



NEW APPROACHES in CONSTRUCTION and PROJECT MANAGEMENT

Quarterly Journal of the Civil Engineering Department, Faculty of Engineering

<https://cpm.aletaha.ac.ir>



Investigating the buckling effect of micro piles on their bearing capacity on sandy soil

Amir Moghadam^{a*}, Farzad Moghadam Rad^b, Mohammad Hadi Shokri Yarak^c

^a Assistant Professor, Islamic Azad University, Parand Branch, Department of Civil Engineering, Tehran, Iran;

amir.moughaddam@gmail.com

^b Assistant Professor, Islamic Azad University, Parand Branch, Department of Civil Engineering, Tehran, Iran;

farzammr@yahoo.com

^c Master's student, Islamic Azad University, Parand Branch, Department of Civil Engineering, Tehran, Iran;

mohh.shokri@gmail.com

Abstract

In this study, the buckling load of micropiles was evaluated for micropiles with different diameters and lengths and for different inclination angles located in loose, medium and dense sandy soil. For this purpose, the finite element method and PLAXIS3D and ABAQUS software were used. The results of the analysis showed that by increasing the length of the micropiles by 1.5 and 2 times, the buckling load increases to a maximum of 35 and 25 percent for micropiles located in dense sandy soil, respectively. Also, for inclined micropiles for all angles including 20, 30 and 45 degrees, buckling occurs before reaching the ultimate load and bearing capacity, and the relationship between the buckling load and the inclination angle of the micropiles is nonlinear and the probability of buckling increases for lower loads and has an exponential and nonlinear rate. Finally, the best inclination angle for inclined micropiles is up to a maximum of 20 degrees, which is related to loose sand.

Article history:

Received: 22/11/2024

Revised: 29/04/2025

Accepted: 11/05/2025

Keywords

Buckling, micropile, finite element method, structural failure, geotechnical failure, buckling load.

* corresponding author: Assistant Professor, Islamic Azad University, Parand Branch, Department of Civil Engineering, Tehran, Iran; amir.moughaddam@gmail.com; ORCID: 0009-0003-22712-6965



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
موسسه آموزش عالی آل ط

رویکردهای نوین در مدیریت ساخت و پروژه

فصلنامه گروه مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی

<https://cpm.aletaha.ac.ir>



بررسی تأثیر کمانش ریزش‌ها بر ظرفیت باربری آن‌ها در خاک ماسه‌ای

امیر مقدم^{۱*}، فرزاد مقدم راد^۲، محمدهادی شکری یرکی^۳

۱. استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند، گروه مهندسی عمران، تهران، ایران؛ amir.moughaddam@gmail.com

۲. استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند، گروه مهندسی عمران، تهران، ایران؛ farzamr@yahoo.com

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند، گروه مهندسی عمران، تهران، ایران؛ mohh.shokri@gmail.com

چکیده فارسی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱

در این تحقیق برای ریزش‌های با قطر و طول‌های مختلف و برای زوایای تمایل مختلف واقع در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم اقدام به ارزیابی بار کمانش ریزش‌ها شد. به این منظور از روش المان محدود و نرم‌افزارهای PLAXIS3D و ABAQUS استفاده شد. نتایج حاصل از تحلیل نشان داد که به ترتیب با افزایش طول ریزش‌ها به میزان ۱.۵ و ۲ برابر بار کمانش تا حداکثر ۳۵ و ۲۵ درصد برای ریزش‌ها واقع در خاک ماسه‌ای متراکم افزایش می‌یابد. همچنین برای ریزش‌ها مایل به‌ازای تمام زوایا اعم از ۲۰، ۳۰ و ۴۵ درجه، کمانش قبل از رسیدن به بار و ظرفیت باربری نهایی اتفاق می‌افتد و رابطه بار کمانش با زاویه تمایل ریزش‌ها به‌صورت غیرخطی بوده و احتمال وقوع کمانش به‌ازای بار کمتر بیشتر می‌شود و نرخ تصاعدی و غیرخطی دارد. در نهایت این‌که بهترین زاویه تمایل برای ریزش‌ها مایل تا حداکثر ۲۰ درجه است که مربوط به ماسه سست می‌باشد.

واژگان کلیدی

کمانش، میکروپایل، روش المان محدود، گسیختگی سازه‌ای، گسیختگی ژئوتکنیکی، بار کمانش.

* نویسنده مسئول: استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد پرند، گروه مهندسی عمران، تهران، ایران؛ amir.moughaddam@gmail.com

۱. مقدمه

امروزه علم ژئوتکنیک با تکیه بر تجربیات چند صد ساله خود، امکان اجرای بسیاری از پروژه‌های عظیم را فراهم کرده است که یکی از مهم‌ترین آن‌ها اجرای پروژه‌های عمرانی بر روی خاک‌های مسئله‌ساز (خاک‌های آماسی یا قابل تورم، خاک‌های رمبند، خاک‌های نرم و سست با قابلیت نشست‌پذیری بالا و ...) است [۱]. بهسازی خاک روشی نوین جهت ایجاد بستری مناسب برای اجرای پروژه است. ارتقای شرایط ژئوتکنیکی خاک متناسب با شرایط پروژه مورد نظر و به صورت کنترل شده، جهت احداث یک سازه را بهسازی خاک می‌نامند [۲]. بهسازی خاک سبب بهبود شرایط ژئوتکنیکی خاک، متناسب با نوع پروژه، کاهش هزینه و زمان اجرا و افزایش طول عمر بهره‌برداری می‌شود [۳].

هدف بهسازی خاک، به‌کارگیری یک یا ترکیبی از روش‌های مختلف، جهت بهبود خصوصیات مختلف خاک همچون افزایش مقاومت برشی و ظرفیت باربری، افزایش تراکم خاک، کاهش نشست‌پذیری، تخلخل و نفوذپذیری خاک می‌باشد [۴]. روش‌های مختلفی به منظور بهسازی خاک وجود دارد که عمدتاً شامل بهسازی در جای خاک شامل حفاری و برداشت و جایگزینی خاک ضعیف با خاک خوب و مناسب یا انجام عملیات تراکم سطحی و عمیق توسط غلطک‌ها و دستگاه‌ها و واحدهای لرزاننده و مرتعش‌کننده خاک و یا تراکم توسط انفجار در سطح یا عمق خاک - بهسازی با استفاده از افزودنی‌های مختلف - بهسازی توسط المان‌های مسلح‌کننده خاک براساس روش‌های مختلف از جمله میخ‌کوبی خاک (Soil Nailing) و سازه نگهبان و پی شمعی (Pile Foundation) و ... و سایر روش‌های بهسازی است [۵].

بهسازی خاک با استفاده از میکروپایل‌ها از پیشرفته‌ترین روش‌های بهسازی بوده که با نام روش ریزشمع نیز معروف است. در این روش، میکروپایل به‌عنوان یک عضو باربر اضافه شده و علاوه بر افزایش مقاومت خاک، با تزریق دوغاب سیمان خصوصیات مکانیکی خاک را اصلاح می‌کند. میکروپایل دارای قطر کمتر از ۳۰ سانتیمتر بوده که جهت انتقال بارهای استاتیکی و دینامیکی به لایه‌های زیرین خاک به‌کار می‌رود. این روش بهسازی شامل سه مرحله حفاری - لوله‌کوبی - تزریق و تسلیح بوده که علاوه بر بازدهی بالا، معضلات اجرایی و هزینه‌های بالای اجرای پی‌های شمعی معمول را ندارد [۶]. برخی از کاربردهای ریزشمع‌ها عبارت‌اند از پایدارسازی شیب‌ها، ساخت دیواره‌های نگهبان، مقابله با روانگرایی، افزایش مقاومت توده خاک با اهداف مختلف و خاص در پروژه‌های تونل‌سازی و راه‌سازی و پل‌سازی و ...، حفاظت شیمیایی بخش‌های مدفون سازه‌ها، استفاده از آن به‌عنوان عضو باربر در زیر پی‌سازه‌های موجود و جدید و یا به‌عنوان عضو باربر برای ترمیم و بهسازی پی ساختمان‌های قدیمی و ... [۷]. اصول محاسبات مهندسی میکروپایل تابع نوع کاربری میکروپایل و به تبع آن نحوه رفتار آن می‌باشد. در شرایطی که میکروپایل‌ها با هدف تحکیم و بهسازی بستر پی‌سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، محاسبات فنی میکروپایل مشابه با محاسبه شمع‌های متداول است. این محاسبات مبتنی بر سه بخش طرح سازه‌ای - طرح ژئوتکنیکی - کنترل برش پانچ می‌باشند [۸]. میکروپایل‌ها به مانند پی‌های شمعی به لحاظ تئوری به صورت منفرد و یا گروهی تحلیل و طراحی می‌شوند. میکروپایل‌ها می‌توانند به صورت قائم یا مایل مورد استفاده قرار گیرند که نوع قائم آن به منظور باربری تحت بارهای قائم مورد توجه بوده ولیکن به لحاظ باربری جانبی دارای محدودیت بوده و به منظور افزایش ظرفیت باربری جانبی میکروپایل می‌توان آن را به صورت مایل اجرا کرد [۹]. در این خصوص ترکیبی از میکروپایل‌های قائم و مایل به صورت گروه (به مانند گروه شمع قائم و مایل به صورت شمع‌های قائم در بخش میانی و مرکزی و شمع‌های مایل کناری) می‌تواند روشی مناسب به منظور تأمین ظرفیت باربری قائم و جانبی مورد نظر به صورت توأم باشد [۱۰]. مسئله اصلی و مهم در خصوص میکروپایل نسبت لاغری بسیار بالای آن‌ها است که به تبع آن بحث کماتش میکروپایل تحت بارهای وارده مطرح می‌شود [۱۱]. نکته بسیار مهم در خصوص میکروپایل آن است که اجرای میکروپایل در خاک‌های سست و ضعیف مسئله کماتش را مطرح می‌سازد و این موضوع به‌خصوص در مورد خاک‌های نرم و ریزدانه بسیار مهم است. بر این اساس توصیه بر اجرای میکروپایل در زمین‌های سنگی و زمین‌های با خاک‌های درشت‌دانه (شنی و ماسه‌ای) و مخلوط با حداقل شرایط تراکم متوسط (در صورت عدم داشتن تراکم مناسب در خاک‌های دانهای و مخلوط درشت‌دانه و ریزدانه توصیه بر متراکم ساختن آن‌ها براساس روش‌های تراکم سطحی و عمیق قبل از اجرای میکروپایل می‌شود) به منظور جلوگیری از وقوع کماتش میکروپایل می‌شود [۱۲].



شکل ۱: نمونه ای از اجرای ریزشمع [۱۲]

مسئله مهم در خصوص ریزشمع‌ها به خصوص ریزشمع‌های با نسبت لاغری زیاد واقع در خاک‌های با شرایط متوسط و متراکم همان‌طور که بیان شد، مسئله کمانش است [۱۳]. سؤال مهم این است که کمانش ریزشمع قبل از رسیدن به ظرفیت باربری حدکثری و نهایی آن رخ می‌دهد یا قبل از آن که در صورتی که کمانش ریزشمع زودتر از رسیدن به ظرفیت باربری نهایی رخ دهد؛ در این صورت مسئله کمانش حاکم بر طرح بوده و بار کمانش ملاک طرح است که ممکن است به مراتب کمتر از بار و ظرفیت باربری نهایی ریزشمع بوده که در این صورت از ظرفیت ریزشمع به‌طور کامل استفاده نشده و این مسئله مطلوب نیست [۱۴]. از سوی دیگر و با وجود وقوع کمانش بعد از حصول به ظرفیت و بار نهایی که مطلوب است نیز نباید شرایطی پیش آید که کمانش ریزشمع رخ دهد و در هر شرایطی وقوع کمانش برای ریزشمع امری نامطلوب تلقی می‌شود [۱۵].

۲. روش تحقیق

به منظور انجام تحقیق از روش المان محدود و نرم‌افزارهای ABAQUS و PLAXIS3D استفاده می‌شود. متغیرهای مورد نظر شامل قطر ریزشمع - زاویه استقرار ریزشمع - نسبت طول به قطر ریزشمع - نوع خاک ماسه‌ای اعم از سست و متوسط و متراکم است. مشخصات مربوط به ریزشمع و خاک در جدول ۱ نشان داده شده است. مطالعات در دو فاز انجام می‌شود. در فاز اول بار کمانش تعیین می‌شود. در این خصوص و برای پارامترهای قطر ریزشمع - طول ریزشمع - نوع خاک ماسه‌ای در ابتدا با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS اقدام به ارزیابی و تحلیل بار کمانش برای ریزشمع براساس پارامترهای مختلف نامبرده فوق می‌شود. در این بخش هدف ارزیابی رفتار کمانشی و بار کمانش ریزشمع در حالات مختلف است. بر این اساس سناریوهای تحقیق در این بخش شامل موارد زیر هستند:

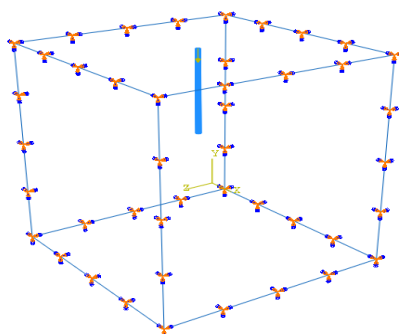
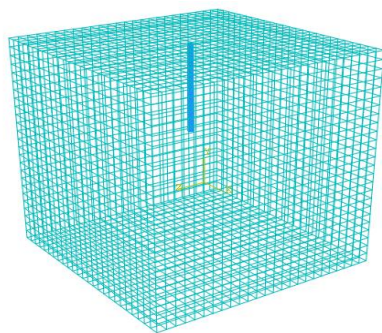
- ارزیابی بار کمانش ریزشمع‌ها به قطر ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتیمتر و با طول ۱ متر واقع در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم؛
 - ارزیابی بار کمانش ریزشمع‌ها به قطر ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتیمتر و با طول ۱.۵ متر واقع در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم؛
 - ارزیابی بار کمانش ریزشمع‌ها به قطر ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتیمتر و با طول ۲ متر واقع در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم؛
 - ارزیابی بار کمانش ریزشمع برای زاویه ریزشمع به قرار ۲۰، ۳۰ و ۴۵ درجه واقع در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم.
- ولیکن در ادامه نیاز است تا ظرفیت باربری ریزشمع نیز برآورد شود که در این خصوص از نرم‌افزار PLAXIS3D استفاده می‌شود. مطالعات در فاز دوم با دو هدف انجام می‌شود. اول آن که منحنی بار نشست ریزشمع در هر حالت و به‌ازای مقادیر مختلف پارامترها ارزیابی شود و براساس آن ظرفیت باربری نهایی مشخص و تعیین می‌شود. با مشخص شدن ظرفیت باربری و مقایسه آن با بار کمانش حاصل از مطالعات انجام شده در بخش قبل مشخص می‌شود که ریزشمع قبل از رسیدن به ظرفیت باربری یا هم‌زمان با رسیدن به ظرفیت باربری و یا بعد از رسیدن به آن، دچار کمانش می‌شود. در ادامه و به‌عنوان هدف دوم به ارزیابی شرایط توزیع تنش‌ها، تغییرشکل‌ها، شرایط گسیختگی، محدوده و گستره نقاط پلاستیک و توزیع آن‌ها پرداخته می‌شود.

مدل عددی ریزشمع و خاک در نرم‌افزار ABAQUS بوده که ریزشمع با استفاده از المان خطی سه‌بعدی تحت عنوان Wire3d مدل

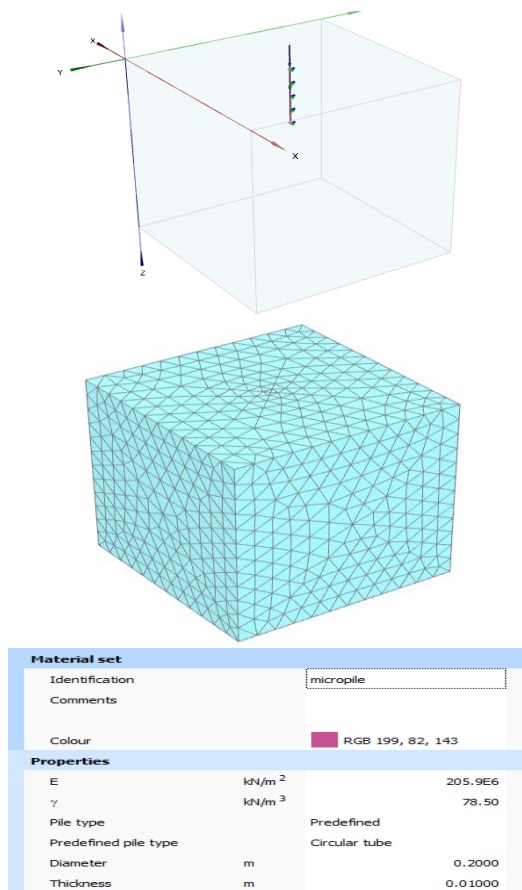
می‌گردد و خاک نیز با استفاده المان حجمی تحت عنوان Solid3d مدل می‌گردد. اندرکنش بین ریزشمع و خاک براساس استفاده از قید Interaction در نرم‌افزار در نظر گرفته و لحاظ شد. مدل رفتاری خاک نیز به صورت موهركولمب در نظر گرفته شد. در نرم‌افزار PLAXIS3D المان تخصصی برای مدل‌سازی شمع تحت عنوان embedded pile وجود دارد که برای آن شکل مقطع که به صورت لوله‌ای بوده و قطر و ضخامت تعریف شده و محاسبات مشخصات هندسی مقطع به صورت اتوماتیک انجام می‌گیرد. اندرکنش خاک و ریزشمع و شرایط مرزی تکیه‌گاهی نیز توسط نرم‌افزار و به صورت اتوماتیک لحاظ می‌شود.

جدول ۱: جدول مطالعات پارامتری و مشخصات شمع و خاک

مشخصات ریزشمع‌های مورد مطالعه		
نام پارامتر	مقدار	واحد
قطر ریزشمع	۱۵، ۲۰ و ۲۰	سانتیمتر
زاویه تمایل ریزشمع	۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۵	درجه
نسبت طول به قطر ریزشمع	حداقل برابر با ۱۰	-
طول ریزشمع	۱، ۱.۵ و ۲	متر
نوع خاک ماسه‌ای و مشخصات آن‌ها	سست، متوسط و متراکم	-
مشخصات خاک ماسه‌ای		
ماسه سست	ماسه متوسط	ماسه متراکم
چسبندگی = ۰ کیلوپاسکال	چسبندگی = ۰ کیلوپاسکال	چسبندگی = ۰ کیلوپاسکال
زاویه اصطکاک داخلی = ۳۰ درجه	زاویه اصطکاک داخلی = ۳۵ درجه	زاویه اصطکاک داخلی = ۴۰ درجه
مدول الاستیسیته = ۱۸۰۰۰ کیلوپاسکال	مدول الاستیسیته = ۴۰۰۰۰ کیلوپاسکال	مدول الاستیسیته = ۶۰۰۰۰ کیلوپاسکال
ضریب پواسون = ۰.۳	ضریب پواسون = ۰.۳۵	ضریب پواسون = ۰.۳۵
جرم واحد حجم = ۱۷ کیلونیوتن بر متر مکعب	جرم واحد حجم = ۱۹.۵ کیلونیوتن بر متر مکعب	جرم واحد حجم = ۲۱ کیلونیوتن بر متر مکعب



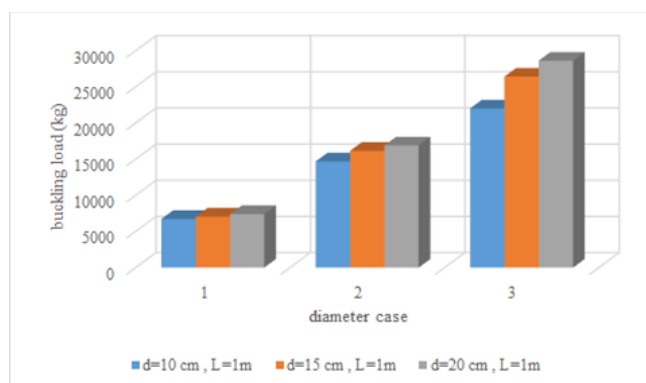
شکل ۲: مدل عددی ریزشمع، مش‌بندی و شرایط مرزی آن در نرم‌افزار ABAQUS



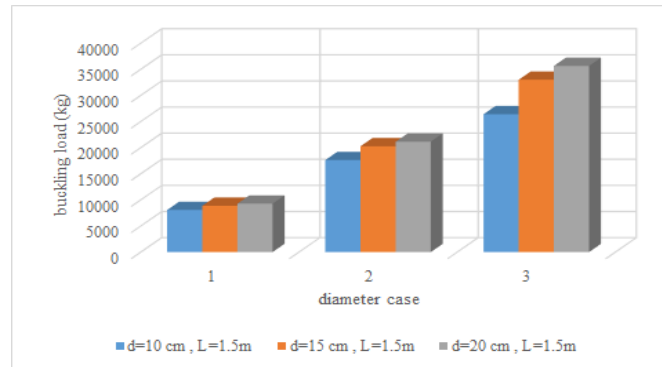
شکل ۳: مدل عددی ریزشمع، خاک، مش بندی آن و مشخصات ریزشمع در نرم افزار PLAXIS3D

۳. یافته‌ها

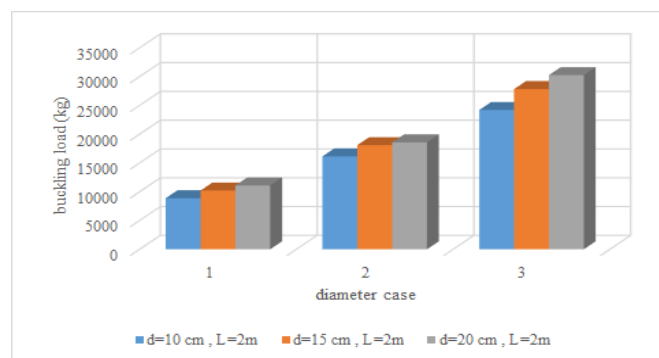
در این بخش نتایج تحلیل پارامتری برای ریزشمع براساس سناریوهای بیان شده در بخش قبل نشان داده شده است.



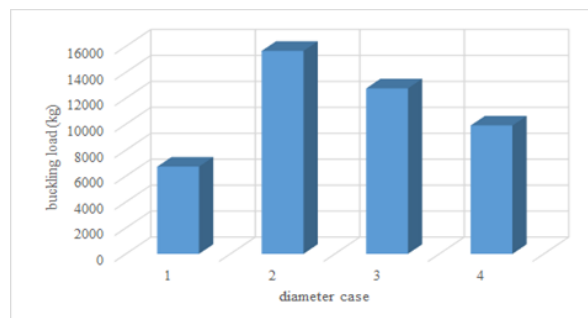
شکل ۴: مقایسه بار کمانش برای ریزشمع با قطرهای ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتیمتر و طول ۱ متر به ترتیب واقع در ۱: ماسه سست، ۲: ماسه متوسط و ۳: ماسه متراکم



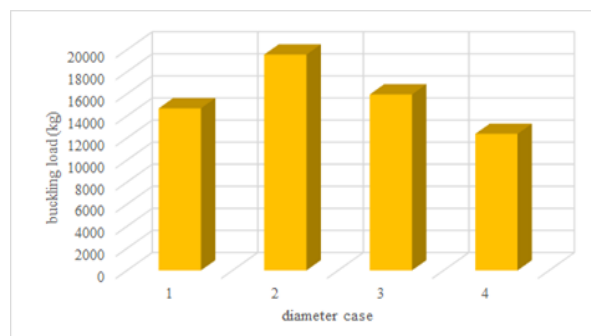
شکل ۵: مقایسه بار کمانش برای ریزشمع با قطرهای ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتیمتر و طول ۱.۵ متر به ترتیب واقع در ۱: ماسه سست، ۲: ماسه متوسط و ۳: ماسه متراکم



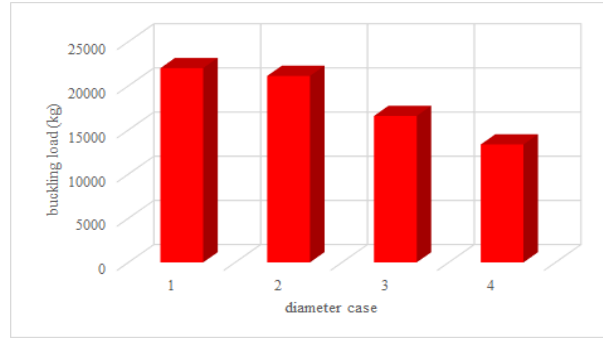
شکل ۶: مقایسه بار کمانش برای ریزشمع با قطرهای ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتیمتر و طول ۲ متر به ترتیب واقع در ۱: ماسه سست، ۲: ماسه متوسط و ۳: ماسه متراکم



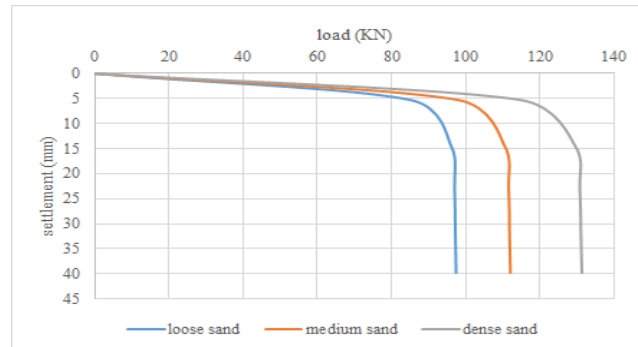
شکل ۷: مقایسه بار کمانش ریزشمع با زوایای تمایل ۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۵ درجه واقع در ماسه سست



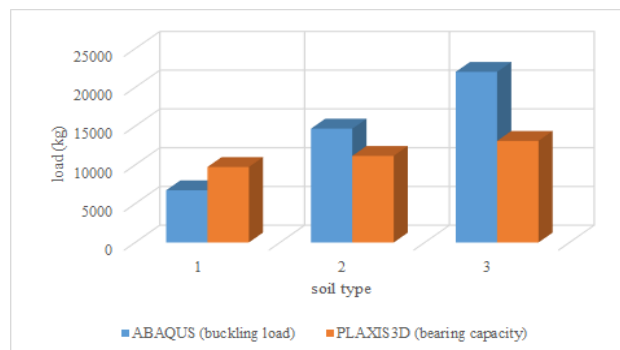
شکل ۸: مقایسه بار کمانش ریزشمع با زوایای تمایل ۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۵ درجه واقع در ماسه متوسط



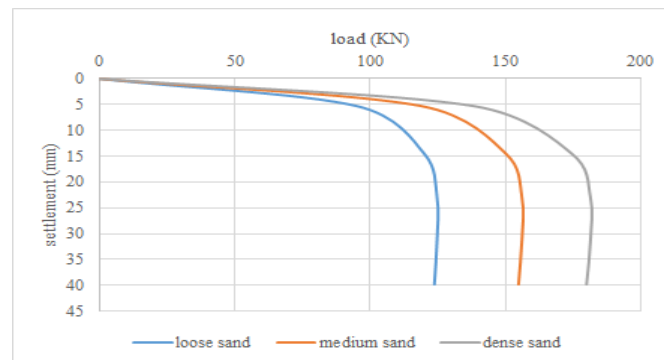
شکل ۹: مقایسه بار کماتش ریزشمع با زوایای تمایل ۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۵ درجه واقع در ماسه متراکم



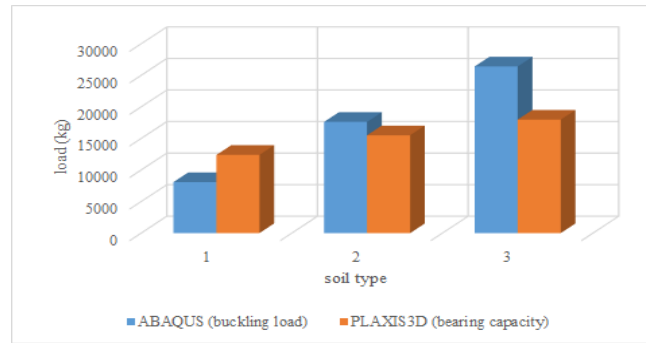
شکل ۱۰: مقایسه منحنی‌های بار نشست برای ریزشمع به قطر ۱۰ سانتیمتر و طول ۱ متر واقع در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم



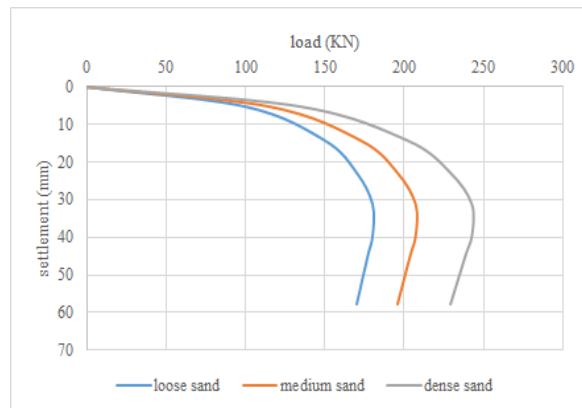
شکل ۱۱: مقایسه بار نهایی و بار کماتش برای ریزشمع به قطر ۱۰ سانتیمتر و طول ۱ متر واقع در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم



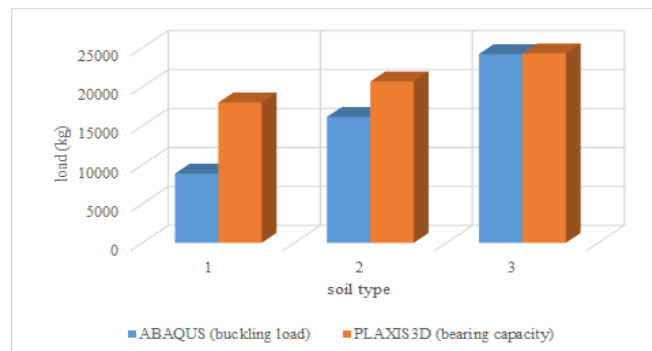
شکل ۱۲: مقایسه منحنی‌های بار نشست برای ریزشمع به قطر ۱۰ سانتیمتر و طول ۱.۵ متر واقع در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم



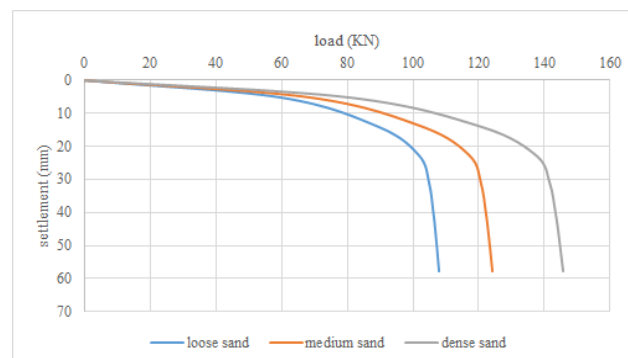
شکل ۱۳: مقایسه بار نهایی و بار کماتش برای ریزشمع به قطر ۱۰ سانتیمتر و طول ۱.۵ متر واقع در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم



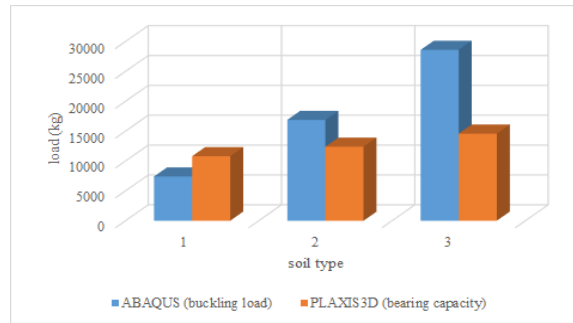
شکل ۱۴: مقایسه منحنی‌های بار نشست برای ریزشمع به قطر ۱۰ سانتیمتر و طول ۲ متر واقع در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم



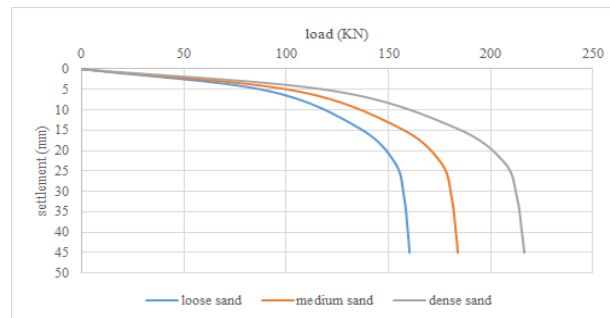
شکل ۱۵: مقایسه بار نهایی و بار کماتش برای ریزشمع به قطر ۱۰ سانتیمتر و طول ۲ متر واقع در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم



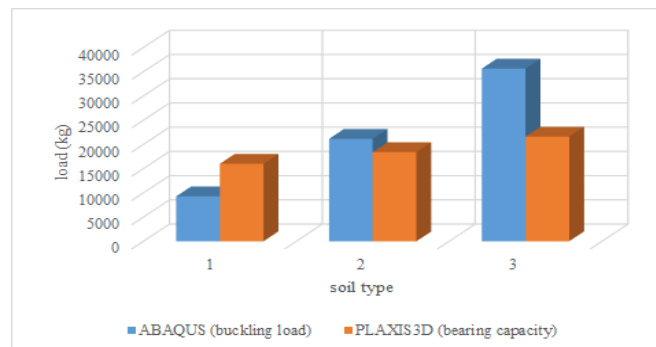
شکل ۱۶: مقایسه منحنی‌های بار نشست برای ریزشمع به قطر ۲۰ سانتیمتر و طول ۱ متر واقع در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم



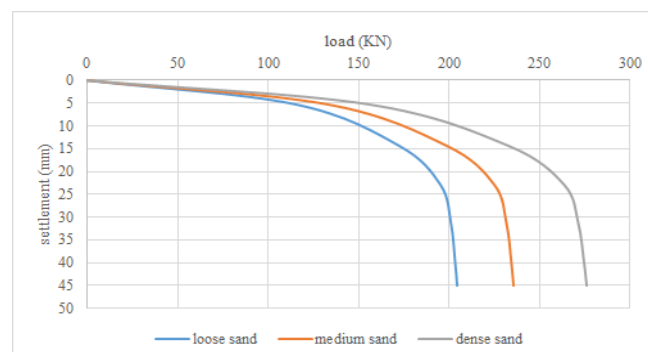
شکل ۱۷: مقایسه بار نهایی و بار کماتش برای ریزشمع به قطر ۲۰ سانتیمتر و طول ۱ متر واقع در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم



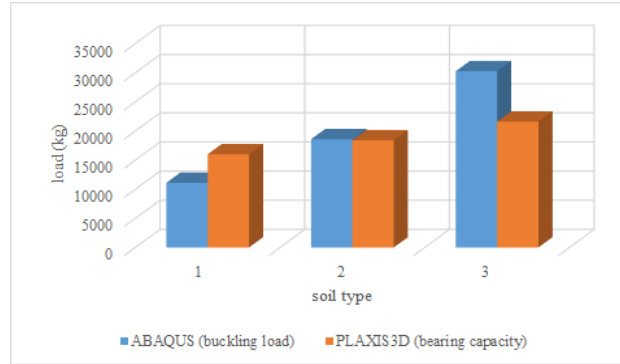
شکل ۱۸: مقایسه منحنی‌های بار نشست برای ریزشمع به قطر ۲۰ سانتیمتر و طول ۱.۵ متر واقع در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم



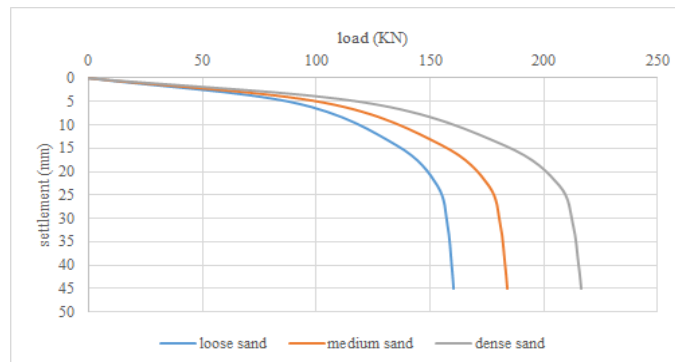
شکل ۱۹: مقایسه بار نهایی و بار کماتش برای ریزشمع به قطر ۲۰ سانتیمتر و طول ۱.۵ متر واقع در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم



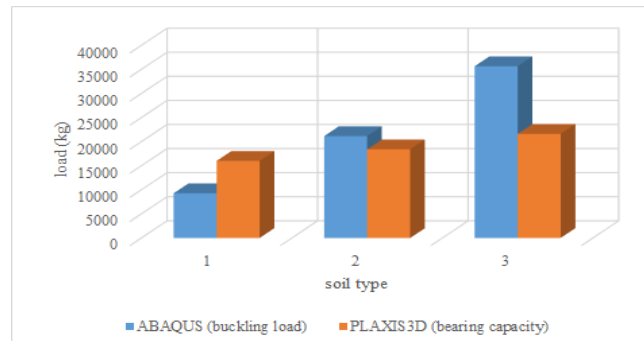
شکل ۲۰: مقایسه منحنی‌های بار نشست برای ریزشمع به قطر ۲۰ سانتیمتر و طول ۲ متر واقع در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم



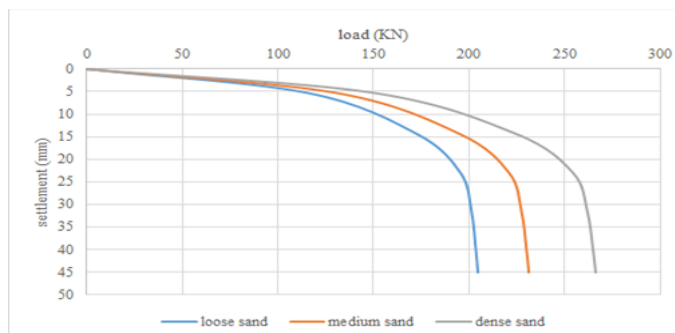
شکل ۲۱: مقایسه بار نهایی و بار کمانش برای ریزشمع به قطر ۲۰ سانتیمتر و طول ۱.۵ متر واقع در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم



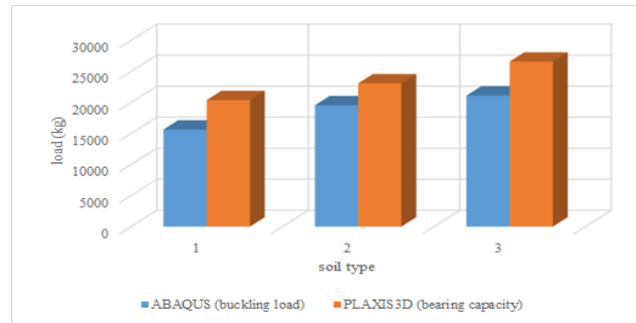
شکل ۲۲: مقایسه منحنی‌های بار نشست برای ریزشمع قائم به قطر ۲۰ سانتیمتر و طول ۱.۵ متر واقع در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم



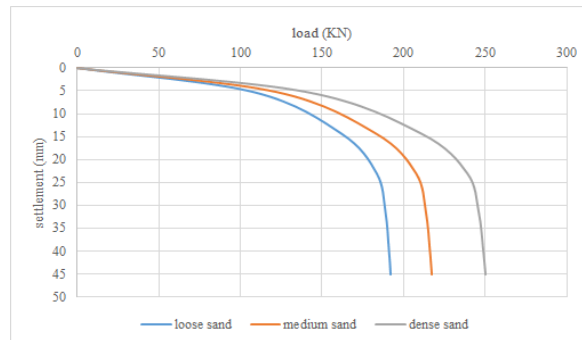
شکل ۲۳: مقایسه بار نهایی و بار کمانش برای ریزشمع قائم به قطر ۲۰ سانتیمتر و طول ۱.۵ متر واقع در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم



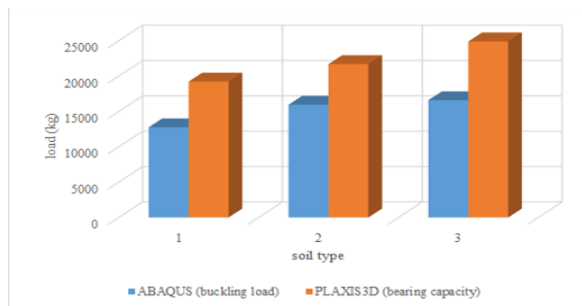
شکل ۲۴: مقایسه منحنی‌های بار نشست برای ریزشمع با زاویه تمایل ۲۰ درجه به قطر ۲۰ سانتیمتر و طول ۱.۵ متر واقع در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم



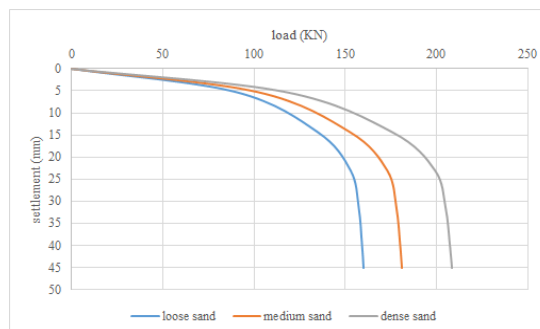
شکل ۲۵: مقایسه بار نهایی و بار کماتش برای ریزشمع با زاویه تمایل ۲۰ درجه به قطر ۲۰ سانتیمتر و طول ۱.۵ متر واقع در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم



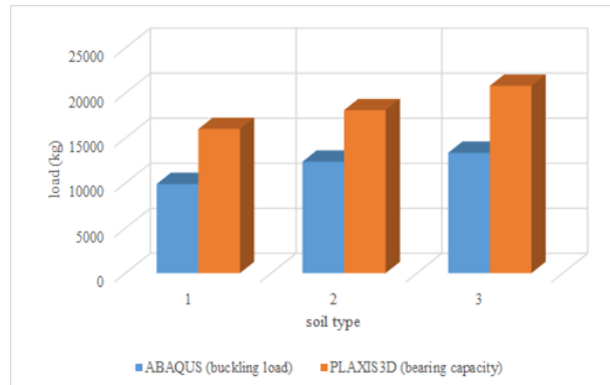
شکل ۲۶: مقایسه منحنی‌های بار نشست برای ریزشمع با زاویه تمایل ۳۰ درجه به قطر ۲۰ سانتیمتر و طول ۱.۵ متر واقع در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم



شکل ۲۷: مقایسه بار نهایی و بار کماتش برای ریزشمع با زاویه تمایل ۳۰ درجه به قطر ۲۰ سانتیمتر و طول ۱.۵ متر واقع در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم



شکل ۲۸: مقایسه منحنی‌های بار نشست برای ریزشمع با زاویه تمایل ۴۵ درجه به قطر ۲۰ سانتیمتر و طول ۱.۵ متر واقع در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم



شکل ۲۹: مقایسه بار نهایی و بار کمانش برای ریزشمع با زاویه تمایل ۴۵ درجه به قطر ۲۰ سانتیمتر و طول ۱.۵ متر واقع در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم

۱-۳. بحث بر روی یافته های تحقیق

- ✓ نتایج حاصل از تحلیل ریزشمع با طول ۱ متر نشان داد که به ترتیب افزایش قطر ریزشمع از ۱۰ به ۱۵ و ۲۰ سانتیمتر منجر به افزایش ۵ و ۱۰ درصدی بار کمانش ریزشمع واقع در ماسه سست، افزایش ۱۰ و ۱۵ درصدی بار کمانش ریزشمع واقع در ماسه متوسط و در نهایت افزایش ۲۰ و ۳۰ درصدی بار کمانش ریزشمع واقع در ماسه متراکم می‌شود.
- ✓ نتایج حاصل از تحلیل ریزشمع با طول ۱.۵ متر نشان داد که به ترتیب افزایش قطر ریزشمع از ۱۰ به ۱۵ و ۲۰ سانتیمتر منجر به افزایش ۱۰ و ۱۵ درصدی بار کمانش ریزشمع واقع در ماسه سست، افزایش ۱۵ و ۲۰ درصدی بار کمانش ریزشمع واقع در ماسه متوسط و در نهایت افزایش ۲۵ و ۳۵ درصدی بار کمانش ریزشمع واقع در ماسه متراکم می‌شود.
- ✓ نتایج حاصل از تحلیل ریزشمع با طول ۲ متر نشان داد که به ترتیب افزایش قطر ریزشمع از ۱۰ به ۱۵ و ۲۰ سانتیمتر منجر به افزایش ۱۵ و ۲۵ درصدی بار کمانش ریزشمع واقع در ماسه سست، افزایش ۱۲ و ۱۵ درصدی بار کمانش ریزشمع واقع در ماسه متوسط و در نهایت افزایش ۱۵ و ۲۵ درصدی بار کمانش ریزشمع واقع در ماسه متراکم می‌شود.
- ✓ نتایج تحلیل ریزشمع به قطر ۱۰ سانتیمتر و طول ۱ متر نشان داد که ظرفیت باربری حداکثر ریزشمع واقع در خاک‌های ماسه‌ای متوسط و متراکم به ترتیب به میزان ۱۵ و ۳۵ درصد نسبت به ریزشمع واقع در خاک سست افزایش یافته است. براساس نتایج به‌دست آمده مشاهده شد که ظرفیت باربری نهایی ریزشمع واقع در خاک ماسه‌ای سست در حدود ۱.۴۵ برابر بیشتر از بار کمانش بحرانی می‌باشد.
- ✓ نتایج تحلیل ریزشمع به قطر ۱۰ سانتیمتر و طول ۱.۵ متر نشان داد که ظرفیت باربری حداکثر ریزشمع واقع در خاک‌های ماسه‌ای متوسط و متراکم به ترتیب به میزان ۲۵ و ۴۵ درصد نسبت به ریزشمع واقع در خاک سست افزایش یافته است. براساس نتایج به‌دست آمده مشاهده شد که ظرفیت باربری نهایی ریزشمع واقع در خاک ماسه‌ای سست در حدود ۱.۵۵ برابر بیشتر از بار کمانش بحرانی است.
- ✓ نتایج تحلیل ریزشمع به قطر ۱۰ سانتیمتر و طول ۲ متر نشان داد که ظرفیت باربری حداکثر ریزشمع واقع در خاک‌های ماسه‌ای متوسط و متراکم به ترتیب به میزان ۱۵ و ۳۵ درصد نسبت به ریزشمع واقع در خاک سست افزایش یافته است. براساس نتایج به‌دست آمده مشاهده شد که ظرفیت باربری نهایی ریزشمع واقع در خاک ماسه‌ای سست و متوسط به ترتیب در حدود ۲ و ۱.۳ برابر بیشتر از بار کمانش بحرانی است.
- ✓ نتایج تحلیل ریزشمع به قطر ۲۰ سانتیمتر و طول ۱ متر نشان داد که ظرفیت باربری حداکثر ریزشمع واقع در خاک‌های ماسه‌ای متوسط و متراکم به ترتیب به میزان ۱۷ و ۳۰ درصد نسبت به ریزشمع واقع در خاک سست افزایش یافته است. براساس نتایج به‌دست آمده مشاهده شد که ظرفیت باربری نهایی ریزشمع واقع در خاک ماسه‌ای سست در حدود ۱.۳۶ برابر بیشتر از بار کمانش بحرانی است.
- ✓ نتایج تحلیل ریزشمع به قطر ۲۰ سانتیمتر و طول ۱.۵ متر نشان داد که ظرفیت باربری حداکثر ریزشمع واقع در خاک‌های ماسه‌ای متوسط و متراکم به ترتیب به میزان ۱۰ و ۳۸ درصد نسبت به ریزشمع واقع در خاک سست افزایش یافته است.

۴. نتایج

- نتایج تحلیل ریزشمع به قطر ۱۰ سانتیمتر و طول ۱ متر نشان داد که ظرفیت باربری نهایی ریزشمع واقع در خاک ماسه‌ای سست در حدود ۱.۴۵ برابر بیشتر از بار کمانش بحرانی بوده که بر این اساس ظرفیت باربری به بار کمانش بحرانی محدود می‌شود؛ چرا که کمانش ریزشمع در مود ژئوتکنیکی بوده (و نه سازه‌ای) که براساس آن تغییر شکل‌های زیادی در خاک پیرامونی و زیر نوک شمع اتفاق می‌افتد؛ لذا کمانش ریزشمع در مود ژئوتکنیکی قبل از رسیدن ریزشمع به ظرفیت باربری نهایی اتفاق می‌افتد. برای ریزشمع واقع در خاک ماسه‌ای متوسط و متراکم به ترتیب ظرفیت باربری نهایی به میزان ۷۶ و ۶۰ درصد بار کمانش بحرانی بوده که بر این اساس ظرفیت باربری نهایی ملاک حاکم بر طرح بوده و بار نهایی قبل از کمانش ریزشمع اتفاق می‌افتد که مطلوب است و از ظرفیت باربری کامل ریزشمع استفاده می‌شود.
- نتایج تحلیل ریزشمع به قطر ۱۰ سانتیمتر و طول ۱.۵ متر نشان داد که ظرفیت باربری نهایی ریزشمع واقع در خاک ماسه‌ای سست در حدود ۱.۵۵ برابر بیشتر از بار کمانش بحرانی بوده که بر این اساس ظرفیت باربری به بار کمانش بحرانی محدود می‌شود. برای ریزشمع واقع در خاک ماسه‌ای متوسط و متراکم به ترتیب ظرفیت باربری نهایی به میزان ۸۵ و ۷۲ درصد بار کمانش بحرانی بوده که بر این اساس ظرفیت باربری نهایی ملاک حاکم بر طرح بوده و بار نهایی قبل از کمانش ریزشمع اتفاق می‌افتد که مطلوب است و از ظرفیت باربری کامل ریزشمع استفاده می‌شود.
- نتایج تحلیل ریزشمع به قطر ۱۰ سانتیمتر و طول ۲ متر نشان داد که ظرفیت باربری نهایی ریزشمع واقع در خاک ماسه‌ای سست و متوسط به ترتیب در حدود ۲ و ۱.۳ برابر بیشتر از بار کمانش بحرانی بوده که بر این اساس برای ریزشمع واقع در خاک ماسه‌ای سست و متوسط ظرفیت باربری به بار کمانش بحرانی محدود می‌شود. همچنین ظرفیت باربری نهایی برای ریزشمع واقع در خاک ماسه‌ای متراکم با بار کمانش تقریباً برابر بود.
- نتایج تحلیل ریزشمع به قطر ۲۰ سانتیمتر و طول ۱ متر نشان داد که ظرفیت باربری نهایی ریزشمع واقع در خاک ماسه‌ای سست در حدود ۱.۳۶ برابر بیشتر از بار کمانش بحرانی بوده که بر این اساس ظرفیت باربری به بار کمانش بحرانی محدود می‌شود. برای ریزشمع واقع در خاک ماسه‌ای متوسط و متراکم به ترتیب ظرفیت باربری نهایی به میزان ۷۷ و ۶۵ درصد بار کمانش بحرانی بوده که بر این اساس ظرفیت باربری نهایی ملاک حاکم بر طرح بوده و بار نهایی قبل از کمانش ریزشمع اتفاق می‌افتد که مطلوب است و از ظرفیت باربری کامل ریزشمع استفاده می‌شود.
- نتایج تحلیل ریزشمع به قطر ۲۰ سانتیمتر و طول ۱.۵ متر نشان داد که ظرفیت باربری نهایی ریزشمع واقع در خاک ماسه‌ای سست در حدود ۱.۶۶ برابر بیشتر از بار کمانش بحرانی بوده که بر این اساس ظرفیت باربری به بار کمانش بحرانی محدود می‌شود. برای ریزشمع واقع در خاک ماسه‌ای متوسط و متراکم به ترتیب ظرفیت باربری نهایی به میزان ۸۸ و ۷۳ درصد بار کمانش بحرانی بوده که بر این اساس ظرفیت باربری نهایی ملاک حاکم بر طرح بوده و بار نهایی قبل از کمانش ریزشمع اتفاق می‌افتد که مطلوب است و از ظرفیت باربری کامل ریزشمع استفاده می‌شود. نتایج تحلیل ریزشمع به قطر ۲۰ سانتیمتر و طول ۲ متر نشان داد که ظرفیت باربری حداکثر ریزشمع واقع در خاک‌های ماسه‌ای متوسط و متراکم به ترتیب به میزان ۱۵ و ۴۰ درصد نسبت به ریزشمع واقع در خاک سست افزایش یافته است. براساس نتایج به‌دست آمده مشاهده شد که ظرفیت باربری نهایی ریزشمع واقع در خاک ماسه‌ای سست در حدود ۱.۴۴ برابر بیشتر از بار کمانش بحرانی بوده که بر این اساس ظرفیت باربری به بار کمانش بحرانی محدود می‌شود. برای ریزشمع واقع در خاک ماسه‌ای متوسط و متراکم به ترتیب ظرفیت باربری نهایی به میزان ۹۵ و ۷۵ درصد بار کمانش بحرانی بوده که بر این اساس ظرفیت باربری نهایی ملاک حاکم بر طرح بوده و بار نهایی قبل از کمانش ریزشمع اتفاق می‌افتد که مطلوب است و از ظرفیت باربری کامل ریزشمع استفاده می‌شود.
- نتایج به‌دست آمده در مجموع نشان داد که در حالتی که ریزشمع قائم در خاک ماسه‌ای متوسط و متراکم واقع است دارای ظرفیت باربری نهایی کمتر از بار کمانش است که بر این اساس ظرفیت باربری نهایی قبل از وقوع کمانش حاصل شده که مطلوب است، اما در خصوص خاک سست کمانش قبل از رسیدن به بار و ظرفیت باربری نهایی اتفاق می‌افتد. برای ریزشمع مایل به‌ازای تمام زوایا اعم از ۲۰، ۳۰ و ۴۵ درجه کمانش قبل از رسیدن به بار و ظرفیت باربری نهایی اتفاق می‌افتد و رابطه بار کمان با زاویه تمایل ریزشمع به‌صورت غیرخطی بوده و احتمال وقوع کمانش به‌ازای بار کمتر بیشتر می‌شود و نرخ تصاعدی و غیرخطی دارد.

۵. جمع بندی

در این تحقیق برای ریزشمع‌های با قطر و طول‌های مختلف و برای زوایای تمایل مختلف واقع در خاک ماسه‌ای سست، متوسط و متراکم اقدام به ارزیابی بار کمانش ریزشمع شد. به این منظور از روش المان محدود و نرم‌افزارهای PLAXIS3D و ABAQUS استفاده شد. مدل‌سازی به صورت سه‌بعدی کامل انجام گرفت و اندرکنش خاک و شمع براساس نوع خاک ماسه‌ای اعم از سست، متوسط و متراکم با استفاده از ضریب اندرکنش مناسب در نظر گرفته شد.

نتایج به‌دست آمده در مجموع نشان داد که در حالتی که ریز شمع قائم در خاک ماسه‌ای متوسط و متراکم واقع است دارای ظرفیت باربری نهایی کمتر از بار کمانش است که بر این اساس ظرفیت باربری نهایی قبل از وقوع کمانش حاصل شده که مطلوب است، اما در خصوص خاک سست کمانش قبل از رسیدن به بار و ظرفیت باربری نهایی اتفاق می‌افتد. برای ریزشمع مایل به‌ازای تمام زوایا اعم از ۲۰، ۳۰ و ۴۵ درجه کمانش قبل از رسیدن به بار و ظرفیت باربری نهایی اتفاق می‌افتد و رابطه بار کمانش با زاویه تمایل ریزشمع به‌صورت غیرخطی بوده و احتمال وقوع کمانش به‌ازای بار کمتر بیشتر می‌شود و نرخ تصاعدی و غیرخطی دارد. در نهایت این‌که بهترین زاویه تمایل برای ریزشمع مایل تا حداکثر ۲۰ درجه است که مربوط به ماسه سست می‌باشد.

منابع

- [1]. Tang, H.; Chen, M.; Wu, P.; Faheem, M.; Feng, Q.; Lee, X. ... & Wang, B. (2023). "Engineered biochar effects on soil physicochemical properties and biota communities: A critical review," *Chemosphere*, 311, 137025.
- [2]. Buritatum, A.; Suddeepong, A.; Horpibulsuk, S.; Udomchai, A.; Arulrajah, A.; Mohammadinia, A. ... & Hoy, M. (2022). "Improvement of tensile properties of cement-stabilized soil using natural rubber latex," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(4), 04022028.
- [3]. Jaffar, S. T. A.; Muneeb Abid, M.; Khan, S. Z.; Jafri, T.; Rehman, Z. U.; Tariq, M. A. U. R. & Ng, A. W. (2022). "Evaluation of Conventional and Sustainable Modifiers to Improve the Stiffness Behavior of Weak Sub-Grade Soil," *Sustainability*, 14(5), 2493.
- [4]. Alimohammadi, H.; Amirmojahedi, M. & Tahat, J. N. (2022). "A case history of application of deep compaction method with comparison to different ground improvement techniques," *Transportation Infrastructure Geotechnology*, pp. 1-26.
- [5]. Majik, R. K. & Savoikar, P.P. (2022). "Ground modification techniques for deep soft soils sites in Goa region," *In Ground Improvement and Reinforced Soil Structures*, pp. 409-421, Springer, Singapore.
- [6]. Casagrande, B.; Saboya Jr, F.; McCartney, J. S. & Tibana, S. (2022). "Investigation of a field-scale energy micropile in stratified soil under cyclic temperature changes," *Geomechanics for Energy and the Environment*, 29, 100263.
- [7]. Sun, Z., Kong, L. & Wang, Y. (2022). "Seismic behaviour of a micropile-reinforced cut slope behind a cantilever retaining wall," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 152, 107058.
- [8]. Malik, B. A.; Mandhaniya, P.; Shah, M. Y. & Sawant, V. (2022). "Experimental and Numerical Study on Reinforcement of Foundations Using Micropiles as a Retrofitting Measure," *Arabian Journal for Science and Engineering*, pp. 1-11.
- [9]. Ding, X., He, H., Qu, Y. & Yang, Y. (2022). "Analysis of the Pile-Soil Combined Effect of Micropiles in Strengthening Expansive Soil Landslide in Southern Shaanxi Based on the Dynamic Soil Arch Model," *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022.
- [10]. Hadi, M. S. & Mekkiyah, H. M. (2022). "Effect of Diameter of Micropile on the Minaret Behavior during Earthquake, Virtual study," *Journal of Engineering*, 28(12), pp. 67-79.
- [11]. Castro Neto, J. R.; Albuquerque, P. J. R. D.; Barbosa, Y. & Fiscina, L. F. G. (2022). "Experimental study on the behavior of a new post-grouted micropile in a tropical soil," *Soils and Rocks*, p. 45.
- [12]. Almeida, A. P.; Liu, J.; Gurbarsaud, N. & Bruce, J. (2022). "Ultimate grout-to-soil bond strength of micropiles in glacial deposits," *Acta Geotechnica*, 17(2), pp. 577-600.
- [13]. Sanzeni, A. & Danesi, E. G. (2022). "Field tests and interpretation of screw micropiles subjected to axial loading in cohesive soil," *International Journal of Geotechnical Engineering*, 16(4), pp. 391-399.
- [14]. Wang, C.; Han, J. T. & Kim, S. (2022). "A field study on the load sharing behavior of a micropiled raft underpinned by a waveform micropile," *Canadian Geotechnical Journal*, 99(999), pp. 1-13.
- [15]. Abou Alhaija, M. & Batali, L. (2022). "Seismic Behavior of Micropiles and Micropiled Structures Used for Increasing Resilience: A Literature Review," *Applied Sciences*, 12(5), 2743.