

مطالعه‌ی عددی تأثیر هندسه‌ی سطوح جداری گروه شمع‌های مخروطی با مقاطع دایروی و مربعی در ظرفیت باربری محوری فشاری و بررسی بازدهی گروه

علیرضا شعبانپور* (دکتری)

محمود قضاوی (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۱
دوری ۲ - ۳۸، شماره ۱/۴، ص. ۷۱-۶۱ (پژوهشی)

شمع‌های مخروطی یا باریک‌شونده به شمع‌هایی اطلاق می‌شود که سطح مقطع آنها به صورت تدریجی و با حرکت به طرف نوک شمع کاهش می‌یابد. این تغییر هندسه باعث می‌شود که با ثابت ماندن حجم مصالح مصرفی در مقایسه با یک شمع متداول با سطح مقطع ثابت، باربری محوری فشاری شمع افزایش یابد. در پژوهش حاضر، به شبیه‌سازی عددی دو مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی شمع‌های منفرد و گروه شمع‌های 2×2 تحت بار محوری فشاری با مقاطع دایروی و مربعی مخروطی و یکنواخت معادل در دستگاه سانتریفیوژ پرداخته شده است. نتایج آزمایشگاهی و عددی انجام شده حاکی از برتری شمع و گروه شمع‌های مخروطی از منظر باربری محوری فشاری در مقایسه با مقطع یکنواخت معادل خود است. در مدل عددی شبیه‌سازی شده به بررسی ضرایب بازدهی گروه شمع‌های مخروطی و تحلیل توزیع تنش‌های برشی در محیط خاکی اطراف شمع‌ها و آثار هندسه‌ی سطوح جداری متفاوت شمع‌های دایروی و مربعی در میزان باربری آنها پرداخته و مشخص شد که کج‌های محدب شمع‌های مربعی، اثر منفی در اصطکاک جداری شمع‌ها دارند.

واژگان کلیدی: شمع مخروطی، گروه شمع، شبیه‌سازی عددی، هندسه‌ی سطوح جداری، بازدهی گروه.

ashabanpour@mail.kntu.ac.ir
ghazavi_ma@kntu.ac.ir

۱. مقدمه

پی‌های عمیق (شمع‌ها)، در مواردی که پی‌های سطحی، امکان تحمل بار وارده از سازه را ندارند و یا در مواردی که نشست سازه، موضوع مهمی باشد و یا زمانی که سازه بر روی خاک ضعیفی قرار گرفته باشد، استفاده می‌شوند. در موارد مذکور از شمع جهت انتقال بار سازه به لایه‌های مقاوم در عمق بیشتری از زمین استفاده می‌شود. شمع‌های استفاده شده در کاربری‌های مهندسی عمدتاً شمع‌های مقطع ثابت در طول (شمع‌های غیرمخروطی) هستند. شمع‌های مخروطی، شمع‌هایی هستند که سطح مقطع آنها در قسمت سر شمع بیشتر است و رفته‌رفته، مقطع آن تا نوک شمع کاهش می‌یابد. در سه دهه‌ی اخیر، علاقه‌ی پژوهشگران به شمع‌های مخروطی بیشتر شده و بر اساس مطالعات انجام شده مشخص شده است که آنها، توزیع مصالح بهتر و مؤثرتری دارند و ظرفیت باربری بیشتری در بارگذاری‌های مختلف (نظیر بارگذاری‌های محوری فشاری و جانبی) از خود نشان می‌دهند.

کاربری شمع‌ها در عمل عمدتاً به صورت گروهی است، اما بیشتر مطالعات انجام شده در مورد شمع‌های مخروطی بر روی شمع‌های منفرد با مقطع دایروی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۴/۲۱، اصلاحیه ۱۴۰۱/۶/۱۳، پذیرش ۱۴۰۱/۶/۲۰.

DOI:10.24200/J30.2022.60712.3118

۲. مروری بر ادبیات فنی

روبینسکی و ماریسون^۲ (۱۹۶۴)،^[۳] در مطالعات خود با استفاده از روش رادیوگرافی،

جابه جایی و تراکم، خاک اطراف مدل شمع مخروطی را بررسی کرده و نظریه‌ی در زمینه‌ی انتقال ناچیز نیرو در اثر اصطکاک سطح در اطراف شمع‌های استوانه‌یی و انتقال قابل توجه نیرو در اطراف شمع‌های مخروطی ارائه داده‌اند. کوریان و سرینوس^۳ (۱۹۹۵)،^[۴] در پژوهش آزمایشگاهی - عددی خود به بررسی تأثیر شکل مقاطع مختلف شمع‌های مخروطی و مزایای آنها در مقابل شمع‌های استوانه‌یی معادل پرداختند. شمع‌ها با مقاطع دایروی، مربعی و مثلثی چوبی به طول و حجم یکسان در خاک ماسه‌یی بوده‌اند. روش اجرای شمع‌ها در پژوهش اخیر به صورت اجرای شمع‌های درجاریز (بدون جابه جایی) بوده است. براساس مطالعات انجام شده، بیشینه‌ی ظرفیت بار نهایی در شمع‌های مخروطی، ۱۰٪ بیشتر از شمع‌های استوانه‌یی معادل بوده است. وی و آل‌نگار^۴ (۱۹۹۸)،^[۵] در پژوهش خود به مطالعه‌ی عکس‌العمل شمع‌های مخروطی تحت بارگذاری محوری در فشارهای همه‌جانبه‌ی مختلف پرداخته‌اند. در گروه اول آزمایش‌ها در خاک با تراکم کم، بیشترین افزایش باربری محوری فشاری شمع‌ها ناشی از مخروطی بودن شمع‌ها در فشار همه‌جانبه‌ی معادل ۲۰ کیلوپاسکال بوده است، که اختلاف باربری ۲۵ درصدی ایجاد کرده بود. در گروه دوم آزمایش‌ها در خاک با تراکم متوسط، بیشترین افزایش باربری محوری فشاری ناشی از مخروطی بودن شمع‌ها در فشار همه‌جانبه‌ی معادل ۴۰ کیلوپاسکال رخ داده است، که افزایش باربری معادل ۴۰٪ را در پی داشته است. ایشان در پژوهش دیگری (۱۹۹۹)،^[۶] به منظور بررسی عملکرد شمع‌های مخروطی در خاک ماسه‌یی درشت‌دانه، که تحت بار جانبی قرار گرفته‌اند، ۱۸ آزمون انجام دادند و دریافتند که شمع‌های مخروطی تا بیش از ۷۷٪، باربری جانبی بیشتری در مقایسه با شمع‌های استوانه‌یی معادل تحت بار جانبی از خود نشان داده‌اند. همچنین آنها در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۰۰)،^[۷] به بررسی ظرفیت باربری کششی شمع‌های مخروطی پرداختند و نشان دادند که نسبت باربری کششی به فشاری در شمع‌های استوانه‌یی بین ۵۹/۰ تا ۷/۰ و در شمع مخروطی با زاویه‌ی مخروطی ۹۵/۰ بین ۳۷/۰ تا ۵۸/۰ بوده است. در پژوهش آل‌نگار و سکر^۵ (۲۰۰۰)،^[۸] نیز با هدف بررسی خصوصیات کارایی محوری شمع‌های با مقطع متغیر و توسعه‌ی طراحی آنها، یک سری آزمایش‌های سانتریفیوژ انجام و مشخص شده است که ظرفیت باربری محوری فشاری شمع مخروطی به شمع استوانه‌یی معادل، تا ۸۸٪ افزایش یافته است. پایک^۶ و همکاران (۲۰۱۳)،^[۹] نیز با هدف بررسی چگونگی تأثیرگذاری حالت خاک و زاویه‌ی مخروطی شمع در ظرفیت باربری محوری شمع‌های مخروطی، ۱۴ آزمایش آزمایشگاهی بر روی یک شمع استوانه‌یی و دو شمع مخروطی با زوایای مخروطی ۱ و ۵/۱ درجه انجام دادند و دریافتند که مقاومت نهایی واحد نوک شمع‌های مخروطی با افزایش میانگین تنش، تراکم نسبی خاک و زاویه‌ی مخروطی شمع‌ها افزایش یافته است. همچنین مقاومت نهایی واحد جداری شمع‌های مخروطی نیز با افزایش تنش‌های عمودی و افقی، تراکم نسبی خاک و زاویه‌ی مخروطی افزایش یافته است.

برخی مطالعات بزرگ‌مقیاسی در محل نیز انجام شده‌اند،^[۱۰-۱۲] که تماماً برتری شمع مخروطی را در مقایسه با شمع مقطع یکنواخت معادل نشان داده‌اند. پژوهش‌های فوق‌الذکر، مربوط به مطالعات آزمایشگاهی و یا بزرگ‌مقیاس هستند، که عمده‌ی آنها در مورد شمع‌های مخروطی آزمایشگاهی بوده و تعداد مطالعات تحلیلی و عددی محدودتری در ادبیات فنی در مورد شمع‌های مخروطی انجام شده است، که در ادامه، به تعدادی از آنها اشاره شده است.

در مطالعه‌ی تحلیلی - عددی کدیکارا و مور^۷ (۱۹۹۳)،^[۱۳] که نقطه‌ی عطفی در مورد شمع‌های مخروطی به حساب می‌آید، با استفاده از تئوری انبساط حفره (CEM)^۸ و ارائه‌ی رابطه‌ی تحلیلی با معیار گسیختگی موهر-کلمب، به محاسبه‌ی ظرفیت باربری شمع‌های مخروطی پرداخته شده است. در مطالعه‌ی تحلیلی -

عددی انجام شده توسط ماناندهار و یوسفوکو^۹ (۲۰۱۳)،^[۱۴] که البته چند آزمون کوچک‌مقیاس آزمایشگاهی برای بررسی‌های اولیه نیز در آن انجام شده است، سعی شده است در راستا و تکمیل پژوهش اخیر،^[۱۳] فرض ساده‌سازی شده‌ی ثابت ماندن زاویه‌ی اصطکاک داخلی و زاویه‌ی اتساع با معرفی روابط جدید اصلاح شود. در پژوهش عددی انجام شده توسط قضاوی و علیمردانی (۲۰۰۶)،^[۱۵] که بر پایه‌ی روش اختلاف محدود و با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ انجام گرفته است، ظرفیت باربری محوری فشاری سه شمع سیلندری، مخروطی و مخروطی - پله‌یی معادل، بررسی و ارزیابی شده است. هدف اصلی نوشتار اخیر، بررسی امکان معادل‌سازی یک شمع مخروطی با قطعات منشوری است، که به صورت صلب در گرچه‌ها به هم متصل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که اختلاف ظرفیت باربری شمع مخروطی و مخروطی - پله‌یی کمتر از ۱۰٪ است. ژان^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۲)،^[۱۶] نیز به منظور مطالعه‌ی رفتار ظرفیت باربری محوری فشاری شمع‌های مخروطی، مطالعات عددی بر پایه‌ی روش اجزاء محدود با نرم‌افزار آباکوس^{۱۱} انجام داده‌اند. روش اجرای شمع‌ها به صورت بتنی درجاریز با مقطع دایروی و طول ۴ متر و ۲ سری تحلیل شمع بوده است. بر اساس پژوهش اخیر، ظرفیت باربری محوری فشاری شمع مخروطی در زاویه‌ی مخروطی بهینه، حدود ۱۲٪ بیشتر از شمع مقطع یکنواخت معادل خود است و دریافتند که شمع مخروطی برای شرایطی مناسب است که شمع در حالت شناور قرار داشته باشد.

هاتف و شفقت (۲۰۱۵)،^[۱۷] به مطالعه‌ی عددی رفتار شمع و گروه شمع‌های مقطع دایروی مخروطی و یکنواخت معادل و مقایسه‌ی ظرفیت باربری محوری فشاری آنها با استفاده از نرم‌افزار سه‌بعدی پلکسیس ($PLAXIS^{3D}$)^{۱۲} پرداخته و دریافت‌اند که زاویه‌ی مخروطی بهینه برای شمع‌های منفرد جهت حصول بیشینه‌ی ظرفیت باربری محوری به طور کامل به زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک بستگی دارد. همچنین برای گروه شمع‌های مخروطی، افزایش ضریب فشار جانبی خاک باعث افزایش قابل توجه ظرفیت باربری محوری گروه شمع می‌شود و با افزایش زاویه‌ی مخروطی شمع‌ها، بازدهی گروه شمع مخروطی کاهش می‌یابد. در مطالعه‌ی عددی انجام شده‌ی والی و همکاران (۲۰۱۹)،^[۱۸] نیز به بررسی و مقایسه‌ی عددی ظرفیت باربری و نشست شمع‌های مخروطی و شمع‌های آندر - ریمد^{۱۳} در خاک رس پرداخته شده است. در پژوهش تحلیلی دیگری که سورمه‌یی و قضاوی (۲۰۱۸)،^[۲۰] انجام داده‌اند، یک روش تئوری مبتنی بر تئوری انبساط حفره در ارتباط با نظریه‌ی معادلات موج^{۱۴} برای تحلیل شمع‌های مخروطی رانده شده به خاک‌های چسبنده توسعه داده شده است. توسلی و قضاوی (۲۰۲۰)،^[۲۱] نیز با مدل‌سازی و تحلیل‌های عددی توسط نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ بر اساس روش تفاضل محدود، قابلیت رانده شدن شمع‌های با هندسه‌های مختلف به داخل خاک را بررسی کرده‌اند. همچنین نصرالله‌زاده و هاتف (۲۰۲۲)،^[۲۲] به بررسی آزمایشگاهی و عددی ظرفیت باربری محوری فشاری شمع‌های منفرد و گروه شمع‌های مخروطی و سیلندری یکنواخت پرداختند و نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی را توسط نرم‌افزار $PLAXIS^{3D}$ سه‌بعدی و اثر تعداد شمع‌ها و فاصله‌ی شمع‌های گروه در ظرفیت باربری محوری را به صورت عددی بررسی کردند و دریافتند که بازدهی گروهی شمع‌های مخروطی در مقایسه با شمع‌های استوانه‌یی در فواصل بیشتر شمع‌های گروه به بیشینه‌ی مقدار خود می‌رسد. نهایتاً نشان داده شد که با افزایش تعداد شمع‌ها در گروه شمع، بازدهی گروه شمع‌های استوانه‌یی و مخروطی با فاصله‌ی شمع‌های ثابت، سه برابر قطر شمع و بیشتر، افزایش یافته است.

در مطالعات انجام شده بر روی شمع‌های مخروطی، کاستی‌ها و نقص‌هایی وجود دارد که نهایتاً باعث عدم تدوین نتایج جامع در مورد شمع‌های مخروطی شده

جدول ۱. برنامه‌ی آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام شده.

شماره‌ی آزمایش	مقطع شمع منفرد	مقطع گروه شمع ۴ تایی	زاویه‌ی مخروطی (درجه)	نسبت فاصله به قطر متوسط شمع‌ها در گروه
۱	دایروی	-	۰	-
۲	دایروی	-	۱/۲۸	-
۳	مربعی	-	۰	-
۴	مربعی	-	۱/۲۸	-
۵	-	دایروی	۰	۵
۶	-	دایروی	۱/۲۸	۵
۷	-	مربعی	۰	۳
۸	-	مربعی	۱/۲۸	۳
۹	-	دایروی	۰	۵
۱۰	-	دایروی	۱/۲۸	۵
۱۱	-	مربعی	۰	۳
۱۲	-	مربعی	۱/۲۸	۳

جدول ۲. جزئیات ابعادی شمع‌های مدل و پروتوتایپ.

اسم شمع	طول (سانتی متر)	قطر رأس شمع (سانتی متر)	قطر نوک شمع (سانتی متر)	قطر متوسط (سانتی متر)	سطح جانبی (سانتی متر مربع)	حجم (سانتی متر مکعب)	زاویه‌ی مخروطی (درجه)
مدل فیزیکی	CU	۳۸	۲/۵	۲/۵	۲۹۸	۱۸۷	۰
	CT	۳۸	۳/۳	۱/۶	۲۹۳	۱۸۶	۱/۲۸
	SU	۳۸	۲/۲	۲/۲	۳۳۵	۱۸۵	۰
	ST	۳۸	۳	۱/۳	۳۲۷	۱۸۵	۱/۲۸
نمونه‌ی مقیاس شده‌ی (پروتوتایپ)	CU	۱۱۴۰	۷۵	۷۵	۲۶۸۲۰۰	۵۰۴۹۰۰۰	۰
	CT	۱۱۴۰	۹۹	۴۸	۲۶۳۷۰۰	۵۰۲۲۰۰۰	۱/۲۸
	SU	۱۱۴۰	۶۶	۶۶	۳۰۱۵۰۰	۴۹۹۵۰۰۰	۰
	ST	۱۱۴۰	۹۰	۳۹	۲۹۴۳۰۰	۴۹۹۵۰۰۰	۱/۲۸

۳. شرح مختصری از آزمایش‌های آزمایشگاهی

سانتریفیوژ ژئوتکنیکی، ابزاری قدرتمند برای مهندسی ژئوتکنیک است، که قادر است اثر وابستگی رفتار مصالح خاکی به تنش را شبیه‌سازی کند. در واقع، به طور مصنوعی می‌توان رفتاری از مصالح مدل را ایجاد کرد، که توزیع و مقدار تنش در مدل و سازه‌ی اصلی یکسان باشد. در دو مطالعه‌ی آزمایشگاهی مذکور،^{[۱] و [۲]} در مجموع ۱۲ آزمایش بارگذاری شمع در دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی بر روی شمع‌های مقطع دایروی و مربعی تحت بارگذاری محوری فشاری انجام شده است، که ۴ مورد آن بر روی شمع‌های منفرد و ۸ مورد دیگر بر روی گروه شمع‌ها با فاصله‌ی مرکز به مرکز ۳ و ۵ برابر قطر متوسط شمع‌ها (۳D و ۵D) بوده است. خلاصه‌ی برنامه‌ی آزمایش‌های انجام شده در جدول ۱ ارائه شده است.

بر مبنای قوانین مقیاس در دستگاه سانتریفیوژ، طول و ابعاد شمع با ضریب N و نیروی شمع با ضریب N^2 مقیاس می‌شود. تمامی آزمایش‌های تحت شتاب گرانش $3g$ (یعنی $N=3$) انجام پذیرفته است. شمع‌های استفاده شده از جنس آلومینیوم بودند، که مشخصات آنها در ابعاد مدل و مقیاس شده (پروتوتایپ^[۱۵]) در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین گروه شمع‌ها 2×2 بوده و تمامی شمع‌ها به

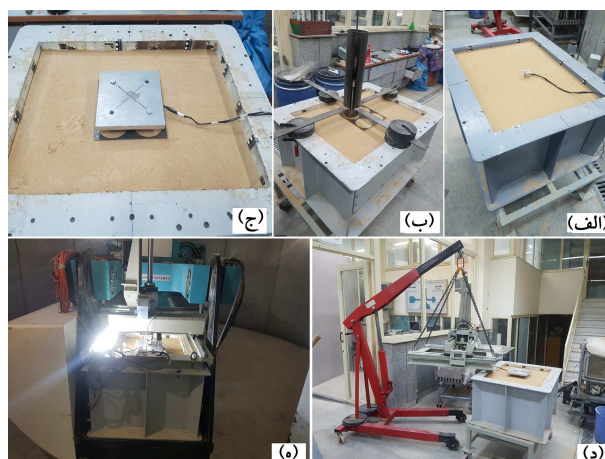
است. اولاً، بیشتر مطالعات بر روی شمع‌های منفرد بوده و مطالعات آزمایشگاهی و بزرگ‌مقیاس جامعی بر روی گروه شمع‌های مخروطی با مقاطع مختلف انجام نشده است. همچنین روش اجرا، که متغیر مهمی در نتایج حاصل از ظرفیت باربری محوری شمع‌های مخروطی است، عمدتاً به صورت درجاریز است، که با ماهیت اجرای واقعی شمع‌های مخروطی تفاوت دارد. همچنین اثر مقیاس در مطالعات آزمایشگاهی شمع‌های مخروطی لحاظ نشده است، که این موضوع بدون تردید در تعمیم نتایج آزمایشگاهی به بزرگ‌مقیاس با توجه به وابستگی ماهیت رفتار سازه‌های ژئوتکنیکی به تنش، ایجاد نقصان می‌کند. لذا نویسندگان پژوهش حاضر، در مطالعاتی جداگانه،^{[۱] و [۲]} به بررسی و رفتارسنجی شمع‌های منفرد و گروه شمع‌های با مقاطع مختلف با اجرای کوبشی و تحت بارگذاری محوری فشاری در دستگاه سانتریفیوژ تحت شتاب گرانش $3g$ اقدام کرده و بدین ترتیب نواقص موجود در مطالعات پیشین را پوشش داده‌اند. هدف از پژوهش حاضر، شبیه‌سازی مطالعات انجام شده در مورد دو مقطع دایروی و مربعی در نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ و بررسی اثر هندسه‌ی سطح جانبی متفاوت شمع‌های گروه در ظرفیت باربری محوری فشاری و همچنین بررسی بازدهی گروه شمع‌هاست. در ادامه، شرح مختصری در مورد مطالعات آزمایشگاهی ذکر شده ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه.

پارامتر	مقدار
اسم تجاری خاک	ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه
متوسط اندازه‌ی دانه‌های خاک (میلی‌متر)	۰/۳
نسبت تخلخل بیشینه و کمینه	۰/۵۳ و ۰/۸۹
چگالی ویژه‌ی ذرات جامد	۲/۶۵
تراکم نسبی خاک قبل و بعد از حرکت سانتریفیوژ (درصد)	۲۵/۸ و ۳۶/۹
زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک (درجه)	۳۲
مدول کشسانی (MPa)	۲۵
چسبندگی (kPa)	۰
چگالی خشک بیشینه (kg/m^3)	۱۷۲۹
چگالی خشک کمینه (kg/m^3)	۱۴۰۱
درصد رطوبت	۰/۶

است، که برای شبیه‌سازی محیط‌های پیوسته به کار می‌رود. نرم‌افزار مذکور بر اساس تحلیل محاسباتی لاگرانژی استوار است، که برای مدل‌سازی تغییرشکل‌های بزرگ نیز مناسب است. با نرم‌افزار آیتسکا می‌توان رفتار سازه‌های خاکی، سنگی و یا سایر موارد را که دارای جریان خمیری در هنگام رسیدن به حد تسلیم هستند، شبیه‌سازی کرد. مدل‌های رفتاری متنوعی در نرم‌افزار به صورت پیش‌فرض تعریف شده است و همچنین می‌توان مدل‌های جذبی را نیز به آن وارد کرد. هدف از تحلیل عددی یک پدیده‌ی ژئوتکنیکی، شبیه‌سازی تغییرات تنش کرنش محیط با بیشینه‌ی دقت ممکن است. به صورت مشخص در خصوص شبیه‌سازی‌های انجام شده در پژوهش حاضر، علاوه بر پیچیدگی‌های ذاتی محیط خاک، از مدل‌سازی فرایند نصب شمع‌ها نیز صرف‌نظر شده است. لذا راهبرد تحلیل در بخش کنونی این بوده است که پارامترهای خاک برای بهترین انطباق ممکن بین نتایج حاصل برای شمع منفرد دایروی مقطع یکنواخت در آزمایشگاه با نتایج حاصل از تحلیل عددی تدقیق شود. سپس در ادامه، سایر تحلیل‌ها، که تماماً با پارامترهای ذکر شده به دست آمده‌اند، انجام شده‌اند. به عبارتی، کالیبره کردن پارامترها فقط برای شمع منفرد دایروی مقطع یکنواخت انجام شده و این کار در سایر تحلیل‌ها تکرار نشده است. توجه شود تغییرات پارامترها به میزان اندک و در بازه‌ی قابل قبول برای خاک بوده است. در واقع، اصلی‌ترین پارامتری که در تحلیل‌ها تغییر داده شده است، مقدار چگالی خاک است؛ که به دلیل تراکم ناشی از اعمال شتاب مصنوعی g ۳۰ در دستگاه سانتریفیوژ در زمان بارگذاری آزمایش نیز مقدار آن بیش از مقدار استفاده شده در آماده‌سازی مدل فیزیکی بوده است. در واقع در مدل فیزیکی، خاک به صورت لایه‌لایه و با چگالی 150° کیلوگرم بر مترمکعب (تراکم نسبی ۲۵/۸) اجرا شده است، که پس از اعمال شتاب سانتریفیوژ تراکم آن افزایش (۳۶/۹) یافته است. در جدول ۴، مقادیر پارامترهای استفاده شده در تحلیل‌ها در مقایسه با مقادیر استخراج شده برای آنها در آزمایشگاه مکانیک خاک ارائه شده‌اند.

در شبیه‌سازی انجام شده از مدل رفتاری موهر - کلمب برای رفتار خاک و از مدل رفتاری کشسان خطی برای شبیه‌سازی رفتار شمع‌های مدل استفاده شده است. مرزها در کف مدل در هر سه امتداد X ، Y ، Z بسته شده‌اند. در طرفین (دیواره‌ها) نیز از قید غلظتی استفاده شده است. به این معنی که امکان جابه‌جایی قائم به گرہ‌ها داده شده است، اما جابه‌جایی افقی ممکن نبوده است.



شکل ۱. الف) آماده‌سازی جعبه‌ی خاک؛ ب) نصب شمع‌ها با چکش شمع‌کوب؛ ج) نصب سرشمع در گروه شمع‌ها؛ د) نصب سیستم بارگذاری و ابزارها؛ و) انتقال مدل آماده شده به سبد سانتریفیوژ جهت شروع آزمایش.

صورت کوبشی و با چکش شمع‌کوب در جعبه‌ی خاک اجرا شده‌اند. آماده‌سازی هر آزمایش، شامل ۵ مرحله‌ی اصلی بوده است، که تماماً در شتاب گرانش $1g$ انجام شده‌اند، که این مراحل عبارت‌اند از: الف) تهیه‌ی جعبه‌ی خاک با اجرای خاک به صورت لایه‌لایه و متراکم کردن هر لایه برای رسیدن به تراکم نسبی مطلوب؛ ب) کوبیدن شمع (در آزمایش شمع‌های منفرد) و یا ۴ شمع (در آزمایش‌های گروه) به صورت مجزا در محل تعیین شده توسط ضربه‌ی چکش و استفاده از سیلندر هادی برای هر شمع برای اطمینان از اجرای عمودی شمع‌ها؛ ج) نصب سرشمع (در مورد آزمایش‌های گروه شمع)؛ د) آماده‌سازی سیستم بارگذاری و ابزار دقیق (کرنش‌سنج)؛ هـ) انتقال مدل آماده شده به سبد سانتریفیوژ برای بارگذاری در شتاب گرانش $30g$ ، که تمامی مراحل اخیر در شکل ۱ مشاهده می‌شوند. نحوه‌ی اعمال بارگذاری به صورت کنترل جابه‌جایی و با نرخ ثابت اعمال بار ۲ میلی‌متر بر دقیقه انجام پذیرفته است.

خاک استفاده شده در پژوهش حاضر، نوعی ماسه‌ی سیلیسی معدنی موسوم به ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه بوده است، که مشخصات آن در جدول ۳ ارائه شده است. خاک مورد نظر به صورت لایه‌لایه در یک جعبه‌ی آزمایش مستطیلی با ابعاد 58×78 سانتی‌متر و ارتفاع ۴۹ سانتی‌متر اجرا شده است. هر شمع منفرد با ۲ حرف لاتین، که حرف اول مربوط به مقطع شمع (دایروی: C و مربعی: S) و حرف دوم مربوط به مخروطی یا یکنواخت بودن مقطع شمع در طول (مخروطی: T و یکنواخت: U) بوده، نام‌گذاری شده است. همچنین گروه شمع‌ها نیز با ۴ حرف لاتین، که دو حرف اول، نظیر شمع‌های منفرد و دو حرف دوم، مربوط به فاصله‌ی شمع‌های گروه است (۳D و ۵D) نام‌گذاری شده‌اند.

۴. مطالعه‌ی عددی

با هدف بررسی دقیق‌تر رفتار شمع‌های منفرد و گروه شمع‌های مخروطی و مقایسه‌ی آن با رفتار شمع‌های یکنواخت معادل (غیرمخروطی معادل)، مجموعه‌ی تحلیل‌ها به کمک نرم‌افزار تفاضل محدود $FLAC^{3D}$ (نسخه‌ی پنجم) انجام شده است. نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ ، یک برنامه‌ی تفاضل محدود از مجموعه‌ی نرم‌افزارهای آیتسکا ۱۶

جدول ۴. مقایسه‌ی متغیرهای خاک استفاده شده در مدل‌های آزمایشگاهی و عددی.

پارامتر	مقدار آزمایشگاه مکانیک خاک	مقدار در نظر گرفته شده در تحلیل عددی
زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک (درجه)	۳۱	۳۲
چسبندگی (kPa)	۴	۱
مدول کشسان (MPa)	۲۳	۲۵
چگالی (Kg/m^3)	۱۵۰۰	۱۶۰۰

جدول ۵. مشخصات مکانیکی مصالح شمع‌ها.

ویژگی	مقدار
مدل رفتاری	کشسان خطی
مدول بالک (MPa)	$6/4e^4$
مدول برشی (MPa)	$2/6e^4$
وزن مخصوص (Kg/m^3)	۲۳۵۷

جدول ۶. مشخصات در نظر گرفته شده برای خاک در مدل‌سازی.

ویژگی	مقدار
چگالی (Kg/m^3)	۱۶۰۰
مدول کشسان خاک (MPa)	۲۵
نسبت پواسون	۰/۳
زاویه‌ی اصطکاک (درجه)	۳۲
چسبندگی (kPa)	۱

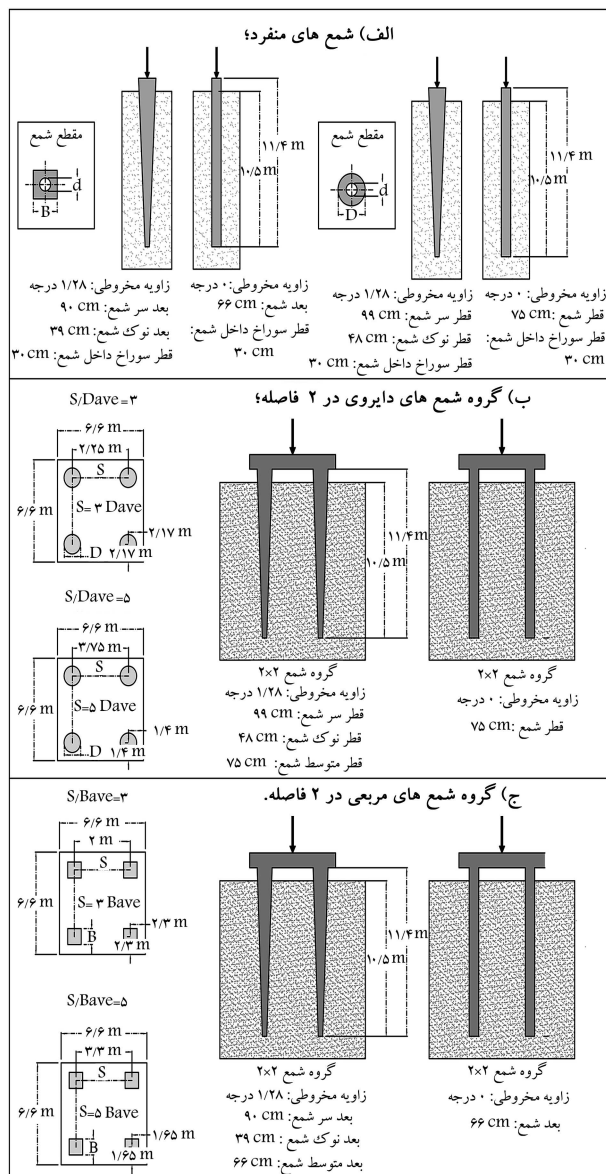
۱.۴. مشخصات شمع و خاک استفاده شده در شبیه‌سازی

مشخصات شمع‌ها در حالت پروتوتایپ و برای شتاب گرانش g و با رعایت قوانین مقیاس در نظر گرفته شده است، که ابعاد آن در جدول ۲ ارائه شده است. طرح شماتیک شمع‌ها و گروه شمع‌ها با ۲ فاصله‌ی مختلف با ابعاد پروتوتایپ در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

تمامی نتایج ارائه شده در مطالعه‌ی حاضر مربوط به شمع با مقیاس پروتوتایپ است. آلیاژ مصرفی در ساخت شمع‌ها از جنس آلومینیوم بوده است، که خصوصیات مکانیکی آن در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به این‌که رفتار شمع‌ها بر اساس مدل رفتاری کشسان خطی شبیه‌سازی شده است، فقط پارامترهای کشسان برای تعریف رفتار آلیاژ مذکور کافی است. در شکل ۲، همان‌گونه که مشخص است، سوراخی به قطر ۱ سانتی‌متر در شمع‌های مدل (۳۰ سانتی‌متر در پروتوتایپ) به جهت عبور سیم‌های ابزار دقیق (کرنش‌سنج) و کاهش میزان خطای ناشی از آن بر میزان باربری جداری شمع‌ها تعبیه شده است. مشخصات در نظر گرفته شده برای تعریف رفتار خاک استفاده شده در مدل عددی به کمک معیار موهر - کلمب در جدول ۶ ارائه شده است.

۲.۴. فاصله‌ی مرزها و ابعاد مش‌ها

برای اطمینان از عدم تأثیرگذاری فاصله‌ی مرزها و ابعاد مش در نتایج، از آنالیز حساسیت استفاده شده است. به این ترتیب که در دو مدل مجزای عددی، با افزایش تدریجی فاصله‌ی مرزها و کاهش تدریجی ابعاد مش از یک مقدار اولیه، منحنی بار - جابه‌جایی ترسیم و با هم مقایسه شده است. به عنوان پارامتر کنترلی، بار متناظر



شکل ۲. شماتیک مشخصات ابعادی هندسه‌ی شمع و گروه شمع‌های شبیه‌سازی شده در ابعاد پروتوتایپ.

با نشست ۱۲ میلی‌متر (Q_{12}) برای یک شمع با مقطع یکنواخت دایره‌ی تحت بارگذاری محوری فشاری انتخاب شده است. برای بررسی تأثیر فاصله‌ی مرزها، با افزایش فاصله‌ی مرزهای مدل از مرکز شمع، مقدار پارامتر کنترلی پایش و ثبت شده است، که تغییرات آن با افزایش فاصله‌ی

جدول ۷. مقادیر متغیرهای مربوط به اینترفیس استفاده شده.

پارامتر	مقدار
(MPa)K	۲۰/۸
(MPa)G	۹/۶
(cm) Δz_{min}	۱۵
سختی ظاهری محیط (MPa)	۲۲۴
(GPa) K_n, K_s	۲/۲۴

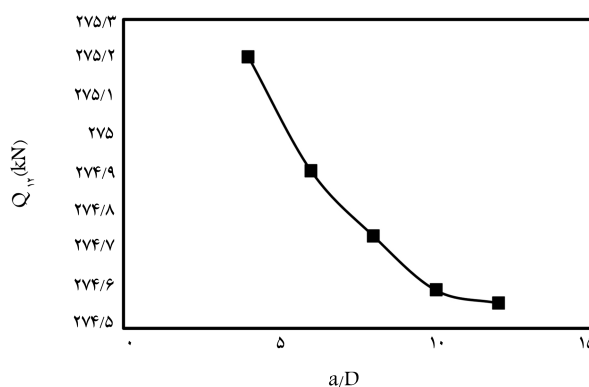
هر کدام با کمک ۳ گره تعریف می‌شوند، ارائه می‌کند. هر آلمان سطح مشترک، سطح تحت پوشش خود را به صورت وزنی بین گره‌های خود توزیع می‌کند، بنابراین هر گره، نماینده‌ی ویژگی‌های یک سطح مشخص است. باید توجه کرد که آلمان سطح مشترک در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ به صورت یک طرفه است. مدل رفتاری سطح مشترک مذکور با استفاده از معیار خطی مقاومت برشی کلمب تعریف می‌شود. پارامترهای لازم برای تعریف معیار اخیر در آلمان‌های سطح مشترک، شامل پارامترهای مقاومتی معیار کلمب (چسبندگی و زاویه اصطکاک سطح لغزش، که در مثال حاضر بین خاک و جداری شمع است) و همچنین سختی برشی (k_s) و نرمال (k_n) سطح است. برای پارامترهای مقاومتی توصیه‌هایی جهت انتخاب مقادیر ذکر شده برای سطح مشترک خاک و مصالح دیگر نظیر آهن و بتن بر اساس مقادیر ذاتی پارامترهای مذکور در خاک در مراجع فنی ارائه شده است. همچنین در مورد مقادیر سختی نرمال و برشی دستورالعمل نرم‌افزار پیشنهاد می‌کند که مقدار سختی‌های k_n و k_s را ۱۰ برابر سختی معادل محیط مجاور سطح مشترک باید اختیار کرد. مقدار سختی ظاهری محیط، که در واحد تنش بر واحد طول بیان می‌شود، را نیز مطابق رابطه‌ی ۱ پیشنهاد می‌دهد:

$$\max \left[\frac{(K + \frac{1}{3}G)}{\Delta z_{min}} \right] \quad (1)$$

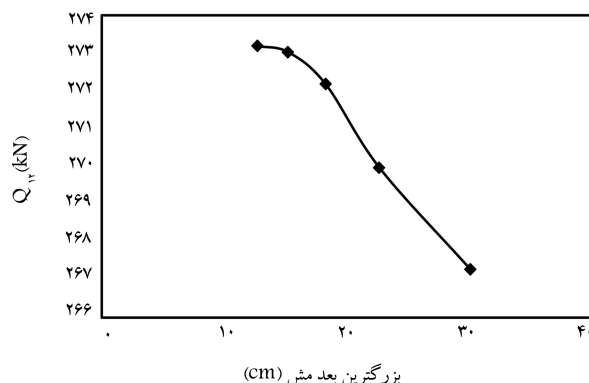
که در آن، K و G به ترتیب مدول بالک و مدول برشی محیط و Δz_{min} کوچک‌ترین بُعد زون‌های مجاور و در جهت نرمال است. در جدول ۷، مقادیر پارامترهای سطح مشترک استفاده شده در تحلیل‌ها ارائه شده است.

۴.۴. راستی‌آزمایی نرم‌افزار

جهت بررسی درستی عملکرد نرم‌افزار از نتایج پژوهش وی وال‌نگار (۱۹۹۸) استفاده شده است. در پژوهش حاضر، مدل فیزیکی کوچک‌مقیاس از شمع استوانه‌یی و مخروطی در صندوقی فشار با امکان اعمال فشارهای همه‌جانبه‌ی مختلف به کل نمونه‌ی خاکی مطالعه شده است. راستی‌آزمایی نرم‌افزار برای نتایج شمع T_1 در پژوهش حاضر به طول تقریباً ۱/۵ متر و زاویه‌ی جداری ۹۵° درجه انجام شده است. قطر رأس شمع T_1 ، ۲۰۳ میلی‌متر و قطر نوک آن ۱۵۲ میلی‌متر بوده است. خاک استفاده شده در پژوهش حاضر، دارای چگالی ۱۷۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب، زاویه اصطکاک داخلی ۲۸ درجه، چسبندگی ۰ و مدول بالک و برشی به ترتیب برابر با ۸/۳ و ۳/۸ مگاپاسکال گزارش شده است. در شکل ۵، مقایسه‌ی منحنی بار-جابجایی مدل عددی ساخته شده در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ با نتایج ارائه شده در پژوهش حاضر مشاهده می‌شود، که انطباق قابل قبولی دارد.



شکل ۳. نتیجه‌ی آنالیز حساسیت نسبت به فاصله‌ی مرزها.



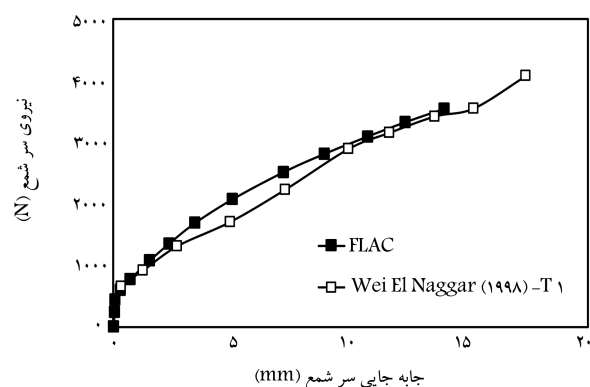
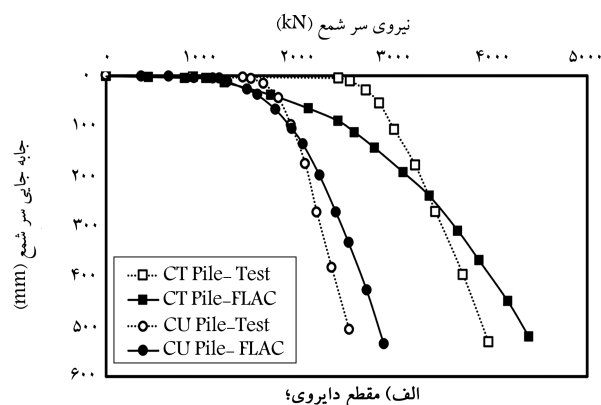
شکل ۴. نتیجه‌ی آنالیز حساسیت نسبت به ابعاد مش.

مرزهای مدل از شمع، در شکل ۳ مشاهده می‌شود. توجه شود که منحنی‌های بار - جابجایی نیز از نظر مسیر و شکل مقایسه شده‌اند، اما جهت ترسیم نموداری حساسیت، از پارامتر Q_{12} استفاده شده است. مقدار a/D معرف نسبت فاصله‌ی دورترین نقطه‌ی مدل به قطر شمع است. همان‌طور که در شکل ۳ مشهود است، افزایش نسبت a/D حساسیت پارامترکنترلی به فاصله‌ی مرزها کاهش یافته است، به نحوی که برای a/D بزرگ‌تر از ۸، مرزها تأثیر قابل ملاحظه‌یی در رفتار مدل ندارند. به این ترتیب در تمامی مدل‌های منفرد و گروهبی، ابعاد توده‌ی خاک به نحوی تعریف شده است که مرزها دست‌کم ۹ برابر قطر متوسط شمع از جداری شمع‌ها فاصله داشته باشند.

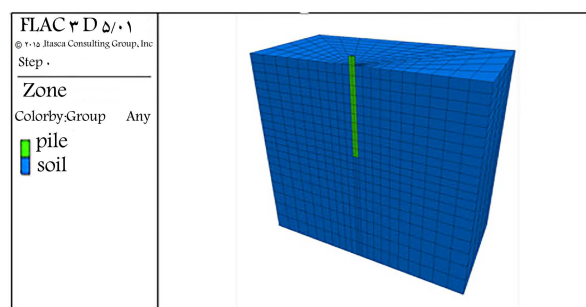
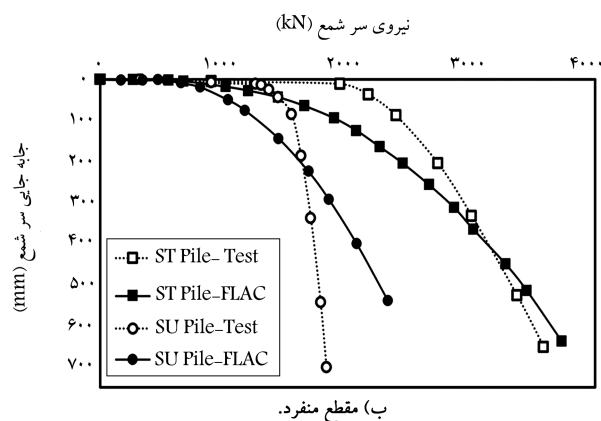
به طریق مشابه و برای ابعاد مش، بررسی نتایج ذکر شده نشان می‌دهد با کوچک‌تر شدن بزرگ‌ترین بُعد مش از ۱۸ سانتی‌متر، حساسیت پارامترکنترلی به ابعاد مش تا حد زیادی کاهش یافته است، که در شکل ۴ نیز مشاهده می‌شود. بر این اساس، برای رعایت مسئله‌ی مذکور و در عین حال اجتناب از افزایش قابل ملاحظه‌ی زمان تحلیل، ابعاد مش‌ها در نواحی حساس (نزدیک به شمع) از ۱۵ سانتی‌متر تجاوز نکرده است؛ اما در نواحی دورتر از شمع (نزدیک مرزها)، بزرگ‌ترین بُعد مش به مقدار بیشینه‌ی ۸۰ سانتی‌متر لحاظ شده است، که به این ترتیب مش‌بندی بهینه برای مدل حاصل شده است.

۳.۴. آلمان‌های سطح مشترک

در پدیده‌های ژئوتکنیکی، که امکان لغزش دو سطح روی هم وجود دارد، نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ استفاده از آلمان‌های سطح مشترک را پیشنهاد می‌کند. نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ سطح مشترک را با استفاده از مجموعه‌ی آلمان‌های مثلثی، که

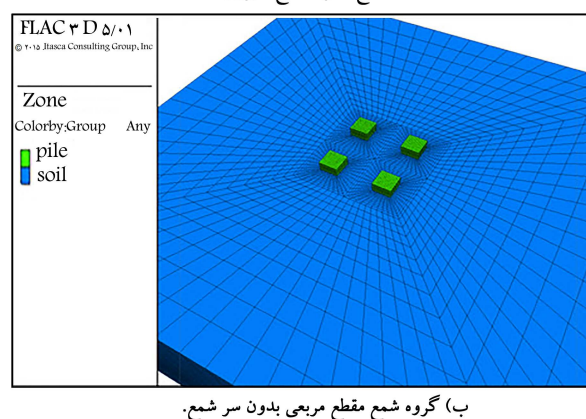
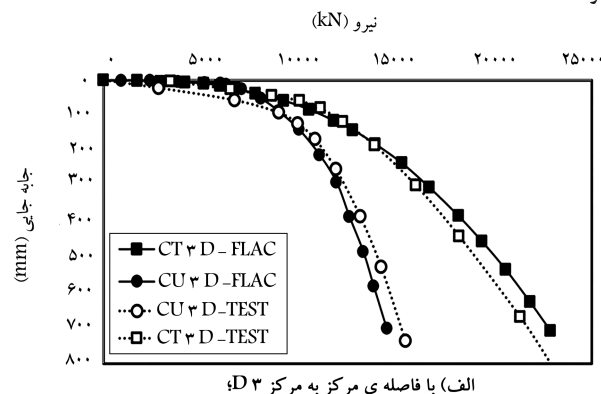


شکل ۵. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی عددی پژوهش حاضر با شمع T۱ در پژوهش وی و ال نگار (۱۹۹۸).



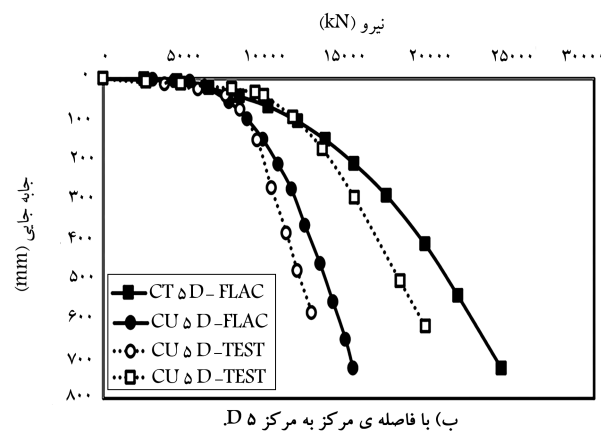
الف) شمع منفرد مقطع دایروی؛

شکل ۷. مقایسه‌ی منحنی بار-جابجایی نتایج عددی و آزمایشگاهی برای شمع‌های منفرد.



ب) گروه شمع مقطع مربعی بدون سر شمع.

شکل ۶. نمونه‌ی مش‌بندی شمع‌ها: (شکل بالایی) شمع منفرد مقطع دایروی.

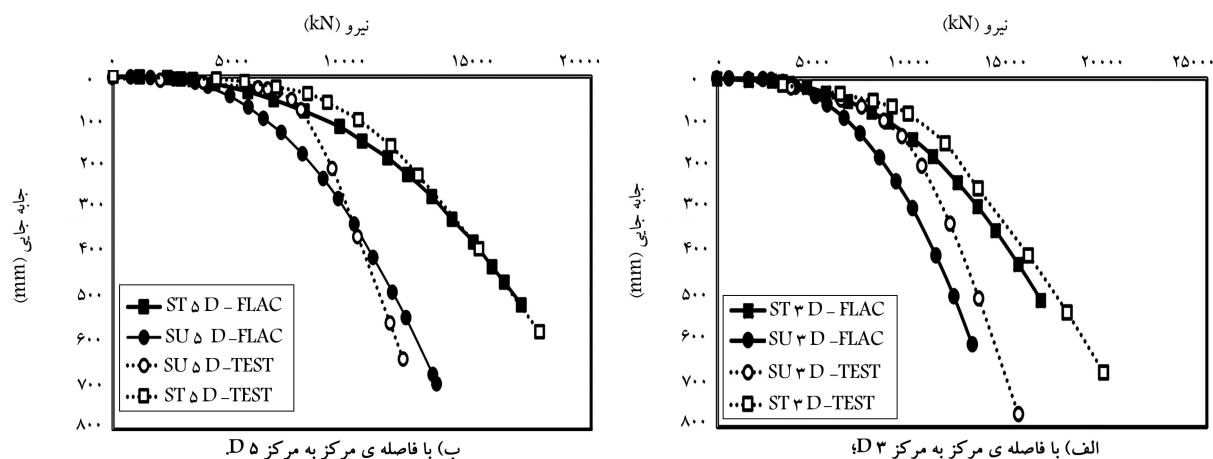


۵.۴. نتیجه‌ی شبیه‌سازی شمع‌های منفرد و گروه شمع‌ها

در بخش حاضر، نتایج مربوط به شبیه‌سازی‌های انجام شده برای ۱۲ آزمایش آزمایشگاهی شمع‌های منفرد و گروه شمع‌ها ارائه شده است. در شکل ۶، مش‌بندی یک نمونه از مدل‌های مربوط به شمع‌های منفرد و گروه شمع مشاهده می‌شود. در مورد مش‌بندی شمع منفرد، مقطع مدل مذکور از وسط نشان داده شده است، تا قرارگیری شمع در تراکم و چگالی مش‌ها بهتر ملاحظه شود.

در شکل‌های ۷ الی ۹، منحنی‌های بار-جابجایی شمع‌های مختلف راکه در آزمایش‌های آزمایشگاهی و همچنین تحلیل‌های عددی حاصل شده‌اند، مشاهده می‌شود. همان‌گونه که بیان شد، از آن‌جا که امکان مدل‌سازی فرایند اجرای شمع در شبیه‌سازی فراهم نبوده است، تلاش شد با در نظر گرفتن متغیر ضریب فشار جانبی خاک برای حالت روش اجرا با جابه‌جایی شمع‌ها، بهترین انطباق ممکن بین نتایج

شکل ۸. مقایسه‌ی منحنی بار-جابجایی نتایج گروه شمع ۲×۲ با مقطع دایروی.



شکل ۹. مقایسه‌ی منحنی بار - جابه‌جایی گروه شمع ۲ × ۲ با مقطع مربعی.

جدول ۸. مقادیر ظرفیت باربری نهایی و ضریب کارایی گروه شمع ۲ × ۲ حاصل از تحلیل عددی و آزمایش‌های سانتریفیوژ.

اسم	ظرفیت باربری نهایی (kN)	ضریب کارایی (E_g)	اثر مخروطی (C_r)	اثر سطح مقطع (C_{cs})
آزمایشگاهی	عددی	آزمایشگاهی	عددی	آزمایشگاهی
CU	۱۹۲۷	۱۸۰۲	-	-
CT	۲۹۲۲	۲۴۱۰	۱/۵۲	۱/۳۴
SU	۱۶۵۲	۱۱۹۴	-	-
ST	۲۴۸۶	۱۷۸۵	۱/۵	۱/۴۹
CU Δ D	۸۵۶۰	۸۳۴۰	۱/۱۱	۱/۱۶
CT Δ D	۱۱۱۹۰	۱۰۵۰۰	۰/۹۶	۱/۰۹
SU Δ D	۷۸۸۰	۵۸۰۰	۱/۱۹	۱/۲۱
ST Δ D	۹۷۱۰	۸۰۶۰	۰/۹۸	۱/۱۲
CU Δ D	۸۳۷۰	۸۷۹۰	۱/۰۹	۱/۲۲
CT Δ D	۱۱۰۳۰	۱۰۶۳۰	۰/۹۴	۱/۱۰
SU Δ D	۷۷۲۰	۶۲۰۰	۱/۱۷	۱/۳۰
ST Δ D	۹۵۹۰	۸۰۹۰	۰/۹۶	۱/۱۳

برای محاسبه‌ی مقادیر ظرفیت باربری نهایی محوری فشاری از روی نمودار بار - نشست، مشابه آنچه در تفسیر نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی ارائه شده است،^[۱۱] بار متناظر با جابه‌جایی ۸۰ میلی‌متر، که تقریباً معادل ۱۰٪ قطر متوسط شمعه‌های دایره‌یی است، لحاظ شده است. این معیار بر اساس در نظر گرفتن پیشنهاد ترازایی (۱۹۴۲)،^[۱۲] است.

در جدول ۸، پارامتر C_r به جهت بررسی کمی اثر مخروطی شمعه تعریف شده و برابر نسبت باربری یک شمعه یا گروه شمعه مخروطی به باربری شمعه یا گروه شمعه متناظر غیرمخروطی است. همچنین برای بررسی کمی اثر سطح مقطع، پارامتر C_{cs} تعریف شده است، که به صورت نسبت باربری شمعه یا گروه شمعه با مقطع مربعی به شمعه یا گروه شمعه متناظر با مقطع دایره‌یی است.

مطابق جدول ۸، هم نتایج آزمایشگاهی و هم عددی و هر دو مقطع شمعه‌ها، ظرفیت باربری نهایی محوری فشاری شمعه مخروطی در حالت‌های منفرد و گروه، از شمعه معادل یکنواخت خود بیشتر است. در تمامی نتایج آزمایشگاهی و عددی، ظرفیت باربری نهایی محوری فشاری شمعه‌های مقطع دایره‌یی بیشتر از مقطع مربعی بوده است. همچنین میزان افزایش باربری در مورد شمعه‌های منفرد در اثر زاویه‌ی

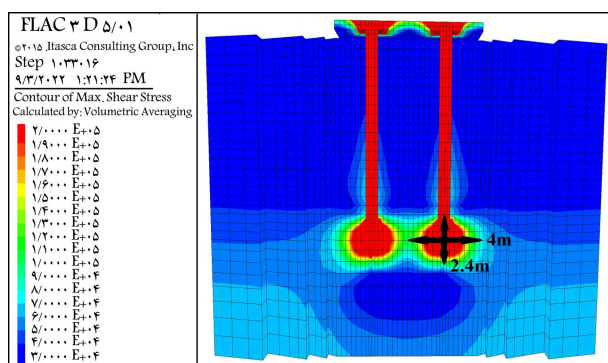
به دست آید و اثر روش اجرا تا حدی به صورت مصنوعی در متغیر ضریب فشار جانبی خاک لحاظ شود.

مطابق شکل‌های ۷ الی ۹، انطباق قابل قبولی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی حاضر به دست آمده و میزان اختلاف مشاهده شده به دلیل عدم مدل‌سازی کامل، روش اجرا منطقی و در حد قابل قبول است.

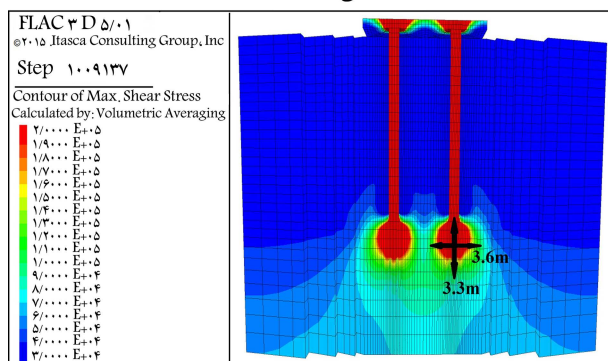
۶.۴. بحث در مورد نتایج

در جدول ۸، ظرفیت باربری نهایی محوری فشاری شمعه‌های منفرد و گروه شمعه‌های حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی و مدل عددی، شبیه‌سازی شده و همچنین ضریب کارایی گروه شمعه‌های حاصل از هر دو مطالعه ارائه شده است. با توجه به اینکه نتایج ارائه شده برای گروه شمعه‌های ۲ × ۲ متشکل از ۴ شمعه است، رابطه‌ی محاسبه‌ی ضریب کارایی گروه شمعه ۴ تایی به صورت رابطه‌ی ۲ است:

$$E_g = \frac{Q_{Group}}{4Q_{single}} \quad (2)$$

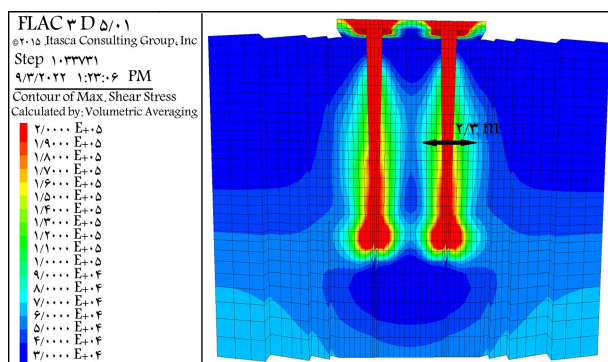


الف) مقطع دایروی؛

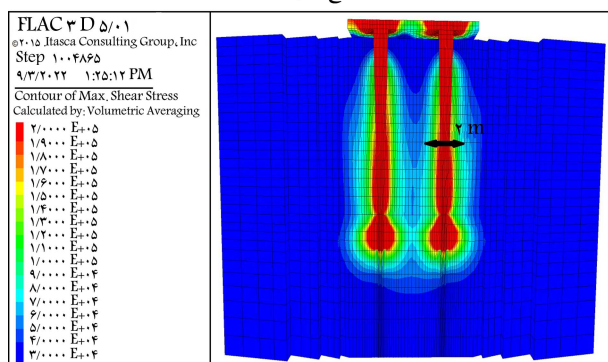


ب) مقطع مربعی.

شکل ۱۰. ابعاد حباب تنش‌های برشی اطراف شمع‌های یکنواخت در گروه شمع‌های با فواصل مرکز به مرکز ۵D.



الف) مقطع دایروی؛



ب) مقطع مربعی.

شکل ۱۱. ابعاد حباب تنش‌های برشی اطراف شمع‌های غیر یکنواخت در تراز ۶/۵- در گروه شمع‌های با فواصل مرکز به مرکز ۵D.

مخروطی، بیشینه ۵۲٪ بوده است، که مربوط به شمع مقطع دایروی است. این افزایش باربری در مورد گروه شمع‌ها کمتر از ۳۸٪ بوده است.

همچنین از نتایج مشخص است که مقادیر کمی ظرفیت باربری نهایی محوری فشاری شمع‌ها در هر دو حالت منفرد و گروه در مدل آزمایشگاهی بیشتر از مدل عددی است، که این موضوع به علت عدم شبیه‌سازی کامل روش اجرای شمع‌ها بوده است. همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد که افزایش باربری محوری فشاری شمع‌های منفرد مخروطی نسبت به مقطع یکنواخت معادل خود بیش از گروه شمع‌های مخروطی نسبت به مقطع یکنواخت معادل خود بوده است. نتیجتاً برتری شمع‌های مخروطی نسبت به شمع‌های غیرمخروطی در بارگذاری محوری فشاری، در حالت منفرد آن مشهودتر از حالت گروهی است.

مطابق جدول ۸ مشخص است که مقادیر ضریب کارایی گروه شمع‌های با مقاطع مخروطی (غیر یکنواخت) در هر دو فاصله ۳ و ۵ برابر قطر متوسط شمع‌ها، کوچک‌تر از مقدار متناظر برای شمع با مقطع یکنواخت است، که در نتایج آزمایشگاهی نیز مسئله مذکور مشاهده شده است. دلیل این موضوع احتمالاً تداخل بیشتر حباب‌های تنش به دلیل اثر پدیده انبساط حفرة استوانه‌یی در مورد جداری شمع‌های مخروطی بوده است، که در ادامه به بررسی این موضوع در مدل‌های عددی از روی کانتورهای توزیع تنش برشی اطراف شمع‌ها پرداخته شده است. همچنین مشخص است که با افزایش فاصله‌ی مرکز به مرکز شمع‌ها، روند کلی تغییرات مقدار ضریب کارایی، کاهش و در مسیر میل کردن به ۱ بوده است. مقدار ضریب کارایی گروه برای شمع‌های با مقطع مخروطی در تمامی حالت‌ها تقریباً نزدیک به ۱ بوده است. به این معنی که ظرفیت باربری گروه شمع مخروطی تقریباً برابر با مجموع باربری شمع‌ها منفرد مخروطی مشابه موجود در گروه است.

۷.۴. بررسی اثر هندسه‌ی جداری شمع‌ها در ظرفیت باربری

ماهیت افزایش ظرفیت باربری محوری شمع‌های مخروطی، افزایش ظرفیت باربری جداری آنها به علت پدیده انبساط حفرة است، که اصطکاک جداری بیشتری را در دیواره‌ی شمع فعال می‌کند. اما علی‌رغم بیشتر بودن سطح جانبی شمع مربعی، ظرفیت باربری محوری شمع مقطع دایروی چه در حالت منفرد و چه در حالت گروهی بیشتر از شمع مقطع مربعی است. به همین جهت به منظور بررسی دلیل پدیده اخیر، بررسی توزیع تنش‌های برشی پیرامون شمع بعد از بارگذاری می‌تواند اطلاعات مفیدی ارائه کند. برای درک بهتر حدود ناحیه‌ی تأثیر حباب‌های تنش، ابعاد ناحیه‌ی تأثیر با تنش برشی بزرگ‌تر از ۸۰ کیلوپاسکال (رنگ آبی فیروزه‌یی) برای فواصل مرکز به مرکز ۵D برای هر دو مقطع در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.

مطابق شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشخص است که در مورد شمع‌های با مقاطع یکنواخت، عمده‌ی تنش‌های برشی بزرگ ایجاد شده در محیط خاک، پیرامون نوک شمع‌ها متمرکز است؛ اما در شمع‌های با مقاطع مخروطی، پیرامون جداری شمع و تا شعاع قابل توجهی خاک، متحمل تنش‌های برشی بزرگ شده‌اند، که همین موضوع اصلی‌ترین دلیل بیشتر بودن ظرفیت باربری محوری فشاری شمع‌های مخروطی در مقایسه با شمع یکنواخت معادل است.

مطابق شکل ۱۰ مشخص است که در شمع‌های با مقطع یکنواخت، شعاع تأثیر شمع مقطع دایروی بیشتر از شمع مقطع مربعی است، اما عمق تأثیر زیر نوک شمع در مورد مقطع مربعی بزرگ‌تر از مقطع دایروی است. همچنین با توجه به شکل ۱۱، در شمع‌های مخروطی پیرامون جداری شمع و در عمق ۶/۵- از سطح خاک،

شمع‌های مقطع یکنواخت، تنش‌های برشی ایجاد شده در پیرامون شمع به جزء در سطح مشترک شمع - خاک، ناچیز است و ارائه‌ی مقطع عرضی تنش‌های برشی بیشینه برای شمع‌های مذکور، اطلاعات مفیدی ارائه نمی‌کند.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، شبیه‌سازی مطالعات آزمایشگاهی نویسندگان نوشتار حاضر، [۱ و ۲] در مورد شمع‌های مخروطی منفرد و گروهی با مقاطع دایروی و مربعی تحت بارگذاری محوری فشاری در دستگاه سانترفیوژ ژئوتکنیکی و نیز تحلیل‌هایی بر اساس مدل عددی شبیه‌سازی شده انجام شده است؛ که در ادامه، نتایج آن به طور خلاصه بیان شده است:

۱- ظرفیت باربری محوری فشاری شمع‌های مخروطی در تمامی نتایج (آزمایشگاهی و عددی)، در هر دو حالت منفرد و گروهی از شمع یا گروه شمع معادل یکنواخت خود بیشتر بوده است. همچنین مقادیر کمی ظرفیت باربری نهایی محوری شمع‌های منفرد و گروهی در مدل آزمایشگاهی بیشتر از مدل عددی بوده است، که این موضوع به علت عدم شبیه‌سازی کامل روش اجرای شمع‌ها در مدل عددی است.

۲- برتری شمع‌های مخروطی نسبت به شمع‌های مقطع یکنواخت (غیرمخروطی) در بارگذاری فشاری، در حالت منفرد آن، مشهودتر از حالت گروهی بوده است.

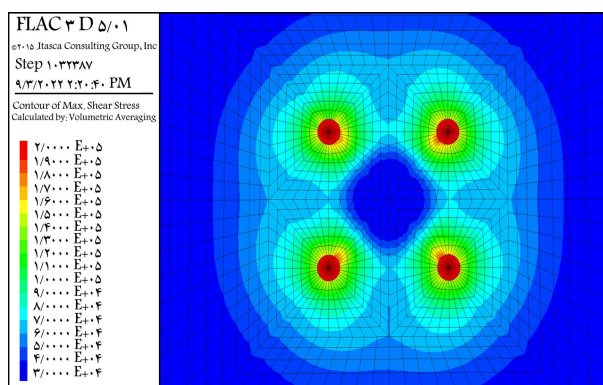
۳- مقادیر ضریب کارایی گروه شمع‌های با مقاطع مخروطی (غیریکنواخت) در هر دو فاصله‌ی ۳ و ۵ برابر قطر متوسط شمع‌ها، کوچک‌تر از مقدار متناظر برای شمع با مقطع یکنواخت بوده است.

۴- مقدار ضریب کارایی گروهی برای شمع‌های با مقطع مخروطی در تمام حالت‌ها تقریباً نزدیک به ۱ بوده است، که نشان می‌دهد ظرفیت باربری گروه شمع مخروطی تقریباً برابر با مجموع باربری شمع‌های منفرد مخروطی مشابه موجود در گروه است.

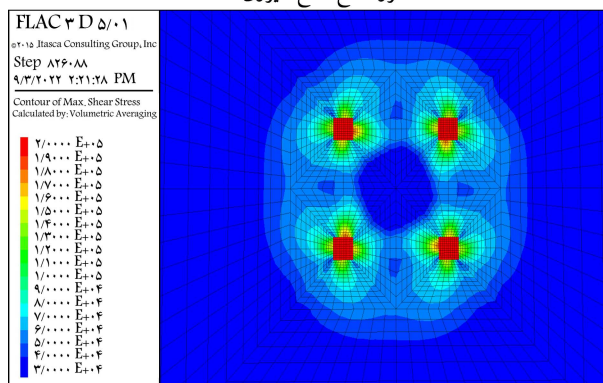
۵- شمع با مقطع دایروی، توزیع تنش یکنواخت‌تری در خاک اطراف شمع از خود نشان داده است. در مورد شمع مقطع مربعی در طرفین کنج اضلاع (کنج‌های محدب)، تنش برشی ایجاد شده در خاک به شدت کاهش یافته است. نتیجتاً داشتن اضلاع قائم نسبت به هم (داشتن زوایای تند محدب و شکستگی اضلاع) در مقطع شمع مربعی باعث شده است که عملکرد شمع در ایجاد مکانیزم‌های برشی در خاک پیرامون و فعال کردن مقاومت جداري خاک کاهش یابد؛ که این موضوع، باعث بیشتر بودن ظرفیت باربری شمع و گروه شمع مقطع دایروی مخروطی از شمع و گروه شمع مقطع مربعی مخروطی علی‌رغم کمتر بودن مساحت سطح جانبی آن شده است.

پانوشته‌ها

1. FLAC^{3D} (fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensional)



الف) گروه شمع مقطع دایروی؛



ب) گروه شمع مقطع مربعی.

شکل ۱۲. مقطع عرضی توزیع تنش برشی بیشینه در خاک پیرامون شمع‌های مخروطی در تراز ۶- و برای فاصله‌ی مرکز به مرکز ۵D: (شکل بالایی) گروه شمع مقطع دایروی.

حساب تنش شمع با مقطع دایره‌یی بزرگ‌تر از مقطع مربعی است. با توجه به این‌که تمام مقاطع فوق از محور تقارن گذرنده از مرکز شمع‌ها ترسیم شده‌اند، برای درک بهتر تأثیر هندسه‌ی سطح جدار مقطع شمع‌ها (سطوح محدب، تخت، و کنج‌های تیز) در انتقال تنش به خاک، مقاطع عرضی شمع‌های مخروطی (غیریکنواخت) در تراز ۶- متر و برای فواصل مرکز به مرکز ۵D در شکل ۱۲ ترسیم شده است، که مطابق آن، شمع با مقطع دایروی توزیع تنش یکنواخت‌تری در خاک اطراف شمع از خود نشان داده است.

در مورد شمع مقطع مربعی به وضوح مشخص است که در مورد شمع مقطع مربعی در طرفین کنج اضلاع (کنج‌های محدب)، تنش برشی ایجاد شده در خاک به شدت کاهش یافته است. به تعبیری به نظر می‌رسد تغییر زوایای تند محدب در مقطع شمع باعث شده است که عملکرد شمع در ایجاد مکانیزم‌های برشی در خاک پیرامون و فعال کردن مقاومت خاک کاهش یابد. لازم به ذکر است که در مورد

2. Robinsky & Morrison
3. Kurian & Srinivas
4. Wei & El Naggar
5. Sakr

6. Paik
7. Kodikara & Moore
8. cavity expansion method
9. Manandhar & Yasufuku
10. Zhan
11. ABACOUS
12. PLAXIS
13. Under-Reamed Piles
14. wave equation theory
15. Prototype
16. Itasca

منابع (References)

1. Shabanpour, A. and Ghazavi, M. "Centrifuge tests on axially loaded tapered piles with different cross-sections under compressive and tensile loading", *Canadian Geotechnical Journal*, **99**(999), pp. 1-10 (2022).
2. Shabanpour, A., Ghazavi, M. and El Naggar, M.H. "Behavior of axially loaded tapered pile groups using centrifuge test", *Innovative Infrastructure Solutions*, (Under Review) (2022).
3. Robinsky, E.I. and Morrison, C.F. "Sand displacement and compaction around model friction piles", *Canadian Geotechnical Journal*, **1**(2), pp. 81-93 (1964).
4. Kurian, N.P. and Srinivas, M.S. "Studies on the behavior of axially loaded tapered piles by the finite element method", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **19**(12), pp. 869-888 (1995).
5. Wei, J. and El Naggar, M.H. "Experimental study of axial behavior of tapered piles", *Canadian Geotechnical Journal*, **35**(4), pp. 641-654 (1998).
6. El Naggar, M.H. and Wei, J.Q. "Response of tapered piles subjected to lateral loading", *Canadian Geotechnical Journal*, **36**(1), pp. 52-71 (1999).
7. El Naggar, M.H. and Wei, J.Q. "Uplift behavior of tapered piles established from model tests", *Canadian Geotechnical Journal*, **37**(1), pp. 56-74 (2000).
8. Naggar, M.H.E. and Sakr, M. "Evaluation of axial performance of tapered piles from centrifuge tests", *Canadian Geotechnical Journal*, **37**(6), pp.1295-1308 (2000).
9. Paik, K., Lee, J. and Kim, D. "Calculation of the axial bearing capacity of tapered bored piles", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, **166**(5), pp. 502-514 (2013).
10. Rybnikov, A.M. "Experimental investigations of bearing capacity of bored-cast-in-place tapered piles", *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **27**(2), pp. 48-52 (1990).
11. Ghazavi, M. and Ahmadi, H.A. "Time-dependent bearing capacity increase of uniformly driven tapered piles-field load test", *Proceedings of the 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, A Symposium in honor of Professor James K. Mitchell, Mariott Crystal City, Arlington, Virginia, USA (2008).
12. Khan, M.K., El Naggar, M.H. and Elkasabgy, M. "Compression testing and analysis of drilled concrete tapered piles in cohesive-frictional soil", *Canadian Geotechnical Journal*, **45**(3), pp. 377-392 (2008).
13. Kodikara, J.K. and Moore, I.D. "Axial response of tapered piles in cohesive frictional ground", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, **119**(4), pp. 675-693 (1993).
14. Manandhar, S. and Yasufuku, N. "Vertical bearing capacity of tapered piles in sands using cavity expansion theory.", *Soils and Foundations*, **53**(6), pp. 853-867 (2013).
15. Ghazavi, M. and Lavasan, A.A. "Bearing capacity of tapered and step-tapered piles subjected to axial compressive loading", *In The 7th International Conference On Coasts, Ports & Marine Structures*, ICOPMAS, Tehran, Iran (2006).
16. Zhan, Y.G., Wang, H. and Liu, F.C. "Numerical study on load capacity behavior of tapered pile foundations", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **17** (2012).
17. Hataf, N. and Shafaghat, A. "Numerical comparison of bearing capacity of tapered pile groups using 3D FEM", *Geomech. Eng.*, **9**(5), pp. 547-567 (2015).
18. Hataf, N. and Shafaghat, A. "Optimizing the bearing capacity of tapered piles in realistic scale using 3D finite element method", *Geotechnical and Geological Engineering*, **33**(6), pp. 1465-1473 (2015).
19. Vali, R., Mehrinejad Khotbehsara, E., Saberian, M. and et al. "A three-dimensional numerical comparison of bearing capacity and settlement of tapered and under-reamed piles", *International Journal of Geotechnical Engineering*, **13**(3), pp. 236-248 (2019).
20. Sormeie, A. and Ghazavi, M. "Analysis of non-uniform piles driven into cohesive soils", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **109**, pp. 282-285 (2018).
21. Tavasoli, O. and Ghazavi, M. "Effect of tapered and semi-tapered geometry on the offshore piles driving performance", *Ocean Engineering*, **201**, p.107147 (2020).
22. Nasrollahzadeh, E. and Hataf, N. "Experimental and numerical study on the bearing capacity of single and groups of tapered and cylindrical piles in sand", *International Journal of Geotechnical Engineering*, **16**(4), pp. 426-437 (2019).
23. Terzaghi, K. "Discussion of the progress report of the committee on the bearing value of pile foundations", *In Proceedings*, ASCE, **68**(2), pp. 311-323 (1942).