



بررسی ظرفیت باربری پی‌های حلقوی مستقر بر خاک‌های دانه‌ای در شرایط بارگذاری خارج محور

امید سرگزی مزاری^۱، سید احسان سیدی حسینی^۲

۱- کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی

۲- استادیار، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی

eseyedi@um.ac.ir

خلاصه

امروزه پی‌های حلقوی کاربرد وسیعی در سازه‌های گوناگون در سراسر جهان یافته‌اند؛ نظیر: برج‌های مخابراتی، مخازن ذخیره مایعات، پایه پل‌ها و سازه‌های فراساحلی. از آنجا که اغلب سازه‌های مذکور بلند و بزرگ می‌باشند، پی آن‌ها به طور مکرر تحت لنگرهای خمشی ناشی از بارهای جانبی (باد، امواج، زلزله) قرار می‌گیرند. اعمال بار خارج از مرکز اثر قابل توجهی بر ظرفیت باربری خواهد داشت. نظر به اهمیت بالای سازه‌های احداث شده بر روی این قبیل از پی‌ها بحث ظرفیت باربری در این شرایط بارگذاری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با این وجود رفتار پی حلقوی به درستی درک نشده است به نحوی که یک روش منطقی جهت تعیین ظرفیت باربری آن وجود ندارد. در تحقیق حاضر به بررسی اثر بارگذاری خارج محور بر ظرفیت باربری پی‌های حلقوی مستقر بر یک نمونه خاک ماسه‌ای با شبیه‌سازی عددی سه بعدی به کمک نرم افزار 3D FLAC پرداخته شده است و نتایج حاصل با تحقیق مشابه آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد شبیه‌سازی عددی می‌تواند در بسیاری موارد، شرایط مناسبی برای دستیابی به نتایج عملی ارائه دهد.

کلمات کلیدی: پی حلقوی، شبیه‌سازی سه بعدی، ظرفیت باربری، بارگذاری خارج محور

۱. مقدمه

پی‌های حلقوی 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 دایره‌ای حکایت دارند. گرچه پی حلقوی و دایره‌ای به لحاظ شکل ظاهری مشابه هستند ولی رفتار آنها به لحاظ توزیع فشار روی خاک، نشست و یا موارد مشابه تفاوت ماهوی داشته و نمی‌توان به پی حلقوی همانند پی دایره‌ای نگاه کرد. مطالعات انجام گرفته بر روی پی‌های حلقوی بسیار محدود بوده است و عموماً رفتار آن مشابه پی دایره‌ای در نظر گرفته می‌شود. نظر به دامنه وسیع کاربرد این پی‌ها انجام مطالعات وسیع و در عین حال دقیق، بر روی آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد.

نخستین تحقیق انجام شده بر روی پی‌های حلقوی توسط فیشر [1] در سال 1957 صورت پذیرفت. وی به روش تحلیلی مطالعاتی بر روی نشست پی‌های حلقوی به کمک برهم نهی دو پی دایره‌ای انجام داد و برای این منظور روابط و گرافهایی ارائه داد. در سال 1965 ایگوروف [2] به روش تحلیلی و فرض محیط الاستیک مقدار فشار تماسی و نشست در زیر پی‌های حلقوی را محاسبه نمود. ایگوروف و همکاران [3] در سال 1977 با انجام برخی پایش‌های میدانی و انجام تحقیقات تئوری، رابطه‌ای برای محاسبه نشست پی‌های حلقوی مستقر بر خاک‌های چند لایه ارائه نمودند. در سال 2005 کراولف [4] به روش تعادل حدی رابطه‌ای برای محاسبه ظرفیت باربری پی‌های حلقوی با کمک ظرفیت باربری پی‌نواری و دایره‌ای ارائه داد. در همین سال کومارو قوش [5] نیز به روش خطوط مشخصه مقدار بار نهایی پی‌های حلقوی مستقر بر خاک دانه‌ای را بدست آوردند. در سال‌های 1996 و 2012 به ترتیب اسماعیل [6] و دمیر و همکاران [7] با انجام آزمایش‌های بزرگ مقیاس میدانی به محاسبه ظرفیت باربری پی‌های حلقوی بر روی خاک‌های ماسه‌ای و رسی طبیعی پرداختند. اسماعیل به این نتیجه رسید که ظرفیت باربری پی حلقوی بر روی ماسه متراکم سیمانته شده تا نسبت شعاعی برابر 0.25 تغییر نمی‌کند ولی پس از آن روند کاهشی دارد [6]. اما نتایج تحقیقات دمیر و همکاران [7] بر روی خاک رس طبیعی نشان می‌دهد

¹ دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران - مکانیک خاک و پی، دانشگاه فردوسی مشهد

² استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد



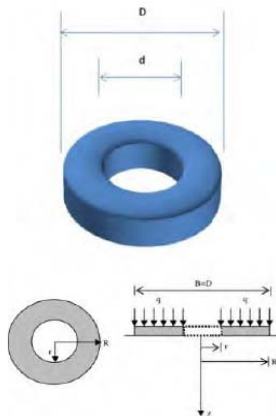
که ظرفیت باربری پی حلقوی با افزایش نسبت شعاعی پیوسته کاهش می‌یابد. در سال 1997 اوهری و همکاران [8] نخستین مطالعات آزمایشگاهی بر روی پی‌های حلقوی مستقر بر خاک ماسه‌ای دو لایه را انجام دادند. ایشان نسبت شعاعی برابر 0.38 را به عنوان نسبت شعاعی بهینه معرفی نمودند. تحقیق مشابهی توسط بوشهریان و هاتف [9] در سال 2003 انجام شد که این تحقیق نسبت شعاعی بهینه را برابر 0.4 ارائه داد. هم‌چنین در سال 2003 ساران و همکاران [10] این نسبت را بین 0.2 تا 0.3 و در سال‌های 2003 و 2007 لامن و یلدیز [11, 12] مقدار آن را 0.3 پیشنهاد نمودند. در سال 2003 رضوی و هاتف [13] تحقیقات آزمایشگاهی و عددی بر روی پی‌های حلقوی مستقر بر ماسه انجام دادند. ایشان نسبت شعاعی بهینه را بین 0.2 تا 0.4 پیشنهاد دادند. ایشان هم‌چنین بر مبنای شکل سطح گسیختگی حاصل از آزمون‌ها رابطه‌ای نیمه تجربی برای محاسبه ظرفیت باربری پی‌های حلقوی تحت بار محوری ارائه دادند.

در سال 1998 ژو [14] تحقیقات گسترده‌ای بر روی رفتار پی‌های حلقوی مستقر بر ماسه بصورت آزمایشگاهی انجام داد. وی با استفاده از تست سانتیفریوژ مقدار نسبت شعاعی بهینه را حدود 0.35 بدست آورد. تحقیقات وی از جمله محدود تحقیقات انجام شده بر روی پی‌های حلقوی تحت بار برون محور است که بر مبنای آزمایش‌ها یک ضریب کاهش برای این شرایط بارگذاری ارائه داد. تنها کار دیگر در این شرایط بارگذاری در سال 2011 و توسط الصواف و نذیر [15] انجام شده است که البته بیشتر تمرکز کار آن‌ها بر روی اثرات مسلح کننده‌ها می‌باشد. ایشان نسبت شعاعی بهینه را 0.39 پیشنهاد نمودند.

در تحقیق حاضر مطالعه سه بعدی رفتار پی حلقوی مستقر بر خاک دانه‌ای در شرایط بارگذاری خارج محور با کمک نرم افزار تفاضل محدود 3D FLAC صورت پذیرفته است و نتایج با تحقیقات ژو [14] مقایسه گردیده است. مشخصات خاک ماسه‌ای و پی با توجه به مقادیر حاصل از آزمایش‌های ژو [14] انتخاب شده و مدل رفتاری در نظر گرفته شده در مدل عددی، مور-کولمب می‌باشد. در نهایت ضمن ارائه نسبت شعاعی بهینه، نتایج حاصل از این مدل‌سازی با نتایج ژو [14] مقایسه گردیده است. که نزدیکی میان نتایج قدرت مناسب نرم افزار 3D FLAC در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

2. صحنه گذاری نتایج مدل عددی

جهت صحنه گذاری، نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی ژو [14]، مقایسه شده است. در ادامه جزئیات روش کار، فرایند آزمایش، آنالیز نتایج و مدل بکار رفته در آزمایش جهت برآورد ظرفیت باربری پی حلقوی در شرایط بارگذاری خارج محور ارائه شده است. در سال 1998 ژو [14] به محاسبه ظرفیت باربری پی حلقوی مستقر بر خاک ماسه‌ای با استفاده از تکنیک مدل‌سازی آزمایشگاهی سانتیفریوژ پرداخت. ژو [14] با انجام 40 آزمایش سانتیفریوژ با شتاب‌های 10 تا 160 برابر شتاب گرانش به بررسی رفتار پی‌های حلقوی پرداخت. پی مدل از جنس آلومینیوم با مساحت ثابت 15 سانتی مترمربع و نسبت‌های شعاعی متغیر بوده است. بار وارده نیز دارای برون محوری بین صفر تا 0.375 بوده است. ماکزیمم سرعت چرخش مدل 189 دور بر دقیقه و بیشترین شعاع موثر برابر 5 متر بوده است. هندسه پی مدل در شکل (1) نشان داده شده است. وی اثرات اندازه پی، نسبت شعاعی n (نسبت شعاع داخلی به خارجی) و برون محوری بار را مطالعه نمود. مشخصات خاک مورد استفاده در آزمایش با انجام آزمون‌های فیزیکی و مقاومتی حاصل و در جدول (1) ارائه شده است.



شکل 1- هندسه پی حلقوی مدل آزمایشگاهی [14]



جدول 1: مشخصات خاک ماسه ای مورد استفاده در آزمون‌های سانتریفیوژ [14]

پارامتر	نماد	مقدار
چگالی دانه ها	G_s	2.66
وزن مخصوص خشک حداقل و حداکثر	γ_d (KN/m ³)	12.7-15.8
نسبت تخلخل حداقل و حداکثر	e	0.65-1.06
اندازه متوسط دانه ها	D_{50} (mm)	0.22
ضریب یکنواختی	c_u	1.69
ضریب فشار حالت سکون	K_0	0.42
نسبت پوآسون	ν	0.3
تراکم نسبی	D_r	90
زاویه اصطکاک داخلی خاک	ϕ	39.5
حداقل زاویه اصطکاک کف پی و خاک	δ	28

3. مدل‌سازی عددی

شبیه سازی عددی مسئله ظرفیت باربری پی حلقوی مستقر بر بستر ماسه ای در شرایط بارگذاری خارج محور با یک مدل اختلاف محدود و به کمک نرم افزار FLAC 3D انجام شده است. این برنامه کاربرد وسیعی در تحلیل مسائل پیچیده مهندسی و بطور ویژه مهندسی ژئوتکنیک داشته و قابلیت کدنویسی در آن، این برنامه را از برنامه های مشابه متمایز می کند و قدرت بیشتری در آنالیز مسائل مختلف ایجاد کرده است. در تحقیق حاضر از مدل رفتاری پر کاربرد مور- کولمب برای شبیه سازی رفتار خاک استفاده شده است. هم چنین به جهت ایجاد رفتار واقعی در مصالح قانون جریان غیر هم بسته فرض شده است. بر مبنای مدل آزمایشگاهی تحقیقات ژو [14] پارامترهای استفاده شده برای خاک ماسه ای مدل مطابق جدول (2) می باشد.

جدول 2: مشخصات خاک ماسه ای مورد استفاده در مدل عددی

پارامتر	نماد	مقدار
مدول بالک	K (MPa)	58
مدول برشی	G (MPa)	27
وزن مخصوص	γ_d (KN/m ³)	15.74
چسبندگی	C (KPa)	1
زاویه اصطکاک داخلی خاک	ϕ	39.5
زاویه اتساع	ψ	8

نظر به اینکه کلیه آزمایش‌های سانتریفیوژ ژو [14] در شرایط بارگذاری خارج محور در شتاب 100 برابر شتاب گرانش انجام شده است، لذا پی مدل عددی با مساحت 15 متر مربع و سه نسبت شعاعی 0، 0.35 و 0.5 انتخاب شده است. تحلیل‌ها در نسبت‌های برون محوری (e/D) بین 0 تا 0.375 انجام شده است. هم چنین پی آلومینیومی مدل با مدل رفتاری الاستیک تعریف شده است. مشخصات مصالح پی در جدول (3) آورده شده است.

جدول 3: مشخصات پی آلومینیومی مورد استفاده در مدل عددی

پارامتر	نماد	مقدار
مدول بالک	K (MPa)	76000
مدول برشی	G (MPa)	26000
وزن مخصوص	γ_d (KN/m ³)	27

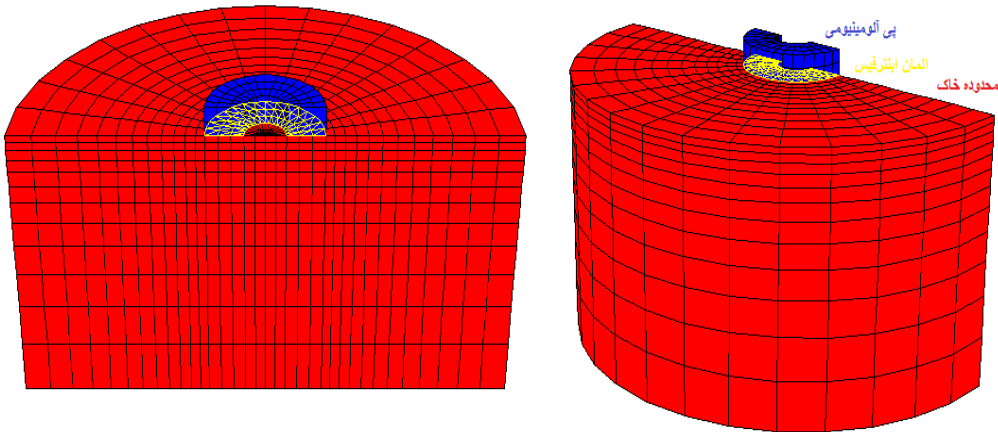
به منظور شبیه سازی اثر متقابل محل فصل مشترک پی و خاک از المان اینترفیس بهره گیری شده است. این المان تحمل کشش نداشته و به کمک روابط توصیه شده در راهنمای نرم افزار FLAC 3D و نتایج آزمایش‌های ژو [14]، مشخصات این جزء در قالب جدول (4) آورده شده است.



جدول 4: مشخصات المان ایترفیس در مدل عددی

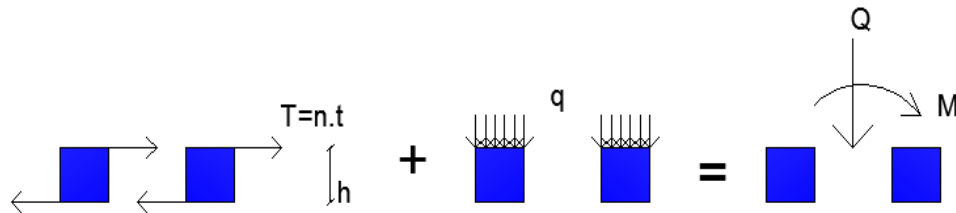
پارامتر	نماد	مقدار
سختی برشی	K_s (MPa)	3800
سختی نرمال	K_n (MPa)	3800
زاویه اصطکاک	φ	28
زاویه اتساع	ψ	0

شکل کلی از نحوه مش بندی و قسمت های مختلف مدل سه بعدی در شکل (2) نشان داده شده است. با توجه به وجود تقارن و کمک به کاهش زمان تحلیل، نیمی از محیط مدل شده است. شرایط مرزی بدین ترتیب انتخاب شده است که مرز کف فاقد هرگونه جابجایی می باشد. مرز مدور خارجی تنها در جهت قائم امکان جابجایی دارد و از حرکت مرز مربوط به صفحه تقارن در جهت عمود بر صفحه ممانعت شده است. برای ایجاد شرایط اولیه و برجا، آنالیز مدل صورت گرفته تا تنش های اولیه در محیط ایجاد گردند. در پایان این مرحله کلیه تغییر مکان ها صفر شده و سپس تحلیل ها برای رسیدن به مرحله گسیختگی بصورت تنش - کنترل انجام شده است.



شکل 2- هندسه و مش بندی پی حلقوی مدل عددی حاضر

برای اعمال بارگذاری خارج محور با توجه به محدودیت های موجود، از اعمال یک بار گسترده قائم به سطح پی و مجموعه نیروهای افقی به نقاط گرهی فوقانی و تحتانی پی استفاده شده است. به طوری که برهم نهی این دو سیستم منجر به ایجاد یک بار متمرکز و لنگر شود. این نحوه اعمال بار در شکل (3) به صورت مناسب تشریح شده است.



شکل 3- نحوه اعمال بارگذاری به مدل عددی حاضر

لذا داریم:

$$M = 0.5T.h \quad (1)$$

$$T = n.t \quad (2)$$

$$Q = q.A \quad (3)$$

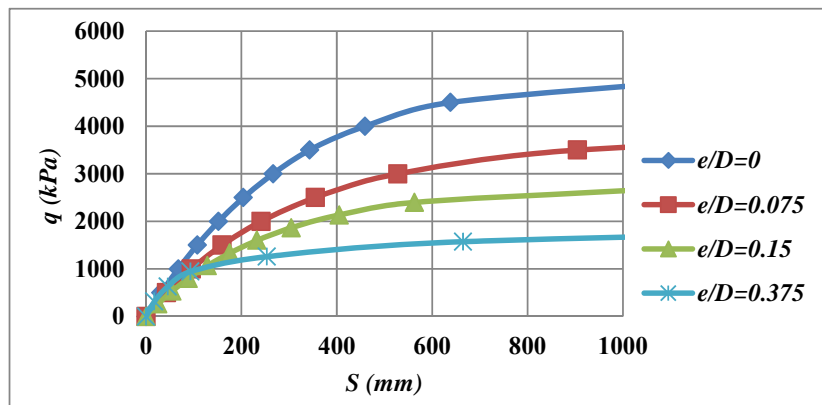


$$e = M / Q \quad (4)$$

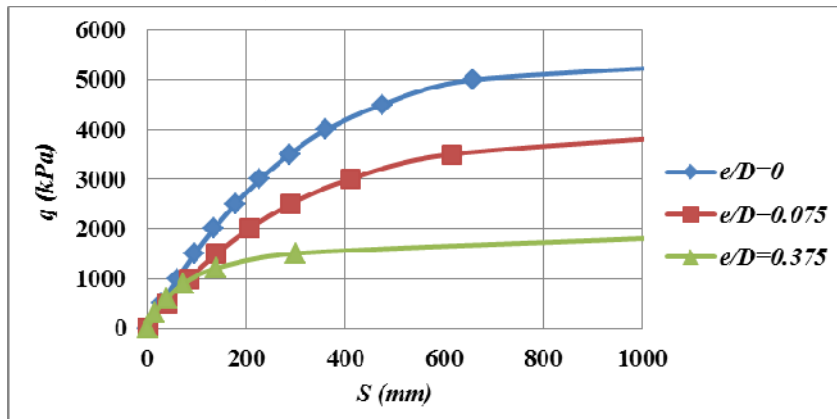
در روابط فوق M لنگر، T مجموع نیروهای افقی اعمالی بر گره‌های سطوح فوقانی و تحتانی پی، n تعداد گره‌های سطوح فوقانی و تحتانی پی، t نیروی افقی اعمالی بر هر گره، h ضخامت پی، q بار گسترده قائم اعمالی، A مساحت پی، Q بار قائم کل و e برون محوری می‌باشند. به منظور محاسبه ظرفیت باربری، سیستم بارگذاری مذکور در گام‌هایی در حدود یک دهم ظرفیت باربری تخمینی بر پی اعمال و در هر مرحله میزان نشست حاصل پایش شده است. در نهایت به کمک منحنی بار-نشست میزان باربری پی حلقوی بدست آمده است که از تقسیم بار کل بر مساحت در تماس پی با خاک میزان ظرفیت باربری محاسبه گردیده است.

4. نتایج تحلیل

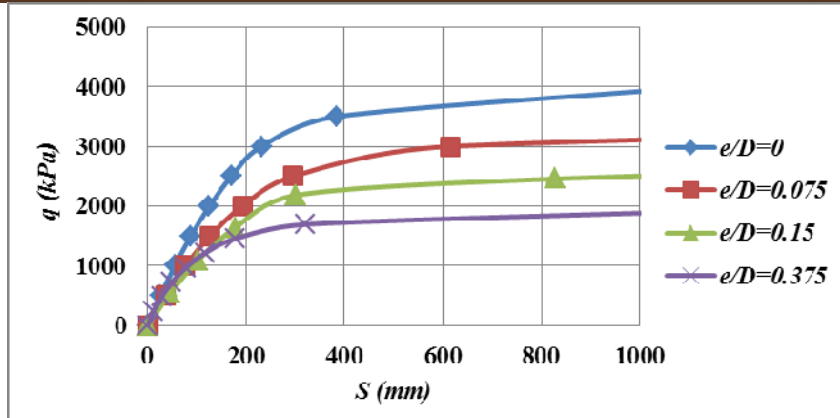
مطابق با روش مدل‌سازی ذکر شده در قسمت قبل، تحلیل‌ها در حالات مختلف انجام شد. در نهایت منحنی بار-نشست برای این حالات بدست آمده است. شکل (4) نتایج حاصل را نشان می‌دهد.



شکل 4-الف - منحنی بار-نشست در نسبت شعاعی صفر (پی دایره ای)

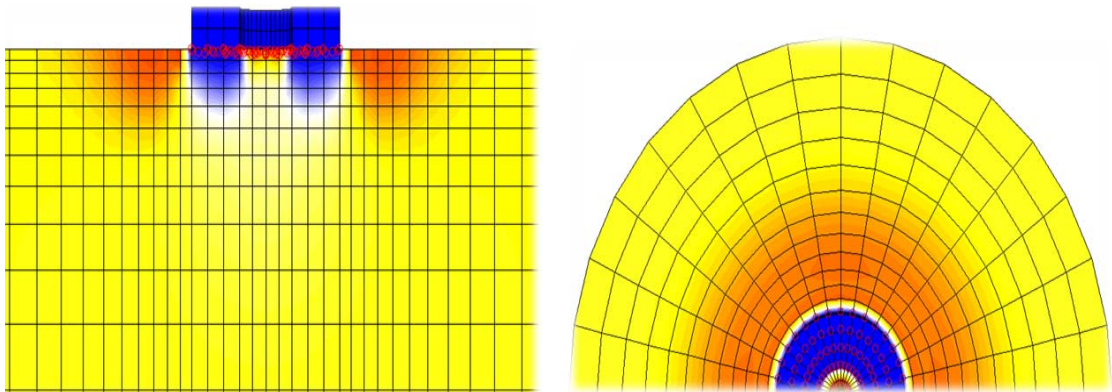


شکل 4-ب - منحنی بار-نشست در نسبت شعاعی 0.35 (پی حلقوی)

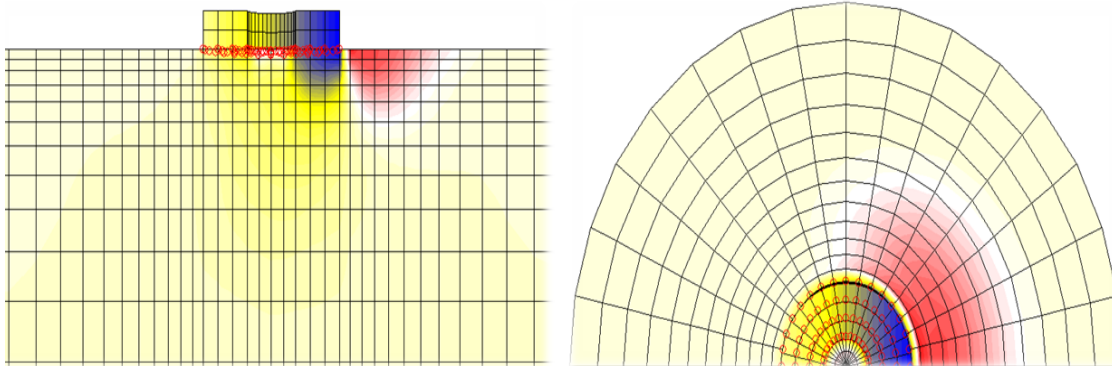


شکل 4- پ - منحنی بار- نشست در نسبت شعاعی 0.5 (پی حلقوی)

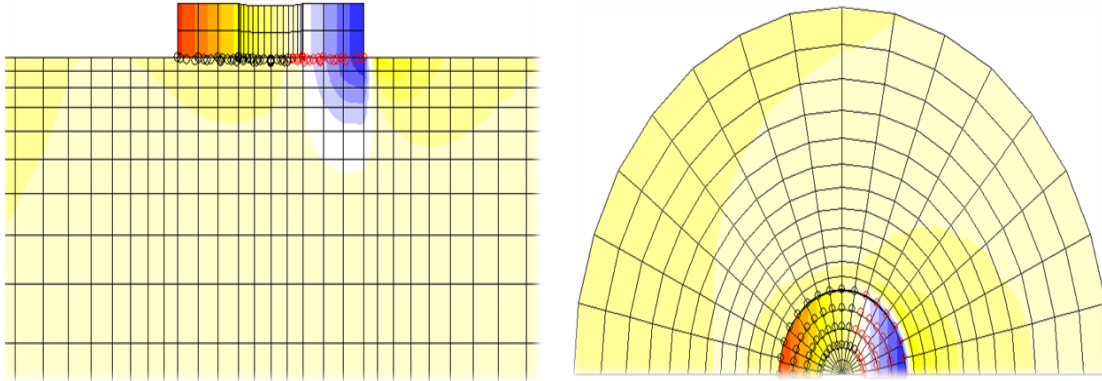
در ادامه وضعیت نشست ها و شکل کانتورهای جابجایی و وضعیت تماس المان اینترفیس در لحظه گسیختگی برای نسبت شعاعی 35.0 در شکل (5) آورده شده است.



شکل 5-الف - وضعیت کانتورهای جابجایی در لحظه گسیختگی برای نسبت برون محوری صفر



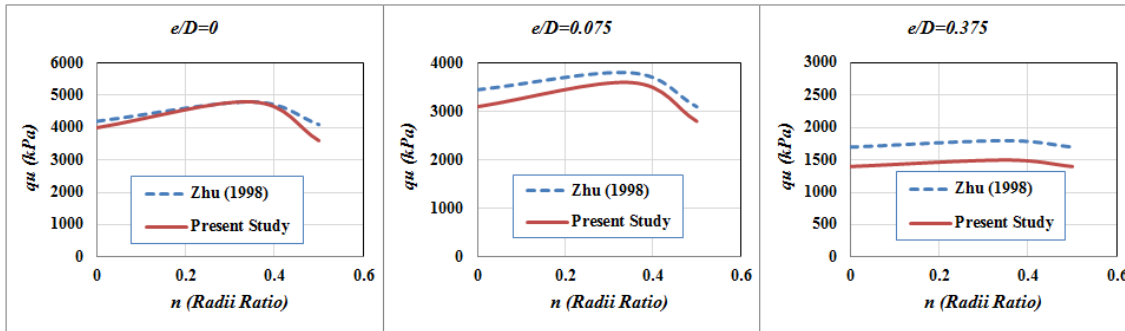
شکل 5-ب - وضعیت کانتورهای جابجایی در لحظه گسیختگی برای نسبت برون محوری 0.075



شکل 5- پ - وضعیت کانتورهای جایجایی در لحظه گسیختگی برای نسبت برون محوری 0.375

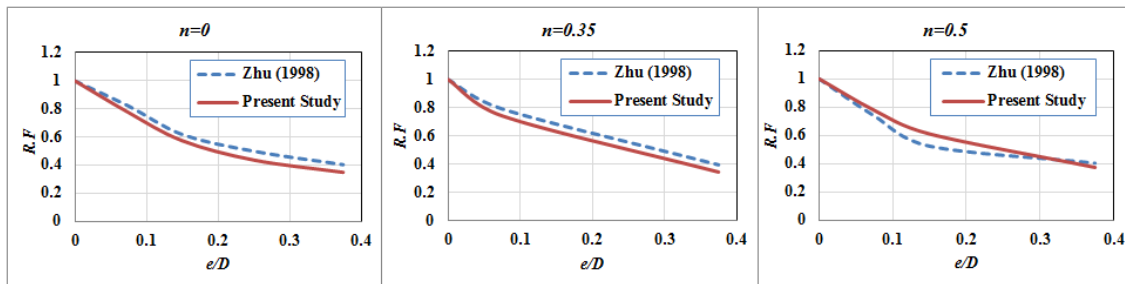
5. مقایسه نتایج

با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته با روش عددی و استفاده از نتایج آزمون‌های سانتریفیوژ ژو [14] نمودارهایی به منظور مقایسه نتایج این مدل‌سازی عددی با مدل‌سازی آزمایشگاهی تهیه شده است. شکل (6) مقایسه نتایج این دو پژوهش در نسبت‌های برون محوری صفر، 0.075 و 0.375 را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود می‌توان از نزدیکی بسیار زیاد نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی، بویژه در نسبت‌های شعاعی کمتر از 0.4 خبر داد. هم‌چنین نسبت شعاعی بهینه نیز عددی بین 0.35 تا 0.4 می‌باشد. به نحوی که در این نسبت شعاعی، ظرفیت باربری در حدود 12 درصد افزایش نسبت به دایره کامل را نشان می‌دهد. این بدان مفهوم است که حتی در مساحت برابر پی، حلقه نسبت به دایره 12 درصد اقتصادی‌تر است.



شکل 6- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی تحقیق حاضر

شکل (7) به مقایسه ظرفیت باربری با تغییر نسبت برون محوری می‌پردازد. مطابق این شکل مشاهده می‌شود با افزایش این نسبت تا حدود 0.1، کاهش ظرفیت باربری با نرخ زیاد رخ می‌دهد و پس از آن سرعت کاهش بویژه در نسبت حلقه‌های بزرگتر، کمتر می‌شود.



شکل 7- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی تحقیق حاضر



6. نتیجه‌گیری

مطالعه سه بعدی رفتار پی حلقوی مستقر بر خاک دانه ای در شرایط بارگذاری خارج محور با کمک نرم افزار تفاضل محدود FLAC 3D صورت پذیرفته است و نتایج با تحقیقات آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. مشخصات خاک ماسه ای و پی با توجه به مقادیر حاصل از آزمایش های فان یو ژو [14] انتخاب شده و مدل رفتاری در نظر گرفته شده در مدل عددی، مور-کولمب می باشد. از جمله مهمترین نتایج این پژوهش می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- 1- مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی و عددی از تقارب بسیار زیاد نتایج حکایت دارد که می تواند قدرت نرم افزار تفاضل محدود FLAC 3D را در تحلیل مسائل ژئوتکنیکی اثبات نماید.
- 2- بر اساس تحلیل های انجام شده بر روی این نمونه خاک دانه ای، نسبت شعاعی بهینه بین 0.35 تا 0.4 می باشد.
- 3- استفاده از قانون جریان غیر هم بسته در مدل مور-کولمب به نزدیک شدن نتایج عددی به آزمایشگاهی کمک کرده است.
- 4- نرخ کاهش ظرفیت باربری تا حدود نسبت برون محوری 0.1 زیاد و از آن به بعد کمی تعدیل می شود.

7. مراجع

- [1] K. Fisher, "Zur Berechnung der setzung Von Fundamenten in der form einer Kreisformigen Ringfläche," *Der Bauingenieur*, vol. 32, pp. 172-174, 1957.
- [2] K. Egorov, "Calculation of bed for foundation with ring footing," in *Proceedings of the sixth international conference on soil mechanics and foundation engineering*, 1965, pp. 41-45.
- [3] K. Egorov, P. Kononov, D. Kitaykina, L. Salnikov, and A. Zinovyev, "Soil deformation under circular footing," *Proc. 9th JCSMFE, Tokyo*, vol. 1, pp. 489-492, 1977.
- [4] A. Karaulov, "Static solution of the limiting-pressure problem for ring foundations on soil beds," *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. 42, pp. 189-194, 2005.
- [5] J. Kumar and P. Ghosh, "Bearing capacity factor N_{γ} for ring footings using the method of characteristics," *Canadian geotechnical journal*, vol. 42, pp. 1474-1484, 2005.
- [6] N. F. Ismael, "Loading tests on circular and ring plates in very dense cemented sands," *Journal of geotechnical engineering*, vol. 122, pp. 281-287, 1996.
- [7] A. Demir, M. Örnek, M. Laman, and A. Yildiz, "Analysis of ring footings using field test results," in *Proc., 3rd Int. Conf. of New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Nicosia, Northern Cyprus*, 2012, pp. 179-184.
- [8] M. Ohri, D. Purhit, and M. Dubey, "Behavior of ring footings on dune sand overlaying dense sand," in *Proc., Int. Conf. on Civil Engineering*, 1997.
- [9] J. H. Boushehrian and N. Hataf, "Experimental and numerical investigation of the bearing capacity of model circular and ring footings on reinforced sand," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 21, pp. 241-256, 2003.
- [10] S. Saran, N. Bhandari, and M. Al-Smadi, "Analysis of eccentrically-obliquely loaded ring footings on sand," *Indian Geotechnical Journal*, vol. 33, pp. 422-46, 2003.
- [11] M. Laman and A. Yildiz, "Model studies of ring foundations on geogrid-reinforced sand," *Geosynthetics International*, vol. 10, pp. 142-152, 2003.
- [12] M. Laman and A. Yildiz, "Numerical studies of ring foundations on geogrid-reinforced sand," *Geosynthetics International*, vol. 14, pp. 52-64, 2007.
- [13] N. Hataf and M. Razavi, "Model tests and finite element analysis of bearing capacity of ring footings on loose sand," 2003.
- [14] F. Zhu, *Centrifuge modelling and numerical analysis of bearing capacity of ring foundations on sand*: Memorial University, 1999.
- [15] M. El Sawwaf and A. Nazir, "Behavior of eccentrically loaded small-scale ring footings resting on reinforced layered soil," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 138, pp. 376-384, 2011.

5th International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics

November 15 - 17 | Tehran - Iran | www.icgesm2016.ir

Certificate of Presentation

This is to certify that the paper entitled:

Bearing Capacity of Ring Footings on Granular Soil with eccentric Loading Condition

by

Omid Sargazi Mazarebi Abeh , Ehsan Seyedi Houseinia

has been accepted for oral presentation at the

5th International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics,

which was held in November 15-17, 2016, in Milad Tower, Tehran, Iran.

Prof. Behrouz Gatzmiri

President of the Iranian Geotechnical Society



Prof. S. Mohsen Haeri

Chairman of the 5th International Conference

on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics

