

## ظرفیت باربری پی‌های مسلح شده با ریزشمع

جعفر بلوری بزازی<sup>۱\*</sup>، حدیث جلیلیان مشهود<sup>۲</sup>

۱. دانشیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲. دانش آموخته کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه فردوسی مشهد

bolouri@ferdowsi.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۳/۲۷]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۷/۶]

**چکیده** - ریزشمع، یک شمع جایگزینی حفاری و تزریق شده با قطر کمتر از ۳۰۰ میلی‌متر است که عموماً مسلح بوده و برای اجرای آن ابتدا چاه شمع حفاری شده و مسلح‌کننده در داخل آن قرار می‌گیرد و سپس ملات به داخل چاه تزریق می‌شود. از این تکنولوژی برای بهبود ظرفیت باربری پی‌های موجود نیز استفاده می‌شود. این پژوهش به بررسی میزان تاثیر ریزشمع در بهبود ظرفیت باربری پی تحت اثر بارگذاری استاتیکی قائم می‌پردازد. تعدادی آزمایش بارگذاری روی مدل آزمایشگاهی کوچک‌مقیاس از پی مسلح شده با ریزشمع که روی ماسه شل قرار گرفته انجام شد. برای مسلح نمودن پی صلب دایره‌ای با قطر ۱۰ سانتی‌متر، از ریزشمع‌های فولادی آج‌دار به قطر ۶ میلی‌متر و طول ۲۰ سانتی‌متر استفاده شد. با تغییر زاویه نصب و تعداد ریزشمع‌ها، تاثیر چگونگی چیدمان ریزشمع‌ها بر رفتار ژئوتکنیکی پی مطالعه شد. برای سنجش کمی میزان افزایش ظرفیت باربری پی مسلح شده با ریزشمع، ضریب شبکه‌ای (R) تعریف می‌شود که عبارتست از نسبت ظرفیت باربری پی مسلح شده با ریزشمع به مجموع ظرفیت باربری پی و ریزشمع‌ها به صورت مجزا. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مقدار ضریب شبکه‌ای با افزایش تعداد ریزشمع‌ها بالا می‌رود. همچنین در صورت کاربرد ۶ یا ۸ ریزشمع، با افزایش زاویه نصب ریزشمع نسبت به امتداد قائم، از مقدار R کاسته می‌شود. در حالت استفاده از تعداد زیادی ریزشمع‌های دارای زاویه نصب کوچک، ظرفیت باربری به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. مقدار ضریب شبکه‌ای در صورت کاربرد ۸ ریزشمع با زاویه نصب ۱۵ درجه، برابر ۱/۹۹۷ است.

**واژگان کلیدی:** پی، ظرفیت باربری، ریزشمع، بررسی آزمایشگاهی، زاویه نصب، تعداد، ضریب شبکه‌ای.

### ۱- مقدمه

که بنا به هر دلیلی در معرض آسیب قرار دارند، استفاده می‌شود. اندرکنش پی و گروه ریزشمع، این مجموعه را قادر می‌سازد تا بارها و جابجایی‌های بزرگ مانند آنچه در زلزله رخ می‌دهد را تحمل نماید. همزمان با کاربرد گسترده ریزشمع‌ها در این زمینه، سازوکار ظرفیت باربری پی‌های مسلح شده با این عناصر، به وسیله‌ی پژوهشگران مختلف مطالعه شده است [۴-۱۶]. اما انجام مطالعات بیشتر برای شناخت سازوکار افزایش ظرفیت باربری پی با استفاده از ریزشمع ضروری به نظر می‌رسد. هدف از این پژوهش، بررسی تاثیر عوامل مختلف بر ظرفیت باربری پی مسلح شده با ریزشمع است. به این منظور، یک مدل کوچک - مقیاس از یک پی سطحی مسلح شده با تعدادی ریزشمع ساخته شده و با انجام آزمایش بارگذاری روی پی تنها و نیز پی مسلح شده با گروه ریزشمع، تاثیر چگونگی چیدمان گروه ریزشمع‌ها

ریزشمع‌ها در دهه ۱۹۵۰ میلادی ابداع شده و امروزه به طور گسترده برای کاربردهایی مانند تکیه‌گاه سازه‌ای در پی‌ها و همچنین تسلیح برج‌های خاکی استفاده می‌شوند [۱ و ۲]. هنگام اجرای ریزشمع‌ها کمترین میزان دست‌خوردگی در سازه‌ها، خاک و محیط اطراف ایجاد می‌شود [۳]. ریزشمع‌ها انعطاف‌پذیری بالایی داشته و قابلیت تحمل بارهای محوری و/یا جانبی را دارند. ریزشمع را می‌توان به صورت یک مولفه منفرد در یک توده مرکب خاک - شمع یا جایگزینی با ابعاد کوچک برای شمع‌های متداول در نظر گرفت. از آنجا که ریزشمع‌ها با تزریق تحت فشار کنترل شده اجرا می‌شوند، از قابلیت تحمل بارهای بزرگ به کمک اصطکاک جداره خود برخوردار هستند. به همین دلیل از این عناصر به وفور برای تقویت ظرفیت باربری پی‌های موجود

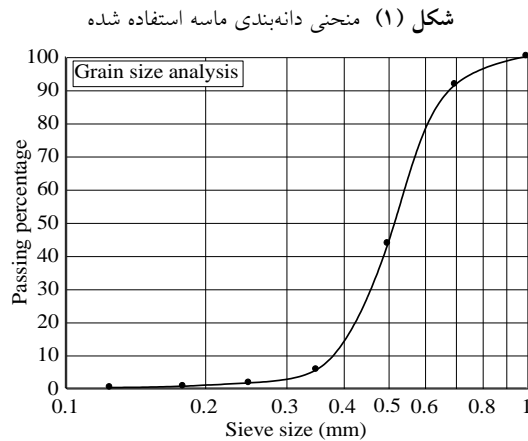


Figure (1): Particle size distribution curve

جدول (۱) مشخصات ماسه فیروزکوه (آزمایش برش مستقیم)

Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Internal friction angle (Degree)
13.8	33
15	41.5

Table (1): Characteristics of Firouz Kuh sand (direct shear test)

#### ۲-۱-۲- مخزن خاک

برای مخزن نگهداری خاک از یک لوله با جنس GRP و به قطر ۷۰۰ mm، ضخامت جداره ۸ mm و ارتفاع ۵۰۰ mm استفاده شد. ابعاد مخزن براساس پی‌هایی که در آن مورد آزمایش قرار گرفتند به گونه‌ای انتخاب شد که تنش حاصل از اعمال بارگذاری روی پی در لایه‌های خاک و در لبه‌های مرزی مخزن نگهدارنده صفر و یا نزدیک به صفر شود.

#### ۲-۱-۳- سیستم اعمال نیرو

در آزمایش‌ها از یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰ تن برای اعمال نیرو به پی و با سرعت بارگذاری ۱۳ میلی‌متر جابجایی فک در دقیقه (معادل 1.1 kg/sec) استفاده شد. به این ترتیب بارگذاری در هنگام آزمایش با نرخ ثابت نشست و کمترین سرعت ممکن انجام پذیرفت. این جک روی یک قاب عکس-العملی صلب ساخته شده از مقاطع بسیار قوی تیر ورق تعبیه شده بود که بیشینه مقدار صلیبیت را دارا بوده و در برابر بارهای وارد شده هیچگونه تغییر مکانی نمی‌داد. این قاب در شکل (۲) نشان داده شده است.

بر عملکرد پی بررسی شد. مجموعه پی و ریزشمع‌های استفاده شده در آزمایش‌ها روی ماسه شل قرار داشت و متغیرهای مورد مطالعه تعداد و زاویه نصب ریزشمع‌ها بودند.

## ۲- روش تحقیق

انجام آزمایش بر روی مدل‌های کوچک مقیاس آسان بوده و با توجه به پایین بودن هزینه آن، می‌توان تعداد زیادی از این آزمایش‌ها را برای کسب اطمینان از قابلیت تکرار انجام داد. در این پژوهش مجموعه‌ای آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد که امکان اعمال نیرو به پی مسلح شده به ریز شمع را که روی خاک دانه‌ای با تراکم معین واقع شده را فراهم نمود. در طول آزمایش، مقدار بار اعمال شده و نشست متناظر پی اندازه‌گیری و ثبت می‌شد.

#### ۲-۱- مدل آزمایشگاهی

چیدمان آزمایشگاهی مورد استفاده در آزمون‌های آزمایشگاهی شامل مخزن خاک، قاب عکس‌العملی صلب و جک هیدرولیکی، نیروسنج، تغییر مکان‌سنج، پی و گروه ریزشمع‌ها است. در ادامه ویژگی‌های این مجموعه بیان شده است.

#### ۲-۱-۱- خاک مورد استفاده

برای انجام آزمایش‌های این پژوهش، از ماسه فیروزکوه استفاده شد. قطر دانه‌های این ماسه کوچکتر از ۱ میلی‌متر بوده و بر اساس سیستم متحد برای طبقه‌بندی خاک (USCS) ماسه مورد نظر در گروه SP قرار می‌گیرد. همچنین چگالی دانه‌های جامد این ماسه  $G_s$  برابر ۲/۷۱ است (ASTM D854). در شکل (۱) منحنی دانه‌بندی ماسه استفاده شده مشاهده می‌شود. برای تعیین مشخصات فنی این ماسه از آزمایش برش مستقیم استفاده شد که نتایج آن در جدول (۱) نشان داده شده است. نتایج این آزمایش با نتایج حاصل از آزمایش سه محوری [۱۷] هماهنگی خوبی دارد. ماسه ریخته شده در مخزن آزمایش با تراکم نسبی پایین بوده و با وزن مخصوص  $\gamma = 14 \pm 0.1 \text{ kN/m}^3$  به عنوان ماسه شل در نظر گرفته می‌شود. در همه‌ی آزمایش‌ها سعی بر آن بوده تا تراکم خاک ریخته شده زیر پی در عمق مخزن یکنواخت و یکسان باشد.

شکل دایره و قطر ۱۰ cm و به ضخامت ۵ cm ساخته شد. برای مدل‌سازی ریزشمع‌ها از قطعات پیچ فولادی به قطر ۶ mm و طول ۲۰ cm استفاده شد. نمونه‌ای از این قطعات پیچ فولادی بر اساس استاندارد ASTM E8M در آزمایشگاه خواص مکانیکی گروه مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه فردوسی مشهد تحت آزمایش بارگذاری کششی قرار گرفت. بر اساس نتایج آزمایش، ضریب ارتجاعی ریزشمع‌های فولادی ۲۳۰ GPa و حد تسلیم و حد نهایی آنها به ترتیب برابر ۴۳۳ و ۴۷۱ مگاپاسکال بود.

برای فعال کردن اصطکاک بین ریزشمع و خاک اطراف آن، جداره ریزشمع‌ها به وسیله‌ی ماسه اندود شد. این کار باعث ایجاد سطحی ناصاف روی ریزشمع‌ها شده و با درگیر شدن این سطح با ذرات خاک، اصطکاک سطحی ریزشمع مدل‌سازی می‌شود. ذرات به کار رفته برای اندود کردن ریزشمع‌ها، همان ماسه استفاده شده برای آزمایش‌ها بودند. قطر ریزشمع‌ها بعد از اندود شدن، حدود 1 mm افزایش داشت. شکل هندسی پی‌های استفاده شده برای آزمایش‌ها در شکل (۴) دیده می‌شود.

شکل (۴) الف: مجموعه ریزشمع‌ها و کلاهک مورد استفاده

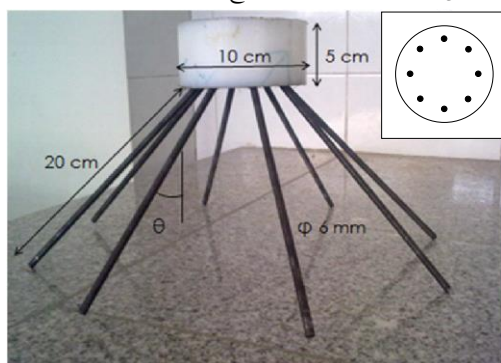


Figure (4-a): Set of micro piles and cap

شکل (۴) ب: نمایی از ریزشمع‌های دارای چسب



Figure (4-b): A view of micro piles coated with glue

شکل (۲) قاب عکس‌العملی مورد استفاده در آزمایش‌ها



Figure (2): Reaction frame employed in the research

۲-۱-۴- سیستم اندازه‌گیری نیرو و تغییر مکان

در روند انجام آزمایش‌ها، برای تعیین نیروهای اعمالی به پی از یک نیروسنج با ظرفیت 4.5 kN و دقت 3N که قبل از شروع آزمایش کالیبره شده بود، استفاده شد. همچنین برای اندازه‌گیری نشست پی، از یک تغییر مکان‌سنج عقربه‌ای با دامنه اندازه‌گیری ۲۱ و دقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شد تا نشست پی با بیشینه دقت ممکن برداشت شود. در شکل (۳) نیروسنج و تغییر مکان‌سنج و پی مورد استفاده در آزمایش‌ها در حالت آماده آزمایش نشان داده شده است.

شکل (۳) مخزن ماسه، نیروسنج و پی آماده آزمایش



Figure (3): Sand reservoir, load ring and foundation; ready for test

۲-۱-۵- پی مسلح شده با گروه ریزشمع

از آنجا که هدف از انجام این پژوهش، بررسی رفتار ژئوتکنیکی پی‌های مسلح شده با ریزشمع بود، باید پی مورد استفاده از صلیبیت کافی برخوردار بوده تا نشست پی یکنواخت باشد. به این منظور پی طراحی شده از جنس پلی‌آمید (تفلون فشرده) به

هیچ تماسی بین پی و سطح خاک وجود نداشت. تعداد آزمایش‌های این گروه ۲۰ عدد است که در جدول ۲ با کد M-θ-N آورده شده اند. θ و N به ترتیب زاویه نصب و تعداد است (شکل ۵-ب).

گروه (۳): در این گروه با انجام ۲۰ آزمایش، عملکرد گروه ریزشمع به همراه کلاhek بررسی شده است. به این منظور صفحه‌ای که ریزشمع‌ها به آن متصل شده بود به عنوان کلاhek با سطح ماسه کاملاً در تماس قرار گرفت به گونه‌ای که تا انتهای آزمایش، پی در تماس با سطح خاک بود (شکل ۵-ج). کد آزمایش‌های این گروه M-F-θ-N بوده که در آن θ و N به ترتیب زاویه نصب و تعداد ریزشمع است (جدول ۲).

هنگام آماده سازی خاک بستر در این گروه، مجموعه کلاhek و ریزشمع‌ها با استفاده از دو میلگرد فولادی در محل مورد نظر در داخل مخزن قرار گرفته و سپس خاک ریخته می‌شد. پس از رسیدن سطح خاک به تراز نهایی شبکه فولادی از زیر پی برداشته شده و کلاhek به میزان ضخامت شبکه فولادی به سمت خاک رانده شد تا کف آن در تماس کامل با خاک قرار گیرد. شکل ۶ چگونگی آماده سازی مجموعه ریزشمع و کلاhek را نشان می‌دهد.

برای انجام آزمایش ابتدا پی در مکان و تراز مورد نظر مستقر شده سپس خاک به روش بارش در داخل مخزن ریخته می‌شد. هنگام ریختن ماسه در مخزن سعی شد که تراکم در نقاط مختلف در هر لایه یکسان باشد. به این دلیل و نیز با توجه به صلیبت بالای پی-ها، نشست در تمام نقاط پی مورد آزمایش به صورت یکنواخت و نشست بوجود آمده همان تغییرشکل لایه خاک بوده است. پس از رسیدن سطح خاک به تراز دلخواه، ابزارهای اندازه گیری نیرو و تغییر مکان روی پی نصب شدند.

شکل (۵) آزمایش‌های طراحی شده در تحقیق حاضر. الف: آزمون مرجع (Ref-Test) ب: گروه دوم (M-Test) ج: گروه سوم (M-F-Test)

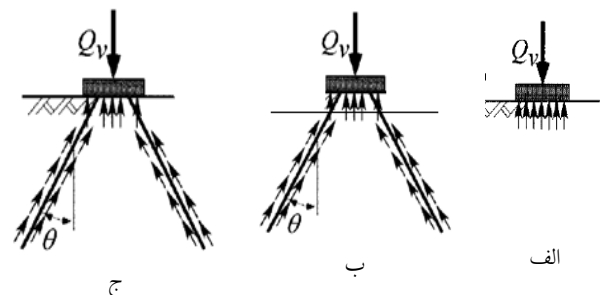


Figure (5): Test program in the present research. a: Reference test (Ref-Test), b: Second Group (M-Test), c: Third Group (M-F-Test)

## ۲-۲- برنامه آزمایش‌ها

پارامترهای مختلفی بر ظرفیت باربری پی‌های مسلح شده با ریزشمع تاثیر دارد که از آن میان می‌توان به تراکم و نوع خاک، تعداد، زاویه نصب و سختی خمشی ریزشمع‌ها اشاره نمود. در این پژوهش، تاثیر تعداد و زاویه نصب ریزشمع‌ها بر ظرفیت باربری پی مسلح شده با این عناصر بررسی شده است. به این منظور، برنامه‌ای به شرح زیر برای انجام آزمایش‌ها طراحی شد: گروه (۱): برای بررسی اثر ریزشمع در ظرفیت باربری پی‌ها، ابتدا یک آزمون بدون ریزشمع روی پی واقع در سطح خاک انجام شد. این آزمون با کد Ref-Test نامگذاری شده است (شکل ۵-الف).

گروه (۲): آزمایش‌های این گروه، اثر ریزشمع را به تنهایی بررسی می‌نماید. به این منظور صفحه‌ای که ریزشمع‌ها به آن متصل شده بود، جدا از ریزشمع‌ها و به فاصله حدود ۳ سانتی‌متر از سطح ماسه قرار گرفت به گونه‌ای که تا انتهای آزمون

جدول (۲) آزمایش‌های گروه ۲ و ۳

M-F-θ-N	M-θ-N	Number of micropiles (N)	Installation angle of micropiles (θ)
M-F-0-2	M-0-2	2	0
M-F-0-4	M-0-4	4	
M-F-0-6	M-0-6	6	
M-F-0-8	M-0-8	8	
M-F-15-2	M-15-2	2	15
M-F-15-4	M-15-4	4	
M-F-15-6	M-15-6	6	
M-F-15-8	M-15-8	8	
M-F-30-2	M-30-2	2	30
M-F-30-4	M-30-4	4	
M-F-30-6	M-30-6	6	
M-F-30-8	M-30-8	8	
M-F-45-2	M-45-2	2	45
M-F-45-4	M-45-4	4	
M-F-45-6	M-45-6	6	
M-F-45-8	M-45-8	8	
M-F-60-2	M-60-2	2	60
M-F-60-4	M-60-4	4	
M-F-60-6	M-60-6	6	
M-F-60-8	M-60-8	8	

Table (2): Tests in group 2 and 3

گسیختگی خاک زیر پی ممکن است به گسیختگی برشی عمومی تغییر یابد [۱۲]. این امر را می‌توان به رفتار اتساعی ماسه مترکم مرتبط دانست.

شکل (۶) چگونگی استقرار مجموعه کلاهک و ریز شمع‌ها در گروه سوم



Figure (6): Solidification of cap and micro piles in the third group

### ۳- نتایج آزمایش‌ها

همان‌گونه که در بخش قبل اشاره شد آزمون‌های اصلی این پژوهش که در شکل ۵ نشان داده شده به سه گروه Ref-Test، M-F-Tests و M-Tests (با ریزشمع‌های قائم یا مایل) تقسیم شده‌اند. در ادامه نتایج هر گروه آورده شده است.

شکل (۸) منحنی‌های بار - نشست آزمایش‌های M-Tests

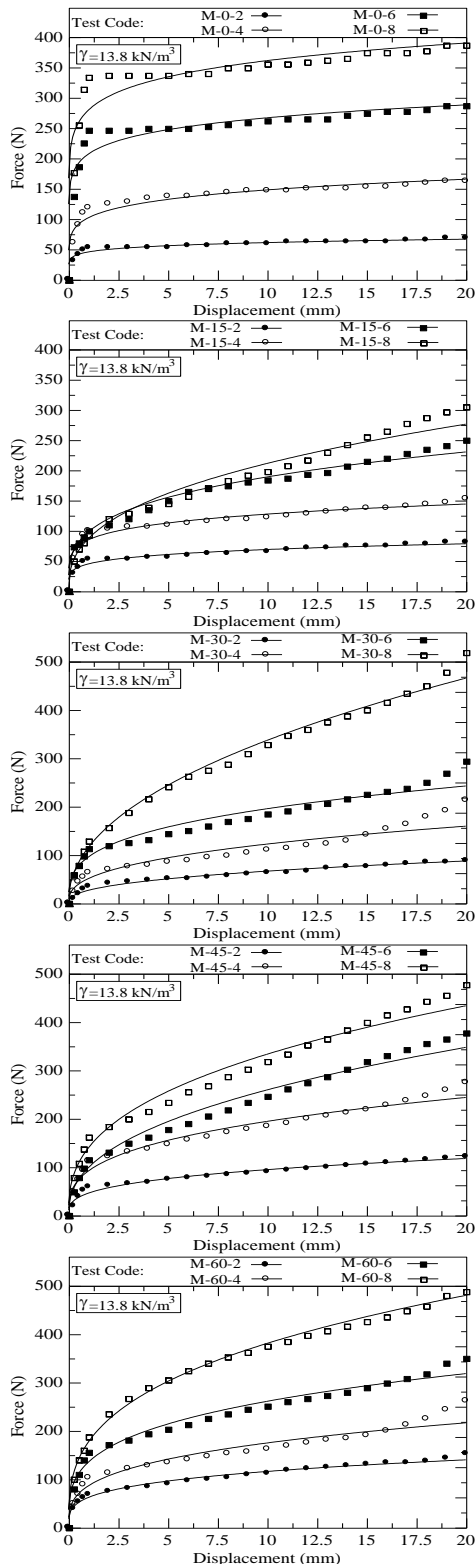


Figure (8): The load-settlement curve of M-Tests

شکل (۷) منحنی بار - نشست آزمایش Ref-Test

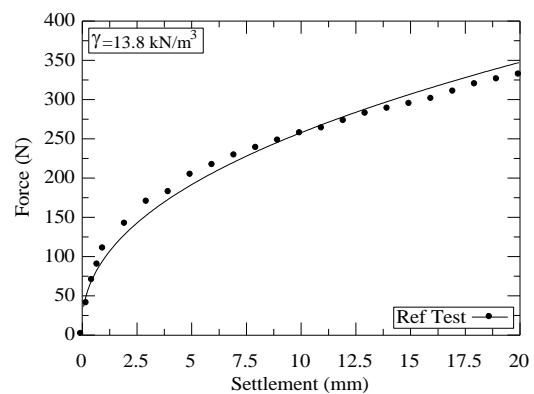


Figure (7): The load-settlement curve of Reference Test

۳-۱- رفتار ژئوتکنیکی پی سطحی واقع بر ماسه (گروه Ref-Test)

در این گروه فقط یک آزمایش انجام شده که روی یک پی ساده تخت و بدون ریزشمع (شکل ۵-الف) است. نمودار بار-نشست این آزمایش که در شکل (۷) نشان داده شده است، بسیار مشابه با رفتار پی روی ماسه با دانسیته نسبی پایین است.

به عبارتی گسیختگی به وجود آمده در خاک زیر پی از نوع برشی موضعی بوده و سطح گسیختگی در سطح خاک ظاهر نمی‌شود. بدیهی است دلیل این رفتار، دانسیته نسبی کم ماسه مورد آزمایش و رفتار انقباضی آن است. مطالعات سایر پژوهشگران نشان داده است در صورت افزایش تراکم ماسه، نوع

جدول (۴) مقادیر K به ازای زاویه نصب ریزشمع‌ها (N=2-8)

N Number of micropiles	installation angle of micropiles ( $\theta$ )				
	0	15	30	45	60
2	1	1.17	1.28	1.74	2.35
4	1	0.98	1.41	1.85	1.77
6	1	1.07	1.12	1.37	1.4
8	1	0.8	1.45	1.33	1.39

Table (4): Magnitudes of K in terms of installation angle of micropiles (N=2-8)

به ازای تمام مقادیر N، روند کلی تغییرات ظرفیت باربری با افزایش زاویه نصب ( $\theta$ ) صعودی است. تنها در حالت‌های N=4 و N=8 است که در روند رشد ظرفیت باربری گروه و پارامتر K کمی بی‌نظمی وجود دارد. به طور کلی از آزمایش‌های این گروه می‌توان نتیجه گرفت که رفتار گروه ریزشمع، تاثیری از ابعاد محدود مخزن ماسه و کف آن نپذیرفته است و با افزایش تعداد و نیز زاویه نصب ریزشمع‌ها، مقدار بار تحمل شده به وسیله‌ی گروه افزایش می‌یابد.

### ۲-۳- رفتار ژئوتکنیکی پی مسلح شده با گروه ریزشمع واقع بر ماسه (گروه M-F-Tests)

در این گروه از آزمایش‌ها، رفتار پی مسلح شده با گروه ریزشمع (با در نظر گرفتن اثر کلاهدک پی) مورد بررسی قرار گرفت. همانگونه که در برنامه آزمایشات بیان شد تفاوت آزمایشات این گروه با گروه M-Tests (که در آن کلاهدک قبل و در طول آزمایش تماسی با خاک نداشت)، در چگونگی قرارگیری کلاهدک روی سطح ماسه می‌باشد. متغیرهای مورد مطالعه به گونه‌ای مشابه، زاویه نصب،  $\theta$  و تعداد ریزشمع، N در گروه در نظر گرفته شده است. منحنی بار-جابجایی پی مسلح شده با تعدادهای مختلف ریزشمع و زاویه نصب در شکل (۹) نشان داده شده است.

برای بررسی تاثیر تغییر متغیرهای آزمایش (N و  $\theta$ ) بر رفتار مجموعه پی و گروه ریزشمع، ضریب بدون بعد P که نسبت بار نهایی تحمل شده به وسیله‌ی پی مسلح شده با تعداد N ریزشمع (نصب شده با زاویه  $\theta$ ) به بار نهایی آزمون مرجع (Ref-Test) است، محاسبه شده و برای هر یک از آزمایش‌های این گروه در جدول (۵) آورده شده است.

### ۲-۳- رفتار ژئوتکنیکی گروه ریزشمع در ماسه (گروه M-Tests)

همانگونه که بیان شد آزمایش‌های این گروه برای بررسی میزان نشست پی (بدون تداخل اثر کلاهدک پی) با تعداد ریزشمع و زاویه نصب مختلف انجام شده است. در شکل (۸) رفتار گروه-های دارای تعداد مختلف ریزشمع نصب شده با زاویه‌های مشخص (۰ تا ۶۰ درجه) نشان داده شده است.

برای بررسی تاثیر تعداد ریزشمع‌ها (N) بر رفتار گروه ریزشمع در هر زاویه نصب، پارامتر بدون بعد J، که نسبت بار نهایی تحمل شده به وسیله‌ی گروه ریزشمع با تعداد ریزشمع (N=2-8) به بار نهایی در حالت N=2 در یک زاویه نصب مشخص است، تعریف شد. مقدار ضریب J که به نوعی راندمان گروه ریزشمع را نشان می‌دهد به ازای زاویه‌های نصب متفاوت در جدول (۳) آورده شده است.

جدول (۳) تغییرات J به ازای تعداد ریزشمع با زاویه نصب مختلف

$\theta$ (degree)	Number of micropiles (N)			
	2	4	6	8
0	1	2.27	4.01	5.49
15	1	1.89	3.64	3.76
30	1	2.5	3.53	6.26
45	1	2.4	3.16	4.18
60	1	1.71	2.39	3.24

Table (3): Variations of J in terms of Number of micropiles and different installation angle

همانگونه که ملاحظه می‌شود با افزایش تعداد ریزشمع با زاویه نصب متفاوت، ظرفیت باربری گروه ریزشمع و نیز پارامتر J افزایش یافته و اثر کاهشی گروه شمع بر رفتار ریزشمع‌ها تاثیری نگذاشته است.

به گونه‌ای مشابه پارامتر بدون بعد K، که نسبت بار نهایی تحمل شده به وسیله‌ی گروه ریزشمع با زوایای نصب،  $\theta=0-60^\circ$  به بار نهایی در حالت  $\theta=0^\circ$ ، تعریف شده است. مقدار ضریب K، که به نوعی بیانگر اثر زاویه نصب ریزشمع است، به ازای زاویه‌های نصب متفاوت ریزشمع در جدول (۴) آورده شده است.

جدول (۵) مقادیر ضریب P به ازای تعداد ریزشمع نصب شده در زاویه-های مختلف ( $\theta=0-60^\circ$ )

$\theta$ (Degree)	Number of micropiles (N)			
	2	4	6	8
0	1.1	1.49	2.59	3.51
15	0.99	1.36	3.44	3.83
30	0.76	1.17	1.69	2.30
45	1.16	1.69	1.98	2.53
60	1.07	1.42	1.67	2.33

Table (5): Magnitudes of P factor in terms of number of micropiles in different angles ( $\theta=0-60^\circ$ )

با توجه به مقادیر P می توان گفت که در تمام زوایای نصب، تنها در صورت استفاده از بیشتر از ۴ ریزشمع است که ظرفیت باربری پی مورد مطالعه تحت اثر بارگذاری مدنظر (قائم و بدون خروج از مرکزیت) بهبود می یابد. تفسیر نتایج حاصل از تغییر زاویه نصب برای هر تعداد ریزشمع استفاده شده برای مسلح نمودن پی، کمی مشکل است اما به طور کلی می توان نتیجه گرفت که هر چه تعداد ریزشمع های استفاده شده در گروه، بیشتر و زاویه نصب آنها کوچکتر باشد، ظرفیت باربری پی مسلح شده با این عناصر بیشتر است.

نظر به انتخاب روش کنترل-کنش برای آزمایش ها امکان ثبت مقدار بار در نشست های مختلف فراهم شد. با توجه به قطر پی (D) و مقدار نشست آن ( $S_v$ ) ضریب بدون بعد  $S_v/D$  محاسبه شده و برای مقادیر مشخصی از این ضریب (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) مقدار بار وارد بر پی ( $Q_v$ ) خوانده شد. در صورت تقسیم این مقدار بار به مساحت خالص پی،  $A_n$ ، تنش قائم روی پی،  $q_v$  قابل محاسبه است. لازم به یادآوری است دلیل به کارگیری لفظ "تنش قائم روی پی" برای گروه سوم (که کلاهک در تماس کامل با خاک است) این است که بخشی از نیروی وارد بر بالای کلاهک را ریزشمع ها تحمل می کنند که مقدار آن نامشخص است و بنابراین نمی توان تنش را با تقسیم نمودن کل نیرو بر سطح کلاهک محاسبه کرد. تغییرات تنش قائم روی پی به ازای مقادیر مختلف  $\theta$  و N و برای  $S_v/D$  گوناگون در شکل های (۱۰) و (۱۱) رسم شده است.

در صورت استفاده از تعداد ۲ یا ۴ ریزشمع برای مسلح کردن پی در تمام نشست های مدنظر، تنش روی پی در  $\theta=30^\circ$  کمترین و در  $\theta=45^\circ$  بیشترین مقدار را داراست. در حالت  $N=6$  و  $N=8$  روند کلی نمودار ( $\theta-q_v$ ) کاهشی بوده و در کلیه نسبت های

شکل (۹) منحنی های بار-نشست آزمایش های M-F-Tests

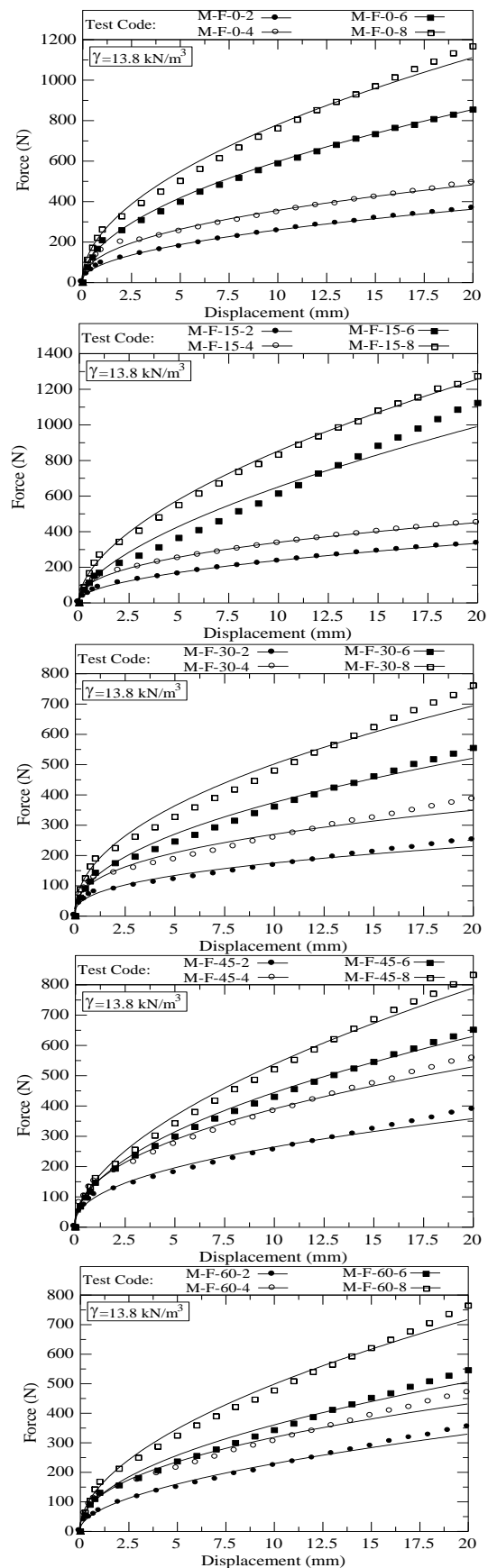


Figure (9): The load-settlement curve of M-F-Tests

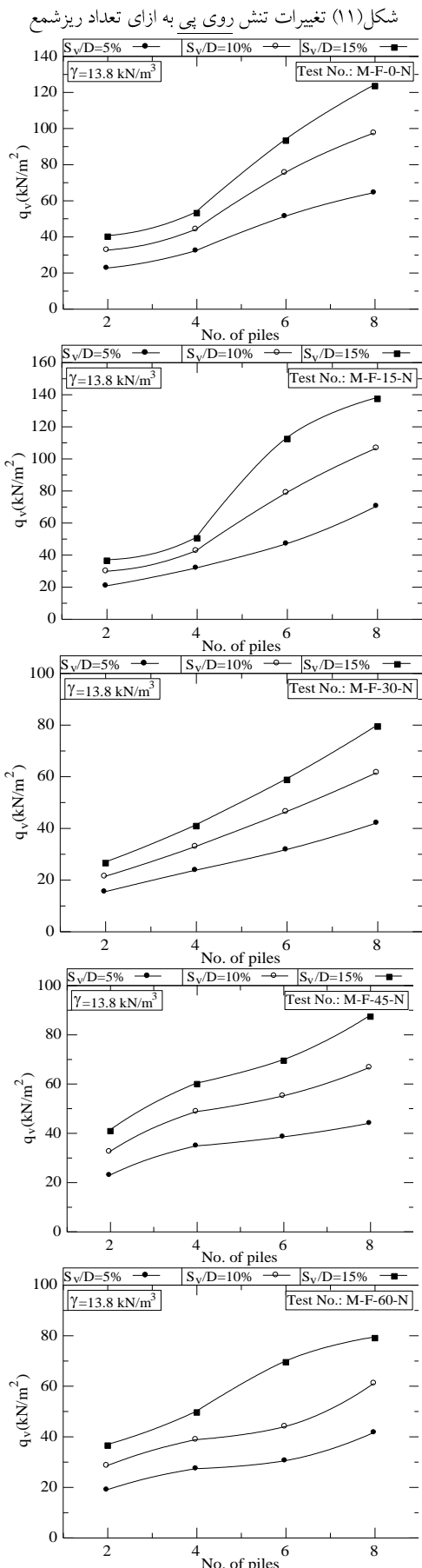


Figure (11): Variations of foundation pressure in terms of number of micro piles.

$(S_v/D)$  مقدار تنش روی پی  $(q_v)$  در زاویه نصب  $0^\circ$  و  $15^\circ$  درجه بیشینه و در  $30^\circ$  و  $60^\circ$  درجه کمینه است. با توجه به نمودارهای فوق می‌توان گفت که به ازای همه مقادیر  $S_v/D$  با افزایش تعداد ریزشمع‌های به کار رفته برای مسلح کردن پی، تنش روی پی افزایش می‌یابد. نکته دیگر آنکه در نشست‌های زیاد، تغییرات تنش روی پی با افزایش  $\theta$ ، بیشتر از حالت نشست‌های کم است.

شکل (۱۰) تغییرات تنش روی پی به ازای مقادیر مختلف زاویه نصب

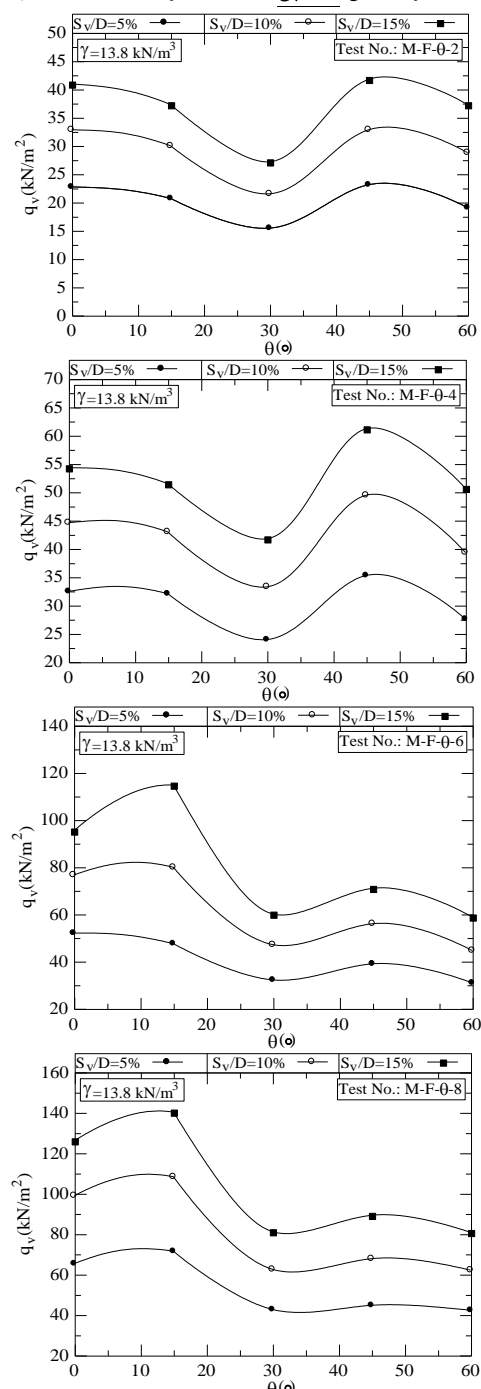


Figure (10): Variations of foundation pressure in terms of different magnitudes of installation angle.



مقدار این پارامتر از تقسیم ظرفیت باربری پی مسلح شده با ریزشمع به مجموع ظرفیت باربری‌های پی و گروه ریزشمع به صورت مجزا به دست می‌آید. منظور از ظرفیت باربری، بار قائم وارد بر پی در  $S_v/D$  معین است. چنانچه مقدار  $S_v/D$  برابر ۲۰٪ در نظر گرفته شود مقدار بار وارد بر پی، بار نهایی در نظر گرفته می‌شود. تغییرات  $R$  به ازای مقادیر مختلف زاویه نصب در شکل (۱۴) آورده شده است.

شکل (۱۴) تغییرات ضریب شبکه‌ای به ازای مقادیر مختلف زاویه نصب

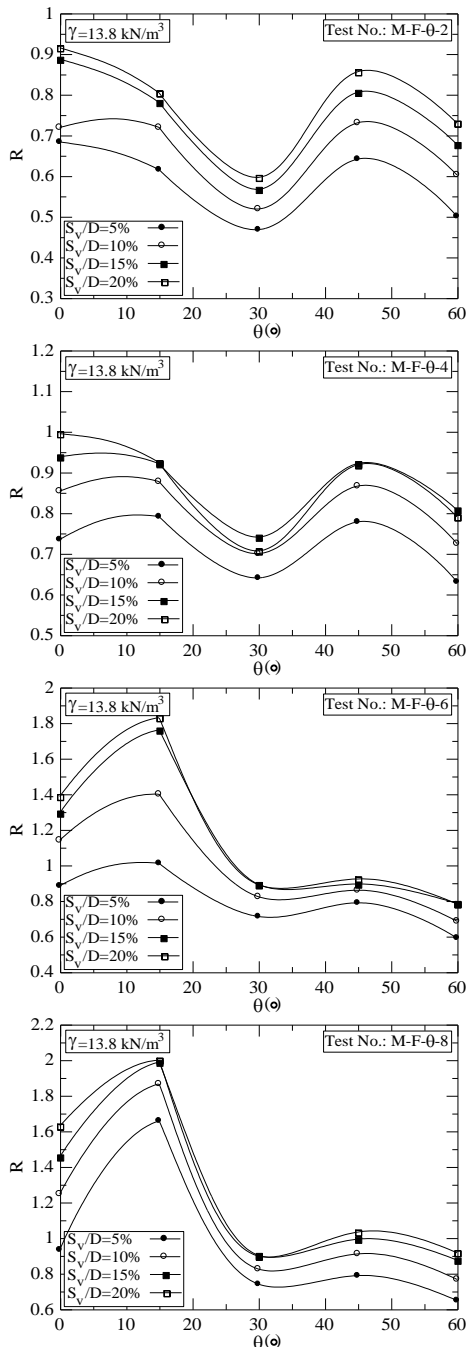


Figure (14): Variations of net factor in terms of different magnitudes of installation angle.

در ادامه، بار خوانده شده در نشست برابر ۲۰ درصد قطر پی (۲سانتی متر) را به عنوان ظرفیت باربری نهایی پی یا به عبارتی بار نهایی در نظر گرفته و سپس تنش قائم نهایی روی پی ( $q_{ult}$ ) محاسبه شده است. تغییرات تنش به ازای متغیرهای آزمایش ( $N$  و  $\theta$ ) در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ رسم شده است.

شکل (۱۲) تغییرات تنش نهایی روی پی به ازای مقادیر مختلف  $\theta$

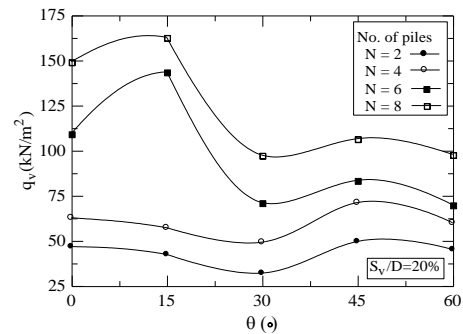


Figure (12): Variations of foundation pressure in terms of  $\theta$ .

در حالت  $N=4$  و  $N=2$  تنش نهایی در زاویه  $\theta=45^\circ$  بیشترین و در  $\theta=30^\circ$  کمترین مقدار را داراست. روند کلی منحنی تغییرات تنش نهایی نسبت به زاویه نصب در زمان استفاده از ۶ یا ۸ ریزشمع، به گونه‌ای است که افزایش  $\theta$  باعث کاهش تنش روی پی می‌شود.

شکل (۱۳) تغییرات تنش نهایی روی پی به ازای تعداد ریزشمع‌ها

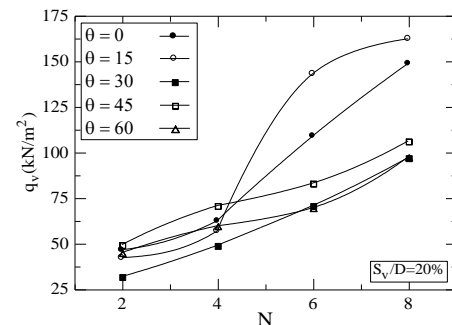


Figure (13): Variations of ultimate foundation pressure in terms of number of micro piles

در صورت استفاده از ۶ یا ۸ ریزشمع، در زاویه نصب ۱۵ درجه، تنش نهایی به بالاترین حد می‌رسد در حالی که در زاویه‌های ۳۰ و ۶۰ درجه، مقدار  $q_{ult}$  حداقل است. در نهایت برای سنجش میزان تاثیر شبکه ریزشمع‌ها بر رفتار پی، ضریب بدون بعدی به نام ضریب شبکه‌ای ( $R$ ) تعریف شده است (رابطه ۱).

$$R = \frac{\left[ \frac{Q_v}{A_s} \right]_{M-F-Test}}{\left[ \frac{Q_v}{A_s} \right]_{Re f-Test} + \left[ \frac{Q_v}{A_s} \right]_{M-Test}} \quad (1)$$

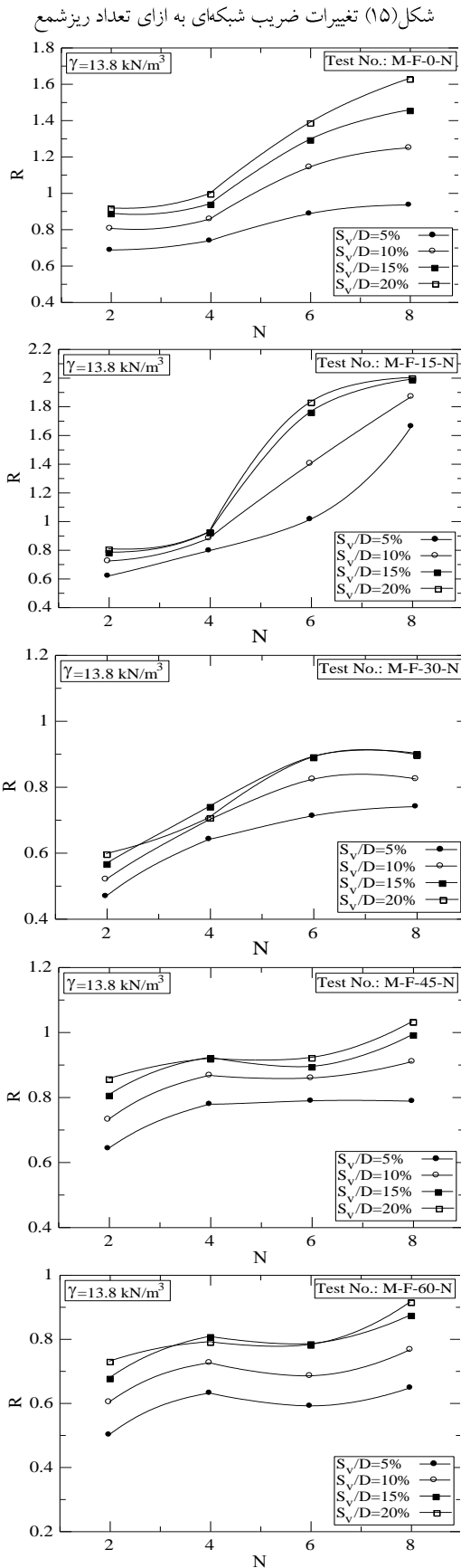


Figure (15): Variations of net factor in terms of different magnitudes of number of micro piles.

به طور کلی می‌توان گفت با افزایش تعداد ریزشمع‌ها مقدار  $R$  افزایش می‌یابد (شکل ۱۵). گرچه روند صعودی در زاویه‌های نصب کوچک (۰ و ۱۵ درجه) چشمگیرتر است به گونه‌ای که در  $\theta=15^\circ$  با افزایش تعداد ریزشمع‌ها به ۸ مقدار  $R$  به حدود ۲ می‌رسد.

افزایش مقدار ضریب شبکه‌ای بر اثر افزایش تعداد ریزشمع و یا کاهش زاویه نصب آنها را می‌توان با اندرکنش پی و خاک مرتبط دانست. در صورتی که در طول فرایند بارگذاری، جابجایی افقی ماسه در داخل گروه ریزشمع محدود شود، این محدودیت منجر به تغییر در ظرفیت باربری ریزشمع‌ها می‌گردد. این تغییر که به دلیل محصور شدن ماسه و افزایش تنش محصورکنندگی می‌باشد، اثر محصورکنندگی گروه ریزشمع‌ها یا اثر شبکه نام دارد [۱۲].

در صورت فعال شدن مثبت اثر شبکه و محصور شدن ماسه، در اندرکنش کف پی و گروه ریزشمع‌ها ظرفیت باربری پی مسلح شده افزایش یافته و  $R$  بزرگتر از ۱ می‌شود. به همین دلیل است که با افزایش تعداد ریزشمع و کاهش زاویه نصب، بر مقدار  $R$  افزوده می‌شود. چرا که افزایش تعداد ریزشمع‌ها ( $N$ ) منجر به افزایش محصورشدگی ماسه زیر پی شده و در اثر اتساع ماسه، تنش محصورکنندگی ماسه زیر پی، ظرفیت باربری و به تبع آن ضریب شبکه‌ای افزایش می‌یابد. در خصوص زاویه نصب ریزشمع‌ها هم می‌توان گفت که با افزایش  $\theta$  محصورشدگی ماسه زیر پی، بنابراین تنش محصورکنندگی و  $R$  کاهش می‌یابد. به گونه‌ای که در زاویه‌های نصب کوچک (۰ و ۱۵ درجه)  $R$  بیشینه مقدار خود را داراست. در زاویه‌های نصب بزرگتر، گوه گسیختگی مصالح زیر پی به سطح خاک نزدیکتر بوده، پس در بار کوچکتری نشست بیشینه به وقوع می‌پیوندد. حال آنکه در زاویه‌های نصب کوچک، این ناحیه در عمق بیشتری محصور می‌باشد.

افزایش مقدار  $R$  (با تعداد زیاد ریزشمع بالا)، هنگامی که  $\theta$  از صفر به ۱۵ درجه افزایش یابد ممکن است به این دلیل باشد که ناحیه محصور شده به وسیله‌ی گروه ریزشمع در حالت  $\theta=15^\circ$  بزرگتر از زمانی است که ریزشمع‌ها به صورت قائم نصب شده‌اند.

تعداد و زاویه نصب ریزشمع، به نرخ نشست نیز وابسته است. گویا مقدار مشخصی از نشست لازم است تا محصور شدن ماسه ایجاد شده و اثر شبکه فعال شود. در تمام مقادیر  $\theta$  و  $N$  با افزایش نرخ نشست میزان ضریب شبکه افزوده می‌شود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تعدادی آزمایش آزمایشگاهی برای بررسی میزان افزایش ظرفیت باربری پی مسلح شده با ریزشمع انجام شد. به این منظور، مدلی کوچک مقیاس از یک پی دایره‌ای مسلح شده با گروهی از ریزشمع ساخته شده و تاثیر تغییر تعداد و زاویه نصب ریزشمع‌ها بر ظرفیت باربری پی بررسی شده قرار گرفت.

در تمام آزمایش‌ها با توجه به تراکم کم خاک زیر پی، رفتار ماسه از نوع انقباضی بوده و همین امر منجر به وقوع گسیختگی برشی موضعی در سطح تماس پی و ماسه شد. در گروه ۲ (M-Tests) در همه زاویه‌های نصب، با افزایش تعداد ریزشمع‌ها میزان ظرفیت باربری گروه ریزشمع افزایش یافته و اثر کاهش گروه بر رفتار ریزشمع‌ها تاثیری نگذاشت. همچنین در تمام مقادیر  $N$  با افزایش زاویه نصب، ظرفیت باربری گروه ریزشمع افزایش یافت.

در گروه ۳ (M-F-Tests) با افزایش تعداد ریزشمع‌ها بر میزان ظرفیت باربری پی افزوده شد. در حالت افزایش زاویه نصب، تفسیر تغییرات ظرفیت باربری مشکل و پیچیده است اما به طور کلی در تعداد زیاد (که استفاده از ریزشمع در بهبود رفتار پی موثرتر است) هر چه زاویه نصب کوچکتر باشد، نتیجه بهتری حاصل می‌شود. لازم به گفتن است که تغییرات مقدار تنش زیر پی هم مشابه تغییرات ظرفیت باربری بود. در صورت فعال شدن مثبت اثر شبکه و محصور شدن ماسه، در اندرکنش کف پی و گروه ریزشمع‌ها ظرفیت باربری پی مسلح شده افزایش یافته و  $R$  بزرگتر از ۱ می‌شود. افزایش تعداد ریزشمع‌ها ( $N$ ) باعث افزایش محصورشدگی ماسه زیر پی شده و سبب شد که در اثر اتساع ماسه، تنش محصورکنندگی ماسه زیر پی، ظرفیت باربری و به تبع آن ضریب شبکه‌ای افزایش یابد. در خصوص زاویه نصب ریزشمع‌ها می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش  $\theta$  محصورشدگی ماسه زیر پی، پس تنش محصورکنندگی و  $R$  کاهش می‌یابد. در زاویه‌های نصب کوچک ( $0^\circ$  و  $15^\circ$  درجه)  $R$  بیشینه مقدار خود را داراست. در  $\theta=15^\circ$  با افزایش تعداد ریزشمع‌ها به ۸، مقدار  $R$  به

شکل (۱۶) تغییرات ضریب شبکه‌ای به ازای نسبت نشست به قطر پی

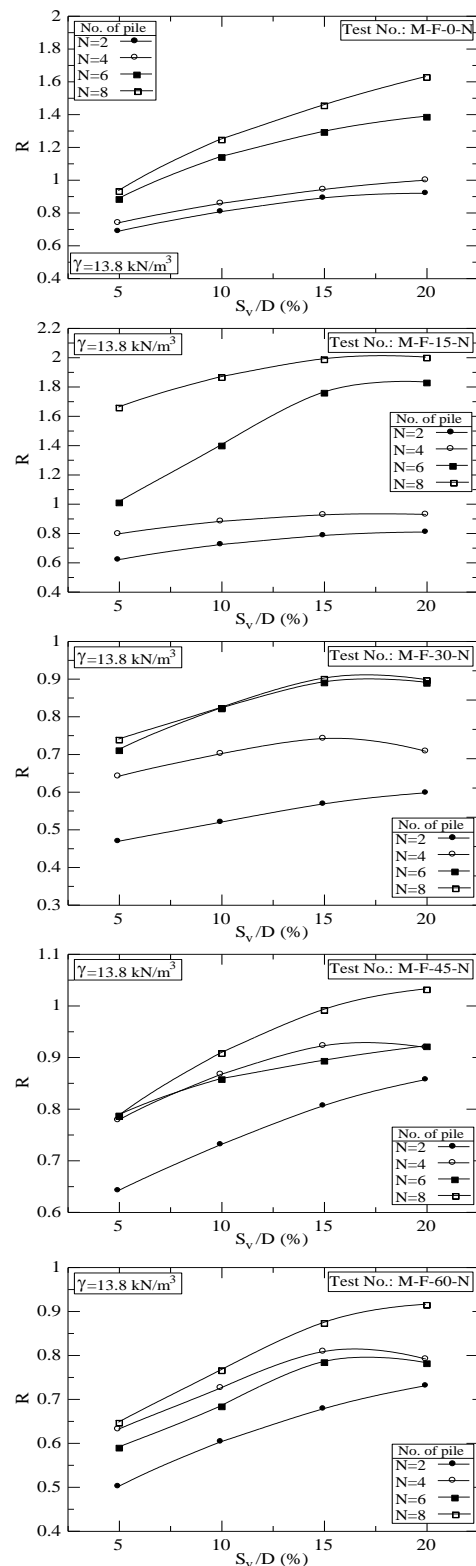


Figure (16): Variations of net factor in terms of settlement to the foundation diameter ratio

بررسی تغییرات  $R$  بر حسب ضریب  $Sv/D$  (شکل ۱۶) نشان می‌دهد که به طور کلی با افزایش مقدار نشست، ضریب شبکه‌ای،  $R$  افزوده می‌شود. این بدان معناست که اثر شبکه، علاوه بر

Champaign, USA, 2002.

[6] Morsy, U.A., "Repair of Damietta Bridge Foundations Using Micropiles: A Case Study", Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, Montréal, Canada, 2002.

[7] Estephan, R., Frank, R., "Experimental and Numerical Approaches to study of the Behavior of Micropile Groups and Networks Subjected to Vertical or Horizontal Loading", Proceedings of International Workshop of Young Doctors in Geomechanics, ENPC-LCPC, France, 2002.

[8] Misra, A., Chen, C.H., Oberoi, R., Kleiber, A., "Simplified Analysis for Micropile Pullout Behavior", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 10, 2004, pp. 1024-1033.

[9] Han, J., Ye, S. L., "A Field Study on the Behavior of Micropiles in Clay under Compression or Tension", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 43, 2006, pp. 19-29.

[10] Han, J., Ye, S. L., "A Field Study on the Behavior of a Foundation Underpinned by Micropiles", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 43, 2006, pp. 30-42.

[11] Dietz, K., Schrumann, A., "Foundation Improvement of Historic Buildings by Microiles, Museum Island, Berlin and St. Kolumba, Cologne", The 7th ISM Workshop, Schrobhausen, Germany, 2006.

[12] Tsukada, Y., Miura, K., Tsubokawa, Y., Otani, Y., You, G. L., "Mechanism of Bearing Capacity of Spread Footings Reinforced with Micropiles", *Soils and Foundations*, Vol. 46, No. 3, 2006, pp. 367-376.

[13] Sadek, M., Shahrou, I., Mrouh, H., "Influence of Micropile Inclination on the Performance of a Micropile Network", *Ground Improvement*, Vol. 10, No. 24, 2006, pp. 165-172.

[14] Misra, A., Roberts, L.A., Oberoi, R., Chen, C.H., "Uncertainty Analysis of Micropile Pullout Based upon Load Tet Results", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 133, No. 8, 2007, pp. 1017-1025.

[15] Shields, D.R., "Buckling of Micropiles", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 133, No. 3, 2007, pp. 334-337.

[16] Alsaleh, H., Shahrour, I., "Influence of Plasticity on the Seismic Soil-Micropiles-Structure Interaction", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 29, 2009, pp. 574-578.

[17] موحدی فر، م.، بلوری بزاز، ج.، جعفری، م.، "تأثیر تغییر طول حرارتی عرشه پل‌های یکپارچه بر میزان فشار مقاوم وارد بر کوله پل‌ها"، ششمین کنگره ملی عمران، سمنان، ۲۰۱۱.

حدود ۲ می‌رسد. اثر شبکه، علاوه بر تعداد و زاویه نصب ریزشمع، به شدت به نرخ نشست نیز وابسته است. گویا مقدار مشخصی از نشست لازم است تا محصور شدن ماسه القا شده و اثر شبکه فعال شود. در تمام مقادیر  $\theta$  و  $N$  با افزایش نرخ نشست بر میزان ضریب شبکه افزوده می‌شود.

در زاویه‌های نصب بزرگتر، گوه گسیختگی مصالح زیر پی به سطح خاک نزدیکتر بوده، بنابراین در بار کوچکتری نشست حداکثر به وقوع می‌پیوندد در حالیکه در زاویه‌های نصب کوچک، این ناحیه در عمق بیشتری محصور است. افزایش مقدار  $R$  وقتی در تعداد زیاد ریزشمع،  $\theta$  از صفر به ۱۵ درجه می‌رسد ممکن است به این علت باشد که ناحیه محصور شده به وسیله‌ی گروه ریزشمع در حالت  $\theta=15^\circ$  بزرگتر از زمانی است که ریزشمع‌ها به صورت قائم نصب شده‌اند. اظهار نظر قطعی در این رابطه مستلزم انجام آزمایش‌های دقیق‌تر و بیشتر و مطالعه در مقیاس ماکروسکوپی است.

در پایان با توجه به نتایج توصیه می‌شود که ریزشمع‌ها طوری چیده شوند که ماسه زیر پی را محدود کرده و اثر محصورشدگی را القا نمایند. در حالت بارگذاری مورد آزمایش، زاویه بهینه برای نصب ریزشمع‌ها ۱۵ درجه و مناسب‌ترین تعداد ریزشمع مورد استفاده ۸ تعیین شد.

## References

## ۵- مراجع

- [1] Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, "Micropile Design and Construction Guidelines-Implementation Manual, Publication No. FHWA-SA-97-070", FHWA, 2000.
- [2] Bruce, D. A., DiMillo, A. F., Juran, I. , "Introduction to Micropiles: An International Perspective", *Foundation Upgrading and Repair for Infrastructure Improvement*, ASCE, GSP 50, 1995, pp.1-26.
- [3] U.S Department of Transportation, "Drilled and Grouted Micropiles – State-of-the-Practice Review, Report No. FHWA-RD-96-016/019", FHWA, 1997.
- [4] Francis, R., Canou, J., Dupla, J.-C., Belmont, G., "Group effects of model micropiles in sand", *Prodeecings of Australian-New Zealand Conference on Geomechanics*, Vol.7, No.1, 1996, pp.620-625.
- [5] Ball, R., "Partial Retrofit of Bridges Using Micropiles", Research, University of Illinois at Urbana-

# Bearing Capacity of Foundations Reinforced with Micropiles

J. Bolouri Bazaz<sup>1\*</sup>, H. Jalilan Mashhoud<sup>2</sup>

1- Associate Professor, Civil Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad

2- M.Sc. of Geotechnical Engineering, Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad

bolouri@ferdowsi.ac.ir

## Abstract:

Improvement of bearing capacity of existing foundations is of great significance. There exist many methods for practical purposes. Micropile is one of the most promising methods. Micropile is a replacement pile of small diameter (usually less than 300 millimeter) which is frequently reinforced using steel elements. To construct a micropile, steel reinforcement is placed in the borehole after drilling the borehole and subsequently the grout is injected into it. Micropiles transfer the structural loads to the deeper and stronger layers of the ground and confine settlement (similar to conventional pile foundations). They also improve the mechanical properties of soil layer such as density, bearing capacity, permeability and compressibility. Owing to their advantages, micropiles are widely used as foundations of new structures construction and also for reinforcing the foundation of existing structures.

This research aims at experimental investigation of bearing capacity of foundations reinforced with micropiles under the condition of static loading. A small-scale physical model of a foundation reinforced with micropiles was developed and a series of static loading tests were carried out on.

The model micropile-foundation was located on loose sand. Density of the underlying soil was kept almost uniform throughout the tests. The foundation model was circular and 100mm and 50 mm in diameter and thickness, respectively. It was made from polyamide and considered to act as a rigid foundation during the loading owing to its material and thickness.

This foundation was reinforced with a group of micropiles with 6mm and 200mm in diameter and length, respectively. These model micropiles were made from threaded steel bars. In order to mobilize friction, sand grains were glued to the surface of the micropiles. Various arrangements of micropiles including the number and inclination angle of micropiles were tested. From the comparative examination of the observed behavior of micropile foundations, the influence of micropiles' arrangement on the mechanism and improvement of bearing capacity of foundation was investigated. Number of micropiles used in the group varied from 2 to 8. Micropiles were inclined at different angles (0°, 15°, 30°, 45° and 60°) to study its influence on the behavior of foundation reinforced with these elements. In order to quantitatively assess the degree of improvement in the bearing capacity of surface foundations reinforced with micropiles, an index R called "Network Index" was introduced in this study. The index R of unity means that the bearing capacity of foundations reinforced with micropiles is simply equal to the summation of the individual value of the surface foundation and that of the micropile group. There is an upward trend in the rate of index R when the number of micropiles is increased. On the other hand, in high numbers of micropiles used to reinforce the foundation, index R declines with increasing of inclination angle. In the case of micropiles with low-inclination-angle being implemented, bearing capacity is improved remarkably; an index R of 1.997 is achieved in this study where 8 micropiles inclined at an angle of 15° were used to reinforce the foundation.

**Keywords:** Foundation, Bearing Capacity, Micropile, Inclination Angle, Number, Network Index.