



بررسی ظرفیت باربری پی های حلقوی مستقر بر خاک های دانه ای در شرایط بارگذاری خارج محور

امید سرگزی^{۱*}، سید احسان سیدی حسینی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه فردوسی مشهد، o69sargazi@gmail.com

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، Eseyedi@um.ac.ir

چکیده

امروزه پی های حلقوی کاربرد وسیعی در سازه های گوناگون در سراسر جهان یافته اند؛ نظیر: برج های مخابراتی، مخازن ذخیره مایعات، پایه پل ها و سازه های فراساحلی. از آنجا که اغلب سازه های مذکور بلند و بزرگ می باشند، پی آن ها به طور مکرر تحت لنگرهای خمشی ناشی از بارهای جانبی (باد، امواج، زلزله) قرار می گیرند. اعمال بار خارج از مرکز اثر قابل توجهی بر ظرفیت باربری خواهد داشت. نظر به اهمیت ویژه ای 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 پی های حلقوی مستقر بر یک نمونه خاک ماسه ای با شبیه سازی عددی سه بعدی به کمک نرم افزار FLAC 3D پرداخته شده است و نتایج حاصل با تحقیق مشابه آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد شبیه سازی عددی می تواند در بسیاری موارد، شرایط مناسبی برای دستیابی به نتایج عملی ارائه دهد.

واژه های کلیدی: پی حلقوی، شبیه سازی سه بعدی، ظرفیت باربری، بارگذاری خارج محور

۱- مقدمه

پی های حلقوی به منظور ساخت سازه هایی نظیر برج ها، مخازن آب، دودکش ها، مخازن نفتی، راکتورهای اتمی، سازه های فراساحلی و گنبدی بسیار مناسب اند و تجربیات عملی از اقتصادی بودن آن ها به نسبت پی های دایره ای حکایت دارند. گر چه پی حلقوی و دایره ای به لحاظ شکل ظاهری مشابه هستند ولی رفتار آنها به لحاظ توزیع فشار روی خاک، نشست و یا موارد مشابه تفاوت ماهوی داشته و نمی توان به پی حلقوی همانند پی دایره ای نگاه کرد. مطالعات انجام گرفته بر روی پی های حلقوی بسیار محدود بوده است و عموماً رفتار آن مشابه پی دایره ای در نظر گرفته می شود. نظر به دامنه وسیع کاربرد این پی ها انجام مطالعات وسیع و در عین حال دقیق، بر روی آن ها ضروری به نظر می رسد.

نخستین تحقیق انجام شده بر روی پی های حلقوی توسط فیشر [۱] در سال ۱۹۵۷ صورت پذیرفت. وی به روش تحلیلی مطالعاتی بر روی نشست پی های حلقوی به کمک بر هم نهی دو پی دایره ای انجام داد و برای این منظور روابط و گرافهایی ارائه داد. در سال ۱۹۶۵ ایگوروف [۲] به روش تحلیلی و فرض محیط الاستیک مقدار فشار تماسی و نشست در زیر پی های حلقوی را محاسبه نمود. ایگوروف و همکاران [۳] در سال ۱۹۷۷ با انجام برخی پایش های میدانی و انجام تحقیقات تئوری، رابطه ای برای محاسبه نشست پی های حلقوی مستقر بر خاک های چند لایه ارائه نمودند. در سال ۲۰۰۵ کراوف [۴] به روش تعادل حدی رابطه ای برای محاسبه ظرفیت باربری پی های حلقوی با کمک ظرفیت باربری پی نواری و دایره ای ارائه داد. در همین سال کومار و قوش [۵] نیز به روش خطوط مشخصه مقدار بار نهایی پی های حلقوی مستقر بر خاک دانه ای را



بدست آوردند. در سال های ۱۹۹۶ و ۲۰۱۲ به ترتیب اسماعیل [۶] و دمیر و همکاران [۷] با انجام آزمونهای بزرگ مقیاس میدانی به محاسبه ظرفیت باربری پی های حلقوی بر روی خاک های ماسه ای و رسی طبیعی پرداختند. اسماعیل به این نتیجه رسید که ظرفیت باربری پی حلقوی بر روی ماسه متراکم سیمانته شده تا نسبت شعاعی برابر ۰.۲۵ تغییر نمی کند ولی پس از آن روند کاهشی دارد [۶]. اما نتایج تحقیقات دمیر و همکاران [۷] بر روی خاک رس طبیعی نشان می دهد که ظرفیت باربری پی حلقوی با افزایش نسبت شعاعی پیوسته کاهش می یابد. در سال ۱۹۹۷ اوهری و همکاران [۸] نخستین مطالعات آزمایشگاهی بر روی پی های حلقوی مستقر بر خاک ماسه ای دو لایه را انجام دادند. ایشان نسبت شعاعی برابر ۰.۳۸ را به عنوان نسبت شعاعی بهینه معرفی نمودند. تحقیق مشابهی توسط بوشهریان و هاتف [۹] در سال ۲۰۰۳ انجام شد که این تحقیق نسبت شعاعی بهینه را برابر ۰.۴ ارائه داد. هم چنین در سال ۲۰۰۳ ساران و همکاران [۱۰] این نسبت را بین ۰.۲ تا ۰.۳ و در سال های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۷ لامن و یلدیز [۱۱، ۱۲] مقدار آن را ۰.۳ پیشنهاد نمودند. در سال ۲۰۰۳ رضوی و هاتف [۱۳] تحقیقات آزمایشگاهی و عددی بر روی پی های حلقوی مستقر بر ماسه انجام دادند. ایشان نسبت شعاعی بهینه را بین ۰.۲ تا ۰.۴ پیشنهاد دادند. ایشان هم چنین بر مبنای شکل سطح گسیختگی حاصل از آزمونها رابطه ای نیمه تجربی برای محاسبه ظرفیت باربری پی های حلقوی تحت بار محوری ارائه دادند.

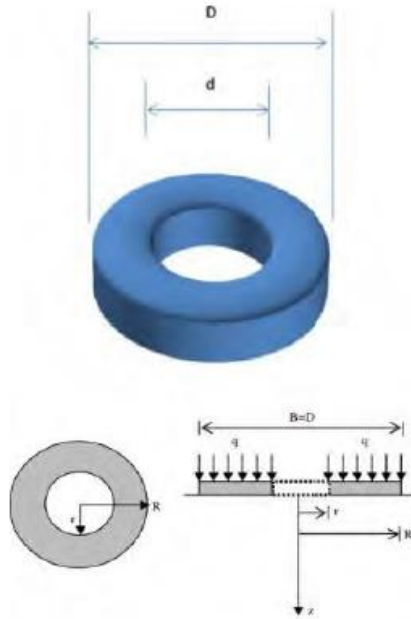
در سال ۱۹۹۸ ژو [۱۴] تحقیقات گسترده ای بر روی رفتار پی های حلقوی مستقر بر ماسه بصورت آزمایشگاهی انجام داد. وی با استفاده از تست سانتریفیوژ مقدار نسبت شعاعی بهینه را حدود ۰.۳۵ بدست آورد. تحقیقات وی از جمله محدود تحقیقات انجام شده بر روی پی های حلقوی تحت بار برون محور است که بر مبنای آزمایش ها یک ضریب کاهشی برای این شرایط بارگذاری ارائه داد. تنها کار دیگر در این شرایط بارگذاری در سال ۲۰۱۱ و توسط الصواف و نذیر [۱۵] انجام شده است که البته بیشتر تمرکز کار آن ها بر روی اثرات مسلح کننده ها می باشد. ایشان نسبت شعاعی بهینه را ۰.۳۹ پیشنهاد نمودند. در تحقیق حاضر 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 ژو [۱۴] مقایسه گردیده است. مشخصات خاک ماسه ای و پی با توجه به مقادیر حاصل از آزمایش های ژو [۱۴] انتخاب شده و مدل رفتاری در نظر گرفته شده در مدل عددی، مور- کولمب می باشد. در نهایت ضمن ارائه نسبت شعاعی بهینه، نتایج حاصل از این مدلسازی با نتایج ژو [۱۴] مقایسه گردیده است. که نزدیکی میان نتایج قدرت مناسب نرم افزار FLAC 3D در شبیه سازی را نشان می دهد.

۲- صحه گذاری نتایج مدل عددی

جهت صحه گذاری، نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی ژو [۱۴]، 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 ۱۹۹۸ ژو [۱۴] به محاسبه ظرفیت باربری پی حلقوی مستقر بر خاک ماسه ای با استفاده از تکنیک مدلسازی آزمایشگاهی سانتریفیوژ پرداخت.

ژو [۱۴] با انجام ۴۰ آزمایش سانتریفیوژ با شتاب های ۱۰ تا ۱۶۰ برابر شتاب گرانش به بررسی رفتار پی های حلقوی پرداخت. پی مدل از جنس آلومینیوم با مساحت ثابت ۱۵ سانتی مترمربع و نسبت های شعاعی متغیر بوده است. بار وارده نیز دارای برون محوری بین صفر تا ۰.۳۷۵ بوده است. ماکزیمم سرعت چرخش مدل ۱۸۹ دور بر دقیقه و بیشترین شعاع موثر برابر ۵ متر بوده است. هندسه پی مدل در شکل (۱) 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 آزمون های فیزیکی و مقاومتی حاصل و در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۱: هندسه پی حلقوی مدل آزمایشگاهی [۱۴].

جدول ۱: مشخصات خاک ماسه ای مورد استفاده در آزمون های سانتریفیوژ [۱۴]

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 پواسون	ν	0.3
تراکم نسبی	D_r	90
زاویه اصطکاک داخلی خاک	ϕ	39.5
حداقل زاویه اصطکاک کف پی و خاک	δ	28

۳- 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 [۱۴] پارامترهای استفاده شده برای خاک ماسه ای مدل مطابق جدول (۲) می باشد.



کانون سراسری انجمن های صنفی مهندسان معمار ایران
دومین همایش ملی معماری، عمران و توسعه ی نوین شهری
ارومیه - مهر ۱۳۹۴

جدول ۲: 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 آزمایش های سانتریفیوژ ژو [۱۴] در شرایط بارگذاری خارج محور در شتاب ۱۰۰ برابر شتاب گرانش انجام شده است، لذا پی مدل عددی با مساحت ۱۵ متر مربع و سه نسبت شعاعی ۰، ۰.۳۵ و ۰.۵ انتخاب شده است. تحلیل ها در نسبت های برون محوری (e/D) بین ۰ تا ۰.۳۷۵ انجام شده است. هم چنین پی آلومینیومی مدل با مدل رفتاری الاستیک تعریف شده است. مشخصات مصالح پی در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳: مشخصات پی آلومینیومی مورد استفاده در مدل عددی

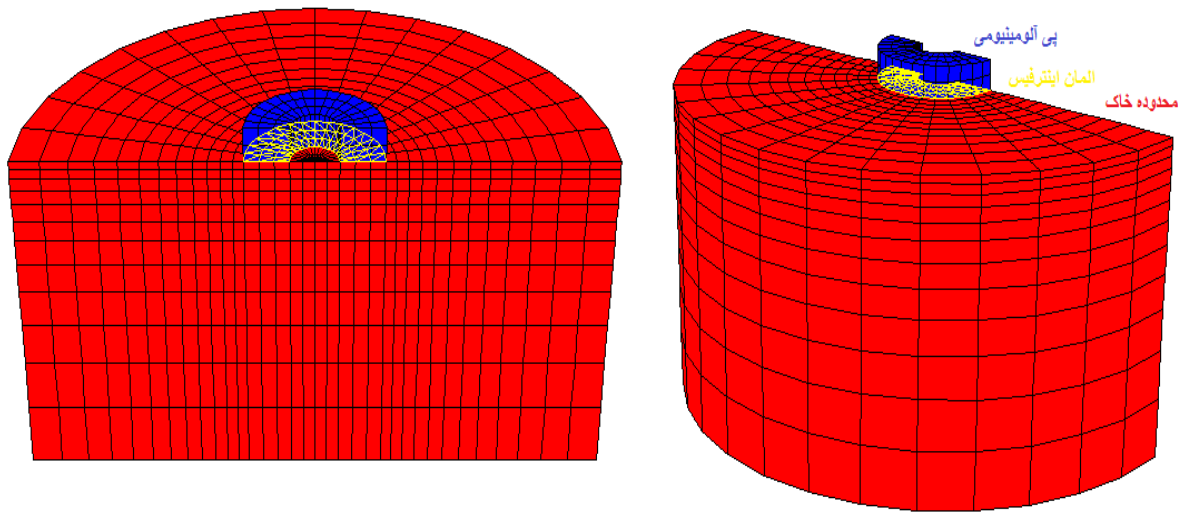
پارامتر	نماد	مقدار
مدول بالک	K (MPa)	76000
مدول برشی	G (MPa)	26000
وزن مخصوص	γ_d (KN/m ³)	27

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 آزمایش های ژو [۱۴]، مشخصات این جزء در قالب جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۴: مشخصات المان اینترفیس در مدل عددی

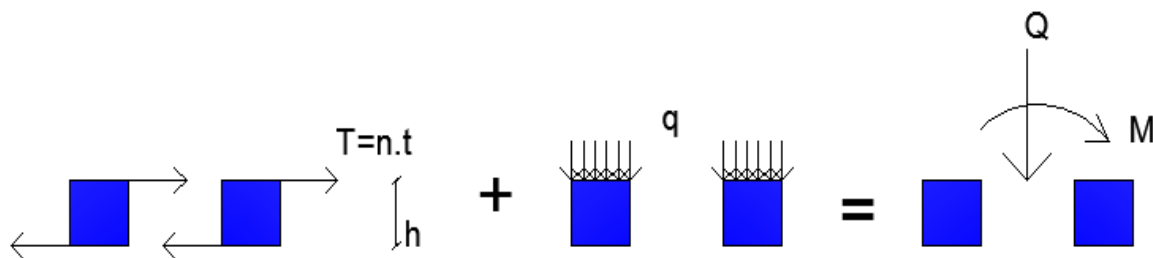
پارامتر	نماد	مقدار
سختی برشی	K_s (MPa)	3800
سختی نرمال	K_n (MPa)	3800
زاویه اصطکاک	ϕ	28
زاویه اتساع	ψ	0

شکل کلی از نحوه مش بندی و قسمت های مختلف مدل سه بعدی در شکل (۲) 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 ۲: 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 (۳) به صورت مناسب تشریح شده است.



شکل ۳: نحوه اعمال بارگذاری به مدل عددی حاضر

لذا داریم:

$$M = 0.5T.h \quad (۱)$$

$$T = n.t \quad (۲)$$

$$Q = q.A \quad (۳)$$

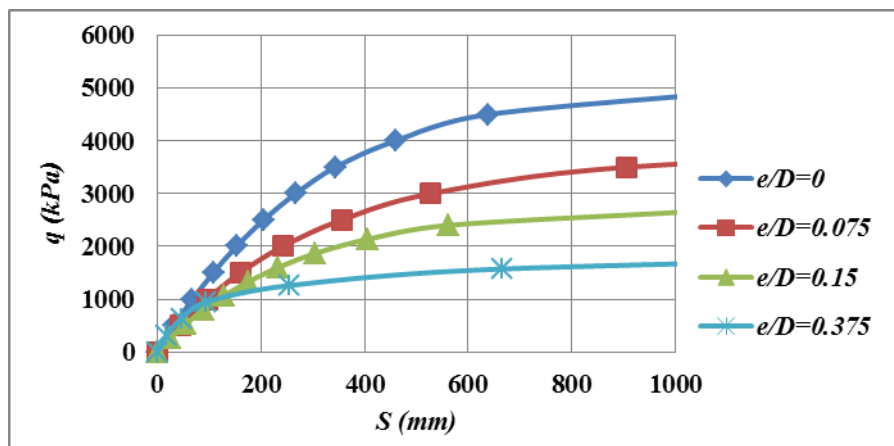
$$e = M / Q \quad (۴)$$

در روابط فوق M لنگر، T مجموع نیروهای افقی اعمالی بر گره های سطوح فوقانی و تحتانی پی، n تعداد گره های 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 می باشند.

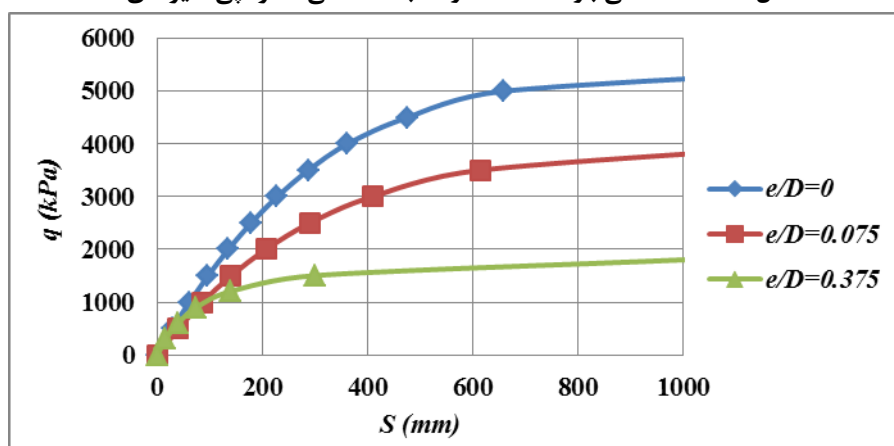
به منظور محاسبه ظرفیت باربری، سیستم بارگذاری مذکور در گام هایی در حدود یک دهم ظرفیت باربری تخمینی بر پی اعمال و در هر مرحله میزان نشست حاصل پایش شده است. در نهایت به کمک منحنی بار- نشست میزان باربری پی حلقوی بدست آمده است که از تقسیم بار کل بر مساحت در تماس پی با خاک میزان ظرفیت باربری محاسبه گردیده است.

۴- نتایج تحلیل

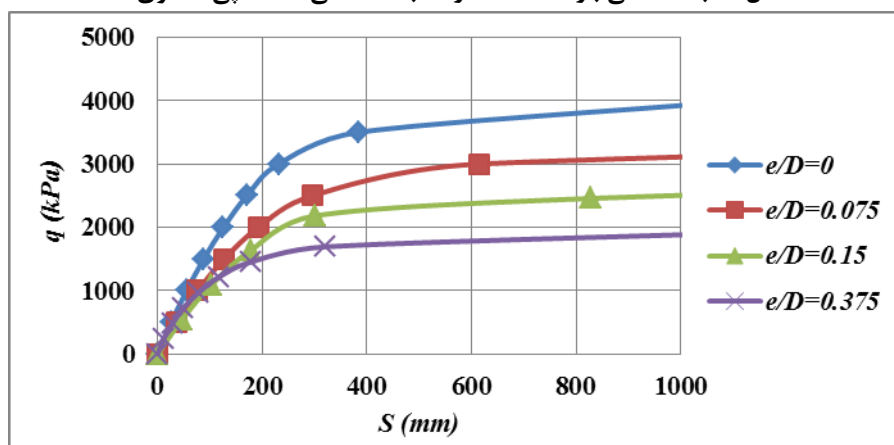
مطابق با روش مدلسازی ذکر شده در قسمت قبل، تحلیل ها در حالات مختلف انجام شد. در نهایت منحنی بار- نشست برای این حالات بدست آمده است. شکل (۴) نتایج حاصل را نشان می دهد.



شکل ۴-الف: منحنی بار- نشست در نسبت شعاعی صفر (بی دایره ای)

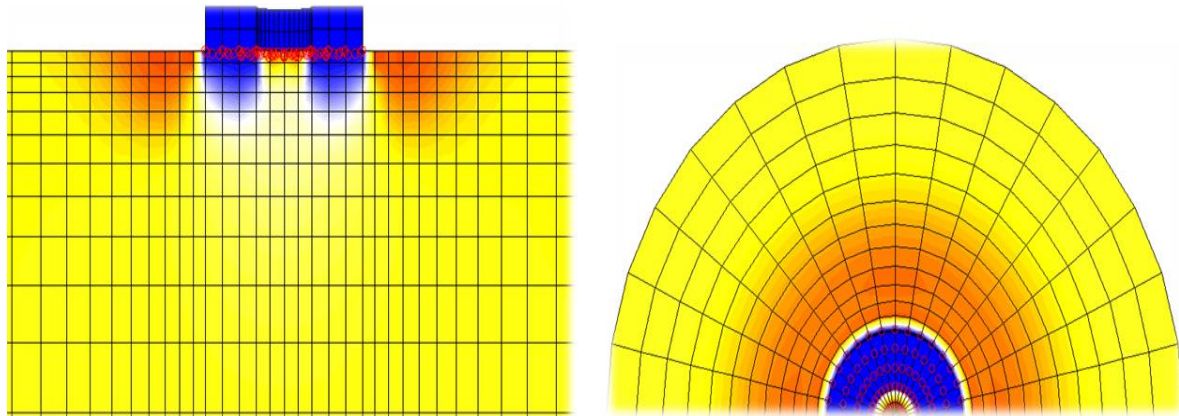


شکل ۴-ب: منحنی بار- نشست در نسبت شعاعی ۰.۳۵ (بی حلقوی)

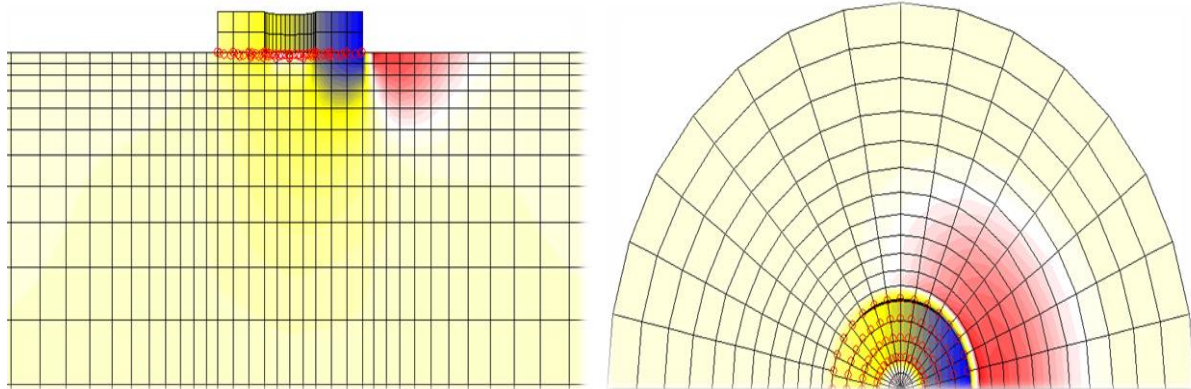


شکل ۴-پ: منحنی بار- نشست در نسبت شعاعی ۰.۵ (بی حلقوی)

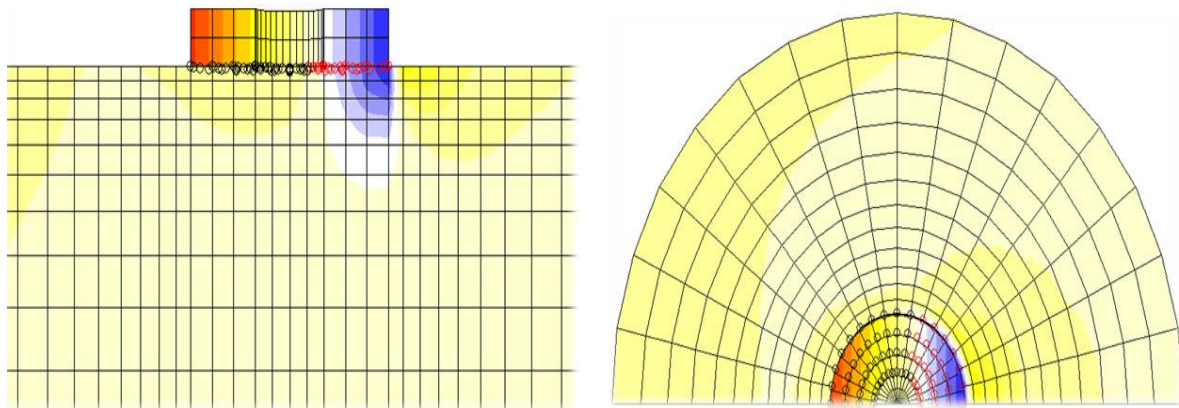
در ادامه وضعیت نشست ها و شکل کانتورهای جابجایی و وضعیت تماس المان اینترفیس در لحظه گسیختگی برای نسبت شعاعی ۰.۳۵ در شکل (۵) آورده شده است.



شکل ۵-الف : وضعیت کانتورهای جابجایی در لحظه گسیختگی برای نسبت برون محوری صفر



شکل ۵-ب : وضعیت کانتورهای جابجایی در لحظه گسیختگی برای نسبت برون محوری ۰.۰۷۵

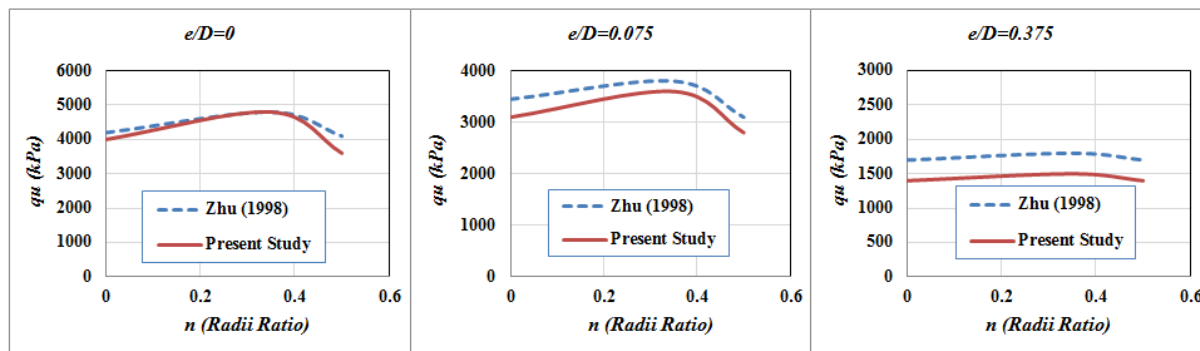


شکل ۵-پ : وضعیت کانتورهای جابجایی در لحظه گسیختگی برای نسبت برون محوری ۰.۳۷۵

۵- مقایسه نتایج

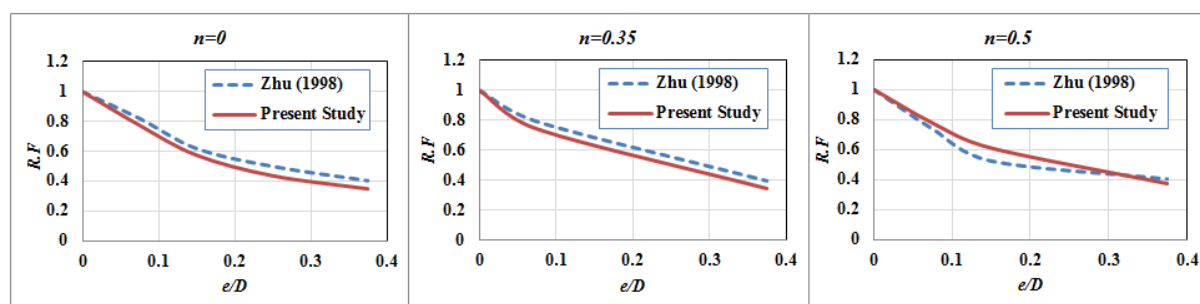
با توجه به تحلیل های صورت گرفته با روش عددی و استفاده از نتایج آزمون های سانتریفیوژ ژو [۱۴] نمودارهایی به منظور مقایسه نتایج این مدل سازی عددی با مدل سازی آزمایشگاهی تهیه شده است. شکل (۶) مقایسه نتایج این دو پژوهش در نسبت های برون محوری صفر، ۰.۰۷۵ و ۰.۳۷۵ را نشان می دهد. همانگونه که ملاحظه می شود می توان از نزدیکی بسیار زیاد نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی، بویژه در نسبت های شعاعی کمتر از ۰.۴ خبر داد. هم چنین نسبت شعاعی بهینه نیز عددی بین ۰.۳۵ تا ۰.۴ می باشد. به نحوی که در این نسبت شعاعی، ظرفیت باربری در حدود ۱۲ درصد افزایش نسبت به

دایره کامل را نشان می دهد. این بدان مفهوم است که حتی در مساحت برابر پی، حلقه نسبت به دایره ۱۲ درصد اقتصادی تر است.



شکل ۶: مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی تحقیق حاضر

شکل (۷) به مقایسه ظرفیت باربری با تغییر نسبت برون محوری می پردازد. مطابق این شکل مشاهده می شود با افزایش این نسبت تا حدود ۰.۱، کاهش ظرفیت باربری با نرخ زیاد رخ می دهد و پس از آن سرعت کاهش بویژه در نسبت حلقه های بزرگتر، کمتر می شود.



شکل ۷: مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی تحقیق حاضر

۶- نتیجه گیری

مطالعه سه بعدی رفتار پی حلقوی مستقر بر خاک دانه ای در شرایط بارگذاری خارج محور با کمک نرم افزار تفاضل محدود ۳D FLAC 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 [۱۴] 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:

- ۱- مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی و عددی از تقارب بسیار زیاد نتایج حکایت دارد که می تواند قدرت نرم افزار تفاضل محدود ۳D FLAC را در تحلیل مسائل ژئوتکنیکی اثبات نماید.
- ۲- بر اساس تحلیل های انجام شده بر روی این نمونه خاک دانه ای، نسبت شعاعی بهینه بین ۰.۳۵ تا ۰.۴ می باشد.
- ۳- استفاده از قانون جریان غیر هم بسته در مدل مور- کولمب به نزدیک شدن نتایج عددی به آزمایشگاهی کمک کرده است.

۴- نرخ کاهش ظرفیت باربری تا حدود نسبت برون محوری ۰.۱ زیاد و از آن به بعد کمی تعدیل می شود.



مراجع

- [1] K. Fisher, "Zur Berechnung der setzung Von Fundamenten in der form einer Kreisformigen Ringflache," Der Bauingenieur, vol. 32, no. 5, pp. 172-174, 1957.
- [2] K. Egorov, "Calculation of bed for foundation with ring footing." pp. 41-45,1965.
- [3] K. Egorov, P. Kononov, D. Kitaykina, L. Salnikov, and A. Zinovyev, "Soil deformation under circular footing," Proc. 9 th 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, no. 6, 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, no. 5, 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, no. 4, pp. 281-287, 1996.
- [7] A. Demir, M. Örnek, M. Laman, and A. Yıldız, "Analysis of Ring Footings using Field Test Results," 2012.
- [8] M. Ohri, D. Purhit, and M. Dubey, "Behavior of ring footings on dune sand overlaying dense sand."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, no. 4, 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, no. 4, pp. 422-46, 2003.
- [11] M. Laman, and A. Yildiz, "Model studies of ring foundations on geogrid-reinforced sand," Geosynthetics International, vol. 10, no. 5, pp. 142-152, 2003.
- [12] M. Laman, and A. Yildiz, "Numerical studies of ring foundations on geogrid-reinforced sand," Geosynthetics International, vol. 14, no. 2, pp. 52-64, 2007.
- [13] N. Hataf, Razavi, M.R., "Behavior of ring footing on sand," Iranian Journal of Science and Technology, vol. 27, pp. 47-56, 2003.
- [14] B. Fanyu Zhu, "CENTRIFUGE MODELLING AND NUMERICAL ANALYSIS OF BEARING CAPACITY OF RING FOUNDATIONS ON SAND," Faculty of Engineering and Applied Science, Memorial University of Newfoundland, 1998.
- [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, no. 3, pp. 376-384, 2011.

Certificate



بدین وسیله گواهی می شود مقاله
امید سرگزی ، سید احسان سیدی حسینی نیا
با عنوان

بررسی ظرفیت باربری پی های حلقوی مستقر بر خاک های دانه ای در شرایط بارگذاری خارج محور
در کنفرانس ملی معماری، عمران و توسعه نوین شهری که در مهر ماه در ارومیه
برگزار شد مورد پذیرش نهایی قرار گرفت.

در سطح: درج در مجموعه مقالات

امید است به یاری حق تعالی هر نقطه ای از قلم ایشان برگی از دفتر بی پایان افتخارات ایران اسلامی باشد

مهندس جعفر صراف زاده تبریز
عضو هیئت مدیره و

دبیر کل کانون معماری ایران

Jafar Saraf



دکتر بابک قصیری

دبیر علمی همایش

Babak