



بهبود ظرفیت باربری پی سطحی با استفاده از ریزشمع مایل

شادان عابدینی¹، جعفر بلوری بزاز²

1- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

shadan.abedini@mail.um.ac.ir

2- دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

bolouri@um.ac.ir

bolouri@um.ac.ir

خلاصه

امروزه با افزایش جمعیت و کاهش منابع تجدیدناپذیر نیاز بشر به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر افزایش یافته است. یک نمونه موفق از این انرژی‌ها، نیروی باد است که بوسیله توربین‌های بادی قابل استخراج می‌باشد. اجرا و نصب توربین‌های بادی از پیچیدگی‌های خاصی برخوردار است. از مهمترین اجزای سازه‌ای توربین بادی پی آن است که در اثر توام بار افقی ناشی از باد و بار قائم ناشی از وزن خود توربین قرار می‌گیرد. لذا طراحی پی باید به نوعی باشد تا در برابر بار ترکیبی مقاومت کافی داشته باشد. از طرف دیگر خود پی به تنهایی مقاومت چندانی در برابر بار افقی ندارد و نیاز است تا با استفاده از عناصر سازه‌ای دیگر آن را تقویت کرد. یکی از این عناصر ریزشمع‌ها هستند که به سبب قابلیت اجرا آسان و هزینه‌های کم محبوب هستند. در این مقاله نیز بر روی پی تقویت شده با ریزشمع، در طول، زاویه و تعداد مختلف تحقیق شده است تا با رسیدن به حالت بهینه‌ای از چنیش، ظرفیت باربری پی را با کمترین هزینه افزایش داد. نتایج این تحقیق نشان داده است که هر چه طول ریزشمع‌ها افزایش پیدا کند میزان بهبود ظرفیت باربری بیشتر می‌شود. همچنین زاویه بهینه اجرای ریزشمع 30 درجه می‌باشد. کلمات کلیدی: ریزشمع، ظرفیت باربری پی، بارگذاری ترکیبی، حالت بهینه

1. مقدمه

ریزشمع‌ها عناصری با قطر کم هستند (معمولا کمتر از 30 cm) که همراه با ملات سیمانی یا بدون آن در محل پروژه اجرا می‌شوند. ریزشمع‌ها برای اولین مرتبه بوسیله شخصی به نام Lizzi [1] در ایتالیا و در سال 1950 میلادی استفاده شد و تکنولوژی آن به سرعت به تمامی جهان گسترش یافت. امروزه نیز ریزشمع‌ها به دلیل مزایایی مانند نصب آسان، ظرفیت باربری بالا، دوام بالا در خاک‌های مختلف، نشست کم و آلودگی صوتی کم در هنگام اجرا، از محبوبیت بالایی برخوردار هستند. بر اساس نحوه استفاده، ریزشمع‌ها به دو بخش تقسیم بندی می‌شوند. بخش اول به منظور بهسازی خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند و در بخش دوم خود ریزشمع بصورت مستقیم به عنوان عضو باربر ایفای نقش می‌کند. همچنین با توجه به روش تزریق ملات سیمان ریزشمع‌ها به چهار گروه A، B، C و D تقسیم بنده می‌شوند [1-3]. ملات سیمانی مورد استفاده در ریزشمع توزیع نیروی وارد به ریزشمع از پی در خاک است.

از جمله پژوهش‌های انجام شده در این زمینه میتوان به تحقیق صورت گرفته توسط Han و همکاران [4] اشاره کرد که در آن به بررسی رفتار ریزشمع تک در شرایط فشاری و کششی پرداخته اند. همچنین Choi و همکاران [5] به بررسی دو نوع ریزشمع پرداخته‌اند که در یکی از آن‌ها ملات سیمان بصورت ثقلی داخل گمانه ریزشمع ریخته شده است و در نوع دیگر با استفاده از فشار، ملات به درون گمانه تزریق شده است. این تحقیق نشان داد که اجرای تزریق بصورت فشاری در مقایسه با حالت ثقلی باعث افزایش ظرفیت باربری تا 20 درصد می‌گردد. تقویت ظرفیت باربری پی نیز توسط پژوهشگران مختلف از جمله Tsukada و همکاران [6]، Bhattacharjee و همکاران [7] و دیگر پژوهشگران بررسی شده است. در این میان Han و همکاران [8 و 9] روشی را برای طراحی پی‌های تقویت شده با استفاده از ریزشمع پیشنهاد کرده است. همچنین Garhy و همکاران [9] به بررسی رفتار



پی تقویت شده با ریزشمع در خاک رسی پرداخته‌اند. هدف از تحقیق آن‌ها دستیابی به میزان بهسازی ظرفیت باربری و نشست پی بوده است. Esmaeili و همکاران [۱۰] نیز به تحقیق بر روی خاکریزهای تقویت شده با ریزشمع، به صورت عددی و آزمایشگاهی، پرداخته و به یک چینه بهینه رسیده‌اند که ضریب اطمینان خاکریز را نیز تامین می‌کند.

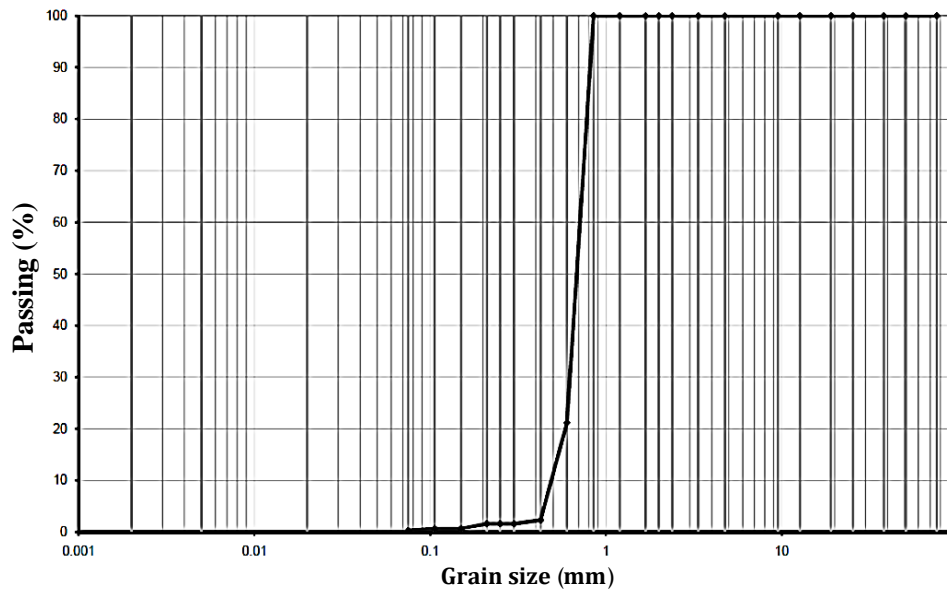
Nguyen و همکاران [۱۱] بر روی اثر متقابل ریزشمع و پی تحت بار قائم در خاک رسی پرداخته‌اند. در این تحقیق آن‌ها با بهره‌گیری از روش‌های عددی و همچنین نتایج آزمایش سانتریفیوژ به بررسی تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل نسبت فاصله ریزشمع‌ها (s/d)، طول به قطر (l/d) و وزن مخصوص نسبی خاک و ... بر رفتار پی پرداخته شده است.

تحقیق حاضر به بررسی ظرفیت باربری قائم پی تقویت شده با استفاده از ریزشمع در خاک ماسه‌ای می‌پردازد. در این تحقیق ریزشمع‌ها در چینه‌های مختلف همراه با طول و زاویه متفاوت به پی متصل شده و تاثیر هر کدام از این پارامترها بر ظرفیت باربری پی بررسی شده است.

۲. روش انجام پژوهش

۱.۲. مدلسازی خاک

در این تحقیق به منظور بررسی ظرفیت باربری پی تقویت شده با ریزشمع و تاثیر پارامترهای مختلف بر آن ابتدا نیاز است تا مدل خاک شبیه‌سازی شود. بدین منظور از یک جعبه فلزی به طول ۲ متر، عرض یک متر و به ارتفاع ۱ متر استفاده شده است. خاک مورد استفاده در این تحقیق ماسه ۱۶۱ فیروزکوه بوده است که نمودار دانه‌بندی آن در شکل ۱ و جدول مشخصات آن در جدول ۱ موجود است. تراکم نسبی مورد نظر در این تحقیق ۷۰ درصد بوده است که مشخصات مقاومتی آن نیز در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱- نمودار دانه بندی خاک ماسه‌ای

جدول ۱- مشخصات ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

ردیف	پارامتر	استاندارد آزمایش	نتیجه آزمایش
1	دانه بندی	ASTM D6913 , ASTM D422	شکل 1
2	طبقه بندی	ASTM D2387	SP
3	G _s	ASTM D854	2.71
4	وزن مخصوص بیشینه	ASTM D4253	1.323 gr/cm ³
5	وزن مخصوص کمینه		1.585 gr/cm ³
6	وزن مخصوص خاک		1.5 gr/cm ³
7	تراکم نسبی		71%

لازم به ذکر است که به منظور دستیابی به این تراکم نیازمند بارش ماسه از ارتفاع مشخص بوده است که در این تحقیق از دستگاه بارش ساخته شده در دانشکده مهندسی گروه دانشگاه فردوسی مشهد [۱۲] استفاده شده که در آن با تنظیم ارتفاع، تغییر سرعت و قطر مجرای بارش می‌توان به تراکم مورد نظر دست یافت.

۲.۲. مدلسازی پی و ریزشمع‌ها

به منظور مدلسازی پی از یک ورق فولادی مربعی به بعد ۲۰ سانتی متر و ضخامت ۱ سانتی متر بهره جسته شد. همچنین از میلگرد ساده به قطر ۱۲ میلی متر که بوسیله ماسه اندود شده است، به جهت مدلسازی ریزشمع در طول‌های ۴۰ و ۶۰ سانتی متر استفاده شده است. همچنین ریزشمع‌ها در زوایای ۰، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ درجه نصب شده‌اند. در شکل ۲ نمایی از ریزشمع زاویه ۳۰ درجه نمایش داده شده است.



شکل ۲- پی تقویت شده با ۴ ریزشمع در زاویه ۳۰ درجه

۳.۲. بارگذاری و تعیین تغییر شکل

به منظور بارگذاری پی از یک مخزن آب به گنجایش ۵۰۰ لیتر که بر روی یک قاب نصب شده است استفاده گردیده است. این مخزن توسط ریل‌های تعبیه شده در داخل قاب قابلیت جابجایی بصورت قائم دارد. همچنین به منظور جابجا کردن آن چرخ‌هایی در زیر قاب جای گذاری شده است. همچنین به منظور ایجاد فضای لازم برای نصب وسایل اندازه‌گیری از یک صفحه صلب همراه با چند میلگرد بهره جسته شد. به منظور تعیین میزان نشست پی در اثر بارگذاری، از ساعت اندیکاتور با دقت دو هزارم اینچ استفاده شده است. این ساعت در مرکز پی و در زیر قاب صلب انتقال نیرو، تنظیم شده تا در هنگام

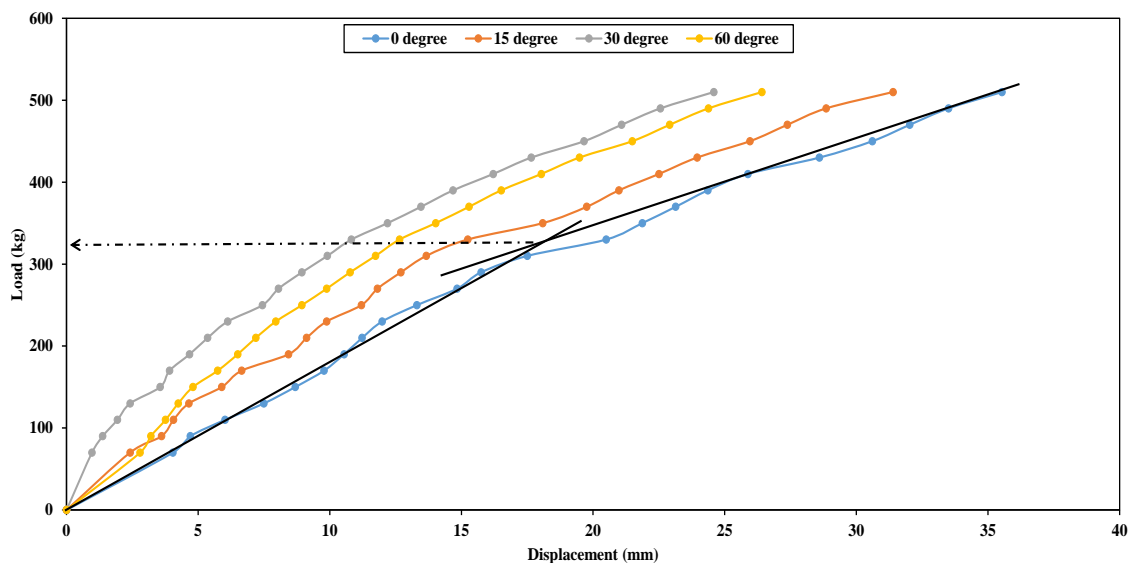
نشست پی میزان جابجایی آن را اندازه بگیرد. به منظور بارگذاری مخزن آب با استفاده از پمپ آب به تدریج پر شده و همزمان در حجم‌های مشخص قرائت گنج تغییر شکل انجام می‌شود. در شکل ۳ نمایی از دستگاه بارگذاری و وسایل اندازه‌گیری نشان داده شده است.



شکل ۳- نمایی از قاب بارگذاری و وسایل اندازه‌گیری

۳. نتایج و تفاسیر

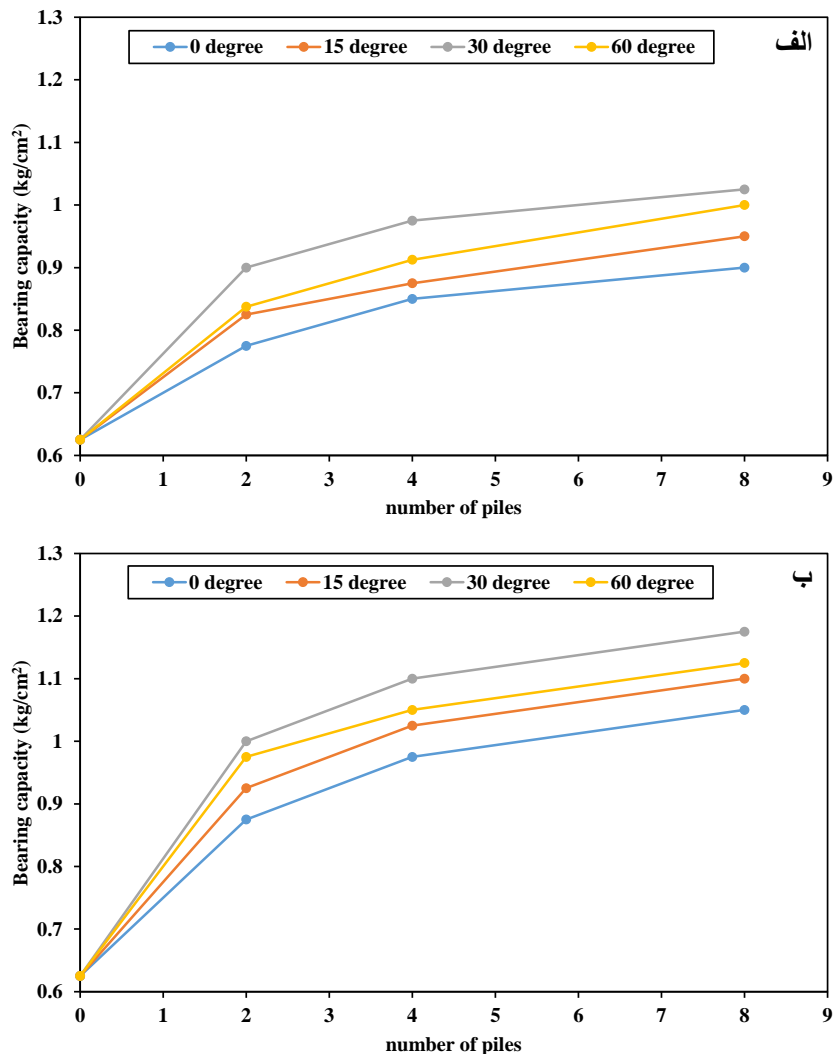
به منظور بررسی نتایج ابتدا نیاز است تا ظرفیت باربری پی را با استفاده از نمودار بار-نشست بدست آوریم. بدین جهت از روش اینترکشن استفاده شده است که در آن با استفاده از دو خط مماس به نمودار و محل تلاقی آن‌ها ظرفیت باربری پی بدست می‌آید. در شکل ۴ نمودار بار-نشست پی دارای ۲ ریزشمع در زاویه‌های مختلف به همراه نحوه تعیین ظرفیت باربری نهایی نمایش داده شده است. در ادامه تاثیر هر یک از پارامترها بر ظرفیت باربری پی تقویت شده با ریزشمع بررسی شده است.



شکل ۴- منحنی بار-نشست پی دارای دو ریزشمع

۱.۳. بررسی تأثیر تعداد ریزشمع بر ظرفیت باربری

شمع‌ها معمولاً از طریق ظرفیت اصطکاکی و ظرفیت نوک شمع در تحمل باربری ایفای نقش میکنند در حالی که در ریزشمع‌ها به علت نازک بودن و سطح مقطع کم انتهای ریزشمع، می‌توان از نیروی نوک صرف نظر کرد. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده هر چه تعداد ریزشمع در زیر پی افزایش پیدا می‌کند، نیروی اصطکاکی بین مجموعه پی-ریزشمع و خاک افزایش، نشست‌ها کاهش و در نتیجه ظرفیت باربری پی افزایش خواهد یافت. این روند افزایشی در تمامی حالات نصب مشاهده شده است و در بعضی از موارد تا نزدیک ۹۰ درصد باعث بهبود ظرفیت باربری شده است.

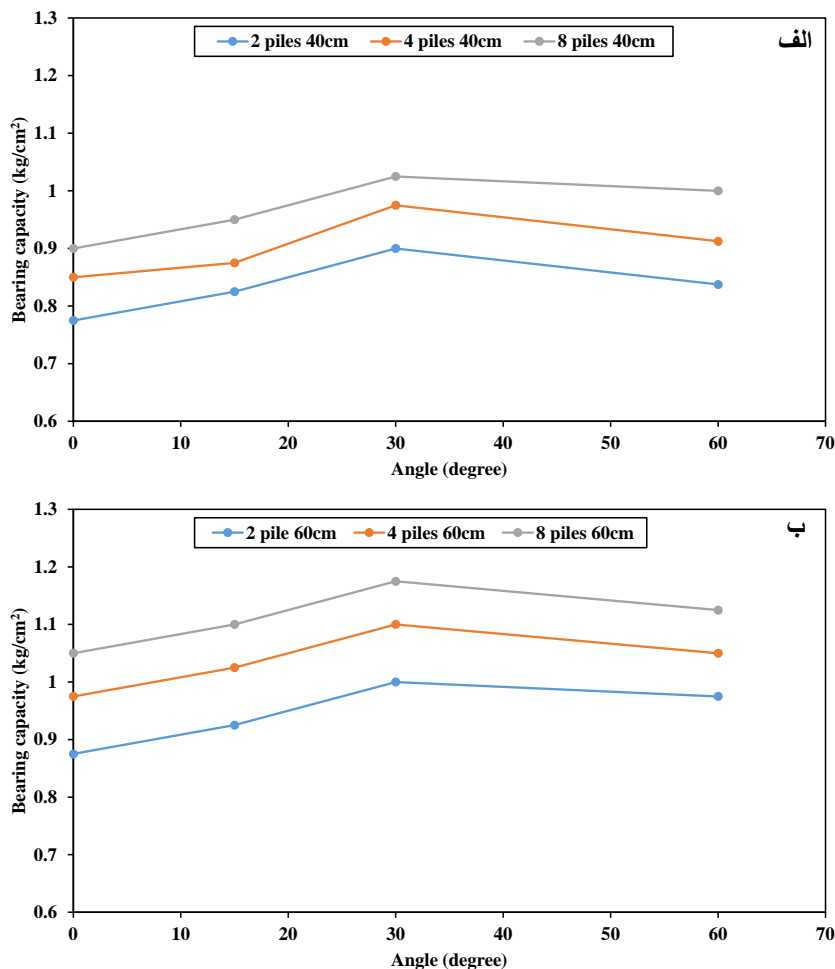


شکل ۵- ظرفیت باربری پی در تعداد ریزشمع مختلف در طول‌های الف) ۴۰ cm ب) ۶۰ cm

از طرف دیگر شیب نمودار در تمامی حالات روند کاهش داشته است. این پدیده حاکی از آن است که با وجود این که افزایش تعداد ریزشمع باعث افزایش ظرفیت باربری می‌شود، اما نباید انتظار داشت که همان تأثیری که افزودن ریزشمع به پی تقویت نشده دارد، اضافه کردن ریزشمع به پی تقویت شده داشته باشد. به نوعی قسمت عمده‌ای از افزایش ظرفیت باربری در همان ۲ ریزشمع اولیه دیده شده است. همچنین از مقایسه قسمت الف با ب نشان داده شده در شکل ۵ میتوان به این نتیجه رسید که افزایش طول ریزشمع تأثیر بسزایی در افزایش ظرفیت باربری داشته که دلیل آن می‌تواند افزایش میزان اصطکاکی ریزشمع‌ها با خاک باشد. این فرآیند در حالات مختلف بین ۱۱ تا ۱۷ درصد بهبود ظرفیت باربری را نتیجه داده است.

۲.۳ بررسی تأثیر زاویه ریزشمع بر ظرفیت باربری

یکی از روش‌هایی که می‌توان توسط آن ظرفیت باربری پی را تقویت کرد مسلح سازی در مرز دایره گسیختگی است. ریزشمع‌ها نیز با رد شدن از این مرز به نوعی باعث تقویت ظرفیت باربری پی می‌شوند. حال نحوه قرار گیری ریزشمع در داخل گوه به طول ریزشمع و زاویه آن بستگی دارد. در این تحقیق سعی شده تا با بررسی زاویه‌های مختلف، زاویه بهینه نصب یافت شود. بدین منظور ریزشمع‌ها در زاوایای ۰، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ درجه نسبت به محور قائم نصب شده و ظرفیت باربری هر کدام بدست آمده است. در شکل ۶ ظرفیت باربری پی تقویت شده با ریزشمع در چینش‌های مختلف به نمایش در آمده است. همانطور که در شکل مشخص است با افزایش زاویه ریزشمع ظرفیت باربری روند صعودی داشته ولی از زاویه ۳۰ درجه به بعد شاهد افت ظرفیت باربری در تمامی حالات هستیم. علت این فرآیند به دلیل تغییر رفتار ریزشمع بوده است که به دلیل زاویه زیاد و نزدیک شدن به سطح خاک، ریزشمع تحت اثر نیروی وارد بر آن رفتار خمشی از خود نشان داده است و از آن جا که سربار حاصل از خاک ماسه‌ای بر روی آن کم است، شمع خاک را به بالا فشار داده و در نتیجه خاک اطراف پی دچار دستخوردگی می‌شود. این پدیده باعث تسهیل حرکت خاک زیر پی شده و در نتیجه نشست افزایش یافته و به تبع آن ظرفیت باربری پی کاسته می‌شود.



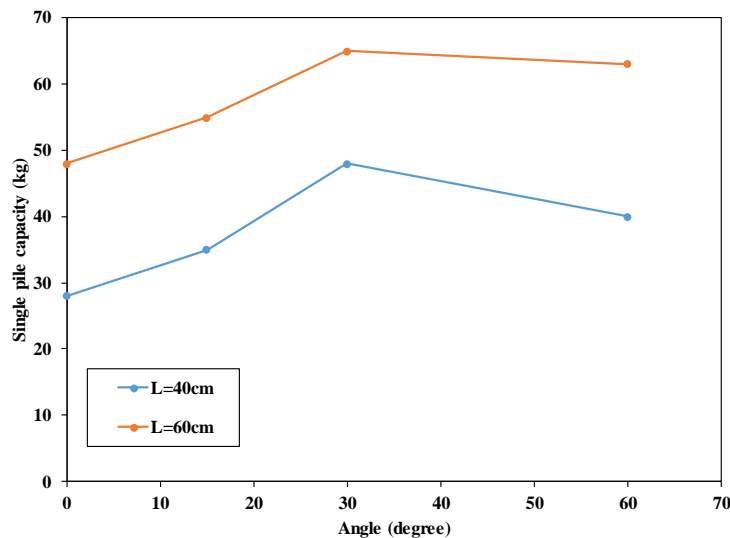
شکل ۶- تغییرات ظرفیت باربری در برابر تغییرات زاویه نصب در طول‌های الف) ۴۰ cm ب) ۶۰ cm

۲.۳. بررسی تاثیر رفتار گروهی ریزشمع

به منظور بررسی رفتار گروهی ریزشمع نیاز است تا مقدار بهسازی گروه ریزشمع نسبت به تک شمع مورد بررسی قرار گیرد. از این رو با استفاده از فرمول زیر نقش گروه ریزشمع در بهسازی ظرفیت باربری بررسی می‌شود. این پارامتر بیانگر مقاومت هر تک ریزشمع قرار گرفته در گروه ریزشمع در برابر مقاومت همان ریزشمع در حالت تک است.

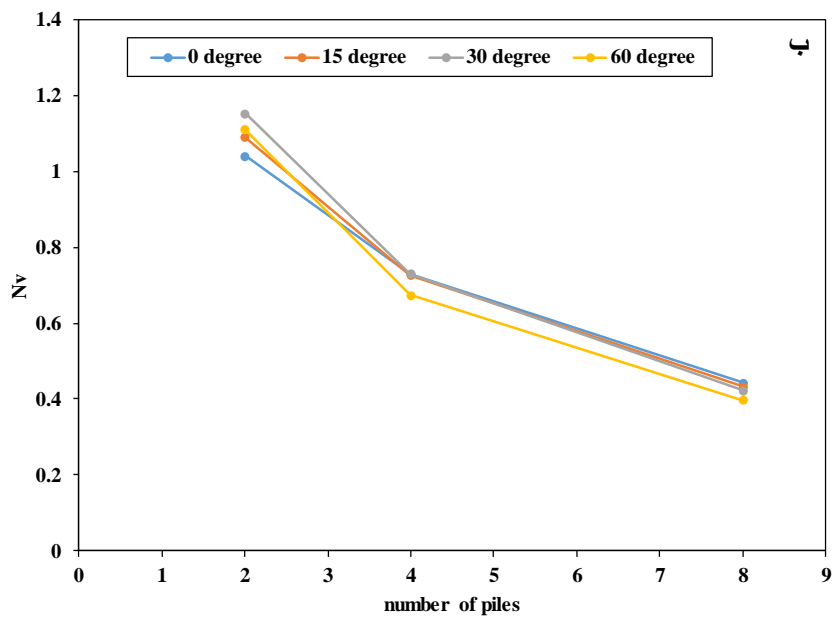
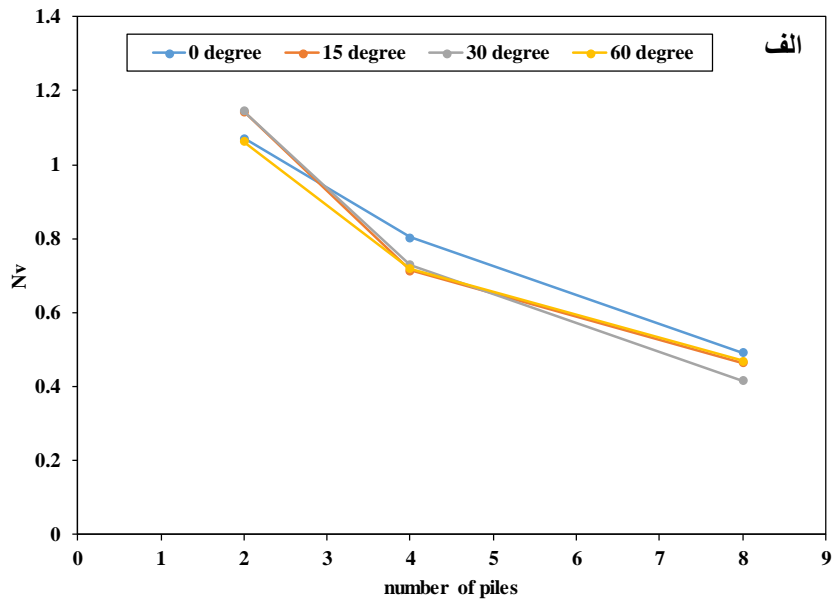
$$N_v = \frac{Q_{n,d,l}^g - Q_{nr}}{\sum_{i=1}^n Q_{d,l}^{sp}} \quad (1)$$

که در آن $Q_{n,d,l}^g$ بیانگر ظرفیت باربری پی تقویت شده با گروه ریزشمع (علامت g) با تعداد n ریزشمع در زاویه d و به طول l ، Q_{nr} نشان دهنده ظرفیت پی فاقد ریزشمع و $Q_{d,l}^{sp}$ ظرفیت باربری ریزشمع تک (علامت sp) در زاویه d و به طول l است. به منظور محاسبه این رابطه در زوایا و طول‌های مختلف نیاز است تا ظرفیت باربری ریزشمع محاسبه گردد. شکل ۷ ظرفیت باربری ریزشمع را نشان می‌دهد.



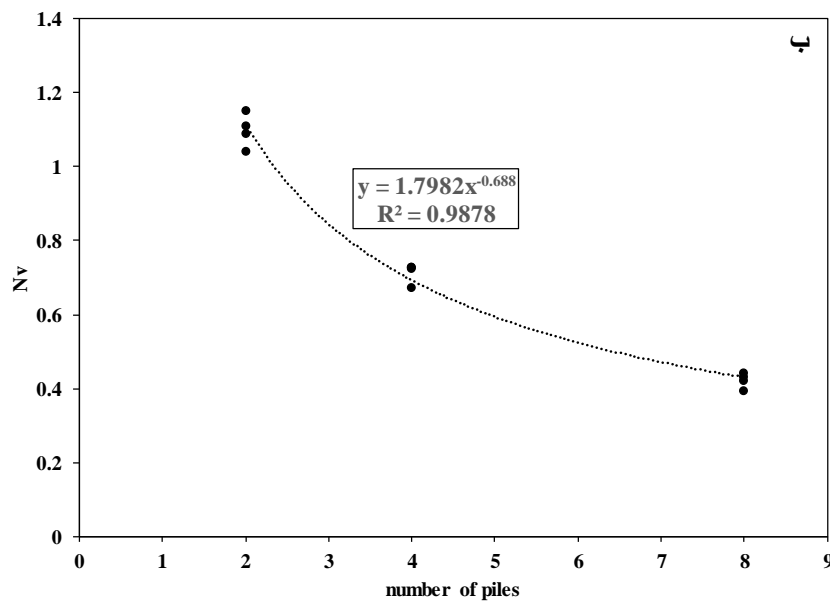
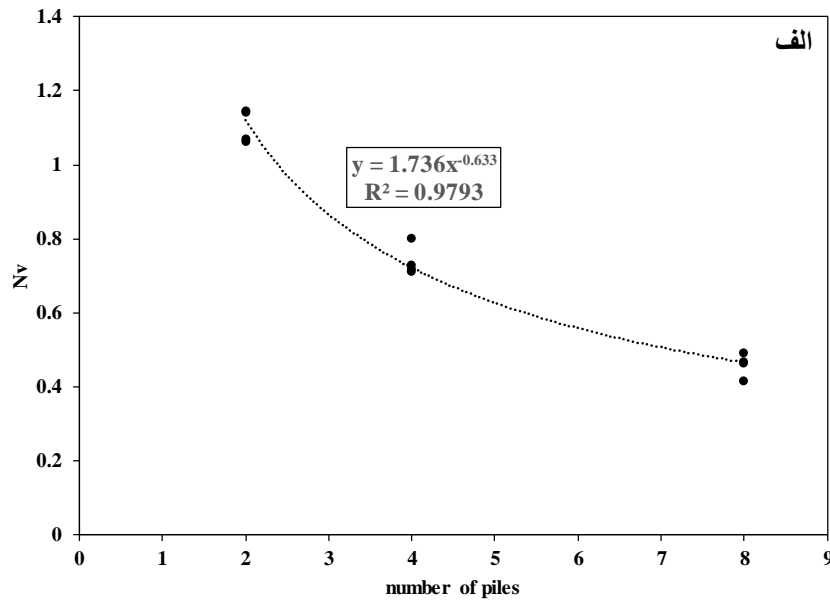
شکل ۷- ظرفیت باربری تک شمع در طول و زوایای مختلف

حال با توجه به مقادیر ظرفیت باربری گروه ریزشمع و تک شمع مقادیر N_v برای هر حالت بدست آمده و نمودار آن رسم می‌گردد. همانطور که در شکل ۸ مشخص است با افزایش تعداد ریزشمع مقدار N_v کاهش یافته است و این نشان‌دهنده این مساله است که نقش مقاومتی هر تک شمع در داخل گروه کمتر شده است و عبارتی با وجود این که نیروی تحمل شده توسط سیستم افزایش یافته است اما نیروی وارد بر هر ریزشمع کاهش یافته است. در نتیجه کاهش قطر و ریزشمع با توجه به این مساله قابل پیش‌بینی است. از طرف دیگر از مقایسه نمودارها در زوایای مختلف می‌توان به این نتیجه رسید که زاویه ریزشمع تاثیر چندانی بر نقش مقاومتی آن نداشته و عملکرد کل سیستم باعث تفاوت آشکار در ظرفیت باربری آن می‌گردد. از طرف دیگر از مقایسه قسمت الف و ب شکل ۸ مشخص می‌شود که افزایش طول ریزشمع در اندکی از موارد باعث کاهش نیروی وارد بر ریزشمع شده است اما در باقی موارد تاثیر قابل توجهی بر مقدار N_v نداشته است. به عبارتی مهمترین پارامتر تاثیر گذار بر نیروی وارد بر هر ریزشمع تعداد ریزشمع بکار رفته در پی است.



شکل ۸- تغییرات N_v در برابر تعداد ریزشمع برای طول‌های الف) ۴۰ cm و ب) ۶۰ cm

با توجه به این که داده‌ها برای هر زاویه اختلاف ناچیزی دارند می‌توان از آن‌ها نموداری برازش داد. در این تحقیق از منحنی توانی استفاده شده است. در شکل ۹ نحوه برازش منحنی بر داده‌ها و همچنین مشخصات منحنی برازش داده شده مشخص است. همانطور که مشاهده می‌شود دو نمودار از ضریب همبستگی مناسبی برخوردار هستند. در این نمودارها ضریب پشت رابطه بیانگر N_v اولیه بوده و توان آن بیانگر وابستگی N_v به تعداد ریزشمع است. همچنین از مقایسه دو نمودار مشخص است که تغییرات N_v وابستگی کمی به طول ریزشمع دارد و با افزایش طول اندکی هر دو پارامتر توان و ثابت منحنی افزایش اندکی داشته‌اند.



شکل ۹- برازش منحنی بر نمودارهای N_v در طول‌های الف) ۴۰ cm و ب) ۶۰ cm

۴. نتیجه گیری:

- هرچه طول ریزشمع بیشتر باشد نیز ظرفیت باربری بهبود بیشتری پیدا می‌کند و افزایش طول ۵۰ درصدی باعث افزایش ظرفیت تا ۱۷ درصد گشته است.
- رفتار ریزشمع در خاک تابع زاویه نصب نیز است. هرچه زاویه بیشتر شود ریزشمع به دلیل لاغر بودن رفتار خمشی از خود نشان داده و در زوایای بالاتر از ۳۰ درجه باعث دستخوردگی در خاک و کاهش ظرفیت باربری می‌شود.
- نقش مقاومتی هر تک ریزشمع در داخل گروه وابستگی قابل توجهی به تعداد ریزشمع داشته است و هرچه طول تعداد افزایش می‌یابد نقش مقاومتی کم‌رنگ‌تر می‌شود. به عبارتی نیروی وارد هر تک ریزشمع در داخل گروه کاهش پیدا می‌کند.



- دو عامل طول و زاویه کارگذاری ریزشمع‌ها نیز در نقش مقاومتی هر تک ریزشمع تاثیر تاجیزی دارند و عامل اصلی تعداد ریزشمع است.
- بر اساس رابطه ارائه و داشتن ظرفیت برابری پی تقویت نشده می‌توان میزان بهسازی استفاده از ریزشمع در تعداد مختلف را بر ظرفیت برابری پی را تخمین زد.

۵. مراجع:

- [1] I. Juran, D.A. Bruce, A. Dimillio, A. Benslimane, Micropiles: the state of practice. Part II: design of single micropiles and groups and networks of micropiles, Proc. Inst. Civ. Eng. - Gr. Improv. 3 (1999) 89–110. <https://doi.org/10.1680/gi.1999.030301>.
- [2] Y. Tsukada, Y. Ichimura, Micropiles in Japan: present status and future prospects, in: Int. Work. Micropiles, Seattle, 1997.
- [3] P.J. Sabatini, B. Tanyu, T. Armour, P. Groneck, J. Keeley, Micropile design and construction reference manual, Rep. FHWA NHI-05-039, Fed. Highw. Adm. Washington, DC. (2005).
- [4] J. Han, S.-L. Ye, A field study on the behavior of micropiles in clay under compression or tension, Can. Geotech. J. 43 (2006) 19–29. <https://doi.org/10.1139/t05-089>.
- [5] C. Choi, S.-D. Cho, Field verification study for micropile load capacity, in: Proc. 10th ISM Work., 2010: pp. 1–10.
- [6] Y. Tsukada, K. Miura, Y. Tsubokawa, M. Ishito, N. Nishimura, Y. Otani, G.L. You, Experimental investigation on the improvement of bearing capacity of surface footing with micropiles, in: Proc. 2nd Int. Work. Micropiles, Sept. Ube City, Japan, 1999: pp. 139–148.
- [7] A. Bhattacharjee, S. Mittal, A. Krishna, Bearing capacity improvement of square footing by micropiles, Int. J. Geotech. Eng. 5 (2011) 113–118. <https://doi.org/10.3328/IJGE.2011.05.01.113-118>.
- [8] J. Han, S.-L. Ye, A field study on the behavior of a foundation underpinned by micropiles, Can. Geotech. J. 43 (2006) 30–42. <https://doi.org/10.1139/t05-087>.
- [9] B. El-Garhy, M. Maraie, A.-F. Youssef, Behavior of model footings resting on soft clay reinforced by floating granular piles: experimental study, Int. J. Geotech. Eng. 5 (2011) 415–424. <https://doi.org/10.3328/IJGE.2011.05.04.415-424>.
- [10] E. Morteza, N.M. Gharouni, K. Farid, Experimental and Numerical Study of Micropiles to Reinforce High Railway Embankments, Int. J. Geomech. 13 (2013) 729–744. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000280](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000280).
- [11] D.D.C. Nguyen, S.-B. Jo, D.-S. Kim, Design method of piled-raft foundations under vertical load considering interaction effects, Comput. Geotech. 47 (2013) 16–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.06.007>.

[۱۲] کاظمی، م.، و بلوری بزاز، ج. (1396). بازسازی نمونه‌های بزرگ ماسه‌ای با روش بارش پرده‌ای ماسه. زمین‌شناسی مهندسی، 11 (2)، 277-298. <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=477176>