۰۴۷۶	۱۸۸۰۷	۲۹۷۲۷
λ_p	۳/۱۴	۳/۵	۳/۶۵	۳/۵۷	۳/۳۱

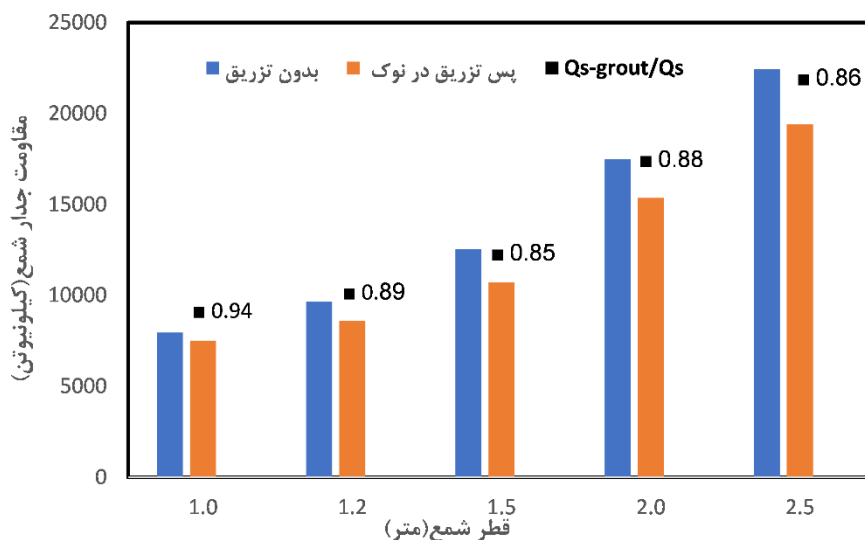


شکل ۶: تغییرات ظرفیت باربری نوک شمع‌های و مقادیر λ_p برای شمع با قطرهای مختلف در نسبت‌های نشست ۱٪ و ۴٪ و نشست ۵۰ میلی‌متر

با توجه به اینکه یکی از اهداف استفاده از روش پس تزریق در شمع‌ها، دست‌یابی به ظرفیت باربری شمع بدون پس تزریق در نسبت نشست کمتر می‌باشد. در این قسمت میزان نسبت نشست لازم برای شمع‌های تزریق شده در نوک و ترکیب نوک و جدار جهت دست‌یابی به ظرفیت باربری شمع بدون تزریق در نسبت نشست ۴٪ بررسی گردید. میزان نسبت نشست لازم شمع پس تزریق شده جهت دست‌یابی به ظرفیت باربری شمع بدون تزریق و میزان درصد کاهش نشست بدست آمده، در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج نشان حاصل شده از جدول ۷ نشان داد که پس تزریق در نوک شمع باعث کاهش ۵۰٪-۳۰٪ در نسبت نشست گردید. میزان کاهش نسبت نشست در اثر

²⁸ Tiyyakkandi et al

پس تزریق در نوک شمع با نتایج به دست آمده از تحقیقات پیکیونا و همکاران ۲۹ [۷۰] که میزان کاهش نشست شمع ناشی از پروسه پس تزریق نوک شمع در خاک ماسه‌ای را ۱۰۰٪-۳۰٪ و فو و ژو [۷۱] میزان کاهش نشست شمع ناشی از پس تزریق نوک شمع در خاک ماسه‌ای را ۶۰٪-۲۵٪ را برآورد کردند، همخوانی دارد.



شکل ۷: تغییرات ظرفیت باربری جدار شمع‌های و مقادیر Qs-grout/Qs برای شمع با قطرهای مختلف در نسبت نشست ۴٪

نتایج حاصل شده از جدول ۷ نشان داد که پس تزریق در نوک و جدار شمع باعث کاهش ۳۵٪-۵۷٪ در نسبت نشست گردید که با نتایج تحقیقات وان و همکاران ۳۱ [۷۲] که میزان کاهش نسبت نشست در اثر پس تزریق در نوک و جدار شمع در خاک ماسه‌ای را در محدوده ۴۰ تا ۱۱۲ درصد برآورد نمودند، همخوانی دارد. ژو و همکاران ۳۲ [۷۳] رابطه زیر را برای برآورد میزان نشست شمع پس تزریق شده مستقر بر خاک متشکل از ۱ لایه ارائه نمودند:

$$s = \psi \frac{\sigma_z l}{E_s} + \xi \frac{Ql}{EA_p} \quad (1)$$

Q، l، E و Ap به ترتیب بار محوری شمع، طول شمع، مدول الاستیسیته و سطح مقطع شمع می‌باشد. E_s و σ_z به ترتیب مدول الاستیسیته خاک بهبود یافته زیر نوک شمع و تنش قائم خاک (بر اساس روش مین‌لین-گد^{۳۳}) می‌باشد. ξ و ψ به ترتیب ضریب فشردگی الاستیک و ضریب تجربی نشست می‌باشد. ضریب فشردگی الاستیک (ξ) به نسبت مقاومت جدار در نوک به مقاومت جدار در بالای شمع و همچنین به نسبت مقاومت نوک به ظرفیت باربری شمع بستگی دارد. ضریب تجربی نشست به نسبت شعاع شمع به طول شمع بستگی دارد و با افزایش قطر شمع این ضرایب بزرگتر می‌شوند. دلیل کوچکتر شدن درصد کاهش نشست با افزایش قطر شمع، افزایش مقدار ضرایب ξ و ψ با افزایش قطر می‌باشد.

شکل ۸ کانتورهای جابجایی برای شمع با قطرهای ۱ و ۲/۵ متر و برای سه حالت بدون پس تزریق، تزریق شده در نوک و تزریق شده در نوک و جدار نشان می‌دهد. نتایج شکل ۸ نشان می‌دهد که محدوده تحت تاثیر بارگذاری در بالای شمع بزرگتر می‌باشد و این محدوده در به سمت نوک شمع کاهش می‌یابد و عرض محدوده تحت تاثیر در شمع پس تزریق شده از شمع بدون پس تزریق بزرگتر می‌-

²⁹ Piccione

³⁰ Fu and Zhou

³¹ Wan et al

³² Zhou et al

³³ Mindlin-Geddes

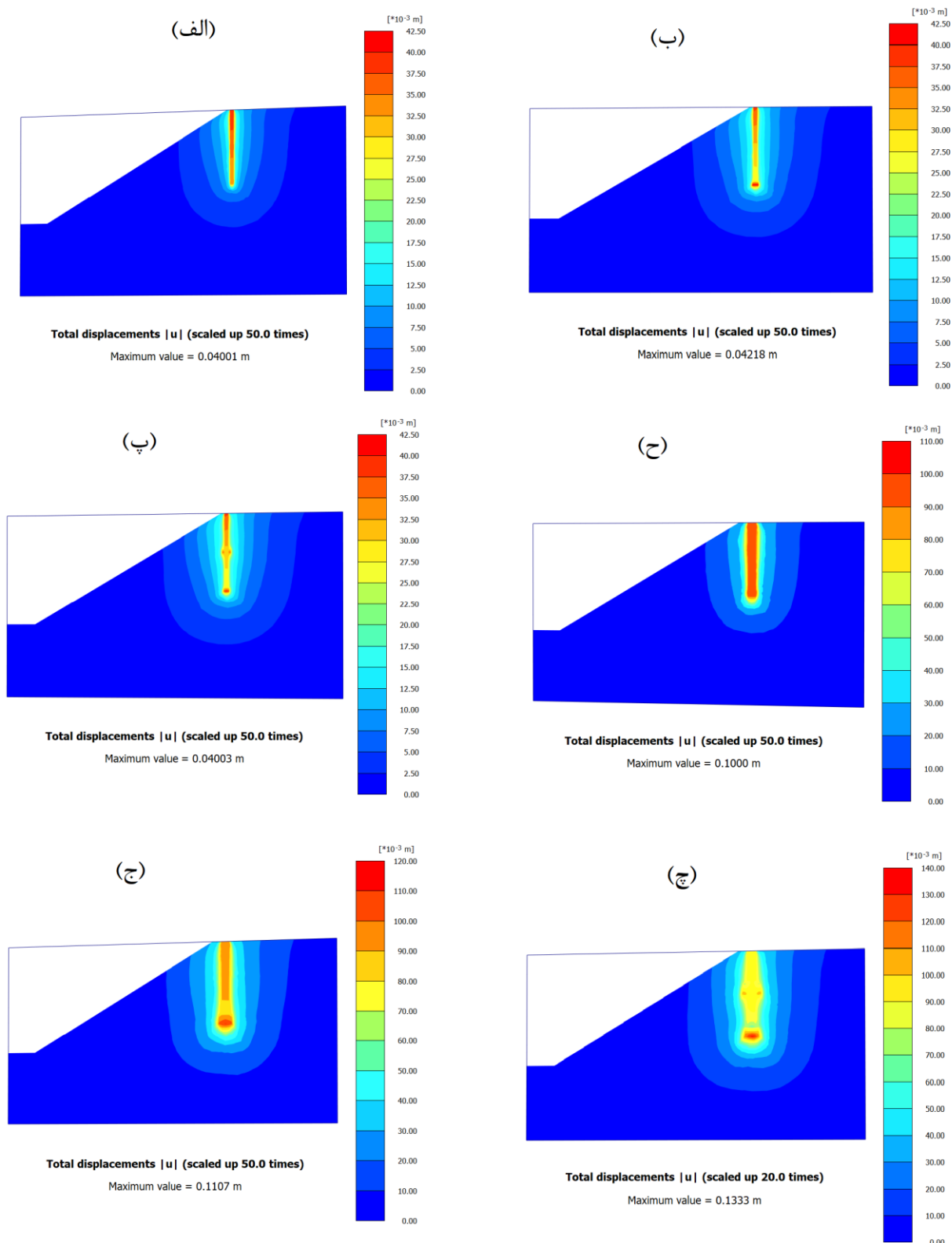
باشد. عرض محدوده تحت تاثیر با افزایش قطر شمع بزرگتر می شود. ناحیه تحت تاثیر نوک شمع در شمع های پس تزریق شده نسبت شمع بدون تزریق بزرگتر می باشد. میزان جابجایی نشان داده در شکل ۸، مجموع نشست مرحله مدل کردن تزریق دوغاب سیمان و اعمال بار تا نشست ۰.۴٪ می باشد و همانطور که در شکل ۸ مشاهده می گردد، میزان نشست در زیر نوک شمع پس تزریق شده به دلیل اعمال پیش تنش ناشی از تزریق دوغاب از نسبت نشست ۰.۴٪ بیشتر می باشد.

جدول ۷: میزان کاهش نشست ناشی از پس تزریق دوغاب سیمان

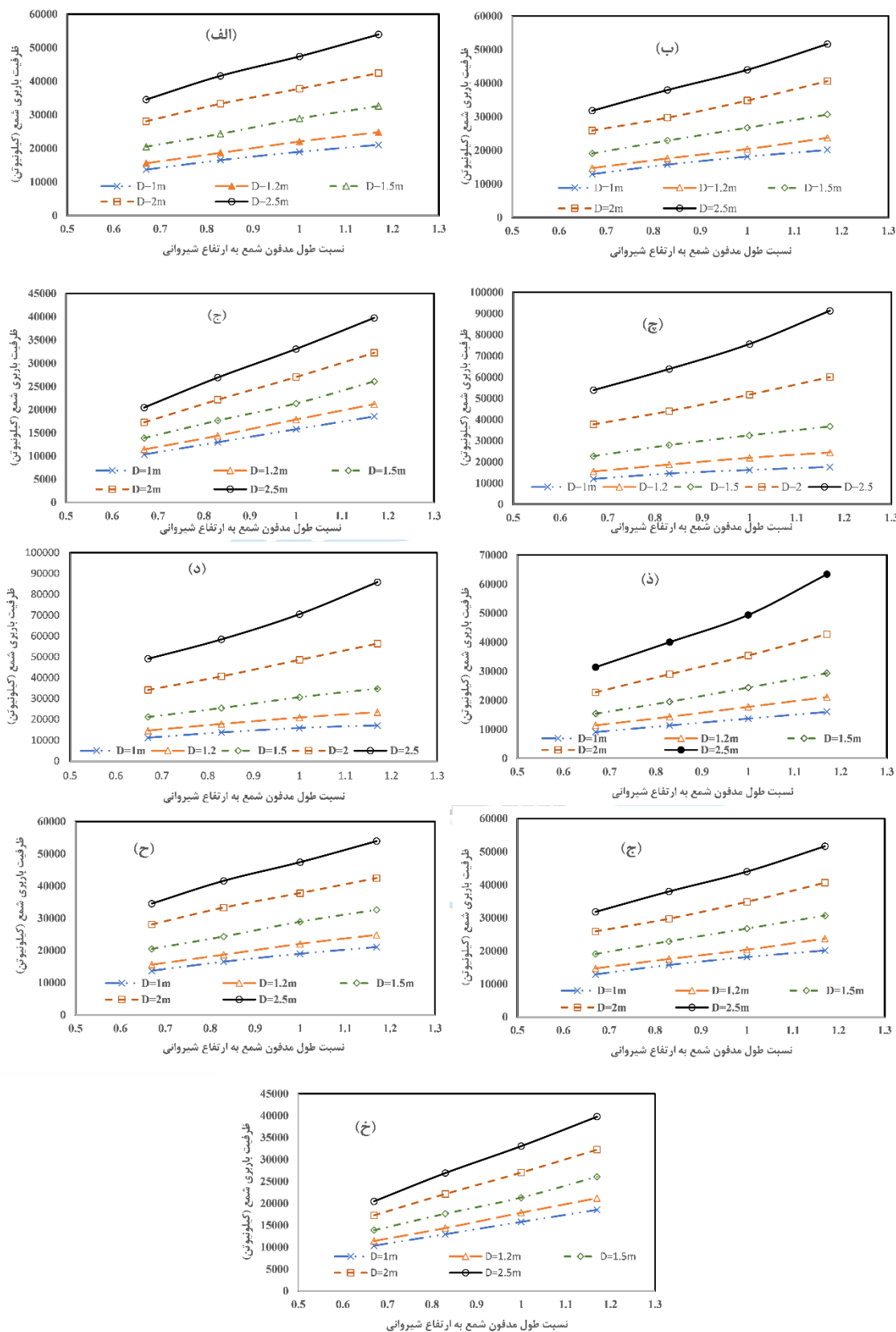
درصد کاهش	δ/D	ظرفیت باربری (کیلو نیوتن)	نوع شمع	قطر شمع (متر)
-	۰.۴٪	۹۰۷۵	بدون تزریق	۱
۵۷٪	۱.۱۷٪	۹۰۷۵	تزریق در نوک و جدار	۱
۵۰٪	۰.۲٪	۹۰۷۵	تزریق در نوک	۱
-	۰.۴٪	۱۱۳۷۷	بدون تزریق	۱/۲
۵۵٪	۱.۱۸٪	۱۱۳۷۷	تزریق در نوک و جدار	۱/۲
۵۰٪	۰.۲٪	۱۱۳۷۷	تزریق در نوک	۱/۲
-	۰.۴٪	۱۵۳۶۷	بدون تزریق	۱/۵
۵۰٪	۰.۲٪	۱۱۵۳۶۷	تزریق در نوک و جدار	۱/۵
۴۲٪	۲.۳٪	۱۵۳۶۷	تزریق در نوک	۱/۵
-	۰.۴٪	۲۲۷۴۶	بدون تزریق	۲
۴۱٪	۲.۳۵٪	۲۲۷۴۶	تزریق در نوک و جدار	۲
۳۵٪	۲.۱۶٪	۲۲۷۴۶	تزریق در نوک	۲
-	۰.۴٪	۳۱۳۹۵	بدون تزریق	۲/۵
۳۵٪	۲.۱۶٪	۳۱۳۹۵	تزریق در نوک و جدار	۲/۵
۳۰٪	۲.۱۸٪	۳۱۳۹۵	تزریق در نوک	۲/۵

۳-۲- اثر نسبت طول مدفون شمع به ارتفاع شیروانی

در این بخش به بررسی اثر نسبت طول مدفون شمع به ارتفاع شیروانی ماسه ای متراکم (L/H) پرداخته می شود. شمع ها با نسبت های L/H ۰.۶۷، ۰.۸۳، ۱ و ۱.۱۷ (با طول مدفون به ترتیب ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ متر) در ۳ حالت بدون پس تزریق، پس تزریق شده در نوک و پس تزریق شده در نوک و جدار در خاک ماسه ای متراکم مدل گردیدند. ارتفاع شیب ۳۰ متر و زاویه شیروانی ۳۰ درجه در نظر گرفته شد. پس تزریق جدار شمع در وسط طول مدفون شمع مدل گردید. شکل ۹، تغییرات ظرفیت باربری شمع های بدون پس تزریق، پس تزریق شده در نوک و پس تزریق شده در نوک و جدار را با افزایش نسبت L/H، در نسبت های نشست ۰.۱٪، ۰.۴٪ و نشست ۵۰ میلی متر نشان می دهد. نتایج حاصل از شکل ۹ نشان می دهد که با افزایش نسبت طول مدفون شمع به ارتفاع شیروانی ظرفیت باربری شمع افزایش یافت. میزان افزایش ظرفیت باربری و شیب تغییرات ظرفیت باربری شمع به قطر شمع بستگی دارد. افزایش ظرفیت باربری شمع ناشی از افزایش نسبت L/H در شمع بدون پس تزریق نسبت به شمع های پس تزریق شده بیشتر می باشد و افزایش ظرفیت باربری شمع ناشی از افزایش نسبت L/H در نسبت نشست ۰.۴٪ از افزایش ظرفیت باربری شمع ناشی از افزایش نسبت L/H در نسبت نشست ۰.۱٪ بیشتر می باشد. برای شمع با قطر ۲/۵ متر در نسبت نشست ۰.۱٪ با افزایش نسبت L/H از ۰.۶۷ به ۱.۱۷، ظرفیت باربری شمع در حالت بدون پس تزریق، پس تزریق شده در نوک و پس تزریق شده در نوک و جدار به ترتیب ۰.۸۳٪، ۰.۶۲٪ و ۰.۵۳٪ و در نسبت نشست ۰.۴٪ به ترتیب ۱.۰۱٪، ۰.۷۵٪ و ۰.۶۷٪ افزایش می یابد. همچنین نتایج شکل ۹ نشان می دهد که با افزایش قطر شمع، افزایش ظرفیت باربری شمع ناشی از افزایش نسبت L/H، بیشتر می شود و این افزایش ظرفیت باربری شمع در نسبت نشست ۰.۱٪ از افزایش ظرفیت باربری شمع در نسبت نشست ۰.۴٪ بیشتر می باشد. این نتایج با نتایج سالم و همکاران [۴۷] برای شمع های پس تزریق شده مستقر بر سطح افقی همخوانی دارد.



شکل ۸: کانتور تغییرشکل برای شمع با قطر ۱ و ۲/۵ متر (الف) قطر ۱ متر بدون پس تزریق (ب) قطر ۱ متر و پس تزریق در نوک (پ) قطر ۱ متر و پس تزریق در نوک و جدار (ح) قطر ۲/۵ متر بدون پس تزریق (ج) قطر ۲/۵ متر و پس تزریق در نوک (چ) قطر ۲/۵ متر و پس تزریق در نوک و جدار



شکل ۹: مقایسه ظرفیت باربری شمع پس تزریق شده برای نسبت نشست ۱٪ (الف) پس تزریق نوک و جدار (ب) پس تزریق نوک (ج) بدون پس تزریق نسبت نشست ۴٪ (چ) پس تزریق نوک و جدار (د) پس تزریق نوک (ذ) بدون پس تزریق

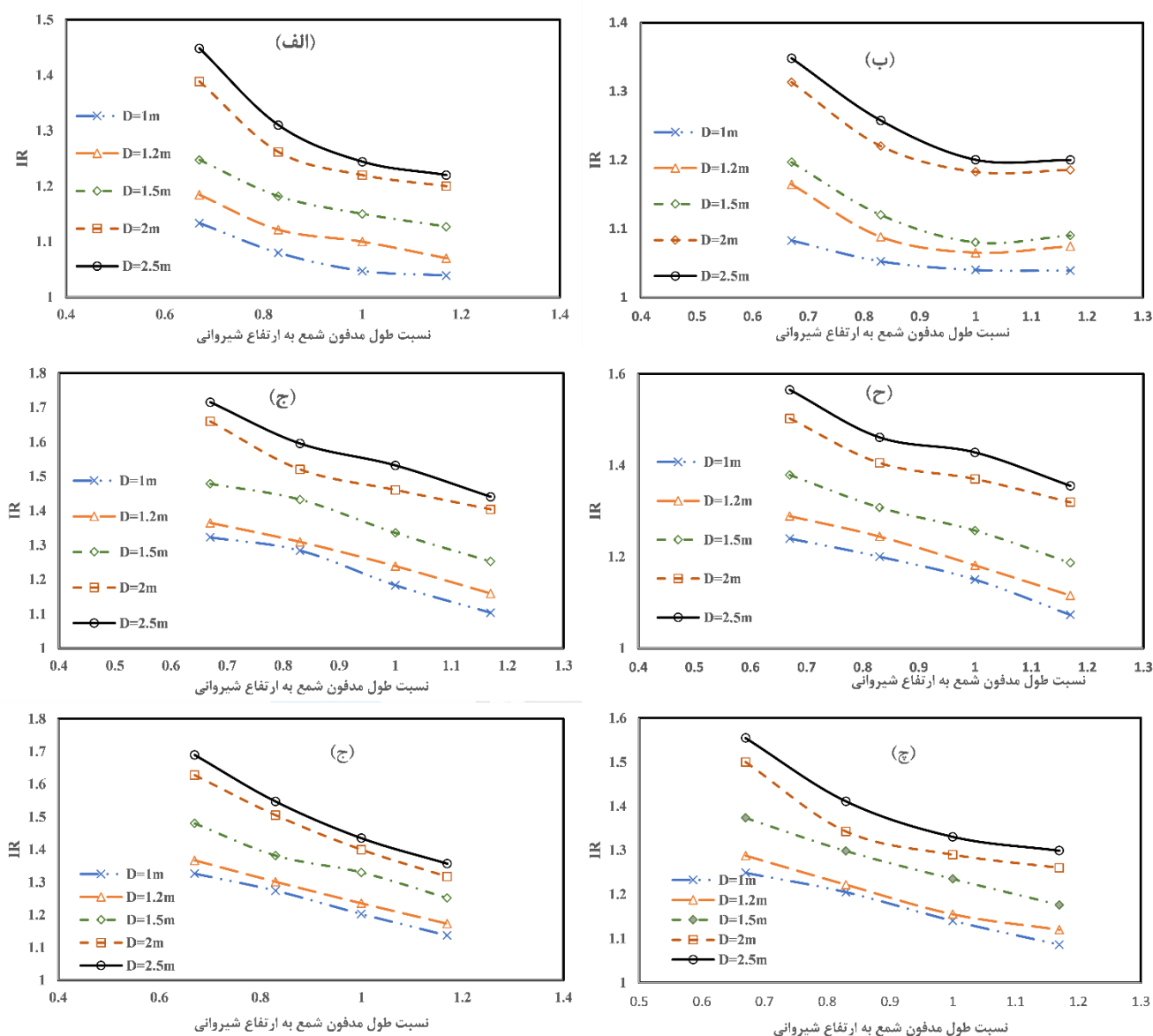
در نسبت نشست ۱٪، افزایش ظرفیت باربری شمع ناشی از افزایش نسبت L/H از ۰/۶۷ به ۱/۱۷ برای شمع با قطرهای ۱ و ۲/۵ متر در حالت بدون پس تزریق به ترتیب ۳۴٪ و ۸۳٪، در شمع‌های پس تزریق شده در نوک به ترتیب ۲۷٪ و ۶۳٪ و در شمع‌های و پس تزریق شده در نوک و جدار به ترتیب ۲۳٪ و ۵۳٪ افزایش می‌یابد. در نسبت نشست ۴٪، افزایش ظرفیت باربری شمع ناشی از افزایش نسبت L/H از ۰/۶۷ به ۱/۱۷ برای شمع با قطرهای ۱ و ۲/۵ متر در حالت بدون پس تزریق به ترتیب ۷۶٪ و ۱۰۱٪، در شمع‌های پس تزریق شده در نوک به ترتیب ۵۲٪ و ۷۵٪ و در شمع‌های و پس تزریق شده در نوک و جدار به ترتیب ۴۷٪ و ۶۷٪ افزایش می‌یابد. در نشست ۵۰ میلی‌متر، افزایش ظرفیت باربری شمع ناشی از افزایش نسبت L/H از ۰/۶۷ به ۱/۱۷ برای شمع با قطرهای ۱ و ۲/۵ متر در حالت بدون پس تزریق به ترتیب ۷۹٪ و ۹۴٪، در شمع‌های پس تزریق شده در نوک به ترتیب ۵۶٪ و ۶۲٪ و در شمع‌های پس تزریق شده در نوک و جدار به ترتیب ۵۳٪ و ۵۶٪ افزایش می‌یابد.

شکل ۱۰ تغییرات ضریب IR با افزایش نسبت L/H را برای نسبت‌های نشست ۱٪ و ۴٪ و نشست ۵۰ میلی‌متر نشان می‌دهد. نتایج نشان شکل ۱۰ نشان می‌دهد که ضریب IR در نسبت نشست ۴٪ از ضریب IR در نسبت نشست ۱٪ بیشتر می‌باشد. در شمع با قطر ۲/۵ متر و نسبت طول مدفون به ارتفاع شیروانی ۰/۶۷، ضریب IR در نسبت نشست ۱٪ برای شمع پس تزریق شده در نوک و پس تزریق شده در نوک و جدار به ترتیب ۳۴٪ و ۴۵٪ و در نسبت نشست ۴٪ به ترتیب ۵۶٪ و ۷۱٪ می‌باشد و در نشست ۵۰ میلی‌متر به ترتیب ۵۵٪ و ۶۹٪ می‌باشد. نتایج حاصل از شکل ۱۰ نشان می‌دهد که با افزایش نسبت L/H، مقدار ضریب IR کمتر می‌شود. برای شمع پس از تزریق شده در نوک و جدار با قطر ۱/۵ متر با افزایش نسبت L/H از ۰/۶۷ به ۱/۱۷، ضریب IR در نشست ۱٪ و ۴٪ و نشست ۵۰ میلی‌متر به ترتیب از ۲۴٪ به ۱۱۳٪، از ۴۷٪ به ۲۵٪ و از ۴۸٪ به ۲۵٪ کاهش می‌یابد. برای شمع پس تزریق شده در نوک، ضریب IR در نشست ۱٪ و ۴٪ و نشست ۵۰ میلی‌متر مقدار ضریب IR به ترتیب از ۱/۱۹ به ۱/۰۹، از ۳۷٪ به ۱/۱۸ و از ۳۷٪ به ۱/۱۸ کاهش می‌یابد. همچنین نتایج حاصل از شکل ۹ نشان داد که مقدار کاهش ضریب IR ناشی از افزایش نسبت L/H در نسبت نشست ۴٪ از نسبت نشست ۱٪ بیشتر می‌باشد. در شمع پس تزریق شده در نوک و جدار و با قطر ۱/۵ متر، با افزایش نسبت L/H از ۰/۶۷ به ۱/۱۷ ضریب IR در نسبت نشست ۱٪ و ۴٪ به ترتیب ۱۰٪ و ۱۷٪ کاهش یافت. نتایج نشان شکل ۱۰ نشان می‌دهد که محدوده کاهش ضریب IR با افزایش نسبت L/H از ۰/۶۷ به ۱/۱۷، برای شمع پس تزریق شده در نوک و جدار در نسبت نشست ۱٪ به ترتیب در محدوده ۱۱٪-۴٪ و ۱۶٪-۸٪ و در نسبت نشست ۴٪ به ترتیب در محدوده ۱۴٪-۱۱٪ و ۱۷٪-۱۴٪ و در نشست ۵۰ میلی‌متر در محدوده ۱۷٪-۱۳٪ و ۲۰٪-۱۴٪ می‌باشد.

۳-۳- اثر تراکم خاک

در این بخش شیروانی ماسه‌ای با تراکم متوسط مدل گردید و ظرفیت باربری شمع در نشست ۱٪ و ۴٪ با مقادیر بخش‌های قبلی (خاک ماسه‌ای متراکم) مقایسه گردید. عمق دفن شده شمع‌ها ۲۰ متر و با نسبت طول مدفون به ارتفاع شیروانی ۰/۶۷ و شیب و ارتفاع شیروانی به ترتیب ۳۰ درجه و ۳۰ متر در نظر گرفته شد. قطر شمع‌ها ۱، ۱/۲، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ متر در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از ۱۱ و ۱۲ نشان می‌دهد که درصد افزایش ظرفیت باربری شمع‌های پس دوغاب شده ناشی از افزایش قطر در خاک متراکم و با تراکم متوسط تقریباً برابر هستند. افزایش ظرفیت باربری شمع‌های پس دوغاب شده در نوک و جدار ناشی از افزایش قطر در نسبت نشست ۱٪ برای خاک متراکم و با تراکم متوسط به ترتیب ۳۵۴٪ و ۳۶۴٪ و برای شمع پس تزریق شده در نوک به ترتیب ۳۳۲٪ و ۳۵۰٪ می‌باشد. افزایش ظرفیت باربری شمع‌های پس دوغاب شده در نوک و جدار ناشی از افزایش قطر در نسبت نشست ۴٪ برای خاک متراکم و با تراکم متوسط به ترتیب ۳۳۴٪ و ۳۴۸٪ و برای شمع پس تزریق شده در نوک به ترتیب ۳۲۷٪ و ۳۳۷٪ می‌باشد. نتایج حاصل از نمودارهای ۱۱-ج و ۱۲-ج نشان می‌دهد که در شمع با قطر ۱/۵ متر و بیشتر، نسبت ظرفیت باربری شمع در خاک متراکم به ظرفیت باربری خاک در ماسه با تراکم متوسط در هر دو نسبت نشست ۱٪ و ۴٪ تقریباً ثابت می‌باشد نسبت ظرفیت باربری شمع در خاک متراکم به ظرفیت باربری خاک در ماسه با تراکم متوسط برای شمع‌ها پس تزریق شده در هر نسبت نشست، تقریباً با هم برابر هستند. در شمع با قطر ۱/۵، نسبت ظرفیت باربری در خاک

متراکم به ظرفیت باربری خاک در ماسه با تراکم متوسط در نسبت نشست ۱٪ برای شمع پس تزریق شده در نوک و جدار و شمع پس تزریق شده در نوک به ترتیب ۱/۶۵ و ۱/۶۳ و این نسبت برای نسبت نشست ۰.۴٪، به ترتیب ۱/۷۴ و ۱/۷۵ می‌باشد.

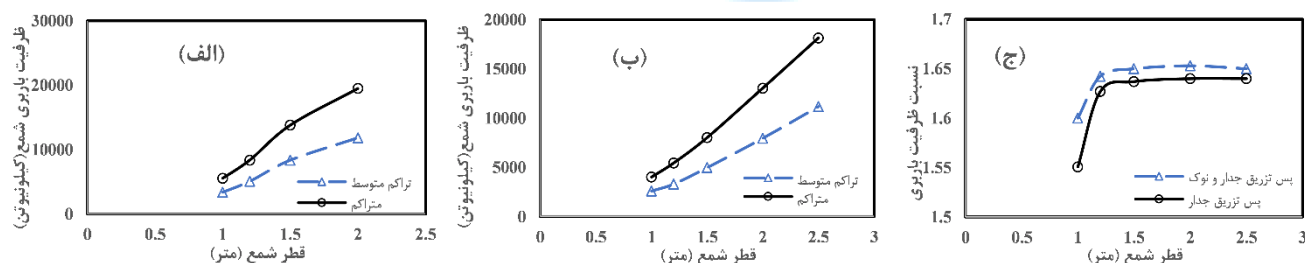


شکل ۱۰: مقایسه نسبت ظرفیت باربری شمع پس تزریق شده برای نسبت نشست ۱٪ (الف) پس تزریق نوک و جدار (ب) پس تزریق نوک

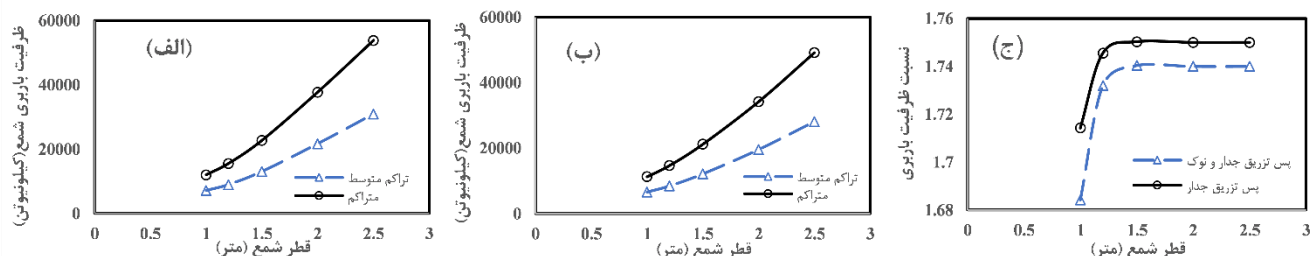
نسبت نشست ۰.۴٪ (ج) پس تزریق نوک و جدار (د) پس تزریق نوک نشست ۵۰ میلی‌متر (ج) پس تزریق نوک و جدار (د) پس تزریق نوک

نتایج حاصل از شکل ۱۳ نشان می‌دهد که ضریب IR در ماسه با تراکم متوسط از ماسه متراکم، بیشتر است. میزان افزایش مقادیر پارامترهای مقاومت ماسه با تراکم متوسط در اثر تزریق دوغاب نسبت به افزایش پارامترهای مقاومت ماسه متراکم، بیشتر می‌باشد و در نتیجه ضریب IR ماسه با تراکم متوسط از ضریب IR ماسه متراکم، بزرگتر می‌گردد. برای شمع پس از تزریق شده در نوک و جدار با قطر ۲ متر، ضریب IR برای ماسه متراکم و ماسه با تراکم متوسط در نشست نسبی ۱٪ به ترتیب ۱/۳۸ و ۱/۴۶ در نسبت نشست ۰.۴٪ به ترتیب ۱/۶۵ و ۱/۸۵ و در نشست ۵۰ میلی‌متر به ترتیب ۱/۶۲ و ۱/۷۷ می‌باشد. با افزایش نسبت نشست از ۱٪ به ۰.۴٪، ضریب IR افزایش می‌یابد. در شمع پس تزریق شده در نوک و جدار با قطر ۱/۵ متر، با افزایش نسبت نشست از ۱٪ به ۰.۴٪، ضریب IR برای ماسه با تراکم متوسط از ۱/۴۶ به ۱/۸۶ و برای ماسه متراکم از ۱/۳۸ به ۱/۶۶ افزایش یافت. در شمع پس تزریق شده در نوک با قطر ۱/۵ متر، با افزایش نسبت

نشست از ۰.۱ به ۰.۴، ضریب IR برای ماسه با تراکم متوسط از ۱/۳۵ به ۱/۶۶ و برای ماسه متراکم از ۱/۳۱ به ۱/۵۰ افزایش می‌یابد. در نشست ۵۰ میلی‌متر، ضریب IR در ماسه با تراکم متوسط از ماسه متراکم، بیشتر می‌باشد. محدوده افزایش ضریب IR در ماسه با تراکم متوسط نسبت به ضریب IR در ماسه با تراکم متوسط برای شمع تزریق شده در نوک و شمع تزریق شده در نوک و جدار به ترتیب در ۰.۹-، ۳٪ و ۰.۱۱-۰.۷٪ می‌باشد. در شمع‌های با قطر ۱ و ۱/۲ متر به دلیل بزرگتر بودن نشست ۵۰ میلی‌متر از نسبت نشست ۰.۴، ضریب IR نشست ۵۰ میلی‌متر از ضریب IR از نسبت نشست ۰.۴ بزرگتر می‌باشد. در شمع‌های با قطر ۱/۵، ۲ و ۲/۵ متر به دلیل کمتر بودن نشست ۵۰ میلی‌متر از نسبت نشست ۰.۴، ضریب IR نشست ۵۰ میلی‌متر از ضریب IR از نسبت نشست ۰.۴ کوچک‌تر می‌باشد. نتایج حاصل از شکل ۱۳ نشان می‌دهد که برای شمع پس از تزریق شده در نوک و جدار، ضریب IR برای ماسه متراکم و ماسه با تراکم متوسط در نشست نسبی ۰.۱ به ترتیب در محدوده ۱/۱۳-۱/۴۴ و ۱/۱۶-۱/۵۱ و در نشست ۰.۴ به ترتیب در محدوده ۱/۳۲-۱/۷۱ و ۱/۴۳-۱/۹۵ و در نشست ۵۰ میلی‌متر به ترتیب در محدوده ۱/۳۲-۱/۶۸ و ۱/۴۵-۱/۸ می‌باشد. برای شمع پس از تزریق شده در نوک، ضریب IR برای ماسه متراکم و ماسه با تراکم متوسط در نشست نسبی ۰.۱ به ترتیب در محدوده ۱/۰۸-۱/۳۴ و ۱/۱-۱/۳۹ و در نشست ۰.۴ به ترتیب در محدوده ۱/۲۳-۱/۵۶ و ۱/۳۲-۱/۷۵ و در نشست ۵۰ میلی‌متر به ترتیب در محدوده ۱/۲۴-۱/۵۵ و ۱/۳۳-۱/۶ می‌باشد.



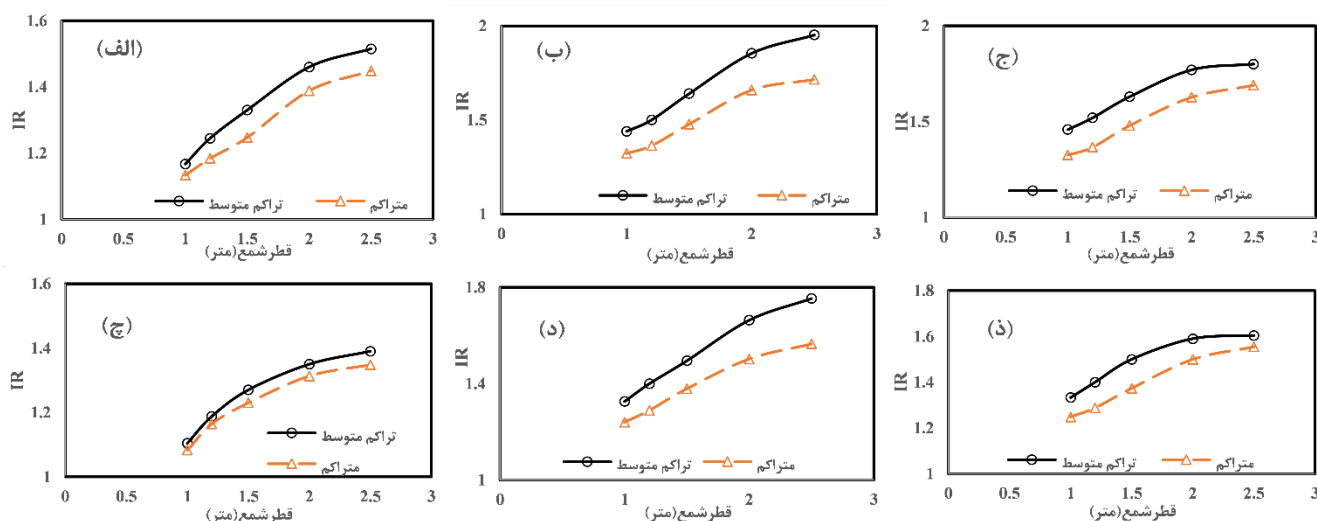
شکل ۱۱: مقایسه ظرفیت باربری شمع پس تزریق شده در خاک ماسه‌ای متراکم و با تراکم متوسط برای نسبت نشست ۰.۱ (الف) پس تزریق نوک و جدار (ب) پس تزریق نوک (ج) نسبت ظرفیت باربری شمع در خاک متراکم به ظرفیت باربری شمع در خاک با تراکم متوسط



شکل ۱۲: مقایسه ظرفیت باربری شمع پس تزریق شده در خاک ماسه‌ای متراکم و با تراکم متوسط برای نسبت نشست ۰.۴ (الف) پس تزریق نوک و جدار (ب) پس تزریق نوک (ج) نسبت ظرفیت باربری شمع در خاک متراکم به ظرفیت باربری شمع در خاک با تراکم متوسط

۳-۵- مقایسه نتایج روش‌های عددی مختلف جهت مدل‌سازی شمع پس تزریق شده

برای مدل‌سازی شمع پس تزریق شده در نوک، روش‌های مختلفی توسط محققین ارائه گردید. در این بخش نتایج روش‌های مختلف مدل‌سازی شمع پس تزریق با یکدیگر مقایسه می‌گردد. در این تحقیق از روش تیاک‌کندی و همکاران [۴۷] برای مدل‌سازی شمع پس تزریق استفاده گردید. نتایج به‌دست‌آمده برای شمع پس تزریق شده در نوک با قطر ۱ و ۲ متر و طول مدفون ۲۰ متر در نسبت نشست ۴٪ با نتایج سایر روش‌های پیشنهادی برای مدل‌سازی شمع پس تزریق شده در نوک مقایسه می‌گردد. در روش لیو و ژانگ [۷۴] پروسه تزریق پرفشار



شکل ۱۳: نسبت ظرفیت باربری شمع پس تزریق شده برای شمع پس تزریق نوک و جدار (الف) نشست ۱٪ (ب) نشست ۴٪ (ج) نشست ۵۰ میلی متر

شمع پس تزریق نوک (چ) نشست ۱٪ (د) نشست ۴٪ (ذ) نشست ۵۰ میلی متر

دوغاب سیمان مدل نمی‌گردد. یکی از مکانیسم‌های افزایش ظرفیت باربری شمع‌های پس تزریق شده، مرحله پیش بارگذاری ناشی از حرکت رو به بالای بدنه شمع بدلیل تزریق پرفشار دوغاب در نوک و در نتیجه بسیج شدن مقاومت اصطکاکی منفی جدار شمع می‌باشد. در روش لو و ژانگ [۷۴] مرحله پیش بارگذاری مدل نمی‌گردد و حباب گروت به وسیله مخروط ناقص که شعاع دایره بالایی آن با شعاع نوک شمع برابر بوده. ارتفاع (h) مخروط ناقص و شعاع دایره بزرگ‌تر در قاعده مخروط ناقص (R) از روابط زیر به دست می‌آید، مدل می‌گردد. در این روش رفتار حباب گروت به کمک مدل الاستیک خطی با پارامترهای مشابه این تحقیق مدل می‌گردد.

$$R = \sqrt[3]{V_g \tan \theta / \pi + r^3} \quad (2)$$

$$h = (R-r) \tan \theta \quad (3)$$

V_g حجم دوغاب تزریقی و $\theta = 60^\circ$ درجه می‌باشد.

اندازه حباب گروت پیشنهادی در روش لو و ژانگ [۷۴] از سایر روش‌ها بیشتر می‌باشد و در نتیجه ظرفیت باربری نوک شمع پس تزریق شده در این روش نسبت به سایر روش‌ها بیشتر تخمین زده می‌شود.

در روش ما و همکاران^{۳۵} [۷۵] و سالم و همکاران [۴۹] پروسه تزریق پرفشار دوغاب سیمان مدل نمی‌گردد. در این روش مرحله پیش بارگذاری که شامل حرکت رو به بالای بدنه شمع به دلیل تزریق پرفشار و در نتیجه بسیج شدن مقاومت اصطکاکی منفی جدار شمع می‌باشد که در مدل‌سازی در نظر گرفته نمی‌شود. در این روش حباب گروت به وسیله یک نیم‌کره با قطر ۱/۵ برابر قطر شمع در زیر نوک شمع مدل می‌گردد. در این روش حباب گروت به کمک مدل الاستیک خطی با پارامترهای مشابه این تحقیق مدل می‌گردد.

در روش یوان و تونان^{۳۶} [۴۸] پروسه تزریق پرفشار دوغاب سیمان به وسیله اعمال فشاری برابر با فشار تزریق دوغاب سیمان در جهت رو به بالا به نوک شمع مدل و فشاری برابر با فشار دوغاب رو به پایین به خاک زیر شمع مدل می‌گردد. یوان و تونان [۴۸] توصیه نمودند که چسبندگی و مدول الاستیسیته خاک زیر نوک شمع پس از پروسه پس تزریق همانند روش بهسازی خاک با تزریق دوغاب سیمان اصلاح

³⁵ Ma et al

³⁶ Youn and Tonon

گردند. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش بارگذاری شمع‌های پل رودخانه برازو آمریکا و نتایج مدل‌سازی‌های انجام شده توسط یوان و تونان [۴۸] برای نشست $0/5\%$ قطر شمع نشان داد که روش ارائه شده توسط آنها، ظرفیت باربری اصطکاکی شمع پس تزریق شده در نوک شمع را کمتر برآورد می‌نماید و پیشنهاد نمودند که برای همخوانی نتایج مدل‌سازی عددی و آزمایش‌های مقیاس واقعی، ضریب سختی لایه‌های خاک اطراف بدنه شمع با کمک روش محاسبات برگشتی، افزایش داده شود. بر اساس پیشنهاد یوان و تونان [۳۵]، در محدوده ۲ برابر قطر شمع، چسبندگی خاک و سختی مماسی، سختی سکانتی و سختی باربرداری خاک زیر نوک خاک پس از پروسه تزریق دوغاب سیمان، به ترتیب ۱۹۲ KN، ۱۵۰ Mpa، ۱۵۰ Mpa و ۴۵۰ Mpa در نظر گرفته شد.

مقایسه نتایج بدست آمده از روش‌های مختلف مدل‌سازی شمع پس تزریق شده در نوک برای نسبت نشست 4% در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج حاصل از جدول ۷ نشان داد که روش یوان و تونان [۴۸]، ظرفیت باربری شمع پس تزریق شده در نوک را نسبت به روش این تحقیق کمتر برآورد می‌نماید که این امر به دلیل برآورد سختی کمتر خاک زیر نوک شمع نسبت به روش تحقیق و کمتر برآورد کردن ظرفیت باربری اصطکاکی شمع پس دوغاب شده در روش یوان و تونان می‌باشد. روش ما همکاران [۵۴] نیز مقدار ظرفیت باربری شمع پس تزریق شده در نوک را نسبت به روش مورد استفاده در این تحقیق کمتر برآورد می‌کند که این امر به دلیل عدم مدل‌سازی پروسه تزریق پرفشار دوغاب و در نتیجه حرکت رو به بالای شمع و بسیج شدن مقاومت اصطکاکی منفی شمع می‌باشد. و با افزایش قطر شمع، اختلاف مقادیر بدست آمده از این روش‌ها با روش مورد استفاده در این تحقیق بیشتر می‌شود. نتایج روش لیو و ژانگ [۵۳] با روش مورد استفاده در این تحقیق همخوانی خوبی دارد که این امر ناشی از برآورد بزرگتر اندازه حباب دوغاب پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها و تخمین بیشتر ظرفیت باربری نوک شمع پس تزریق شده در این روش نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد.

جدول ۷: ظرفیت باربری شمع پس تزریق شده در نوک شمع در نسبت نشست 4% بر اساس (برحسب کیلونیوتن)

قطر شمع	روش لیو و ژانگ [۵۳]	روش ما و همکاران [۵۴]	این تحقیق	یوان و تونان [۳۵]
۱	ظرفیت باربری	۹۹۰۰	۱۱۲۵۰	۱۰۲۷۵
	درصد تفاوت	-۱۲٪	-	-۹٪
۲	ظرفیت باربری	۲۷۶۵۴	۳۴۱۷۵	۲۷۱۴۳
	درصد تفاوت	۰	-۱۹٪	-۲۰٪

۴- نتیجه‌گیری

از شمع به‌عنوان پی ساختمان‌ها، پل‌ها و برج‌های انتقال استفاده می‌گردد. برخی از این سازه‌ها در مجاورت شیروانی ساخته می‌شوند. استقرار شمع‌ها مجاور شیروانی باعث کاهش ظرفیت باربری و دوران شمع به سمت شیروانی در اثر بارگذاری محوری می‌گردد. مهندسی به دنبال راهکارهایی برای افزایش ظرفیت باربری شمع‌ها و در نتیجه کاهش هزینه‌های اجرای شمع می‌باشند. یکی از روش‌های افزایش ظرفیت باربری شمع استفاده از روش پس تزریق شده در شمع‌های حفاری شده می‌باشد. در این تحقیق اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری شمع پس تزریق شده در نوک و شمع پس از تزریق شده در نوک و جدار به کمک روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. در آنالیزهای انجام شده اثرات قطر شمع، نسبت طول مدفون به ارتفاع شیروانی و تراکم خاک ماسه‌ای بر ظرفیت باربری شمع پی تزریق شده در نسبت‌های نشست 1% ، 4% و نشست 50 میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق می‌تواند برای بهبود ظرفیت باربری شمع‌های پی‌پل‌ها و سازه‌های مجاور شیروانی و در نتیجه کاهش تعداد شمع‌ها و کاهش هزینه اجرای پی توسط مهندسی مورد استفاده قرار گیرد.

۱- میزان افزایش ظرفیت باربری شمع ناشی از پروسه پس تزریق در خاک با تراکم متوسط بیشتر از خاک ماسه‌ای متراکم می‌باشد. این موضوع در تمامی قطرهای شمع و هر دو حالت شمع پس از تزریق شده مورد بررسی مشاهده گردید. میزان افزایش مقادیر پارامترهای مقاومت ماسه با تراکم متوسط در اثر تزریق دوغاب نسبت به افزایش پارامترهای مقاومت ماسه متراکم، بیشتر می‌باشد و در نتیجه ضریب IR ماسه با تراکم متوسط از ضریب IR ماسه متراکم، بزرگتر می‌گردد. نسبت طول شمع به ارتفاع شیروانی $0/67$ ، ضریب IR برای شمع با قطر ۱، $2/2$ ، $1/5$ و $2/5$ متر برای شمع پس از تزریق شده در نوک و جدار، ضریب IR برای ماسه متراکم و ماسه با تراکم

متوسط در نشست نسبی ۰.۱٪ به ترتیب در محدوده ۱/۱۳-۱/۴۴ و ۱/۱۶-۱/۵۱ و در نسبت نشست ۰.۴٪ به ترتیب در محدوده ۱/۳۲-۱/۷۱ و ۱/۴۳-۱/۹۵ و در نشست ۵۰ میلی‌متر به ترتیب در محدوده ۱/۳۲-۱/۶۸ و ۱/۴۵-۱/۸ می‌باشد. برای شمع پس از تزریق شده در نوک، ضریب IR برای ماسه متراکم و ماسه با تراکم متوسط در نشست نسبی ۰.۱٪ به ترتیب در محدوده ۱/۰۸-۱/۳۴ و ۱/۱-۱/۳۹ و در نسبت نشست ۰.۴٪ به ترتیب در محدوده ۱/۲۳-۱/۵۶ و ۱/۳۲-۱/۷۵ و در نشست ۵۰ میلی‌متر به ترتیب در محدوده ۱/۲۴-۱/۵۵ و ۱/۶-۱/۳۳ می‌باشد.

۲- با افزایش قطر شمع، افزایش ظرفیت باربری شمع ناشی از پروسه پس تزریق بیشتر می‌گردد. این موضوع در تمامی نسبت نشست و نسبت‌های طول مدفون به ارتفاع شیروانی و هر دو حالت شمع پس تزریق شده مورد مشاهده گردید. این امر به دلیل افزایش فشار دوغاب تزریقی با افزایش قطر شمع و در نتیجه افزایش پیش فشردگی خاک زیر نوک شمع می‌باشد. همچنین با افزایش قطر شمع، اثر پروسه پس تزریق در کاهش دوران شمع بیشتر می‌گردد. در نسبت طول شمع به ارتفاع شیروانی ۰/۶۷، ضریب IR برای شمع با قطر ۱، ۲/۲، ۲/۵ و ۲/۵ متر برای شمع پس تزریق شده در نوک و پس تزریق شده در نوک و جدار برای نسبت نشست ۰.۱٪ به ترتیب در محدوده ۱/۱-۰/۸۳۵ و ۱/۱۳-۱/۴۵ و برای نسبت نشست ۰.۴٪ به ترتیب در محدوده ۱/۲۱-۱/۵۵ و ۱/۲۸-۱/۷۳ و برای نشست ۵۰ میلی‌متر در محدوده ۱/۲۲-۱/۵۵ و ۱/۲۹-۱/۶۹ قرار دارد.

۳- افزایش ظرفیت باربری شمع ناشی از پروسه پس تزریق دوغاب سیمان در نشست ۰.۴٪ از افزایش ظرفیت ناشی از پروسه پس تزریق دوغاب سیمان در نشست ۰.۱٪، بیشتر می‌باشد. این موضوع در تمامی قطرهای شمع و نسبت‌های طول مدفون به ارتفاع شیروانی و هر دو حالت شمع پس تزریق شده مورد مشاهده گردید. دلیل این امر پافیلی شدن نوک شمع در اثر پروسه پس تزریق دوغاب سیمان و افزایش ظرفیت باربری نوک شمع پافیلی، با افزایش نسبت نشست می‌باشد. در نسبت طول شمع به ارتفاع شیروانی ۰/۶۷، برای شمع با قطر ۱، ۲/۲، ۲/۵ و ۲/۵ متر برای شمع پس تزریق شده در نوک و پس تزریق شده در نوک و جدار، ضریب IR برای نسبت نشست ۰.۴٪ به ترتیب در محدوده ۰/۸-۰/۲-۰/۸-۰/۶٪ از ضریب IR برای نسبت نشست ۰.۱٪ بیشتر می‌باشد.

۴- با افزایش نسبت طول مدفون به ارتفاع شیروانی، میزان افزایش ظرفیت باربری شمع ناشی از پروسه پس تزریق دوغاب سیمان کاهش می‌یابد. این موضوع در تمامی قطرهای شمع و هر دو حالت شمع پس تزریق شده مورد بررسی مشاهده گردید. محدوده کاهش ضریب IR با افزایش نسبت L/H از ۰/۶۷ به ۱/۱۷، برای شمع پس تزریق شده در نوک و پس تزریق شده در نوک و جدار در نسبت نشست ۱٪ به ترتیب در محدوده ۰/۱۱-۰/۴٪ و ۰/۸-۰/۱۶٪ و در نسبت نشست ۰.۴٪ به ترتیب در محدوده ۰/۱۱-۰/۱۴٪ و ۰/۱۱-۰/۱۷٪ و در نشست ۵۰ میلی‌متر در محدوده ۰/۱۳-۰/۱۷٪ و ۰/۱۴-۰/۲۰٪ می‌باشد.

۵- افزایش ظرفیت باربری شمع ناشی از افزایش نسبت طول مدفون به ارتفاع شیروانی در شمع بدون پس تزریق نسبت به شمع‌های پس تزریق شده بیشتر می‌باشد. این موضوع در تمامی قطرهای شمع و هر دو حالت شمع پس تزریق شده مورد بررسی مشاهده گردید.

۶- در شمع با قطر ۱/۵ متر و بیشتر نسبت ظرفیت باربری شمع در خاک متراکم به ظرفیت باربری خاک در ماسه با تراکم متوسط تقریباً ثابت می‌باشد. این موضوع در تمامی نسبت نشست و هر دو حالت شمع پس تزریق شده مورد مشاهده گردید. در شمع با قطر ۱/۵، ۲ و ۲/۵ متر، نسبت ظرفیت باربری در خاک متراکم به ظرفیت باربری خاک در ماسه با تراکم متوسط در نسبت نشست ۰.۱٪ برای شمع پس تزریق شده در نوک و جدار و شمع پس تزریق شده در نوک به ترتیب ۱/۶۵ و ۱/۶۳ و این نسبت برای نسبت نشست ۰.۴٪، به ترتیب ۱/۷۴ و ۱/۷۵ می‌باشد.

۷- ظرفیت باربری شمع بدون تزریق در نسبت نشست ۰.۴٪ با ظرفیت باربری شمع پس تزریق شده در نوک با یک سایز قطر کوچک‌تر، برابر می‌باشد. این موضوع در تمامی نسبت‌های طول مدفون به ارتفاع شیروانی و هر دو حالت شمع پس تزریق شده مورد مشاهده گردید.

۵-مراجع

- [1] Meyerhof, G. G. (1976). Bearing capacity and settlement of pile foundations. *J. Geotech. Engrg. Div.*, 102(3), 197–228.
- [2] O'Neill, M. W. (1994). Review of augered pile practice outside the United States. Washington, Transportation Research Board, 3–9.
- [3] Selby, A. R. (1991). Ground vibrations caused by pile installation. In: 4th Int. Conf. on Piling and Deep Foundations, Deep Foundation Institute, Stresa, Italy, 497–502.
- [4] Woods, R. D. (1997). Dynamic effects of pile installations on adjacent structures. Washington. Washington, Transportation Research Board, 11–18.
- [5] Svinikin, M. R. (2006). Mitigation of soil movements from pile driving. *Pract. Period. Struct. Des. Constr.*, 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))
- [6] Deeks, A. D., White, D. J., & Bolton, M. D. 2005. A comparison of jacked, driven and bored piles in sand. In: 16th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering. Amsterdam. IOS Press. 2103-2106.
- [7] O'Neill, M. W., and Reese, L. C. (1999). Drilled shafts: Construction procedures and design methods. Washington, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 243-251
- [8] Brown, D. A., Dapp, S. D., Thompson, W.R., and Lazarte, C. A. (2007). Design and construction of continuous flight auger piles. Washington, Federal Highway Administration, 33-35
- [9] Bruce DA (1986). Enhancing the performance of large diameter piles by grouting. *Ground Eng* 19(4):9–15
- [10] Mullins G, Winters D, Dapp S (2006). Predicting end bearing capacity of post-grouted drilled shaft in cohesionless soils. *J Geotech Geoenviron Eng* 132(4):478–487. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:4\(478\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:4(478))
- [11] AASHTO. (2010). LRFD bridge design specifications. Washington, American Association of State Highway and Transportation Officials,
- [12] Useche-Infante, D. J., Aiassa-Martinez, G. M., Arrua, P. A., & Eberhardt, M. (2022). Performance evaluation of post-grouted drilled shafts: a review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(3), 230. <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00830-y>
- [13] Zhou Z, Xie Y. (2019). Experiment on improving bearing capacity of pile foundation in loess area by postgrouting. *Adv Civ Eng*. <https://doi.org/10.1155/2019/9250472>.
- [14] Gerbaudo CF, Zeballos ME, Gerbaudo G, Zecchin E, Figliozzi L. (2015). Post-grouted drilled shaft behavior. *From Fundam Appl Geotech* 1:398–405. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-603-3-398>
- [15] Huynh, V. H., Nguyen, T., Nguyen, D. P., Nguyen, T. S., & Nguyen, T. C. (2022). A novel direct SPT method to accurately estimate ultimate axial bearing capacity of bored PHC nodular piles with 81 case studies in Vietnam. *Soils and Foundations*, 62(4), 101163. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101163>
- [16] Nguyen, T., Ly, D. K., Shiau, J., & Nguyen-Dinh, P. (2024). Optimizing load-displacement prediction for bored piles with the 3mSOS algorithm and neural networks. *Ocean Engineering*, 304, 117758. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117758>
- [17] Luo, W., & Deng, S. (2024). A rubber-coated bored pile in isolating metro-induced vibrations: Concept, analytical and in-situ investigation. *Construction and Building Materials*, 426, 136094. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136094>
- [18] Jokūbaitis, A., Skuodis, Š., Šneideris, A., Zavalis, R. (2024). Application of non-destructive methods for bored concrete piles installed 34 years ago. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03104. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03104>
- [19] Zeng, B., Zhang, D. W., Yang, S. S., Hou, J., Zhang, A. J., Cheng, C. H., He, L. (2024). Performance enhancement of large diameter bored pile reinforced by cement-soil in clay under static and cyclic loadings. In *Structures* (Vol. 60, p. 105923). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.105923>
- [20] Yu, Y. C., Ren, W. X., Yin, Y. G., Luo, X. G. (2023). Numerical simulation and field tests on vertical load bearing behaviour of bored root piles. *Computers and Geotechnics*, 159, 105453. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105453>
- [21] Han, F., Salgado, R., Prezzi, M., Lim, J. (2017). Shaft and base resistance of non-displacement piles in sand. *Computers and Geotechnics*, 83, 184-197. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.11.006>
- [22] Zhang, Q. Q., Feng, R. F., Yu, Y. L., Liu, S. W. Qian, J. G. (2019). Simplified approach for prediction of nonlinear response of bored pile embedded in sand. *Soils and Foundations*, 59(5), 1562-1578. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.07.011>
- [23] Shalabi, F. I., Saleem, M. U., Qureshi, H. J., Arifuzzaman, M., Khan, K., & Rahman, M. M. (2023). 3D FE analysis of bored pile-pile cap interaction in sandy soils under axial compression-parametric study. *Journal of Engineering Research*, 11(4), 301-313. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.07.011>
- [24] Mohammad Alinejad, R., Bayat, M., Nadi, B., & Pakbaz, M. S. (2021). Response of pile group adjacent to a slope crest under static axial loading. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09123-7>
- [25] Alinejad, R. M., Bayat, M., Nadi, B., & Pakbaz, M. S. (2023). Experimental Study of Axially Loaded Pile Group Near a Sloping Ground. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 67(2), 382-391. <https://doi.org/10.3311/PPci.18334>

- [26] Mohammad Alinejad, R., & Bayat, M. (2024). Investigating the Behavior of Single Pile and Adjacent Pile Group of Sandy Slope under Uplift Loading. *Journal of Civil and Environmental Engineering*. <https://doi.org/10.22034/ceej.2024.61105.2343>
- [27] Mohammad-Alinejad, R., Bayat, M., Nadi, B., & Pakbaz, M. S. (2023). 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*, 10(1), 95-113. <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.321897.2678>
- [28] Bolognesi, AJL, Moretto, O. (1973). Stage grouting preloading of large piles on sand. In: *Proceedings of 8th ICSME, Moscow*, p 20
- [29] Gouvenot D, Gabiix, FD. (1975). A new foundation technique using piles sealed by concrete under high pressure. In: *Proceedings of the 7th annual offshore technical conference, vol 2, Houston, Texas, paper no. OTC 2310*, pp 641–656
- [30] Stocker, M. (1983.) Influence of post-grouting on the load-bearing capacity of bored piles. In: *Proceedings of the European conference on soil mechanics and foundation engineering*. Balkema, Helsinki, pp 167–70
- [31] Zhou Z, Xu F, Lei J, Bai Y, Chen C, Xu T, Zhang Z, Zhu L, Liu T. (2021). Experimental study of the influence of different holeforming methods on the bearing characteristics of post-grouting pile in Loess Areas. *Geotech Transp* 27:1–12. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100423>
- [32] Nguyen TD, Lai VQ, Phung DL, Duong, TP. (2019) Shaft resistance of shaft-grouted bored piles and barrettes recently constructed in Ho Chi Minh city. *Geotech Eng J SEAGS AGSSEA* 50(3):155–162.
- [33] Loehr, J. E., Marinucci, A., Duffy, P. H., Gomez, J., Robinson, H., Day, T. Cadden, A. (2017). Evaluation and guidance development for post-grouted drilled shafts for highways. Washington, Federal Highway Administration. 30-35.
- [34] Zheng (2018) Finite element analysis on bearing capacity of post-grouting bored pile with the HS-small model and the HS model. In: *Proceedings of 2018 international conference on civil and hydraulic engineering*:. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/189/2/022087>
- [35] Liu, S. W., Zhang, Q. Q., Li, H. T., Yu, X. T., Liu, G. H., & Cui, W. (2023). An analysis method for the response of combined side-and-tip grouting pile. *Acta Geotechnica*, 18(7), 3715-3729. <http://dx.doi.org/10.1007/s11440-022-01788-y>
- [36] Wang, Z., Huang, L., Dai, G., Li, F., & Ma, T. (2024). Experimental Study on Grouting Effect of Combined Post-Grouting Piles in Cohesive Soil. *Journal of Testing and Evaluation*, 52(1). <http://dx.doi.org/10.1520/JTE20230341>
- [37] Wan, Z., Liu, H., Zhou, F., & Dai, G. (2022). Axial bearing mechanism of post-grouted piles in calcareous sand. *Applied Sciences*, 12(5), 2731. <https://doi.org/10.3390/app12052731>
- [38] Wan, Z. H. Qi, K. Hu, T., Guo, Z. L, Zhou, F. Dai, G. L. (2024). Experimental study on the durability of cement-stabilized soil for post-grouted piles in calcareous sand under marine environment. *Marine Georesources & Geotechnology*, 1-18. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2024.2434055>
- [39] Wu, Y., Zhang, X., Zhao, C., & Zhao, C. (2023). Effects of soil unloading and grouting on the vertical bearing mechanism for compressive piles. *Ocean Engineering*, 271, 113754. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113754>
- [40] Cao, S., Wang, Q., Ma, J., Xiao, Z., Li, C., Yang, Y., & Wang, J. (2024). Experimental Investigation of Vertical Bearing Characteristics of Composite Post-grouting Piles in Sandy Soil. *International Journal of Civil Engineering*, 22(2), 303-315. <http://dx.doi.org/10.1007/s40999-023-00899-1>
- [41] Kong, D., Li, H., & Gan, W. (2022). Study on Vertical Load-Carrying Capacity of Post-Grouting Bored Piles. *Applied Sciences*, 12(15), 7452. <https://doi.org/10.3390/app12157452>
- [42] Wu, Y., Deng, Y., Zhang, X., Liu, L., Zhao, C., & Zhang, J. (2024). Grout Diffusion Mechanism along the Pile Shaft during the Process of Pile Tip Post-Grouting in Sand. *Applied Sciences*, 14(13), 5389. <https://doi.org/10.3390/app14135389>
- [43] Wang, J., Jin, T., Qin, W., & Zhang, F. (2024). Performance evaluation of post-grouting for bored piles installed in inhomogeneous gravel pebble stratum overlaid by deep and soft soil layers. *Geomechanics and Geoengineering*, 19(1), 77-95. <https://doi.org/10.1080/17486025.2023.2181406>
- [44] Tao, H., Zhihui, W., Guoliang, D., Weiming, G., & Zheng, Z. (2022). Regression analysis and optimization for grouting pressure of post-grouting pile in saturated soil. *Journal of Southeast University/Dongnan Daxue Xuebao*, 52(5). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-0505.2022.05.007>
- [45] Huang, L., Gao, R., Chi, J., & Yan, X. (2024). Study on load-bearing behaviors of prestressed post-grouting tubular piles in the karst region of northern Fujian Province, China. *Frontiers in Earth Science*, 12, 1387028. <http://dx.doi.org/10.3389/feart.2024.1387028>
- [46] Wu, Y., Deng, Y., Zhang, X., Zhao, C., & Zhao, C. (2023). 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*, 23(8), 04023127. <https://doi.org/10.1061/IJGNALGMENG-8438>
- [47] Thiyyakkandi S, McVay M, Bloomquist D, Lai P. (2014). Experimental study, numerical modeling of and axial prediction approach to base grouted drilled shafts in cohesionless soils. *Acta Geotech* 9:439–454. <http://dx.doi.org/10.1007/s11440-013-0246-3>
- [48] Youn, H. Tonon, F. (2010). Numerical analysis on post-grouted drilled shafts: a case study at the Brazo River Bridge, TX. *Comput Geotech* 37:456–465. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.01.005>.

- [49] Salem, T. El-Basset, O. H. Hassan, R. (2024). 3D Numerical Analysis of Post-Grouted Piles. *Indian Geotechnical Journal*, 54(4), 1562-1583. <http://dx.doi.org/10.1007/s40098-023-00832-2>
- [50] Hu, T. Wan, Z. Dai, G., Gong, W. Fang, B. (2024). Prediction and design of grouting parameters for long and large-diameter postgrouted drilled shafts. *International Journal of Geomechanics*, 24(2), 04023265. <http://dx.doi.org/10.1061/IJGNAL.GMENG-8965>
- [51] Huang, S. G. Zhang, T., Cao, H. (2022). A calculation model of grout migration height for post-grouting technology. *Applied Sciences*, 12(13), 6327. <https://doi.org/10.3390/app12136327>
- [52] Zhang, J., Zhao, C., Zhao, C. Wu, Y. (2024, May). Field test on application of tip grouting in enlarged head cast-in-place bored pile. In: *Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, Vol. 1336, No. 1, p. 012041 <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/1336/1/012041>
- [53] Hu, H., Jin, Q., Yang, F., Zhou, J., Ma, J., Gong, X., & Guo, J. (2022). A novel method for testing the effect of base post-grouting of super-long piles. *Applied Sciences*, 12(21), 10996. <https://doi.org/10.3390/app122110996>
- [54] Thiyyakkandi, S. (2024). Post-Grouted Deep Foundations: Individual and Group Responses. *Indian Geotechnical Journal*, 54(1), 301-314. <http://dx.doi.org/10.1007/s40098-023-00739-y>
- [55] Su, S., Wang, X. Lv, S. (2023). Experimental Study on the Bearing Behaviour of Super-Long Post-Gouting Cast-in-Place Pile in Deep Soft Soil. In: *13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi, IOS Press, 538-544. <http://dx.doi.org/10.3233/ATDE230244>
- [56] 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>
- [57] Li, P., Xia, Y., Xie, X., Wang, J., Wang, C., Shi, M. Wu, H. (2024). Study on Vertical Bearing Capacity of Pile Foundation with Distributed Geopolymer Post-Grouting on Pile Side. *Materials*, 17(2), 398. <https://doi.org/10.3390/ma17020398>
- [58] Liu, X., Liu, Y., Liu, K., & Su, Y. (2022). Experimental investigation on anti-sliding performance of grouted micro-pipe pile groups. *Natural Hazards*, 113(2), 1367-1384. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05351-6>
- [59] Mahboubi Niazmandi, M. (2023). 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*, 11(3). <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.402512.3146>
- [60] Abedi, A. S. Hataf, N. (2014). Bearing capacity of strip footings located on grouted soil slopes. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 19(Z4), 16827-16837.
- [61] Xiang, B., Zhang, L. M., Zhou, L. R. He, Y. Y. Zhu, L. (2015). Field lateral load tests on slope-stabilization grouted pipe pile groups. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(4), 04014124. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001220](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001220)
- [62] Wan, Z. H., Dai, G. L. Gong, W. M. (2022). Study on the response of postside-grouted piles subjected to lateral loading in calcareous sand. *Acta Geotechnica*, 17(7), 3099-3115. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01392-6>
- [63] Vesić, AS. (1970). Load transfer in pile-soil systems. Duke University, Durham
- [64] Kulhawy, FH. (1991). Drilled shaft foundations. Boston, Springer, pp 537–552. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3928-5_14
- [65] Mahboubi Niazmandi, M., Mirasi, S., Hashemi jokar, M., & Momeni, M. (2023). 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*, 55(9), 1825-1844. <https://doi.org/10.22060/ceej.2023.21741.7812>
- [66] Tolooiyan, A., Gavin, K. (2013). The base resistance of non-displacement piles in sand. Part II: finite-element analyses. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 166(6), 549-560. <https://doi.org/10.1680/geng.11.00101>
- [67] JGJ 106-2014, Technical Code for Testing of Building Foundation Piles. Beijing, China Architecture & Building Press. Beijing,
- [68] Zhou, Z., Xu, F., Lei, J., Bai, Y., Chen, C., Xu, T., ... & Liu, T. (2021). Experimental study of the influence of different hole-forming methods on the bearing characteristics of post-grouting pile in Loess Areas. *Transportation Geotechnics*, 27, 100423. <http://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100423>
- [69] China Academy of Building Research. (2008). Technical code for building pile foundations. Beijing, Architecture and Building Press,
- [70] Piccione M, Carletti G, Diamanti, L. (1984). The piled foundations of the Al Gazira hotel in Cairo. In: *Proceedings of ICE conference on piling and ground treatment*, London, pp 93–100
- [71] Fu X, Zhou, Z. (2003). Study on bearing capacity of bored cast-insitu piles by post pressure grouting. In: *Proceedings of 3rd international conference on grouting and ground treatment*. ASCE, New Orleans, Louisiana, pp 707–715. [https://doi.org/10.1061/40663\(2003\)41](https://doi.org/10.1061/40663(2003)41)
- [72] Wan Z, Dai G, Gong W (2019) Field study on post-grouting effects of cast-in-place bored piles in extra-thick fine sand layers. *Acta Geotech*. <https://doi.org/10.1007/s11440-018-0741-7>

- [73] Zhou, Z., Zhu, S., Kong, X., Lei, J., Liu, T. (2019). Optimization analysis of settlement parameters for postgrouting piles in loess area of Shaanxi, China. *Advances in Civil Engineering*, 2019(1), 7085104. <https://doi.org/10.1155/2019/7085104>
- [74] Liu J, Zhang Y (2011) A calculation method discussion of vertical bearing capacity on end post-grouted drilled piles. *Adv Mater Res* 243–249:1033–1037. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.243-249.1033>.
- [75] 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>.

