

آزمایش بزرگ مقیاس و ارزیابی عددی پارامترهای موثر کشش ریزشمع در خاک ماسه‌ی لای‌دار (مطالعه موردی: شهر بندرعباس)

مقاله پژوهشی

عادل عساکره، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
محمدرضا ترابی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: asakereh@hormozgan.ac.ir

دریافت: ۹۸/۰۱/۲۳ - پذیرش: ۹۸/۰۴/۲۸

صفحه ۶۷-۷۸

چکیده

بمنظور بهبود و افزایش ظرفیت باربری خاک برای تحمل نیروی فشاری وزن و نیروی زلزله در صورت مناسب نبودن خاک ساختگاه در اغلب پروژه‌های عمرانی، باید خاک محل بهسازی گردد. از طرفی با توجه به نیروی بالابرنده بسیار بزرگ برخی سازه‌ها در حین وقوع زلزله یا نیروی باد، کنترل این نیروی کششی نیز الزامی می‌باشد. اجرای ریزشمع بدلیل سهولت فراوان اجرایی، امکان اجرا در چند جبهه مختلف کاری و اجرای همزمان کلیه مراحل ساخت، در مقایسه با روش‌های دیگر از سرعت بسیار بالایی برخوردار است. در این مطالعه به بررسی موردی استفاده از ریزشمع در بهسازی خاک ماسه لای‌دار، پروژه‌ای در بندرعباس پرداخته شده و مراحل مختلف آزمایشات بارگذاری ریزشمع شرح داده شده است. سپس به بیان جزئیات و نتایج تست کششی روی یکی از ریزشمع‌های محل پروژه پرداخته شده و پس از آن با مدلسازی عددی ریزشمع، تأثیر پارامترهایی مانند طول، قطر و ارتفاع لایه بهسازی شده خاک با استفاده از روش اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که با افزایش طول و قطر ریزشمع میزان نشست به طرز چشم‌گیری کاهش می‌یابد و با افزایش عمق بهسازی خاک نیز میزان نشست ریزشمع کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: ریزشمع، مدلسازی عددی، ظرفیت باربری، بهسازی خاک، عمق بهسازی

۱-مقدمه

خاک دارای برتری می‌باشد (مرندی و دیگران ۱۳۸۱). استفاده از ریزشمع‌ها در بسیاری از پروژه‌های ژئوتکنیکی رایج شده است. ریزشمع‌ها با قطر کم به طور کلی می‌توانند در فضاهای کوچک و کم عرض بدون محدودیت به لحاظ طول و زاویه نصب اجرا شوند. به دلیل همین مزایا ریزشمع‌ها به طور گسترده برای افزایش ظرفیت باربری و یا کاهش نشست در مهندسی پی به کار می‌روند (FHWA, 2005). به دلیل اندرکنش بین ریزشمع و خاک اطراف آن، که روی ناحیه‌ی گسیختگی زیر فونداسیون تأثیرگذار است، فونداسیون‌هایی که

ریزشمع به شمع‌های با قطر کوچک (کمتر از ۳۰ سانتی‌متر) اطلاق می‌گردد که پس از حفر چاه، مسلح کننده فولادی در داخل آن جایگذاری شده و بصورت درجا تزریق می‌شود. ریزشمع علاوه بر آنکه قابلیت تحمل بارهای قائم و افقی را به عنوان یک شالوده شمعی دارا است، باعث تسلیح بر جای زمین به دلیل تزریق در خاک اطراف می‌شود. لذا ریزشمع در مقایسه با سایر روش‌های تسلیح که فقط خصوصیات مکانیکی خاک را بهبود می‌دهند و نیز در مقایسه با شمع که فقط بعنوان عنصر باربر عمل می‌کند، بدلیل عملکرد مرکب (باربر بودن و اصلاح

ریزشمع بودند. در این تحقیق پارامتری برای مقایسه گروه ریزشمع‌های قائم و مایل بر اساس طول کل شمع در گروه و خمش اندازه‌گیری شده تحت بار وارده تعریف شد (Cadden et al., 2004). نتایج آزمایش‌های بارگذاری که در یک تحقیق دیگر بر روی ریزشمع‌های اجرا شده در ماسه شن‌دار انجام شدند نیز مؤید این امر هستند که چشم پوشی از مقاومت نوک، بیش از حد محافظه کارانه است. همچنین تحلیل نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که حالت بارگذاری (کششی یا فشاری) بر چگونگی انتقال بارهای متوسط در ریزشمع‌های دارای قطر کم تأثیرگذار می‌باشد (Holman et al., 2007). Gomez و همکارانش، با توجه به کاربرد گسترده ریزشمع‌ها برای تقویت پی‌های موجود، مطالعه‌ای را برای بررسی میزان مقاومت پیوستگی بین ملات ریزشمع و بتن پی ترتیب دادند. نتایج حاصل از آزمایش‌های بارگذاری این تحقیق با نتایج سایر آزمایش‌های انجام شده بر روی چنین اتصالاتی مقایسه شده و در نهایت پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده ارائه کردند (Gomez et al., 2002). Cushing و همکارانش، نتایج یکسری آزمایش‌های محوری فشاری که بر روی ریزشمع‌های منفرد واقع در سنگ انجام شده بودند را گزارش کردند و پیشنهاداتی نیز برای حداکثر جابجایی قائم قابل قبول تحت اثر بار طراحی (بدون وقوع ترک) در چنین ریزشمع‌هایی ارائه گردید (Cushing et al., 2004). Dapena و همکاران، مقدار نشست‌های تحکیمی حاصل از ریختن یک لایه خاک ۲ متری بر روی زمین محل احداث یک تصفیه خانه فاضلاب در شمال اسپانیا توسط، ثبت نمودند. ایجاد اصطکاک منفی در جداره ریزشمع‌های مورد استفاده به عنوان پی این سازه در اثر نشست‌های تحکیمی غیرقابل اجتناب است. مقادیر این نیروها نیز گزارش شده است (Dapena et al., 1991). Rodriguez-Marquez و Muhunthan، مدل اجزاء محدود ریزشمع‌های منفرد و گروه ریزشمع‌های تحت اثر بار استاتیکی را مورد مطالعه قرار دادند (Muhunthan et al., 2002). در تحقیق دیگری که توسط احمدی و همکاران، در دانشگاه گیلان انجام گردید ابتدا به منظور بررسی و مقایسه نتایج عددی و واقعی، دو مورد اجرایی از شمع و ریزشمع بر اساس پارامترهای واقعی موجود، به صورت عددی و توسط نرم افزار مدل شدند (احمدی گلسفیدی ۱۳۸۸). Shields، کماتش ریزشمع‌ها را مطالعه نموده و بارهای کماتشی حاصل از یک

به وسیله ریزشمع تقویت می‌شوند، دارای ظرفیت باربری به طور قابل توجهی بیشتر نسبت به فونداسیون‌های تقویت نشده می‌باشند (Hwang et al., 2017). علاوه بر این از تکنولوژی ریزشمع‌ها در کاربردهای دیگری هم استفاده می‌شود که از آن میان می‌توان به پایدارسازی گودها، شیروانی‌ها، شیب‌ها و لغزش‌ها و تحمل بارهای برکنش و دینامیکی وارده بر سازه‌ها اشاره نمود (نورزاد و دیگران ۱۳۸۷). از زمان ابداع تکنولوژی ریزشمع در دهه ۱۹۵۰ میلادی در ایتالیا، تحقیقات مختلفی در رابطه با این عناصر انجام شده است که با استفاده از تحلیل‌های عددی، مطالعات آزمایشگاهی و نیز آزمایش‌های میدانی به بررسی جنبه‌های گوناگون عملکرد ریزشمع‌ها در شرایط اجرایی و بارگذاری مختلف پرداخته‌اند. از جمله این تحقیقات می‌توان به استاندارد FHWA، مطالعات Juran و همکاران برای تهیه دستورالعمل‌های طراحی و اجرای ریزشمع در کاربردهای مختلف مهندسی اعم از تقویت پی سازه‌ها و تسلیح بر جای خاک اشاره نمود (Juran et al., 1999). آزمایش‌های بارگذاری بزرگ مقیاس در خاک ماسه شن‌دار، خاک‌های رسوبی و ماسه‌ای برای بررسی عملکرد ریزشمع‌ها و بررسی مقاومت جداره و نوک ریزشمع و چگونگی انتقال بار نیز انجام شده است. با توجه به اینکه ریزشمع‌ها هم در فشار و هم در کشش عملکرد مناسبی دارند، به آزمایش‌های کششی و آزمایش تحت اثر بارگذاری لرزه‌ای نیز توجه شده است (Holman et al., 2007, Stuedlein et al., 2008, Chiara et al., 2016). Misra و Chen، روشی تحلیلی برای طراحی ریزشمع‌های تحت کشش و فشار ارائه کرده‌اند. در مطالعه آنها، برای بررسی رفتار بار-جابجایی اینگونه ریزشمع‌ها، یک نمونه مدلسازی تحلیلی انجام شده که در آن رفتار متقابل خاک-شمع مد نظر قرار گرفته است (Misra et al., 2004). Tonon و Mammino، از روشی احتمال‌گرا برای طراحی ژئوتکنیکی و سازه‌ای ریزشمع‌های به کار رفته به عنوان پی در یک کارخانه در کاستاریکا استفاده نمودند و مسائل اجرایی خاصی را در این زمینه مد نظر قرار دارند (Tonon et al., 2004). یک پروژه عظیم دیگر برای تحقیق در مورد رفتار گروهی و شبکه‌ای ریزشمع‌ها برای کاربردهای نظامی در ایالات متحده توسط Bruce و Weinstein، به انجام رسید. آزمایشاتی که در مقیاس بزرگ در این پروژه انجام گردید، نشان دهنده مزیت نسبی استفاده از گروه ریزشمع‌ها و نیز سودمندی مشبک کردن

ارتفاع لایه بهسازی شده و تأثیر آن بر ظرفیت باربری کششی ریز شمع پرداخته شده است.

رابطه نیمه تجربی را با بارهای مجاز پیشنهادی توسط آیین نامه‌ها و دستورالعمل‌های طراحی مقایسه کرد (Shields 2007).

۲- آزمایش‌های ریز شمع مطابق با استاندارد FHWA

در پروژه‌های تقویت فونداسیون به وسیله ریز شمع، اجرای حداقل یک آزمایش بارگذاری ریز شمع با بار طراحی نهایی برای ارزیابی فرضیات طراحی و کفایت روش‌های اجرایی پیمانکار، به عنوان یک استاندارد صنعتی شناخته شده است. انجام آزمایش بارگذاری ریز شمع را می‌توان از طریق آزمایش شاهد بر روی ریز شمع‌های بهره‌بردار در طی دوره ساخت و اجرا بدست آورد.

آزمایش با بارگذاری محوری استاتیکی بر روی ریز شمع‌های منفرد انجام می‌شود. در این آزمایش‌ها معمولاً، بارگذاری محوری بر روی شمع ادامه دارد مادامی که، شمع بتواند حداکثر بار آزمایش از پیش تعیین شده را تحمل کند، یا به یک حد جابجایی محوری سازه‌ای از پیش تعیین شده رسیده و یا به آستانه خزش از پیش تعیین شده زمین برسد. با گرایش به سمت ظرفیت‌های بالاتر در ریز شمع‌های «باربر» ممکن است گسیختگی به شکل کاهش ناگهانی بار و افزایش در جابه‌جایی وابسته به گسیختگی سازه‌ای، رخ دهد. این موضوع مستلزم ملاحظات دقیق در طراحی ریز شمع‌های ظرفیت بالا می‌باشد (Wolosick et al., 2007). هدف از آزمایش در جای ریز شمع‌ها، بررسی این موضوع است که آیا ریز شمع، می‌تواند بارهای طراحی را بدون حرکت اضافی و با یک ضریب اطمینان کافی در طول عمر بهره‌برداری سازه، تحمل کند. همچنین این آزمایش‌ها برای بررسی کفایت حفاری، اجرا و عملیات تزریق پیمانکار، قبل و در حین ساخت شمع‌های بهره‌بردار می‌باشد (نیازی و دیگران ۱۳۹۱).

به طور کلی با توجه به کارکرد در نظر گرفته شده برای میکروپایل و برای اطمینان از فرض‌های طراحی صورت گرفته، آزمایش‌های مختلفی می‌توان انجام داد. این آزمایش‌ها عبارتند از: آزمایش بارگذاری فشاری، آزمایش بارگذاری کششی و آزمایش بارگذاری جانبی.

روش اعمال بار در آزمایش‌های بارگذاری به این صورت است که اگر ریز شمع برای بارهای کششی و فشاری طراحی شده باشد، پس بایستی در هر دو شرایط بارگذاری آزمایش شود. اگر قرار است، یک ریز شمع تحت هر دو بار فشاری و

با بررسی پیشینه تحقیقات انجام شده روی ریز شمع مشخص می‌گردد که، در آغاز، استفاده از ریز شمع‌ها تنها در تقویت بستر ضعیف ساختمان‌های موجود، مورد توجه قرار داشت. لیکن رفته‌رفته و با توسعه و اجرای این روش در کشورهای مختلف، دامنه کاربرد آنها به دیگر عرصه‌های مهندسی ژئوتکنیک نیز گسترش یافت. پس از انجام مطالعات گسترده، در حال حاضر، دستورالعمل ارائه شده توسط سازمان بزرگراه‌های آمریکا به عنوان مرجع قابل قبول و مورد استفاده طراحان و پیمانکاران اجرای ریز شمع می‌باشد. بخش گسترده‌ای از مطالعات انجام شده روی ریز شمع‌ها به کاربرد آنها برای بهسازی خاک کناره‌های پایه پل، مرمت و تقویت بستر سازه‌های تاریخی و تقویت فونداسیون‌های ساخته شده اشاره دارد. کاربرد ریز شمع‌ها در این موارد به صورت تکی و گروه ریز شمع مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در مطالعات اخیر به روش‌های نوین برای طراحی ریز شمع تحت کشش و فشار پرداخته شده است. مطالعات آزمایشگاهی و عددی برای بررسی ظرفیت باربری پی سطحی مسلح شده با ریز شمع نیز توسط برخی محققان انجام شده است. اما مدلسازی ریز شمع‌های تحت کشش کمتر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

با توجه به اهمیت فوق‌العاده و کاربردهای گسترده ریز شمع‌ها بررسی عملکرد آنها در مواجهه با بارگذاری‌های مختلف با استفاده از آزمایش‌های کوچک و بزرگ مقیاس و همچنین مدلسازی عددی، با توجه به اجرای ریز شمع‌ها در شرایط مختلف زمین شناختی، باربری و نیز پاسخ لرزه‌ای ریز شمع‌ها بسیار مهم می‌باشد. در این مطالعه ریز شمع‌های اجرا شده در پروژه‌ای در شهر بندرعباس مورد مطالعه قرار گرفته است. خاک محل پروژه ماسه لای دار می‌باشد. با توجه به نوع سازه‌ی در دست احداث در محل پروژه، که چند مناره با ارتفاع حدود ۷۰ متر می‌باشند، هدف از طراحی ریز شمع‌ها کنترل نیروی Uplift می‌باشد. یعنی عملکرد اصلی مورد انتظار از ریز شمع‌ها عملکرد کششی می‌باشد. به همین دلیل ابتدا مراحل و نتایج انجام آزمایش بزرگ مقیاس کشش روی یکی از ریز شمع‌ها ارائه شده است. در این تحقیق با استفاده از مدلسازی عددی اجزای محدود به بررسی تغییرات ارتفاع، قطر ریز شمع و نیز

طبق آیین‌نامه‌ی FHWA، بار نهایی اعمالی در آزمایش، هم برای آزمایش فشاری و هم آزمایش کششی برابر با ۱۶۰٪ درصد بار طراحی ریزشمع‌ها می‌باشد. در آزمایش کشش، کل جابجایی اندازه‌گیری شده در بار طراحی ریزشمع (DL) بایستی کمتر از مقادیر مجاز تغییر مکان (۲/۵۴ سانتیمتر) برای سازه‌ی ساختمان باشد. در این پروژه نیز بارگذاری تا بار طراحی و تا ۱/۶ برابر بار طراحی اعمال شده است. انتظار می‌رود که در آزمایش کشش، کل جابجایی اندازه‌گیری شده کمتر از مقادیر مجاز تغییر مکان (۲/۵۴ سانتیمتر) برای سازه‌ی ساختمان باشد. از طرفی بار کششی طراحی در نظر گرفته شده برای هر ریزشمع برای جلوگیری از پدیده Uplift فونداسیون مناره معادل ۳۲ تن می‌باشد. این مقدار از تحلیل عددی فونداسیون و المان‌های ریزشمع با سختی ۴۰ تن بر سانتیمتر حاصل گردیده است. بنابراین هر ریزشمع باید بتواند بیش از بار ۳۲ تن را بدون گسیختگی و با جابجایی در محدوده مجاز تحمل کند.

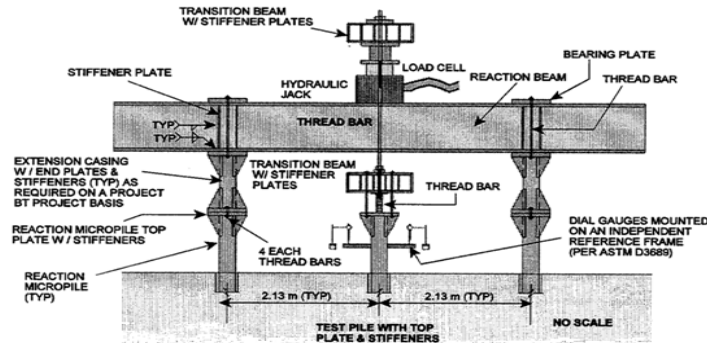
بارگذاری و باربرداری در چهار مرحله انجام شده است. در هر مرحله درصدی از بار کل به ریزشمع وارد شده است. بارگذاری در هر مرحله تا زمانی که تغییر مکان گنج ثابت می‌ماند، ادامه یافته است. در هر مرحله گنج تغییر مکان قرائت شده، سپس بار برداری تا رسیدن به بار صفر انجام شده است. فرآیند بارگذاری همانطور که در بخش‌های قبل نیز ذکر شد به صورت پله‌ای است. در هر پله حدود ۵ تن افزایش بار اعمال شده است. زمان نگهداشت بار تا ثابت شدن گنج تغییر مکان نیز حدود ۲ دقیقه می‌باشد. شکل ۱ طرح شماتیک سیستم آزمایش کشش را نشان می‌دهد.

کششی آزمایش شود، پیشنهاد می‌گردد که ابتدا آزمایش کششی صورت پذیرد. بدین ترتیب شمع می‌تواند در طی آزمایش فشاری استراحت کند، در حالی که بخشی از جابجایی رو به بالای باقیمانده در طی آزمایش کششی، هنوز رخ می‌دهند. اعمال بار را می‌توان طی یک سیکل به طور فزاینده تا ظرفیت مورد نیاز پیش برد، یا در طی چند سیکل در حین اعمال بار و حذف آن به حداکثر بار رسید. اگر هدف رسیدن به ظرفیت نهایی شمع باشد، ممکن است استفاده از بارگذاری چرخه‌ای ترجیح داده شود. تحلیل الاستیک و جابجایی‌های باقیمانده اندازه‌گیری شده در طی بارگذاری چرخه‌ای دیدگاه‌های ارزشمندی در مورد عملکرد شمع و مد گسیختگی تأمین خواهد کرد و هزینه‌های اضافی را به حداقل می‌رساند (نیازی و همکاران، ۱۳۹۱).

۲-۱- آزمایش کشش ریزشمع در خاک ماسه لای‌دار شهر بندرعباس

در پروژه مورد مطالعه در این تحقیق با توجه به نوع سازه‌ی در دست احداث در محل پروژه، که چند مناره با ارتفاع حدود ۷۰ متر می‌باشند، هدف از طراحی ریزشمع‌ها کنترل نیروی Uplift می‌باشد. یعنی عملکرد اصلی مورد انتظار از ریزشمع‌ها عملکرد کششی می‌باشد.

در این بخش به بیان جزئیات و نتایج تست کششی روی یکی از ریزشمع‌های محل پروژه پرداخته شده است. هدف از انجام آزمایش کشش، اطمینان حاصل کردن از طراحی و ساخت ریزشمع‌ها و تطابق مشخصات خاک پروژه با مشخصات اعلامی می‌باشد. نتیجه‌ی این اطمینان، ایستادگی مطلوب ریزشمع‌ها در برابر بار طراحی بدون تغییر مکان اضافی در طول عمر سرویس می‌باشد.



شکل ۱. طرح شماتیک سیستم آزمایش کشش (FHWA 2005)

۶۰ تن)، می‌باشد. شکل ۲ تا شکل ۴ تجهیزات آماده شده برای انجام تست کشش در محل پروژه مورد مطالعه را نشان می‌دهند.

تجهیزات آزمایش کشش شامل قاب عکس‌العمل، دو گیج اندازه‌گیری تغییر مکان‌های کوچک (با دقت اندازه‌گیری مقادیر کمتر از ۰/۲۵ میلی‌متر)، پایه گیج اندازه‌گیری، گیج فشار (با دقت ۵۰ کیلوپاسکال و جک اعمال بار (با قدرت اعمال بار

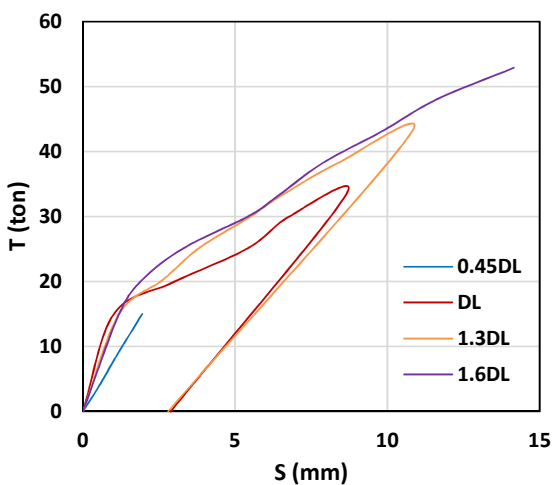


شکل ۲. سیستم قاب عکس‌العمل

هدف از انجام این آزمایش بررسی ایمنی سیستم ریزشمع در مقابل بارهای طراحی در زمان بهره‌برداری است. با توجه به شکل ۵ ریز شمع مورد نظر در بار ۴۰ تن تغییر مکانی به میزان ۱۰ میلی‌متر در کشش نشان می‌دهد که معادل سختی ۴۰ تن بر سانتی‌متر می‌باشد. این تغییر مکان و سختی کششی میکروپایل معادل میزان پیش‌بینی شده در طراحی می‌باشد. همچنین ظرفیت کششی این ریز شمع با توجه به نتایج آزمایش بیش از ۳۲ تن می‌باشد که در طراحی این ظرفیت ۳۲ تن پیش‌بینی شده بود. بنابراین، طراحی و مراحل اجرای ریزشمع قابل قبول می‌باشد.



شکل ۳. گیج قرائت تغییر مکان و پایه گیج



شکل ۵. منحنی نیرو تغییر مکان ریزشمع



شکل ۴. جک اعمال بار

۳- روش تحقیق

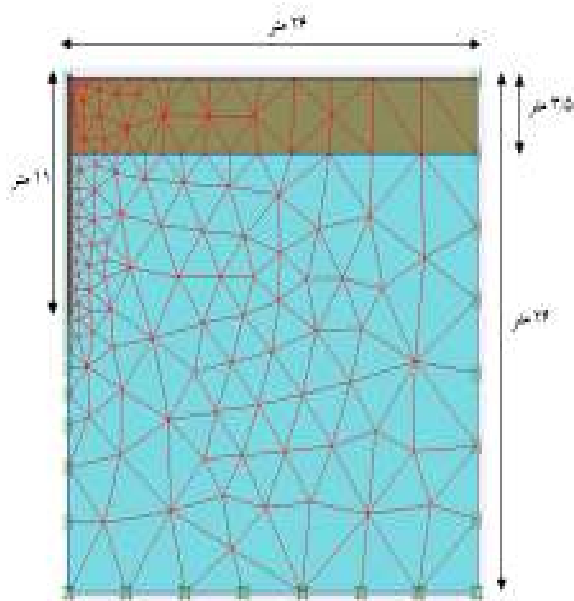
در این تحقیق به مطالعه موردی ظرفیت باربری کششی ریزشمع واقع در خاک ماسه‌ی لای‌دار پرداخته شده است. یکی از روش‌های مطالعه نحوه عملکرد و رفتار سازه‌های مختلف در مهندسی ژئوتکنیک، استفاده از مدل‌های عددی است. در گذشته استفاده از روش‌های آزمایشگاهی برای تحقیق، ترجیح داده می‌شد، ولی به مرور زمان با گسترش روش‌های عددی و همچنین پیدایش کامپیوترها با قدرت پردازش بالا، مدلسازی عددی جایگاه واقعی خود را پیدا نموده است. نرم افزار PLAXIS یک نرم‌افزار تحلیل عددی است که به روش المان محدود مسائل ژئوتکنیکی را مدل سازی و تحلیل می‌کند. این نرم‌افزار یک برنامه کامپیوتری المان محدود دو بعدی با هدف بخصوصی است که برای انجام آنالیز پایداری و تغییرشکل در کاربردهای مختلف ژئوتکنیکی استفاده می‌شود (Plaxis Manual).

جهت شبیه سازی محیط خاک و ریزشمع در تحلیل مجموعه ای از فرضیات بصورت ثابت در نظر گرفته شده است که عبارتند از:

۱. خاک از نوع ماسه لای‌دار است.
 ۲. تحلیل بصورت دو بعدی و متقارن محوری و همچنین در شرایط اعمال بار انجام پذیرفته است.
 ۳. محیط خاک الاستوپلاستیک و همسانگرد می‌باشد و مدل رفتاری خاک، موهر - کولمب در نظر گرفته شده است.
 ۴. المان ریزشمع از مدل رفتاری Linear-Elastic تبعیت می‌کند.
 ۵. جهت انجام مدلسازی از المان‌های مثلثی شکل با ۱۵ گره استفاده شده است.
- خاک مورد مطالعه به دو بخش کلی تقسیم می‌شود. از عمق صفر الی ۳ متر خاک ML بوده که بوسیله اختلاط خاک با دوغاب سیمان بهسازی شده و مابقی خاک SM است. مشخصات مکانیکی خاک با توجه به نتایج آزمایشگاهی بدست آمده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. پارامترهای مکانیکی خاک (گزارش ژئوتکنیک ۱۳۹۲)

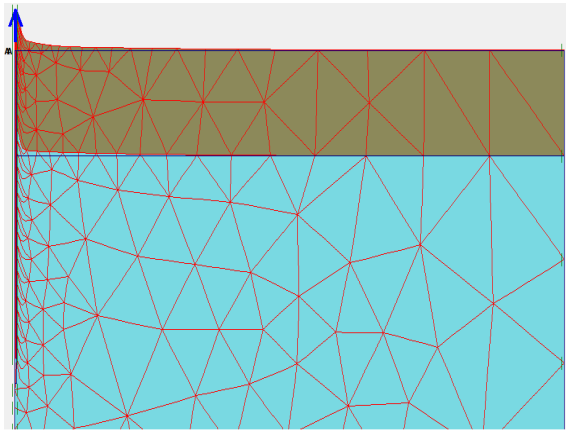
عمق	γ (KN/m ³)	E(KN/m ²)	ν	C (KN/m ²)	φ (°)	ψ (°)
۰ - ۳/۵	۲۰	۲۰۰۰۰۰	۰/۲۵	۵۰۰	۱۷	۱۱
۳/۵ - ۲۰	۱۶	۲۰۰۰۰	۰/۳	۰	۳۰	۱۲



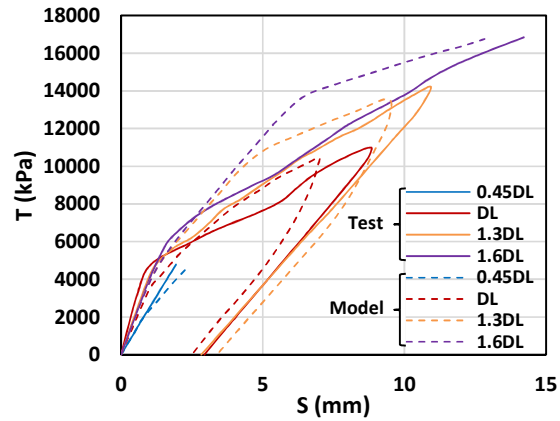
شکل ۶. شرایط مرزی و مش بندی مدلسازی عددی

بدون شک مهمترین مسئله در هر تحلیل عددی نحوه تعریف شرایط مرزی محیط و فرضیات بکار گرفته شده در آن است. هر چه این فرضیات بیشتر به حالت طبیعی شباهت داشته باشند، نتایج حاصل از تحلیل عددی نیز به نتایج واقعی نزدیکتر خواهد بود. به همین دلیل همواره محققان سعی بر آن داشته اند تا با شناخت کامل رفتار نواحی مرزی در نمونه های آزمایشگاهی، تمامی شرایط موجود را در مدلسازی عددی وارد آورند. شرایط مرزی و مش بندی انتخاب شده در این تحقیق بصورت شکل ۶ در نظر گرفته شده است.

در این بخش با استفاده از نرم افزار PLAXIS 2D، به مدلسازی ریزشمع مطابق آزمایش انجام شده، پرداخته شد. در شکل ۷ نتایج بدست آمده از نمودار کشش-نشست مدلسازی‌های فوق با نتایج آزمایشگاهی مربوطه مقایسه شده است. در شکل ۸ تغییرشکل مدل عددی در اثر کشش زیرشمع نمایش داده شده است.



شکل ۸. تغییر شکل حاصل از مدلسازی عددی



شکل ۷. مقایسه منحنی کشش-نشست مدلسازی عددی و مطالعه آزمایشگاهی

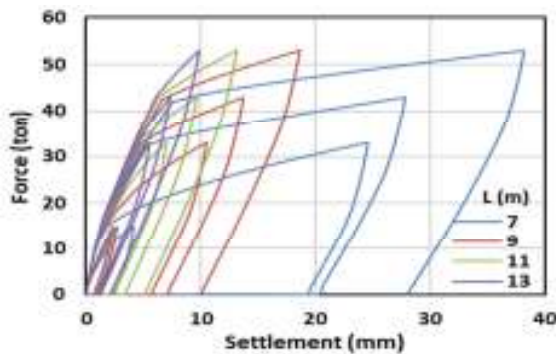
جدول ۲. مقادیر پارامترهای مورد بررسی در مطالعه پارامتری

ردیف	پارامترهای مورد بررسی			تعداد تحلیل
	طول ریزشمع (متر)	قطر ریزشمع (سانتیمتر)	ارتفاع لایه بهسازی (متر)	
۱	۱۱	۲۰	۳/۵۰	۱
۲	۱۳ و ۹، ۷، ۵	۲۰	۳/۵۰	۴
۳	۱۱	۴۰، ۳۵، ۳۰، ۲۵، ۱۵	۳/۵۰	۵
۴	۱۱	۲۰	۵/۲۵ و ۱/۷۵، ۰	۴

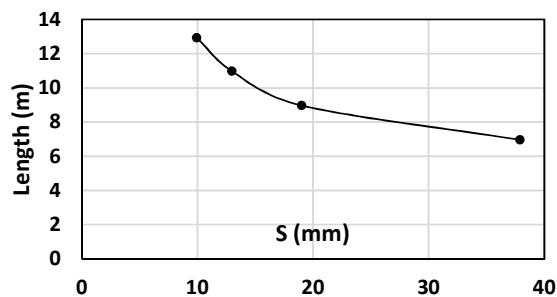
۴- تحلیل نتایج

در این بخش به بررسی تغییرات ارتفاع، قطر ریزشمع و نیز ارتفاع لایه بهسازی شده (مطابق جدول ۲) و تأثیر آن بر ظرفیت باربری کششی ریزشمع پرداخته می‌شود. در جدول ۲، ردیف یک، مدلسازی مینا می‌باشد که مطابق با مشخصات آزمایش بزرگ مقیاس و سایر ردیف‌ها مربوط به مطالعات پارامتریک است.

در شکل ۹ نمودارهای بار-نشست در ۴ دوره بارگذاری و باربرداری به میزان ۰/۴۵، ۱، ۱/۳۰ و ۱/۶۰ برابر بار طراحی برای ریزشمع با قطر ۰/۲ متر و ارتفاع ۵، ۷، ۹، ۱۱ و ۱۳ متر مشاهده می‌شود. شکل ۱۰ اثر تغییرات ارتفاع ریزشمع در بازه ۵ الی ۱۳ متر را بر نشست نشان می‌دهد. با افزایش طول ریزشمع، میزان نشست، به طرز چشمگیری کاهش یافته است. تغییر نشست به واسطه‌ی تغییر طول (۷ متر به ۱۳ متر ارتفاع

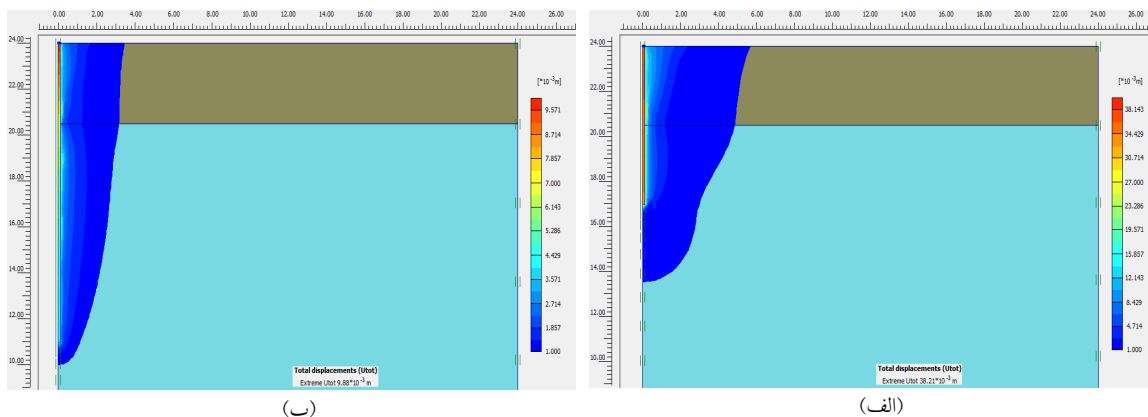


شکل ۹. منحنی نیرو-نشست به ازای تغییرات طول ریزشمع

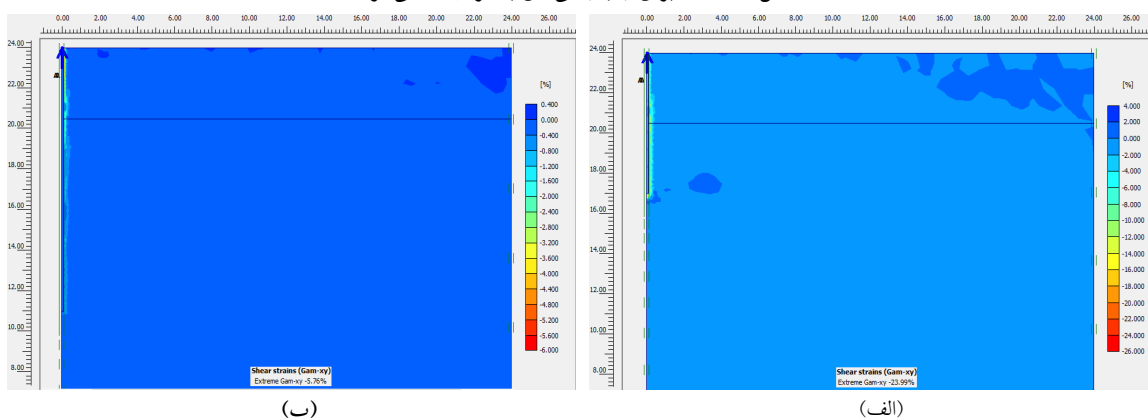


شکل ۱۰. منحنی نشست خاک به ازای تغییرات طول ریزشمع

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ کانتورهای جابه‌جایی کلی و کرنش برشی برای ریزشمع با طول‌های مختلف ارائه شده است. جهت مقایسه بهتر جابجایی‌های عمودی، این کانتورها برای جابه‌جایی بیشتر از ۱ میلی‌متر نیز ترسیم و ارائه گردیده است سایر پارامترهای ریزشمع مطابق ردیف ۱ از جدول ۲ می‌باشد.



شکل ۱۱. جابجایی کلی حاصل از مدلسازی عددی ریزشمع با طول (الف) ۷ متر و (ب) ۱۳ متر (نمایش داده شده برای جابه‌جایی‌های بیشتر از ۱ میلی‌متر)

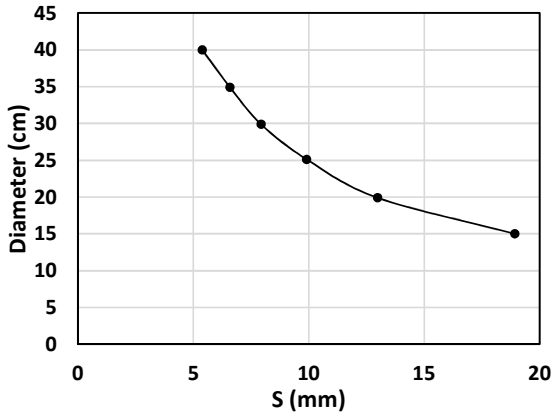


شکل ۱۲. کرنش برشی حاصل از مدلسازی عددی ریزشمع با طول (الف) ۷ متر و (ب) ۱۳ متر

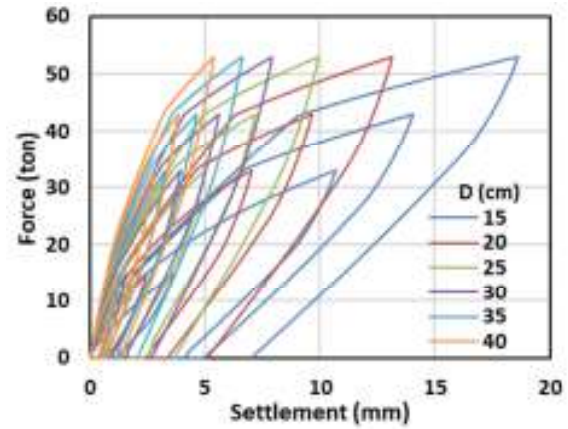
ارتفاع ثابت ۱۱ متر و قطرهای ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ سانتی‌متری می‌باشد. شکل ۱۴ اثر تغییرات قطر ریزشمع در بازه

شکل ۱۳ نشان‌دهنده نمودارهای بارگذاری و باربرداری تحت بار ۱/۴۵، ۱، ۱/۳۰ و ۱/۶۰ برابر بار طراحی برای ریزشمع با

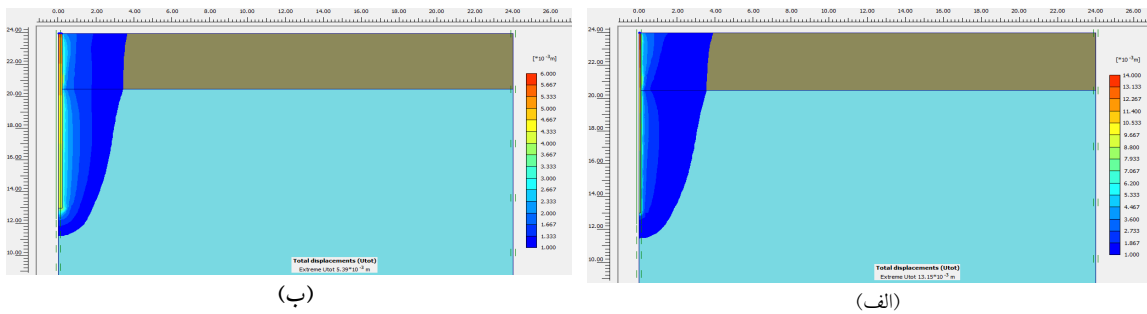
شکل ۱۳. منحنی نیرو-نشست به ازای تغییرات قطر ریزشمع



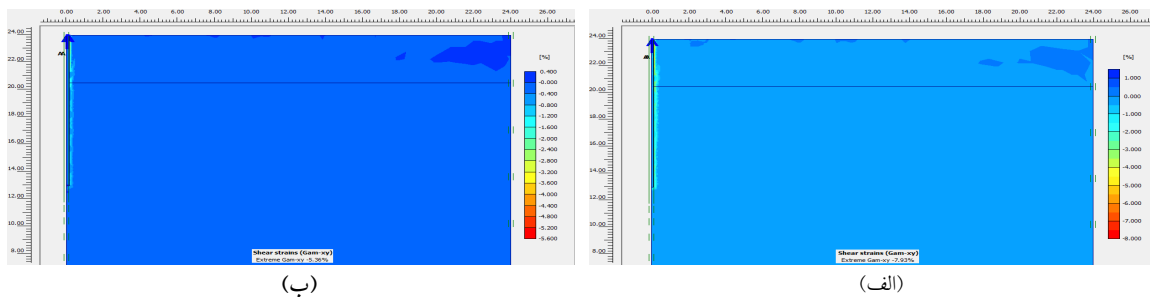
شکل ۱۴. منحنی نشست خاک به ازای تغییرات قطر ریزشمع



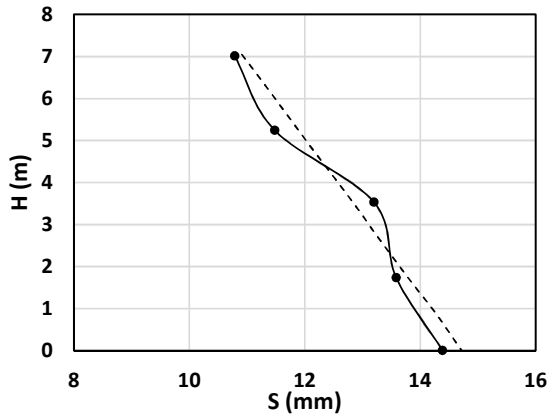
شکل های ۱۵ و ۱۶ کانتورهای جابجایی کلی و کرنش برشی برای ریز شمع با قطرهای ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ سانتی متر ارائه شده است. جهت مقایسه بهتر جابه‌جایی‌های عمودی، این کانتورها برای جابه‌جایی بیشتر از ۱ میلی‌متر نیز ترسیم و ارائه گردیده است. سایر پارامترهای ریزشمع مطابق ردیف ۱ از جدول ۲ می‌باشد.



شکل ۱۵. جابه‌جایی کلی حاصل از مدلسازی عددی ریزشمع با قطر (الف) ۲۰ سانتی‌متر و (ب) ۴۰ سانتی‌متر (نمایش داده شده برای جابه‌جایی‌های بیشتر از ۱ میلی‌متر)



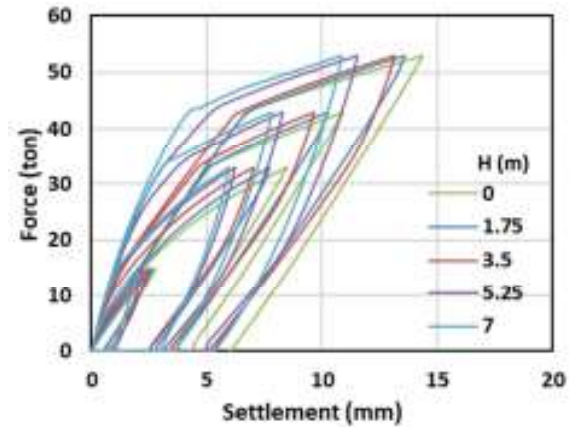
شکل ۱۶. کرنش برشی حاصل از مدلسازی عددی ریزشمع با قطر (الف) ۲۰ سانتی‌متر و (ب) ۳۵ سانتی‌متر



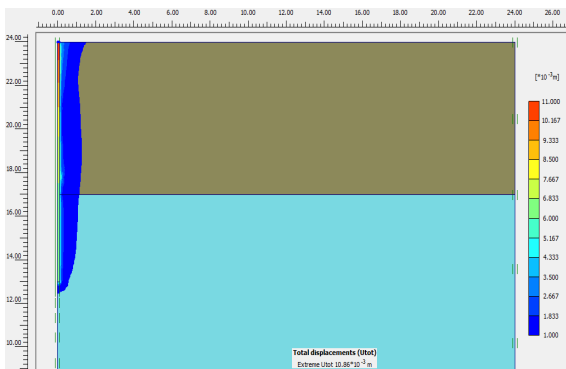
شکل ۱۸. منحنی نشست خاک به ازای تغییرات ارتفاع بهسازی شده خاک

شکل ۱۹ کانتورهای جابجایی کلی برای ریز شمع واقع در خاک بهسازی شده به عمق های صفر، ۱/۷۵، ۳/۵، ۵/۲۵ و ۷ متر ارائه شده است. جهت مقایسه بهتر جابجایی های عمودی، این کانتورها برای جابه جایی بیشتر از ۱ تر نیز ترسیم و ارائه گردیده است.

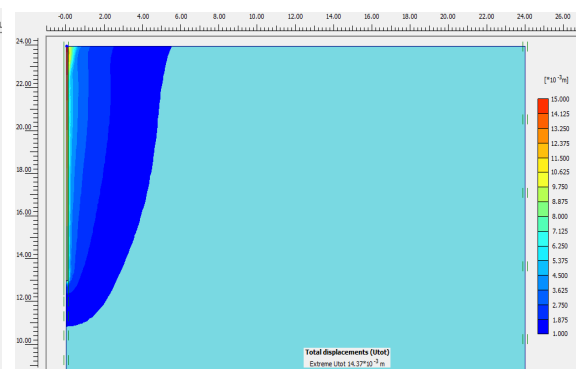
در شکل ۱۷ نمودارهای بار-نشست ریزشمع واقع در خاک بهسازی شده با ارتفاع لایه بهسازی صفر، ۱/۷۵، ۳/۵۰، ۵/۲۵ و ۷ متر ترسیم شده است. شکل ۱۸ اثر تغییرات ارتفاع لایه بهسازی شده در بازه صفر الی ۷ متر را بر نشست ریزشمع نشان می دهد. با افزایش عمق بهسازی خاک، میزان نشست ریزشمع کاهش می یابد و تغییر نشست به واسطه ی این تغییر عمق (صفر به ۷ متر) ۳/۶ میلی متر، حدود ۲۵ درصد کاهش را نشان می دهد.



شکل ۱۷. منحنی نیرو- نشست به ازای تغییرات ارتفاع بهسازی شده لایه خاک



(ب)



(الف)

شکل ۱۹. جابه جایی کلی حاصل از مدل عددی ریزشمع واقع در خاک (الف) بدون بهسازی و (ب) بهسازی شده با ارتفاع ۷ متر (نمایش داده شده برای جابه جایی بیشتر از ۱ میلی متر)

۵- نتیجه گیری

۱. با افزایش طول ریزشمع میزان نشست به طرز چشمگیری کاهش می یابد. تغییر نشست به واسطه ی تغییر طول (۷ متر به ۱۳ متر ارتفاع شمع) ۲۸ میلی متر می باشد. به عبارتی حدود ۷۴ درصد کاهش را نشان می دهد.

در این مطالعه به بررسی موردی استفاده از ریزشمع در فونداسیون پروژه ای در شهر بندرعباس و مطالعات پارامتریک بر روی این سیستم پرداخته شده است. خلاصه نتایج این تحقیق به شرح پیوست می باشد.

-نورزاد، ر.، سقایی، غ.، (۱۳۸۷)، "بررسی رفتار لرزه‌ای ریز شمع‌های مایل"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

- Cushing, A. G., Stonecheck, S. A., Campbell, B. D., Dodds, S. D., (2004), "An Evaluation of the Load-Displacement Behavior and Load Test Interpretation of Micro piles in Rock", Proceedings of 5th International Conference on Case Histories and Geotechnical Engineering, New York.

- Dapena, E., Diaz-Oritz, J. M., Gonzalez, C., Soriano, A., (1991), "Settlements in a Building with Micropile Foundations", Proceedings of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.

- Gomez, J., Cadden, A. W., Traylor, R. P., Bruce, D. A., (2002), "Connection Capacity between Micro piles and Concrete Footings: Interpretation of Test Results and Design Recommendations".

- Holman, T. P., Barakauskas, B. D., (2007), "Mechanics of Micro pile Performance from Instrumented Load Tests", Proceedings of the 7th International Symposium on Field Measurements in Geo mechanics.

-Plaxis 2D Ver 8, "Manual", ISBN 90-5809508-8, Delft University of Technology & PLAXIS b.v., The Netherlands.

-Shields, D. R., (2007), "Buckling of Micropiles", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 133, Iss. 3, Technical Notes.

-Wolosick, J. R., Bonar, E., Nufer, P. J., (2007), "Micropile Foundation Repair and Underpinning, Arts and Science Museum, University of Puerto Rico, Mayaguez", The 8th International Workshop on Micro piles, Toronto, Ontario, Canada.

-Cadden, A. W. Gomez, J. E. Bruce, D. Armour, T., (2004), "Micro piles: Recent Advances and Future Trends", ASCE GSP No. 125, Reston, Virginia.

۲. با افزایش طول ریز شمع، شیب منحنی کاهش می‌یابد، که می‌تواند مبین این موضوع باشد که با افزایش عمق و عبور از طول بحرانی ریز شمع ($L'=D15$) اثر افزایش ضریب اصطکاک کاهش یافته و بنابراین تغییر ظرفیت باربری شمع، تنها تحت اثر ارتفاع شمع می‌باشد.

۳. با افزایش قطر ریز شمع میزان نشست به طرز چشمگیری کاهش می‌یابد. تغییر نشست به واسطه‌ی تغییر قطر (۱۵ به ۴۰ سانتی‌متر طول شمع) ۱۳/۶ میلی‌متر، حدود ۷۲ درصد کاهش را نشان می‌دهد. همچنین با افزایش قطر ریز شمع، شیب منحنی قطر ریز شمع-نشست کاهش می‌یابد.

۴. با در نظر گرفتن ریز شمع با ارتفاع ۱۱ متر و قطر ۲۰ سانتی‌متر، با افزایش دو متر ارتفاع یا افزایش پنج سانتی‌متر قطر ریز شمع، کاهش نشست به میزان تقریبی سه میلی‌متر حاصل می‌گردد. که با توجه به مجموع هزینه‌های اجرا و مصالح مصرفی، افزایش قطر ریز شمع مقرون به صرفه‌تر می‌باشد. البته باید توجه داشت که مطابق تعریف ریز شمع طبق آئین‌نامه‌ی FHWA، قطر ریز شمع به ۳۰ سانتیمتر محدود می‌گردد.

۵. با افزایش عمق بهسازی خاک، میزان نشست ریز شمع کاهش می‌یابد. تغییر نشست به واسطه‌ی این تغییر عمق (صفر به ۷ متر) ۳/۶ میلی‌متر، حدود ۲۵ درصد کاهش را نشان می‌دهد.

۶- مراجع

- احمدی گل‌سفیدی، م. (۱۳۸۸)، "ارزیابی توان باربری ریز شمع‌ها با استفاده از نتایج آزمایشات بارگذاری"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه گیلان.

- نیازی، غ. ر. محقق، م. و محمدخانی، ب. (۱۳۹۱)، "مجموعه روش‌های بهسازی خاک راهنمای جامع طراحی و اجرای ریز شمع‌ها"، ترجمه آیین‌نامه FHWA، چاپ اول.

-مرندی، م. باقری پور، م. کیوانی‌فر، م. (۱۳۸۱)، "میکروپایل و نقش آن در بهسازی زمین"، ششمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تهران.

- "گزارش ژئوتکنیک پروژه احداث مسجد جامع بندرعباس" (۱۳۹۲)، شرکت مهندسین مشاور ژئوتکنیک کاوش آزما پیرشین.

- Misra, A. Chen, C. H., (2004), "Analytical Solution for Micro pile Design under Tension and Compression", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 22, pp. 199-225.
- Muhunthan, B. Itani, R., (2002), "An Investigation of Soil-Interaction and Performance of Micro piles for Retrofits", Research, Department of Civil and Environmental Engineering, Washington State University, Pullman, WA, USA.
- Stuedlein, A. W. Gibson, M. D., Horvitz, G. E., (2008), "Tension and Compression Micropile Load Tests in Gravelly Sand", 6th International Conference on Case Histories and Geotechnical Engineering, Arlington, VA.
- Tonon, F. Mammino, A., (2004), "Reliability-Based Design and Construction Issues for a Micropile Foundation in Costa Rica", *ASCE Practical Periodical on Structural Design and Construction*, Vol. 9, No. 4.
- Chiara Capatti, M., Dezi, F., Morici, M., (2016), "Field tests on micro piles under dynamic lateral loading", *procedia Engineering*, Vol. 158, pp. 236 – 241.
- FHWA, (2005), "Micro-pile Design and Construction. United States Department of Transportation", No. FHWA NHI-05-039, December, pp. 5-1–5-18.
- Holman, T. P., Barakauskas, B. D., (2007), "Mechanics of Micro pile Performance from Instrumented Load Tests", *Proceedings of the 7th International Symposium on Field Measurements in Geo mechanics*.
- Hwang, T.H. Kim, K.H. Shin, J.H., (2017), "Effective installation of micro piles to enhance bearing capacity of micro piled raft", *Soils and Foundations*, Volume 57, Issue 1, February, pp. 36-49.
- Juran, I., Bruce, D. A. DiMillio, A. Benslimane, A., (1999), "Micro piles: the State of Practice, Part II: Design of Single Micropiles and Groups and Networks of Micropiles", *Ground Improvement*, Vol. 3, pp. 89-110.