

به دست آوردن ضریب ظرفیت باربری N_{γ} برای پی های حلقه‌یی ساخته شده بر خاک‌های دانه‌یی در بارگذاری برون‌محور با شبیه‌سازی سه‌بعدی عددی

امید سرگزی* (کارشناس ارشد)

سید احسان سیدی حسینی‌نیا (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۷)
دوری ۲ - ۳۴، شماره ۱/۳، ص. ۱۱-۳

امروزه پی‌های حلقه‌یی کاربرد وسیعی در سازه‌های گوناگون در سراسر جهان، نظیر: برج‌های مخازنی، مخازن ذخیره‌ی مایعات، پایه‌ی پل‌ها، و سازه‌های فراساحلی یافته‌اند. از آنجا که اغلب سازه‌های مذکور بلند و بزرگ هستند، پی‌ها تحت لنگرهای خمشی ناشی از بارهای جانبی (باد، امواج، زلزله) قرار می‌گیرند. در پژوهش حاضر، مطالعاتی در زمینه‌ی تعیین ضریب N_{γ} پی‌های حلقه‌یی بر بستر دانه‌یی در بارگذاری‌های قائم به همراه وجود لنگر صورت گرفته است. آثار نسبت شعاعی (n)، خروج از محوریت بار (e) و زاویه‌ی اصطکاک داخلی با شبیه‌سازی سه‌بعدی عددی به روش اختلاف محدود بررسی شده است. مدل رفتاری در نظر گرفته شده در تحلیل‌ها، مور-کولمب و قانون جریان هم‌بسته است. صحت مدل عددی به کمک یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی سنجیده شده است. بر مبنای تحلیل‌های انجام شده مشخص شد که ضریب N_{γ} پی حلقه‌یی تابعی از برون‌محوری، نسبت شعاعی پی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی است. بر این اساس، روابط ضریب کاهش (R.F) برای ضریب N_{γ} ارائه شده است.

واژگان کلیدی: پی حلقه‌یی، شبیه‌سازی سه‌بعدی، ظرفیت باربری، بارگذاری خارج‌محور.

o69sargazi@gmail.com
eseyedi@um.ac.ir

۱. مقدمه

پذیرفت و برای این منظور روابط و نمودارهایی ارائه شد.^[۱] در سال ۱۹۶۵،^[۲] نیز به روش تحلیلی و با فرض محیط کشسان، مقدار فشار تماسی و نشست در زیر پی‌های حلقه‌یی محاسبه شد. همچنین در سال ۱۹۷۷ با انجام برخی پیش‌های میدانی و انجام پژوهش‌های نظری، رابطه‌یی برای محاسبه‌ی نشست پی‌های حلقه‌یی مستقر بر خاک‌های چندلایه ارائه شد.^[۳]

در سال ۲۰۰۵، نیز به روش تعادل حدی رابطه‌یی برای محاسبه‌ی ظرفیت باربری پی‌های حلقه‌یی با کمک ظرفیت باربری پی نواری و دایره‌یی ارائه شد.^[۴] در پژوهش دیگری در همان سال،^[۵] به روش خطوط مشخصه، مقدار بار نهایی پی‌های حلقه‌یی مستقر بر خاک دانه‌یی به دست آورده شد. همچنین در سال ۲۰۱۳،^[۶] با روش خطوط مشخصه، ضرایب سه‌گانه‌ی ظرفیت باربری پی‌های حلقه‌یی در حالت بارگذاری قائم به دست آورده شد. در برخی پژوهش‌ها،^[۷،۸] نیز با انجام آزمون‌های بزرگ مقیاس میدانی به محاسبه‌ی ظرفیت باربری پی‌های حلقه‌یی بر روی خاک‌های ماسه‌یی و رسی طبیعی پرداخته شد. پژوهشگران در سال ۱۹۹۶ به این نتیجه رسیدند که ظرفیت باربری پی حلقه‌یی بر روی ماسه‌ی متراکم سیمانته شده تا نسبت شعاعی

پی‌های حلقه‌یی به منظور ساخت سازه‌هایی نظیر: برج‌ها، مخازن آب، دودکش‌ها، مخازن نفتی، راکتورهای اتمی، سازه‌های فراساحلی و گنبدی بسیار مناسب‌اند و تجربیات عملی از اقتصادی بودن آن‌ها به نسبت پی‌های دایره‌یی حکایت دارند. اگرچه پی حلقه‌یی و دایره‌یی به لحاظ شکل ظاهری مشابه هستند، ولی رفتار آن‌ها به لحاظ پخش فشار روی خاک، نشست و یا موارد مشابه تفاوت بنیادی داشتند و نمی‌توان به پی حلقه‌یی همانند پی دایره‌یی نگاه کرد. مطالعات انجام گرفته بر روی پی‌های حلقه‌یی بسیار محدود است و رفتار آن‌ها بیشتر مشابه پی دایره‌یی در نظر گرفته می‌شود. نظر به دامنه‌ی وسیع کاربرد پی‌های حلقه‌یی، انجام مطالعات فراگیر و در عین حال دقیق بر روی آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد.

نخستین مطالعه‌ی انجام شده بر روی پی‌های حلقه‌یی در سال ۱۹۵۷، به روش تحلیلی بر روی نشست پی‌های حلقه‌یی به کمک برهم نهی دو پی دایره‌یی صورت

* نویسنده مسؤل

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۱۱/۱۶، اصلاحیه ۱۳۹۵/۸/۱۹، پذیرش ۱۳۹۵/۹/۱۵.

DOI:10.24200/J30.2018.1404

در شرایط بارگذاری خارج محور با یک مدل اختلاف محدود و به کمک نرم افزار FLAC^{3D} انجام شده است. برنامه‌ی مذکور کاربرد وسیعی در تحلیل مسائل پیچیده مهندسی و به‌طور ویژه مهندسی ژئوتکنیک دارد و قابلیت کدنویسی‌اش، آن را از برنامه‌های مشابه متمایز می‌کند و توانایی بیشتری در تحلیل مسائل مختلف به آن می‌بخشد. انتخاب ابعاد مدل شامل برگزیدن ابعاد شالوده و ابعاد محیط خاکی است. با داشتن بعد پی، می‌توان ابعاد محیط خاکی را با توجه به منحنی‌های هم‌تنش ارائه شده برای توزیع تنش قائم در زیر شالوده به دست آورد.^[۲۱] برای جلوگیری از آثار مرزی در هنگام تحلیل و همچنین بهینه‌سازی زمان تحلیل، ابعاد محیط خاکی در هر سه راستا تا ۲/۵ برابر قطر پی از مرکز پی تعیین شده است. جدول ۱، ابعاد مدل‌های ساخته شده در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

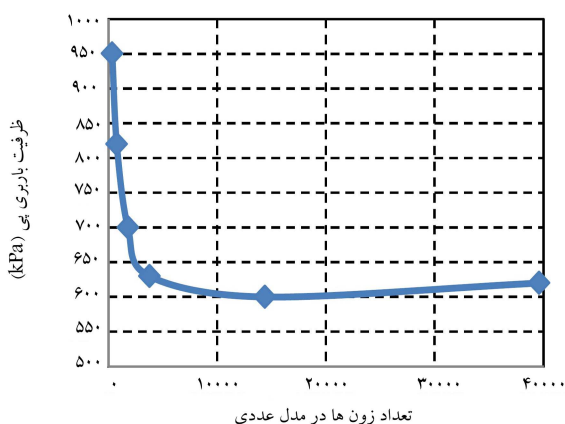
با توجه به اینکه هدف پژوهش حاضر، بررسی ظرفیت باربری پی‌های حلقه‌یی و محاسبه‌ی ضریب ظرفیت باربری N_{γ} در شرایط بارگذاری خارج از محور است، لذا برخی ویژگی‌ها مانند مساحت پی که در نهایت نرمالیزه خواهد شد، ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین ضخامت پی ثابت و برابر ۱ متر فرض شده است.

به جهت افزایش دقت در نواحی نزدیک به گرا دیان تنش، شبکه‌بندی مدل با استفاده از رویکرد نسبت‌دهی صورت گرفته است که در آن با دور شدن از محل شالوده، ابعاد المان‌ها با نسبتی مشخص از المان قبلی افزایش می‌یابد. این روش با حفظ اعتبار و دقت می‌تواند به کاهش زمان تحلیل کمک شایانی کند. در تعیین تعداد شبکه‌ها و سرانجام تعداد ناحیه‌ها، مطالعه‌ی بر روی ۶ حالت شبکه‌بندی صورت پذیرفت، تا بتوان شبکه‌بندی بهینه را انتخاب کرد. بر این اساس مقدار جواب مسئله در هر یک از ۶ حالت در برابر مدت زمان تحلیل و تعداد شبکه‌ها ترسیم شده است. شکل ۱، منحنی مذکور را نشان می‌دهد.

بر این اساس، استفاده از شبکه‌بندی در حدود ۴۰۰۰ ناحیه می‌تواند نتایج مناسبی را ارائه دهد. به منظور ایجاد شرایط بلندشدگی شالوده از بستر بین خاک و پی المان، سطح تماس تعریف شده است. در باره‌ی تعیین مقادیر سختی قائم و برشی سطح تماس، یک قانون تجربی در این زمینه وجود دارد که مقادیر سختی قائم (k_{ns}) و سختی برشی (k_{ns}) را مساوی با ۱۰ برابر سختی معادل سخت‌ترین ناحیه‌ی مجاور پیشنهاد می‌دهد.^[۲۲] سختی معادل (بیان شده در واحد تنش بر طول) برای یک ناحیه در جهت قائم از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید:

$$k = \left[\frac{K + \frac{1}{3}G}{\Delta Z_{\min}} \right] \quad (1)$$

که در آن، K و G به ترتیب مدول حجمی و مدول برشی کشسان و ΔZ_{\min} کمترین



شکل ۱. منحنی ظرفیت باربری در برابر تعداد ناحیه‌ها.

(نسبت شعاع داخلی به خارجی) برابر ۲/۵ تغییر نمی‌کند، ولی پس از آن روند کاهش‌ی دارد؛^[۸] اما برخی نتایج دیگر،^[۹] بر روی خاک رس طبیعی نشان می‌دهد که ظرفیت باربری پی حلقه‌یی با افزایش نسبت شعاعی پیوسته کاهش یافته است. در نخستین مطالعات آزمایشگاهی بر روی پی‌های حلقه‌یی مستقر بر خاک ماسه‌یی دو لایه‌یی^[۱۰] (۱۹۹۷)، نسبت شعاعی برابر ۳/۸، به‌عنوان نسبت شعاعی بهینه معرفی شد.^[۱۰] همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۰۳،^[۱۱] نسبت شعاعی بهینه برابر ۴/۰ و در پژوهش دیگری در همان سال،^[۱۲] نسبت مذکور بین ۲/۰ تا ۳/۰ و در مطالعات دیگری،^[۱۳، ۱۴] مقدار آن ۳/۰ پیشنهاد شد. در یک سری پژوهش‌های آزمایشگاهی و عددی نیز بر روی پی‌های حلقه‌یی مستقر بر ماسه (۲۰۰۳)، نسبت شعاعی بهینه بین ۲/۰ تا ۴/۰ به دست آمد و همچنین بر مبنای شکل سطح گسیختگی حاصل از آزمون‌ها، رابطه‌ی نیمه‌تجربی برای محاسبه‌ی ظرفیت باربری پی‌های حلقه‌یی تحت بار محوری ارائه شد.^[۱۵] از جمله مهم‌ترین مطالعات عددی می‌توان به برخی پژوهش‌ها با روش اختلاف محدود بر روی خاک دانه‌یی اشاره کرد،^[۱۶، ۱۷] که عمده‌ی نتیجه‌ی آن‌ها کاهش ظرفیت باربری با افزایش نسبت شعاعی بوده است. به تازگی، در پژوهشی در سال (۲۰۱۶)،^[۱۸] با روش عددی اختلاف محدود، مقدار ضرایب سه‌گانه‌ی ظرفیت باربری پی‌های حلقه‌یی به دست آمده و برای محدوده‌یی از زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک، رابطه‌ی پیشنهاد شده است.

همچنین در سال ۱۹۹۸،^[۱۹] مطالعات گسترده‌یی بر روی رفتار پی‌های حلقه‌یی مستقر بر ماسه به صورت آزمایشگاهی انجام شد و با استفاده از آزمون سانترفیوژ، مقدار نسبت شعاعی بهینه در حدود ۳/۵ به دست آمد. مطالعات مذکور از جمله معدود پژوهش‌های انجام شده بر روی پی‌های حلقه‌یی تحت بار برون‌محور است که بر مبنای آزمایش‌ها، یک ضریب کاهش برای شرایط بارگذاری ذکر شده ارائه داده است. فقط پژوهش دیگری در شرایط بارگذاری مذکور در سال ۲۰۱۱ انجام شده است^[۲۰] که بیشتر تمرکز آن بر اثر مسلح‌کننده‌ها بوده و نسبت شعاعی بهینه‌ی ۳/۹۰ را پیشنهاد کرده است.

در پژوهش حاضر، مطالعه‌ی سه‌بعدی رفتار پی حلقه‌یی مستقر بر خاک دانه‌یی در شرایط بارگذاری خارج محور با روش عددی تفاضل محدود صورت پذیرفته است و نتایج به دست آمده با مطالعاتی در سال ۱۹۹۸،^[۱۹] مقایسه شده است. مدل رفتاری در نظر گرفته شده در تحلیل‌ها، مور-کولمب و با فرض قانون جریان هم‌بسته ($\phi = \psi$) است. برای در نظر گرفتن اثرهای جداشدگی شالوده از خاک، بین خاک و پی المان، سطح تماس تعریف شده است. در مجموع ۸۰ حالت مختلف تحلیل صورت پذیرفته است که در آن‌ها مساحت پی ثابت و برابر ۱۰ مترمربع فرض شده است و نسبت شعاعی (شعاع داخلی به خارجی پی) بین صفر تا ۷/۵ متغیر است. بارگذاری‌های با اعمال خروج از محوریت در نسبت‌های برون‌محوری (e/D) بین صفر تا ۴/۵ صورت گرفته است. زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک نیز از ۲۵ تا ۴۵ درجه تغییر داده شده است. در تحلیل‌های عددی انجام شده، ویژگی‌های مکانیکی مصالح پی و ویژگی‌های کشسان خاک، ثابت در نظر گرفته شده‌اند، زیرا پارامترهای مذکور مربوط به تعیین تغییر شکل‌ها هستند و تأثیری در ظرفیت باربری خاک زیر پی ندارند. سرانجام، روابط ضریب کاهش (R.F) برای ضریب ظرفیت باربری ارائه شده‌اند.

۲. مدل‌سازی عددی

شبیه‌سازی عددی مسئله‌ی ظرفیت باربری پی حلقه‌یی مستقر بر بستر ماسه‌یی

جدول ۱. ابعاد هندسی مدل عددی (برحسب متر).

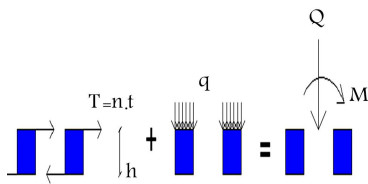
عمق محیط خاکی	شعاع		نسبت شعاعی (n)
	داخلی (r)	خارجی (R)	
۱۰	۰	۱٫۷۸	۰
۱۰	۰٫۴۶	۱٫۸۴	۰٫۲۵
۱۰	۱٫۰۳	۲٫۰۶	۰٫۵
۱۰	۲٫۰۲	۲٫۶۹	۰٫۷۵

جدول ۲. ویژگی‌های مصالح خاکی به‌کار رفته در مدل عددی.

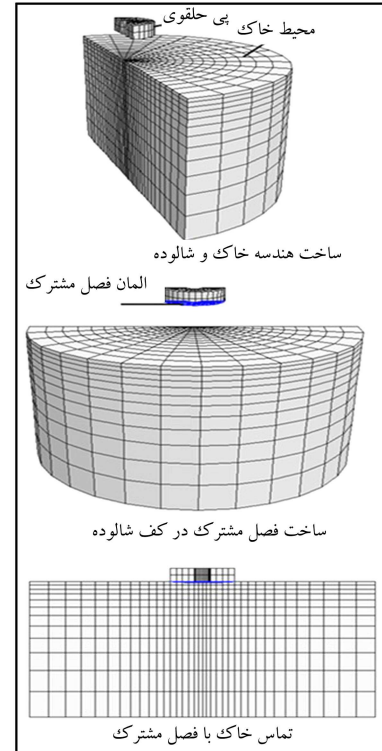
پارامتر	نماد	واحد	مقدار
مدول بالک	K	مگاپاسکال	۳۳٫۳
مدول برشی	G	مگاپاسکال	۲۰
زاویه اصطکاک داخلی	ϕ	درجه	۴۵٫۴۰، ۳۵٫۳۰، ۲۵
چسبندگی	c	کیلوپاسکال	صفر
نسبت پواسون	ν	-	۰٫۲۵

جدول ۳. ویژگی‌های مصالح شالوده‌ی به‌کار رفته در مدل عددی.

پارامتر	نماد	واحد	مقدار
مدول بالک	K	گیگاپاسکال	۱۳٫۳
مدول برشی	G	گیگاپاسکال	۸



شکل ۳. الگوی اعمال بارگذاری در مدل عددی.



شکل ۲. مراحل ساخت هندسه‌ی مدل عددی.

مدل رفتاری کشسان استفاده شده است. ویژگی‌های مصالح پی در همه‌ی حالت‌ها ثابت و مطابق جدول ۳ است.

برای ایجاد شرایط اولیه و برجا، تحلیل مدل صورت گرفته است، تا تنش‌های اولیه در محیط ایجاد شوند. و در پایان مرحله‌ی قبلی، کلیه‌ی تغییرمکان‌ها صفر شده‌اند. سپس تحلیل‌ها برای رسیدن به مرحله‌ی گسیختگی به‌صورت تنش - کنترل انجام شده‌اند. برای اعمال بارگذاری خارج محور با توجه به محدودیت‌های موجود، از اعمال یک بارگسترده‌ی قائم به سطح پی و مجموعه‌ی نیروهای افقی به نقاط گره‌ی فوقانی و تحتانی پی استفاده شده است، به طوری که برهم‌نهی دو سیستم مذکور منجر به ایجاد یک بار متمرکز و لنگر شود. الگوی اعمال بار ذکرشده در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

لذا روابط ۲ الی ۵ به‌دست می‌آید:

$$M = 0.5 T.h \quad (2)$$

$$T = n.t \quad (3)$$

$$Q = q.A \quad (4)$$

$$e = M/Q \quad (5)$$

که در آن‌ها، M لنگر، T مجموع نیروهای افقی اعمالی بر گره‌های سطوح

ضخامت ناحیه‌ی مجاور سطح تماس در جهت عمود بر آن است. نظر به ثابت فرض شدن مقادیر مدول برشی و حجمی کشسان خاک در همه‌ی تحلیل‌های انجام‌شده در پژوهش حاضر و همچنین یکسان بودن مقدار ΔZ_{min} در مدل هندسی، مقدار سختی معادل برابر $2/4$ گیگاپاسکال به‌دست می‌آید. دیگر ویژگی‌های المان سطح تماس نیز وابسته به ویژگی‌های خاک است. بر این اساس مقدار اصطکاک برابر دو سوم ($2/3$) زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک در نظر گرفته شده است.

برای اعمال شرایط مرزی به مدل ساخته‌شده، تغییرمکان کف مدل باید در هر جهت مختصاتی بسته شود تا از جابه‌جایی و ایجاد ناپایداری جلوگیری شود. جابه‌جایی جداره‌ی جانبی بیرونی مدل باید در دو جهت x و y بسته شود و مدل فقط می‌تواند در جهت قائم تغییرمکان دهد. در مرز محل محور تقارن مدل نیز برای ایجاد شرایط تقارن، فقط جابه‌جایی در جهت عمود بر صفحه بسته شده است. به مرز سطح زمین نیز که یک مرز حقیقی است، هیچ‌گونه محدودیتی اعمال نمی‌شود. شکل ۲، مراحل ساخت هندسه در مدل را نشان می‌دهد.

در پژوهش حاضر از مدل رفتاری پر کاربرد مور - کولمب با فرض قانون جریان هم‌بسته برای شبیه‌سازی رفتار خاک استفاده شده است. بر این اساس مقدار پارامترهای به‌کاررفته در تحلیل‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین برای پی از

جدول ۴. ویژگی‌های خاک ماسه‌یی به‌کار رفته در مدل عددی بر مبنای بررسی آزمایشگاهی ژو. [۱۹]

پارامتر	نماد	مقدار
مدول بالک	$K(MPa)$	۵۸
مدول برشی	$G(MPa)$	۲۷
وزن مخصوص	$\gamma_d(kN/m^3)$	۱۵٫۷۴
چسبندگی	$C(kPa)$	۱
زاویه اصطکاک داخلی خاک	ϕ°	۳۹٫۵
زاویه اتساع	ψ°	۸

جدول ۵. قوانین مقیاس در آزمون‌های سانتریفیوژ. [۱۹]

پارامتر	ضریب مقیاس (واقعیت: مدل با شتاب N برابر شتاب گرانش)
شتاب	$1:N$
ابعاد و تغییر مکان	$1:\sqrt{N}$
چگالی	$1:1$
نیرو	$1:\sqrt{N}^2$
تنش و کرنش	$1:1$
نسبت تخلخل و درجه اشباع	$1:1$

جدول ۶. ویژگی‌های پی آلومینیومی به‌کار رفته در مدل عددی بر مبنای مدل آزمایشگاهی ژو. [۱۹]

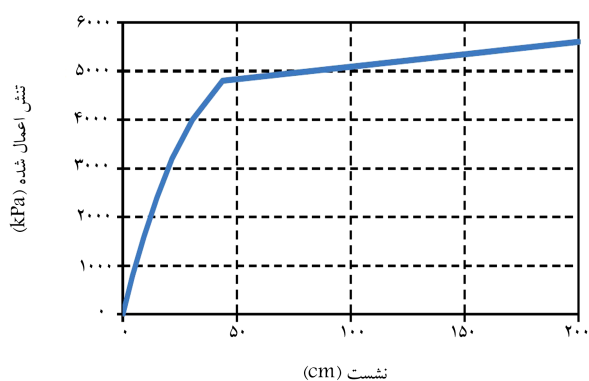
پارامتر	نماد	مقدار
مدول بالک	$K(MPa)$	۷۶۰۰۰
مدول برشی	$G(MPa)$	۲۶۰۰۰
وزن مخصوص	$\gamma(kN/m^3)$	۲۷

جدول ۷. ویژگی‌های سطح تماس به‌کار رفته در مدل عددی بر مبنای مدل آزمایشگاهی ژو. [۱۹]

پارامتر	نماد	مقدار
سختی برشی	$K_s(MPa)$	۳۸۰۰
سختی نرمال	$K_n(MPa)$	۳۸۰۰
زاویه اصطکاک	ϕ°	۲۸

نظر به اینکه همه آزمایش‌های سانتریفیوژ ژو، [۱۹] در شرایط بارگذاری خارج محور در شتاب 10° برابر شتاب گرانش انجام شده است، لذا پی مدل عددی با مساحت 15 مترمربع و سه نسبت شعاعی صفر، $0/35$ و $0/5$ انتخاب شده است. جدول ۵، قوانین مقیاس در آزمایش‌های سانتریفیوژ را نشان می‌دهد. [۱۹] همچنین پی آلومینیومی مدل با مدل رفتاری کشسان و مطابق پارامترهای جدول ۶ تعریف شده است.

ویژگی‌های المان سطح تماس خاک و پی نیز مطابق آنچه در بخش مدل‌سازی گفته شد، انتخاب شده‌اند. جدول ۷، مقادیر پارامترها را نشان می‌دهد. با روشن شدن پارامترهای مدل عددی، مطابق آنچه در بخش مدل‌سازی آمده است، هندسه‌ی مدل عددی ساخته و تحلیل شد. در ادامه، وضعیت نشست‌ها در لحظه‌ی گسیختگی برای نسبت شعاعی $0/35$ در شکل ۵ ارائه شده است.

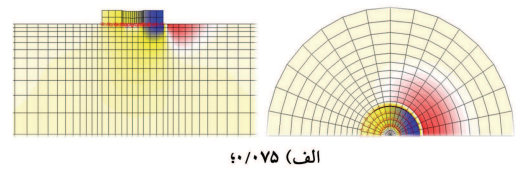
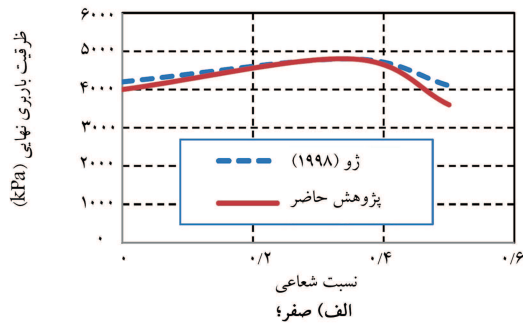


شکل ۴. الگوی تعیین ظرفیت باربری نهایی با کمک نمودار بار واحد سطح - نشست.

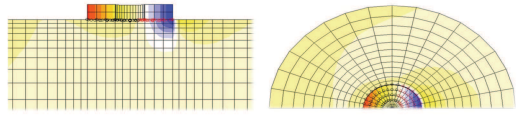
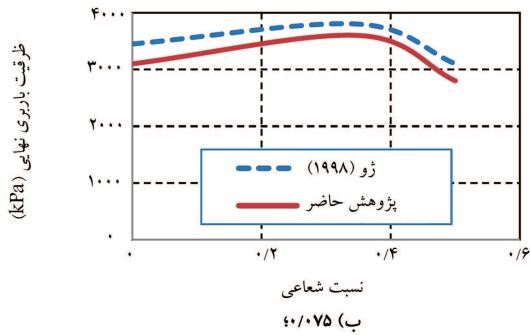
فوقانی و تحتانی پی، n تعداد گره‌های سطوح فوقانی و تحتانی پی، t نیروی افقی اعمالی بر هر گره، h ضخامت پی، q بارگسترده‌ی قائم اعمالی، A مساحت پی، Q بار قائم کل و e برون‌محوری هستند. به منظور محاسبه‌ی ظرفیت باربری، سیستم بارگذاری مذکور در گام‌هایی در حدود $0/1$ ظرفیت باربری تخمینی بر پی، اعمال و در هر مرحله میزان نشست حاصل پایش شده است. سرانجام به کمک منحنی بار - نشست، میزان باربری پی حلقه‌یی به‌دست آمده است. بدیهی است هر چه گام بارگذاری کوچک‌تر باشد، دقت جواب به‌دست آمده از حل عددی بالاتر می‌رود و در عین حال تعداد مراحل بارگذاری و در نتیجه زمان تحلیل افزایش خواهد یافت. عمده‌ی خطای روش مذکور نیز مربوط به همین موضوع است؛ به این معنا که نمی‌توان عدد دقیق ظرفیت باربری را همچون روش تغییر مکان - کنترل تعیین کرد. در حقیقت مقدار ظرفیت باربری نهایی قطعاً مقدار کمتری از باری است که در مرحله‌ی پایانی به مدل اعمال می‌شود. شکل ۴، یکی از حالات تحلیل‌های انجام‌شده را به‌صورت نمونه نشان می‌دهد. بر این اساس مقدار ظرفیت باربری نهایی، مقداری بین دو مرحله‌ی آخر است. در این مورد و طبق تغییرات منحنی بار نشست، مقدار ظرفیت باربری نهایی 5100 کیلوپاسکال تعیین می‌شود.

۳. راستی‌آزمایی مدل عددی

پیش از انجام تحلیل‌های محاسبه‌ی ضریب ظرفیت باربری N_{γ} در شرایط بارگذاری برون‌محور که کار پژوهش حاضر است، لازم است کارایی مدل ساخته‌شده و به ویژه درستی کارکرد روش اعمال بارگذاری به مدل سنجیده شود. لذا برای این منظور فقط کار آزمایشگاهی انجام‌شده در این زمینه، به کمک مدل عددی تشریح‌شده در بخش قبل مبنای کار قرار گرفته است. جهت راستی‌آزمایی، یافته‌های تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی پژوهش ژو در سال 1998 ، [۱۹] که به محاسبه‌ی ظرفیت باربری پی حلقه‌یی ساخته‌شده بر خاک ماسه‌یی با استفاده از شیوه‌ی مدل‌سازی آزمایشگاهی سانتریفیوژ پرداخته است، مقایسه شده است. در پژوهش مذکور، [۱۹] با انجام 40 آزمایش سانتریفیوژ با شتاب‌های 10 تا 160 برابر شتاب گرانش به بررسی رفتار پی‌های حلقه‌یی پرداخته شده است. پی مدل از جنس آلومینیوم با مساحت ثابت 15 سانتی‌مترمربع و نسبت‌های شعاعی متغیر بوده است. همچنین بار وارده برون‌محوری بین صفر تا 3750 بوده و آثار اندازه‌ی پی، نسبت شعاعی و برون‌محوری بار مطالعه شده است. بر مبنای بررسی آزمایشگاهی ژو، [۱۹] پارامترهای به‌کار رفته برای خاک ماسه‌یی در تحلیل عددی با معیار مور - کولمب مطابق جدول ۴ است.

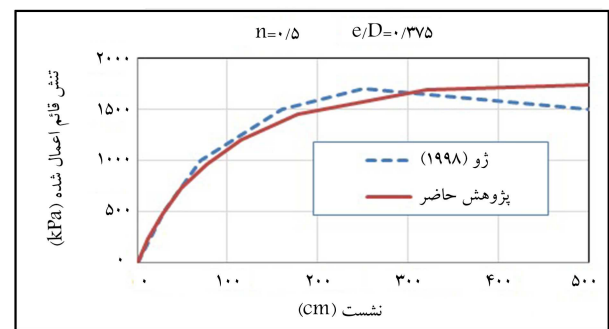
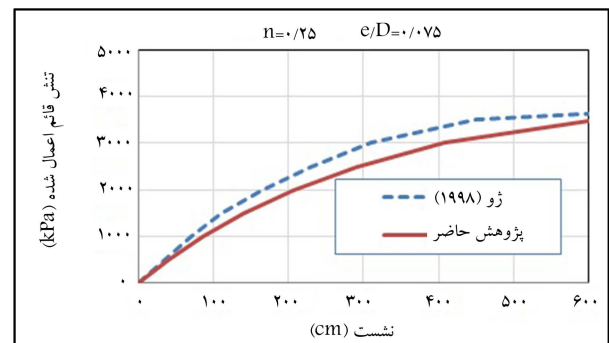
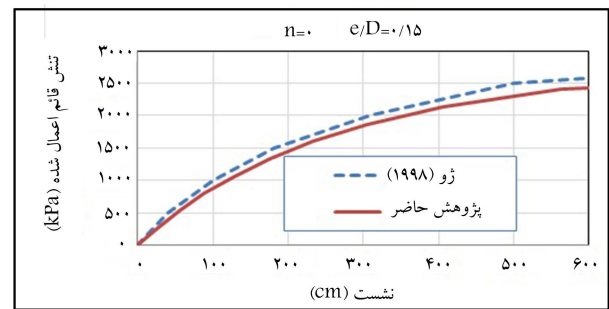
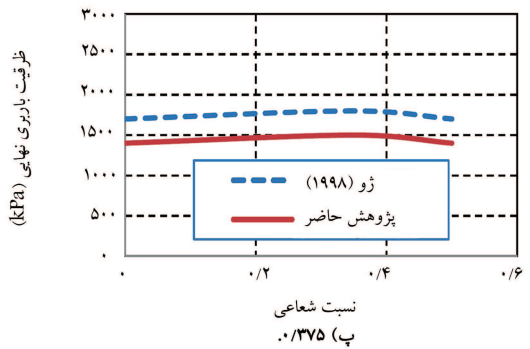


الف) ۰/۰۷۵



ب) ۰/۱۵

شکل ۵. وضعیت کانتورهای جابه‌جایی در لحظه‌ی گسیختگی برای نسبت برون‌محوری.



شکل ۷. مقایسه‌ی ظرفیت باربری بین مدل عددی و مدل سانتریفیوژ،^[۱۹] در نسبت برون‌محوری.

بر مبنای تحلیل‌های انجام‌شده، مقدار ظرفیت باربری نهایی پی حلقه‌یی در حالات مختلف محاسبه و در قالب نمودارهای شکل ۷ با یافته‌های آزمایشگاهی ژو، مقایسه شده است.^[۱۹]

همچنین نسبت ظرفیت باربری در حالت بارگذاری برون‌محور به بارگذاری محوری یا ضریب کاهش (R.F.)، در نمودارهای شکل ۸ با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند.

مطابق نمودارهای ارائه‌شده ملاحظه می‌شود که اختلاف بین روش عددی و رویکرد تجربی سانتریفیوژ ژو،^[۱۹] در نسبت‌های برون‌محوری کم، بسیار اندک است؛ ولی تفاوت بیشتر میان دو رویکرد در برون‌محوری‌های بزرگ‌تر نمود دارد. مطابق شکل‌های مذکور با افزایش نسبت برون‌محوری، نتایج دو رویکرد با یکدیگر اختلاف پیدا می‌کنند، به گونه‌یی که در نسبت برون‌محوری ۰/۳۷۵، نتایج مدل عددی حدود ۲۰٪ کمتر از مدل سانتریفیوژ حاصل شده است. بنابراین می‌توان اظهار داشت که نتایج مدل عددی نسبت به نتایج مدل آزمایشگاهی در نسبت برون‌محوری‌های بزرگ، در حاشیه‌ی اطمینان است و مقادیر کمتری برای ظرفیت باربری به‌دست می‌دهند. در شکل ۹، مقایسه‌ی خطای بین دو روش مشاهده می‌شود.

شکل ۶. مقایسه‌ی متحنی‌های بار نشست بین شبیه‌سازی عددی و مدل سانتریفیوژ.^[۱۹]

در ادامه، به مقایسه‌ی نتایج تحلیل سانتریفیوژ و عددی پرداخته شده است. نمودارهای شکل ۶، مقایسه‌ی بین نمودارهای بار واحد سطح - نشست، دو روش عددی و آزمایشگاهی در ۳ حالت از مجموع ۱۱ حالت بررسی‌شده را نشان می‌دهد. بر این اساس مشاهده می‌شود که روند کلی تغییرات نمودارهای بار واحد سطح - نشست در دو روش عددی و آزمایشگاهی، تطابق مناسبی دارند.

جدول ۸. مقادیر ضریب α در رابطه‌ی ۷ براساس نتایج مدل عددی.

ϕ°	n			
	۰٫۷۵	۰٫۵	۰٫۲۵	۰
۲۵	۰٫۱۸۵۲	۲٫۱۵۶۹	۳٫۶۸۱۹	۴٫۲۳۲۸
۳۰	۰٫۷۴۰۷	۲٫۰۹۸۸	۳٫۱۱۴۵	۴٫۰۳۲۳
۳۵	۱٫۱۱۱۱	۱٫۸۲۲۹	۲٫۸۸۳۳	۳٫۸۲۷۲
۴۰	۱٫۲۱۵۳	۲٫۰۵۱۳	۲٫۸۲۳۳	۳٫۳۳۳۳
۴۵	۱٫۸۵۱۹	۲٫۳۰۵	۲٫۹۳۲۱	۳٫۳۲۵۵

جدول ۹. مقادیر ضریب b در رابطه‌ی ۷ براساس نتایج مدل عددی.

ϕ°	n			
	۰٫۷۵	۰٫۵	۰٫۲۵	۰
۲۵	۱٫۵۵	۲٫۵۴۳۱	۳٫۴۰۷	۳٫۶۷۶۲
۳۰	۱٫۸۸۸۹	۲٫۷۵۹۳	۳٫۳۶۶۲	۳٫۷۷۶۹
۳۵	۲٫۲۴۰۷	۲٫۷۲۱۴	۳٫۲۸۶۵	۳٫۷۵۱۹
۴۰	۲٫۵۱۵۶	۳٫۰۱۵۴	۳٫۳۸۵۲	۳٫۶۱۵۲
۴۵	۲٫۷۴۰۷	۳٫۰۴۷۹	۳٫۴۰۲۸	۳٫۶۱۱۵

به حالت بارگذاری محوری استفاده شده است (رابطه‌ی ۶):

$$R.F = \frac{q_{ult}(e)}{q_{ult}(e=0)} \quad (6)$$

که در آن، $R.F$ ضریب کاهش ظرفیت باربری در حالت وجود برون‌محوری نسبت به بارگذاری محوری و q_{ult} نیز ظرفیت باربری نهایی است.

از آنجا که در روش تحلیل ذکر شده، سربار یا چسبندگی وجود ندارد، لذا ظرفیت باربری فقط وابسته به اثر N_{γ} است. می‌توان مقادیر به دست آمده در این حالات را با معادلات منحنی درجه‌ی دوم مطابق رابطه‌ی ۷ برازش کرد:

$$R.F = 1 + a(e/D)^1 - b(e/D) \quad (7)$$

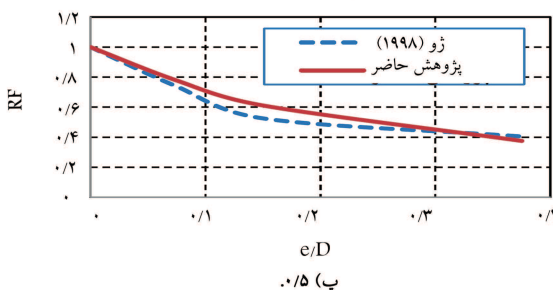
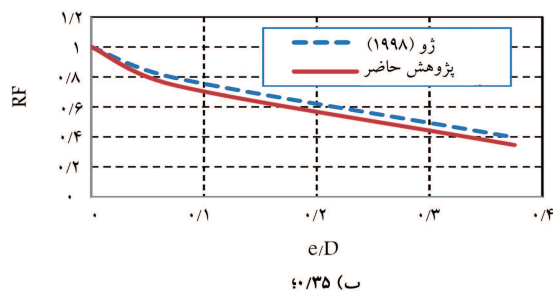
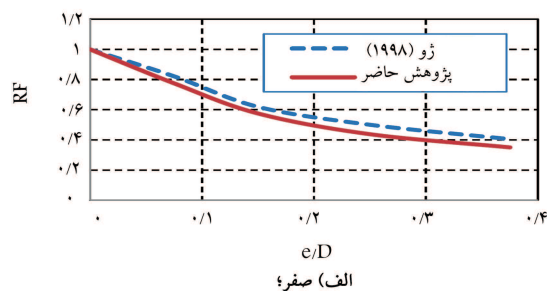
که در آن، ضرایب‌های a و b آثار نسبت شعاعی n در ضریب کاهش ظرفیت باربری را اعمال می‌کنند. به این ترتیب می‌توان مقدار ضریب ظرفیت باربری را در شرایط بارگذاری خارج محور از طریق رابطه‌ی ۸ به دست آورد:

$$N_{\gamma}(e) = R.F(N_{\gamma}) \quad (8)$$

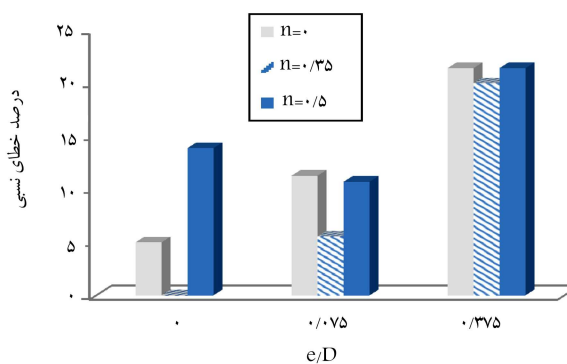
که در آن، $N_{\gamma}(e)$ ضریب ظرفیت باربری در شرایط بارگذاری برون‌محور و N_{γ} ضریب ظرفیت در بارگذاری بدون برون محوری است.

نمودارهای شکل‌های ۱۰ (الف تا ث)، تغییرات نسبت $R.F$ با نسبت برون‌محوری و منحنی‌های هم‌گرایی را نشان می‌دهند. مقادیر ضرایب مربوط به هر یک از حالت‌های معادله‌ی ۷ در جدول‌های ۸ و ۹ ارائه شده است.

بر این اساس می‌توان با کمک رابطه‌ی ۷ و مقادیر جدول‌های ۸ و ۹، مقدار ضریب ظرفیت باربری N_{γ} را از طریق رابطه‌ی ۸ به دست آورد. همان‌طور که در جدول‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود، ضرایب رابطه‌ی ۷ علاوه بر نسبت شعاعی، به زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک نیز وابسته‌اند. به منظور کاربرد کردن نتایج پژوهش حاضر، بین ضرایب مذکور با نسبت شعاعی و سپس زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک رابطه‌سازی صورت پذیرفته است. نمودارهای شکل‌های ۱۱ (الف تا ث) به منظور مرتبط ساختن ضرایب a و b در رابطه‌ی ۷ با نسبت شعاعی ارائه شده‌اند.



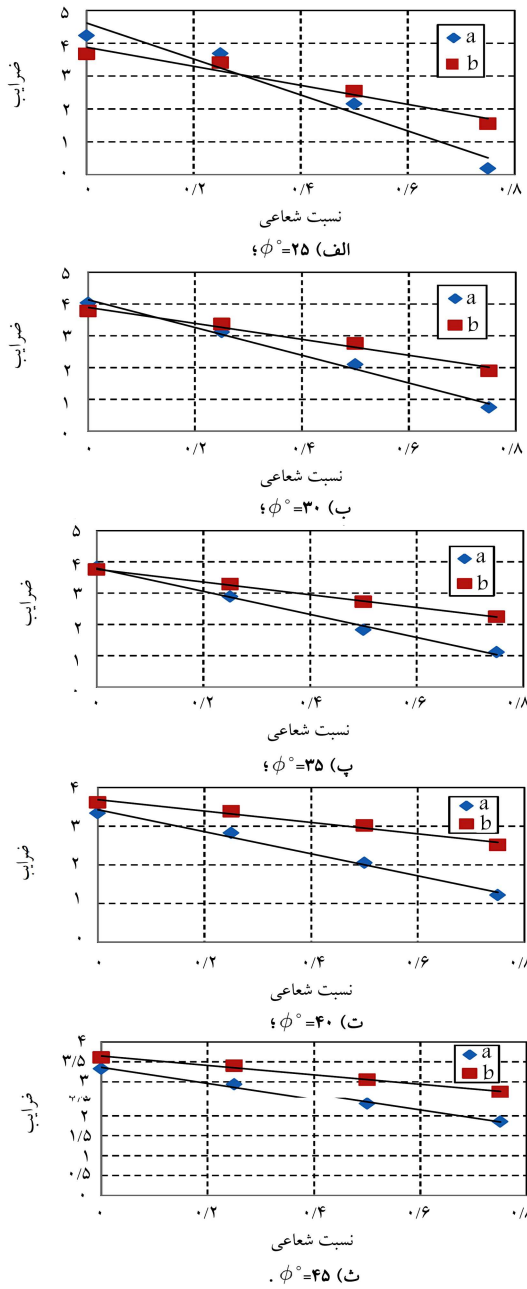
شکل ۸. مقایسه‌ی ضریب کاهش بین مدل عددی و مدل سانتزینیوژ [۱۹] در نسبت شعاعی.



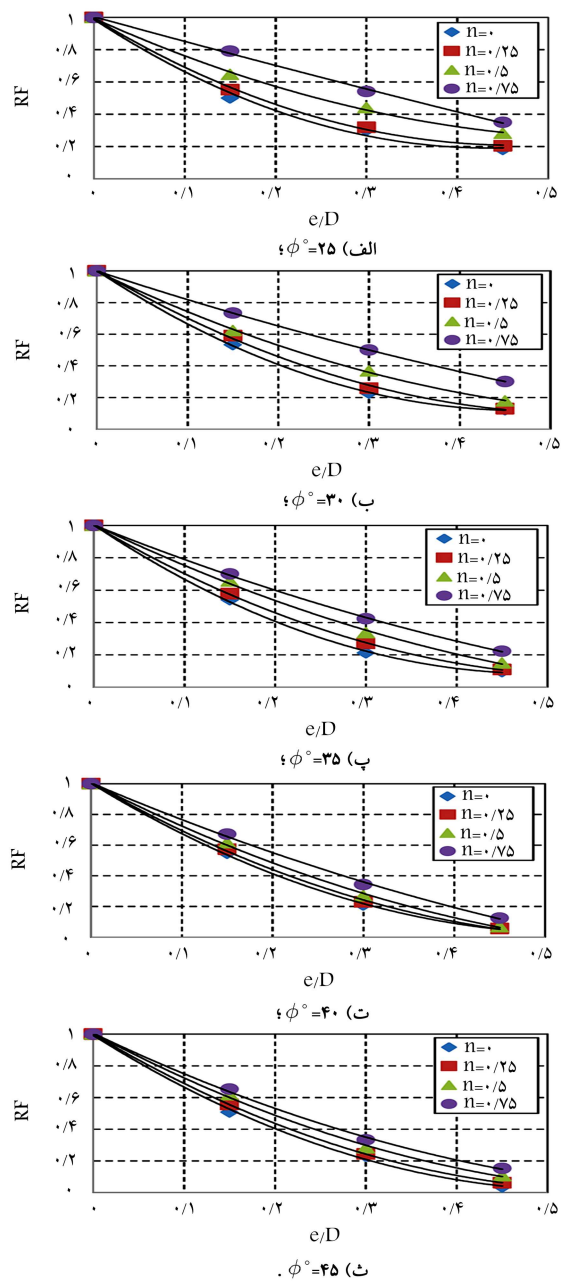
شکل ۹. مقایسه‌ی درصد خطای نسبی بین مدل عددی و شبیه‌سازی تجربی سانتزینیوژ [۱۹].

۴. بحث و بررسی یافته‌ها

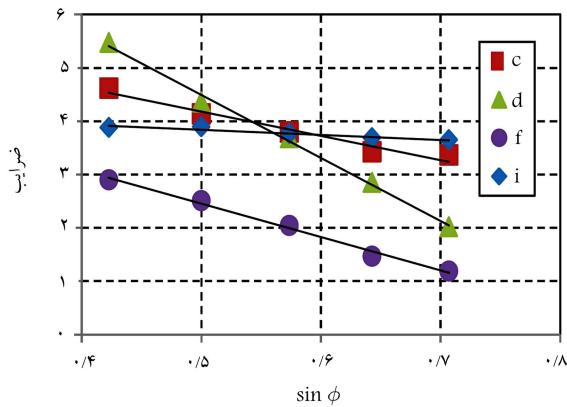
پس از مشخص شدن درستی کارکرد مدل عددی، می‌توان مقدار ظرفیت باربری را با پارامترهای پژوهش حاضر به دست آورد و در نتیجه مقدار ضریب N_{γ} را برآورد کرد. از آنجا که هدف پژوهش حاضر ارائه‌ی رابطه‌ی ثابت‌های کاهش ضریب ظرفیت باربری پی‌حلقه‌ی متناسب با تغییر نسبت برون‌محوری است، لذا به منظور بدون بعد کردن نتایج تحلیل از نسبت ظرفیت باربری در حالت داشتن برون‌محوری



شکل ۱۱. تغییرات ضرایب a و b در برابر نسبت شعاعی.



شکل ۱۰. تغییرات ضریب R.F در برابر نسبت برون محوری.



شکل ۱۲. تغییرات ضرایب c, d, e, f, i در برابر $\sin \phi$.

به منظور مرتبط سازی از معادله‌ی خطی استفاده شده است. بر این اساس ضرایب a و b از طریق روابط ۹ و ۱۰ بیان می‌شوند:

$$a = c - d.n \quad (9)$$

$$b = i - f.n \quad (10)$$

مقادیر ضرایب مربوط به هر یک از حالات روابط ۹ و ۱۰ در جدول ۱۰ ارائه شده است. حال می‌توان ضرایب جدول ۱۰ را به زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک مرتبط کرد. بر این اساس نمودار شکل ۱۲ ارائه شده است. براساس آزمون و خطای انجام شده، ضرایب جدول ۱۰ بهترین ارتباط را با $\sin \phi$ داشته‌اند.

مطابق نمودار شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود بین ضرایب c, d, e با $\sin \phi$ رابطه‌ی

جدول ۱۰. مقادیر ضرایب رابطه‌های ۹ و ۱۰ براساس خطوط هم‌گرایی نمودارهای شکل ۱۱ (الف الی ت).

f	i	d	c	ϕ°
۲,۸۹۷۰	۳,۸۸۰۵	۵,۴۶۹۵	۴,۶۱۶۸	۲۵
۲,۵۰۸۴	۳,۸۸۸۵	۴,۳۵۶۲	۴,۱۳۰۲	۳۰
۲,۰۳۹۵	۳,۷۶۴۹	۳,۶۸۳۳	۳,۷۹۲۳	۳۵
۱,۴۶۷۴	۳,۶۸۳۱	۲,۸۵۰۴	۳,۴۲۴۷	۴۰
۱,۱۸۶۹	۳,۶۴۵۸	۲,۰۱۹۲	۳,۳۶۰۸	۴۵

خطی مطابق روابط ۱۱ الی ۱۳ وجود دارد:

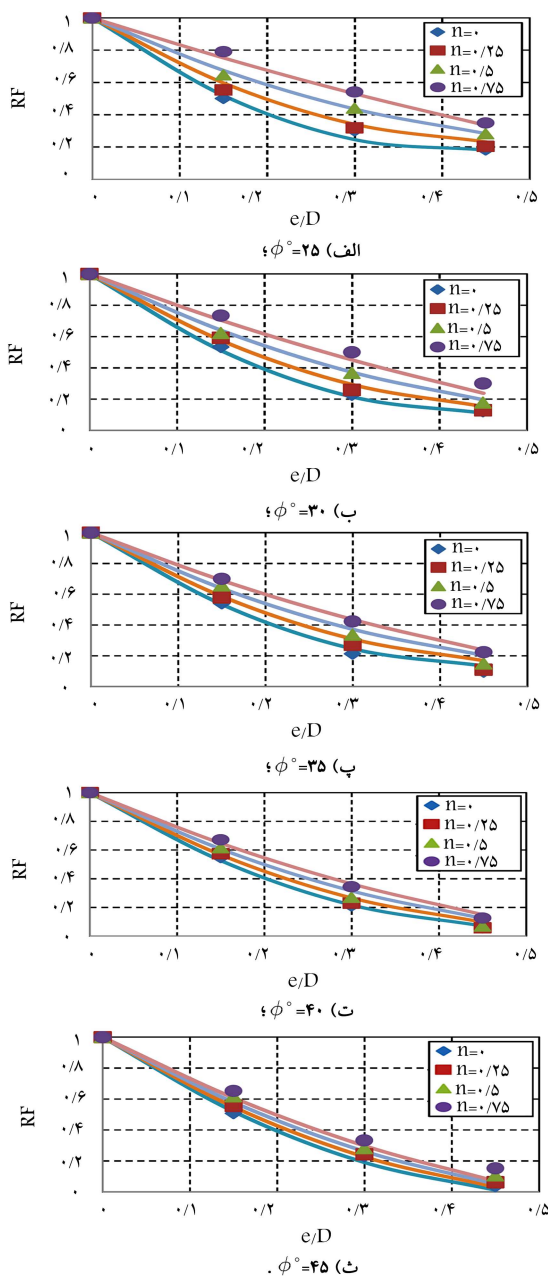
$$c = ۴,۵(۱,۴۵ - \sin \phi) \quad (۱۱)$$

$$d = ۱۱,۸(۰,۸۸ - \sin \phi) \quad (۱۲)$$

$$f = ۶,۳(۰,۸۸ - \sin \phi) \quad (۱۳)$$

همچنین ضریب i را می‌توان برای دو دسته زاویه‌ی اصطکاک داخلی ثابت در نظر گرفت. مقدار ضریب مذکور برای زاویه‌ی اصطکاک داخلی کمتر از ۳۵ درجه، برابر ۳,۹ و برای زوایای اصطکاک مساوی یا بزرگ‌تر از ۳۵ درجه، برابر ۳,۷ در نظر گرفته شده است. حال می‌توان مقادیر ضریب $R.F$ را با رابطه‌ی ۷ و به کمک روابط ۸ الی ۱۳ برای ضریب ظرفیت باربری N_{γ} به دست آورد. نمودارهای شکل ۱۳، مقایسه‌ی میان ضریب کاهش $R.F$ بین رابطه‌ی ۷ و نتایج تحلیل عددی را نشان می‌دهند. در نمودارهای مذکور، نقاط نشان‌دهنده‌ی مقادیر به دست آمده از تحلیل عددی و منحنی‌ها بیانگر تقریب رابطه‌ی ۷ هستند.

براساس نمودارهای ارائه شده، بیشترین اختلاف بین دو مقدار حاصل از رابطه‌ی ۷ و نتایج مدل عددی در زاویه‌ی اصطکاک‌ها و نسبت شعاعی‌های مختلف برداشت و خطای نسبی آن محاسبه و در قالب نمودار شکل ۱۴ ارائه شده است. مطابق نمودار مذکور، بیشینه‌ی خطای نسبی حدود ۳٪ است. استفاده از رابطه‌ی ۷ در زاویه‌ی اصطکاک داخلی کمتر از ۴۰ درجه، نتایج مطلوبی داشته است، به ویژه در نسبت‌های شعاعی بزرگ‌تر از صفر که میزان خطای بیشینه‌ی نسبی کمتر از ۲٪ به دست آمده است.

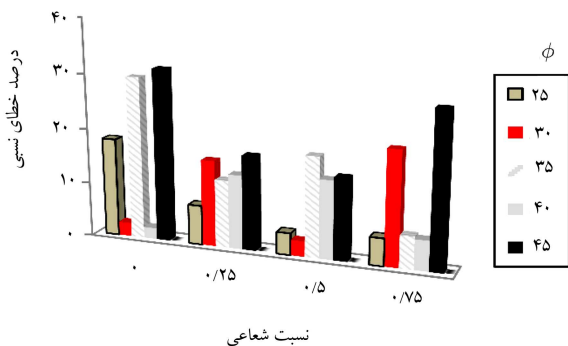


شکل ۱۳. مقایسه‌ی ضریب $R.F$ حاصل از رابطه‌ی ۷ و شبیه‌سازی عددی.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، آثار نسبت شعاعی (n)، خروج از محوریت بار (e)، زاویه‌ی اصطکاک داخلی (ϕ) در ظرفیت باربری پی حلقه‌یی، به کمک شبیه‌سازی سه‌بعدی عددی با نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ بررسی شده است. مدل رفتاری در نظر گرفته شده در تحلیل‌ها، مور-کولمب و با فرض قانون جریان هم‌بسته است. برای منظور کردن آثار جداشدگی شالوده از خاک، بین خاک و پی المان، سطح تماس تعریف شده است. در تحلیل‌ها، مساحت پی ثابت و برابر ۱۰ مترمربع فرض شده است.

بر مبنای ۸۰ تحلیل عددی انجام شده در نسبت‌های شعاعی مختلف (صفر، ۰,۲۵، ۰,۵، ۰,۷۵)، نسبت‌های برون‌محوری متفاوت (صفر، ۰,۱۵، ۰,۳، ۰,۴۵) و ۵ زاویه‌ی اصطکاک داخلی (۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵)، می‌توان به این موارد به‌عنوان اهم نتایج اشاره کرد:



شکل ۱۴. بیشینه‌ی خطای نسبی بین رابطه‌ی ۷ و نتایج شبیه‌سازی عددی در مقدار $R.F$.

- با افزایش نسبت شعاعی پی حلقه‌یی، برخلاف افزایش قطر خارجی (با توجه به ثابت بودن مساحت پی) ناحیه‌ی گوه‌ی گسیختگی کوچک‌تر می‌شود.
- نسبت شعاعی همیشه‌ی پی حلقه‌یی با افزایش برون‌محوری افزایش می‌یابد.
- نسبت ضریب N_γ در حالت بارگذاری خارج محور به محوری با ضریب کاهش $R.F$ تعریف می‌شود که تابعی از نسبت شعاعی، نسبت برون‌محوری و زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک است.
- ضریب $R.F$ با افزایش نسبت برون‌محوری، روند کاهش $R.F$ دارد. این روند کاهش تا نسبت برون‌محوری $3/1$ از نرخ کاهش بیشتری نسبت به برون‌محوری‌های بزرگ‌تر از $3/1$ دارد.
- آثار نسبت شعاعی در ضریب کاهش $R.F$ با افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک، کاهش می‌یابد. این به آن مفهوم است که افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک، اثر حلقه‌یی بودن شکل پی را کاهش می‌دهد.
- به‌طور کلی افزایش نسبت شعاعی، منجر به افزایش ضریب $R.F$ می‌شود. این نتیجه می‌تواند کمک شایانی در طراحی شالوده‌ی سازه‌های تحت بار خارج محور داشته باشد.
- بر مبنای تحلیل‌های انجام‌شده و بررسی نمودارها در حالات مختلف، یک رابطه برای ضریب کاهش $R.F$ ارائه شده است. رابطه‌ی مذکور بسیار عملی است و در بیشتر موارد خطایی بیشتر از 20% ندارد.

منابع (References)

1. Fisher, K. "Zur berechnung der setzung von fundamen-ten in der form einer kreisformigen ringflache", *Der Bauingenieur*, **32**(5), pp. 172-174 (1957).
2. Egorov, K. "Calculation of bed for foundation with ring footing", *In: Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 41-45 (1965).
3. Egorov, K., Kononov, P., Kitaykina, D., Salnikov, L. and Zinovyev, A. "Soil deformation under circular footing", *In: Proc. 9th JCSMFE, Tokyo*, pp. 489-492 (1977).
4. Karaulov, A. "Static solution of the limiting-pressure problem for ring foundations on soil beds", *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **42**(6), pp. 189-194 (2005).
5. Kumar, J. and Ghosh. P. "Bearing capacity factor N_γ for ring footings using the method of characteristics", *Canadian Geotechnical Journal*, **42**(5), pp. 1474-1484 (2005).
6. Seyed Hosseininia, E. and Gholami, H. "Calculation of N_γ bearing capacity factor for ring footings using method of characteristics", *In: 7th National Congress of Civil Engineering* (2013).
7. Gholami, H. "Bearing capacity of ring footings", Msc. Thesis, Ferdowsi of Mashhad, Iran (In Persian) (2013).
8. Ismael, N.F. "Loading tests on circular and ring plates in very dense cemented sands", *Journal of Geotechnical Engineering*, **122**(4), pp. 281-287 (1996).
9. Demir, A., Ornek, M., Laman, M. and Yildiz, A. "Analysis of ring footings using field test results", *Proc. 3rd of Int. Conf. of New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Nicosia, Northern Cyprus (2012).
10. Ohri, M., Purhit, D. and Dubey, M. "Behavior of ring footings on dune sand overlaying dense sand", *In: Proc. of Int. Conf. on Civil Engineering* (1997).
11. Boushehrian, J.H. and Hataf, N. "Experimental and numerical investigation of the bearing capacity of model circular and ring footings on reinforced sand", *Geotextiles and Geomembranes*, **21**(4), pp. 241-256 (2003).
12. Saran, S., Bhandari, N. and Al-Smadi, M. "Analysis of eccentrically-obliquely loaded ring footings on sand", *Indian Geotechnical Journal*, **33**(4), pp. 422-446 (2003).
13. Laman, M. and Yildiz, A. "Model studies of ring foundations on geogrid-reinforced sand", *Geosynthetics International*, **10**(5), pp. 142-152 (2003).
14. Laman, M. and Yildiz, A. "Numerical studies of ring foundations on geogrid-reinforced sand", *Geosynthetics International*, **14**(2), pp. 52-64 (2007).
15. Hataf, N. and Razavi, M.R. "Behavior of ring footing on sand", *Iranian Journal of Science and Technology*, **27**, pp. 47-56 (2003).
16. Zhao, L. and Wang, J. "Vertical bearing capacity for ring footings", *Computers and Geotechnics*, **35**(2), pp. 292-304 (2008).
17. Benmebarek, S., Remadna, M., Benmebarek, N. and Belounar, L. "Numerical evaluation of the bearing capacity factor of ring footings", *Computers and Geotechnics*, **44**, pp. 132-138 (2012).
18. Seyed Hosseininia, E. "Bearing capacity factors of ring footings", *Iranian Journal of Science and Technology*, **40**(2), pp. 121-132 (2016).
19. Fanyu Zhu, B. "Centrifuge modelling and numerical analysis of bearing capacity of ring foundations on sand", Memorial University of Newfoundland (1998).
20. El Sawwaf, M. and Nazir, A. "Behavior of eccentrically loaded small-scale ring footings resting on reinforced layered soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **138**(3), pp. 376-384 (2011).
21. Budhu, M., *Soil Mechanics and Foundations*, Wiley ISBN (2011).
22. *Itasca FLAC 3D: Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, Version 4.0.*, Minneapolis, Minnesota, Itasca Consulting Group (2009).