



بررسی اندرکنش بین پی های رینگی مجاور هم بر ظرفیت باربری فشاری آنها

علی صابر^۱، حمید علی الهی^۲

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش خاک و پی

۲- عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان

ali.saber62@gmail.com

h.alielahi@iauz.ac.ir

خلاصه

در این مقاله به بررسی تاثیر اندرکنش بین پی های رینگی (حلقوی) مجاور هم بر ظرفیت باربری و نشست آنها در قالب مطالعات پارامتریک با استفاده از نرم افزار Plaxis 3d foundation مبتنی بر روش المان محدود، پرداخته شده است. از این رو به منظور صحت گذاری بر نتایج مدل عددی، در گام اول اعتبار سنجی پاسخ ها با مطالعات تجربی و عددی پیشین مد نظر قرار گرفته و سپس بر مبنای مطالعات پارامتریک با پی بعد سازی پارامتر های تاثیر گذار در مساله نظیر نسبت فاصله مرکز به مرکز پی های رینگی بر اندازه قطر خارجی آنها بهینه ترین فاصله از نظر دستیابی به بیشترین ظرفیت باربری محاسبه شده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که تغییر فاصله پی های رینگی مجاور هم در مقادیر ظرفیت باربری و نشست آنها تاثیر گذار بوده و با کاهش فواصل بین آنها، تداخل تنش و اندرکنش بین آنها افزایش می یابد که منجر به کاهش مقادیر ظرفیت باربری آنها می شود.

کلمات کلیدی: پی رینگی، ظرفیت باربری، فواصل بین پی ها، مدل عددی.

۱. مقدمه

استفاده از پی های رینگی به علت دارا بودن مزایایی از قبیل اشغال فضای کم، حجم اندک عملیات ساخت، بتن ریزی و بازدهی مناسب، در گستره وسیعی از سازه ها نظیر پایه پل ها، مخازن آب و نفت، سیلوها و غیره در حال افزایش می باشد. استفاده و بهره گیری کامل از ظرفیت باربری خاک و ایجاد شرایط کشش کم و یا حتی صفر در زیر فونداسیون از ویژگی های بارز این نوع از شالوده ها به حساب می آید. جهت تحمل بارهای سنگین و با توجه به محدودیت در زمین های ساختگاه، مهندسین ناچار به ساخت پی ها در مجاور یکدیگرند. احداث پی ها در مجاور یکدیگر و اندرکنش بین آنها تاثیر مستقیم بر ظرفیت باربری و نشست خواهد داشت. از جمله مطالعات انجام شده در مورد پی های رینگی می توان به موارد زیر اشاره نمود:

اسماعیل [۱] ۱۹۹۶ با استفاده از آزمایش بارگذاری صفحه، منحنی بارنشست ظرفیت باربری نهایی را برای پی های رینگی و توپر روی بستر ماسه ای سیمانی شده مترکم محاسبه و با هم مقایسه نمود. مطالعات ایشان نشان داد که ظرفیت باربری نهایی پی های رینگی نزدیک به پی های دایره ای توپر بوده و پیشنهاد داد که پی های رینگی می توانند به جای پی های دایره ای توپر با نسبت های شعاع داخلی به خارجی (Fi/Fe) مختلف تا نسبت ۰/۷۵ مورد استفاده قرار گیرند. اهری و همکاران [۲] ۱۹۹۷ با انجام تست های آزمایشگاهی روی مدل های مختلف پی رینگی بر روی بستر ماسه بادی، به این نتیجه رسیدند که برای نسبت قطر داخلی به خارجی برابر با $n=0/38$ ظرفیت باربری نهایی به حداکثر مقدار خود خواهد رسید. هاتاف و رضوی [۳] ۲۰۰۳ دریافتند مقدار n برای به حداکثر رسیدن ظرفیت باربری نهایی ماسه منحصر به فرد نبوده و در محدوده ۰/۲ تا ۰/۴ می باشد. بوشهریان و هاتاف [۴] ۲۰۰۳ تست هایی جهت بررسی ظرفیت باربری نهایی پی های دایره ای و رینگی بر روی بستر ماسه ای با استفاده از مدل های آزمایشگاهی و به وسیله روش آنالیز عددی انجام دادند و دریافتند که مقدار بهینه n برای پی های رینگی ۰/۴ می باشد. لامن و بلدی [۵] ۲۰۰۳ مطالعات آزمایشگاهی متنوعی بر روی بستر

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش خاک و پی، دانشکده فنی مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان

^۲ استادیار، دانشکده فنی مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان، گروه ارشد خاک و پی، زنجان، ایران



ماسه‌ای جهت بررسی ظرفیت باربری پی‌های رینگ‌ی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که نسبت بهینه قطر داخلی به خارجی (t/R) برابر $0.4/3$ می‌باشد. همچنین آنها نشان دادند یک پی رینگ‌ی با نسبت قطر داخلی به خارجی بهینه، نتایج مشابهی نسبت به یک پی توپر دایره‌ای با همان قطر خارجی از خود نشان می‌دهد. زهاو و وانگ [۶] ۲۰۰۷ جهت بررسی فاکتور ظرفیت باربری N_c برای پی‌های رینگ‌ی بر روی خاک‌های بدون چسبندگی اصطکاکی از بسته نرم افزاری تفاضل محدود FLAC استفاده کردند. مدل خاک مورد استفاده توسط زهاو و وانگ، موهر کولمب بود. نتیجه این که مقدار N_c با افزایش نسبت شعاع داخلی به خارجی T_i/T_o در پی‌های رینگ‌ی کاهش می‌یابد و نیز مقدار N_c برای پی‌های رینگ‌ی زبر، بالاتر از پی‌های صاف می‌باشد. علی الهی و همکاران [۷] با استفاده از نرم افزار تفاضل محدود FLAC.2D مقادیر ضریب ظرفیت باربری N_{γ} در دو حالت شالوده زبر و صاف و به ازای مقادیر مختلفی از نسبت شعاع داخلی به خارجی (T_i/T_o) پی رینگ‌ی واقع در خاک‌های لایه‌ای را محاسبه نمودند. نتایج حاصل، حاکی از آن بود که مقادیر N_{γ} به دست آمده در حالت شالوده زبر، به خصوص در مقادیر بالای زاویه اصطکاک، بسیار بیشتر از N_{γ} محاسبه شده در حالت شالوده‌ی صاف می‌باشند. از سوی دیگر، با افزایش نسبت شعاع داخلی به خارجی پی رینگ‌ی، روند نزولی محسوس در مقادیر ضریب N_{γ} مشاهده می‌شود. علی الهی و همکاران [۸] ظرفیت باربری پی‌های رینگ‌ی (حلقوی) واقع بر خاک‌های لایه‌ای متشکل از مصالح دانه‌ای و رسی را با استفاده از روش تفاضل محدود، محاسبه نمودند. نتایج به دست آمده نشان دادند هنگامی که مقاومت لایه رسی بالا بوده و لایه ماسه‌ای فوقانی آن کم ضخامت باشد، لایه رسی کنترل کننده ظرفیت باربری خواهد بود. همچنین با افزایش ضخامت و مقاومت لایه رسی، ظرفیت باربری نیز افزایش خواهد یافت که بیشینه این افزایش در مقدار $D/B=0.5$ (نسبت عمق مدفون به عرض پی رینگ‌ی) رخ می‌دهد. علی الهی و صابر [۹] ظرفیت باربری نهایی پی‌های رینگ‌ی را بر روی یک بستر ماسه‌ای با استفاده از روش اجزای محدود سه بعدی بررسی کردند و نتایج به دست آمده از روش المان محدود را با روش آزمایشگاهی قیاس نمودند. علی الهی و صابر [۱۰] با استفاده از نرم افزار سه بعدی Plaxis 3D Foundation مبتنی بر روش اجزای محدود به بررسی اثر شکل هندسی پی‌های رینگ‌ی بر ظرفیت باربری و نشست آنها، پرداختند و نتایج به دست آمده نشان دادند که با ثابت بودن مساحت و حجم مصالح مصرفی و تنها با تغییر در شکل هندسی پی‌های رینگ‌ی می‌توان ظرفیت باربری بیشتری را نسبت به پی رینگ‌ی دایره‌ای به دست آورد.

در این مقاله به بررسی تاثیر اندرکنش بین پی‌های رینگ‌ی مجاور هم در ظرفیت باربری و نشست آنها در قالب مطالعات پارامتریک با استفاده از نرم افزار Plaxis 3d foundation مبتنی بر روش اجزای محدود، پرداخته شده است.

در این مدل، نوع خاک ماسه‌ای و مدل رفتاری خاک سخت شونده در نظر گرفته شده است. همچنین جهت صحت‌گذاری مدل عددی به منظور انجام مطالعات پارامتریک، مدلسازی عددی انجام شده با نتایج آزمایش‌های یلدیز [۱۱] ۲۰۰۲، لامن و یلدیز [۵] ۲۰۰۳ و مطالعات عددی اورنک و دمیر [۱۲] ۲۰۱۰ قیاس شده است. سپس مطالعات پارامتریک عددی بر روی پی‌های رینگ‌ی مجاور هم انجام شده و با پی رینگ‌ی دایره‌ای منفرد مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲. مدل سازی عددی

در دهه اخیر نرم افزارهای محاسباتی که در زمینه روش اجزای محدود به کار می‌روند در تمامی شاخه‌های مهندسی ژئوتکنیک از جمله پی‌های سطحی گسترش چشم‌گیری یافته‌اند. روش اجزای محدود ابزار سودمندی بوده و به طور گسترده برای آنالیزهای عددی سازه‌های خاکی استفاده شده است. (عبدل باکی و رایموند [۱۳] ۱۹۹۴، یتیم اوقلو [۱۴] ۱۹۹۴، اسماعیل و رایموند [۱۵] ۱۹۹۵، اهری [۲] ۱۹۹۷، کراین [۱۶] ۱۹۹۷، چندراشکر [۱۷] ۱۹۹۸، اتانی [۱۸] ۱۹۹۸، یاو [۱۹] ۲۰۰۱، بوشهریان و هاتاف [۴] ۲۰۰۳، لامن و یلدیز [۵] ۲۰۰۳، زهاو و وانگ [۶] ۲۰۰۷، لامن و یلدیز [۲۰] ۲۰۰۷). در این مقاله از برنامه اجزای محدود Plaxis 3D Foundation استفاده شده است. این برنامه ویژه آنالیز تغییر شکل خاک و سنگ به وسیله انواع پی‌ها است. تنش‌ها، کرنش‌ها و گسیختگی‌ها مسائلی هستند که به وسیله این نرم افزار می‌توانند محاسبه شوند. در مقاله از مدل رفتاری هذلولی الاستوپلاستیک خاک ماسه‌ای سخت شونده غیر خطی (HSM) استفاده شده است. HSM یک مدل پیشرفته شبیه سازی رفتار انواع مختلف خاک برای هر دو نوع خاک سخت و نرم می‌باشد. در این مدل صلبیت خاک با استفاده از سه مدول سخت کننده توضیح داده می‌شود. مدول سخت کننده سه محوری (E_{50})، مدول سخت کننده بارگذاری-باربرداری (E_{ur}) و مدول سخت کننده بار اداژومتر (E_{ud}). E_{50} تعیین کننده شدت کرنش‌های الاستیک و پلاستیک و E_{ur} یک مدل الاستیسیته بوده و رفتار خاک را در اثر باربرداری و بارگذاری تعیین می‌کند. هر دو مدول های E_{50} و E_{ur} به مراحل تنش بستگی خواهند داشت. برای خاک سخت شونده این پارامترها به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۲]:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cot \phi + \delta_3}{c \cot \phi + p_{ref}} \right)^m \quad (1)$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cot \phi + \delta_3}{c \cot \phi + p_{ref}} \right)^m \quad (2)$$



در این روابط E_{50}^{ref} و E_{ur}^{ref} پارامترهای ورودی مخصوص فشار مرجع (p^{ref}) می‌باشند. توان m می‌تواند به وسیله دو پارامتر ادنومتر و آزمایش سه محوری تعیین شود. مقدار m برای ماسه برابر ۰/۵ و برای رس برابر ۱ پیشنهاد شده است. در مدل HSM تنش سخت کننده ادنومتر مطابق رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

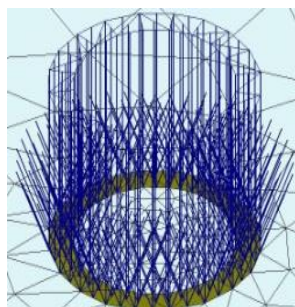
$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \cot \phi + \delta 1}{c \cot \phi + p^{ref}} \right)^m \quad (3)$$

علاوه بر مدول E_{50}^{ref} و E_{ur}^{ref} ، مدول E_{oed}^{ref} نیز از ورودی‌های مدل HSM هستند. پارامترهای m ، v_{ur} ، C ، ϕ و ψ جزو پارامترهای ورودی دیگری هستند که در این مدل رفتاری به کار برده می‌شوند. مقادیر پارامترهای مدل رفتاری خاک از نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط اورنک و دمیر [۱۲] که مبنای اعتبار سنجی مدل عددی نیز می‌باشد، به دست آمده است. همچنین در مدلسازی تنش اولیه با استفاده از رابطه جکی محاسبه شده که در فرمول ۴ بیان شده است. جدول شماره ۱ مشخصات خاک سخت شونده مورد استفاده در مدلسازی عددی را نشان می‌دهد.

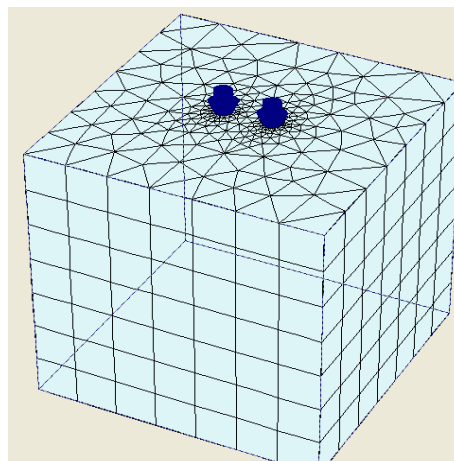
$$K_0 = 1 - \sin \phi \quad (4)$$

که K_0 ضریب جانبی فشار خاک در حالت سکون و ϕ زاویه اصطکاک خاک می‌باشد. پی رینگی مورد نظر با استفاده از یک صفحه صلب و در حالت زیر مدل شده است. مدول یانگ و نسبت پواسون برای پی رینگی به ترتیب برابر 2.07×10^6 کیلو پاسکال و ۰/۲۵ در نظر گرفته شده است. جدول شماره ۲ مشخصات پی مورد استفاده در مقاله را نشان می‌دهد.

در این نرم افزار فرآیند مش بندی به صورت اتوماتیک انجام می‌شود، مدل سه بعدی و مش بندی آن در شکل شماره ۱ و نحوه بارگذاری پی رینگی در شکل شماره ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- نحوه بارگذاری پی رینگی



شکل ۱- مدل سه بعدی مش بندی شده پی رینگی

جدول ۱- مشخصات خاک سخت شونده [۱۲]

مقدار	ویژگی های خاک
۱۰۰	p^{ref} (Kpa)
۱۷٫۱	γ_n (KN/m ³)
۲۸۰۰۰	E_{50} (Kpa)
۷۵۰۰۰	E_{ur} (Kpa)
۲۸۰۰۰	E_{oed} (Kpa)
۰/۵	m
۰/۵	C (Kpa)
۴۱	ϕ (°)
۱۱	ψ (°)
۰/۲	v
۰/۳۴	K_0
۰/۹	R_f

جدول ۲- مشخصات پی رینگی [۱۲]

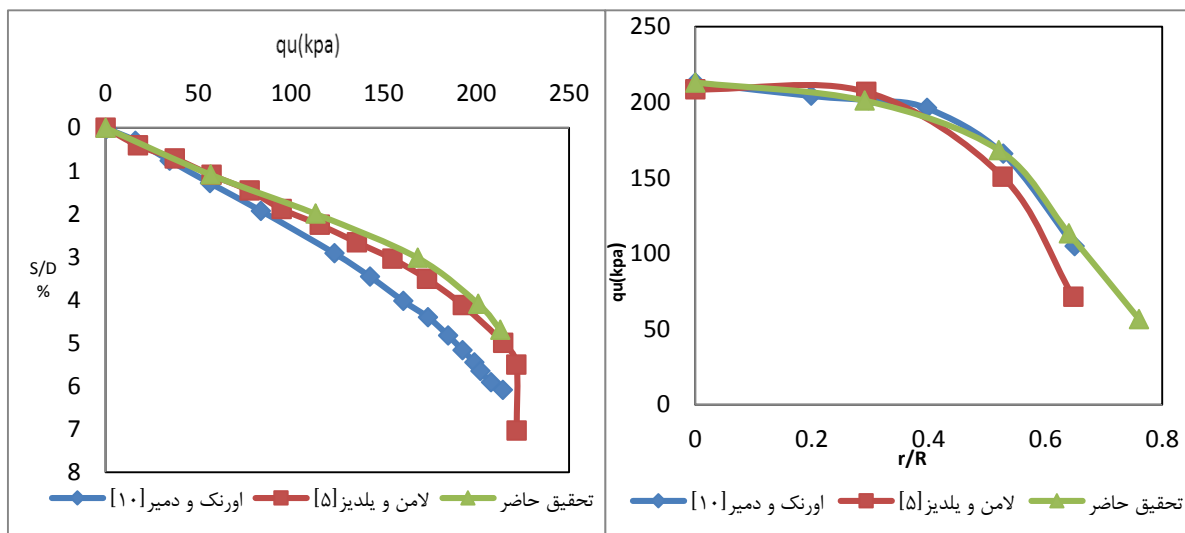
مقدار	ویژگی های پی رینگی
۰/۰۲	d (m)
۷۸٫۵	γ (KN/m ³)
2.07×10^6	E_1 (KN/m ³)
8.28×10^7	G_{12} (KN/m ³)
۰/۲۵	ν_{12} (KN/m ³)



۳. اعتبار سنجی مدل عددی

جهت اعتبارسنجی و صحت‌گذاری نتایج مدل عددی در این مقاله، اقدام به مدلسازی پی رینگی مطالعات آزمایشهای فیزیکی لامن و یلدیز [۵] و مطالعات عددی اورنک و دمیر [۱۲] با نسبت‌های قطر داخلی به خارجی به خارجی ۰، ۰/۲۹، ۰/۵۲، ۰/۶۴ شده است. جزئیات روش انجام آزمایش، آنالیز نتایج و مدل به کار رفته در آزمایش جهت برآورد ظرفیت باربری نهایی پی‌های رینگی بر روی بستر ماسه توسط لامن و یلدیز [۵] ارائه گردیده است. همچنین جزئیات روش عددی و مشخصات خاک به کار رفته توسط اورنک و دمیر [۱۲] شرح داده شده است.

با توجه به اینکه در نرم افزار Plaxis 3D Foundation بار به صورت درصدی بر پی اعمال می‌شود، جهت برآورد ظرفیت باربری، بر روی کلیه پی‌های رینگی باری ثابت قرار داده شده و درصدی از بار که باعث گسیختگی سازه و خاک می‌شود به عنوان ظرفیت باربری در نظر گرفته شده است. این بدان معناست که معیار تعیین ظرفیت باربری، گسیختگی برشی ایجاد شده در زیر پی می‌باشد. اشکال ۳ و ۴ نتایج به دست آمده در این مقاله با مطالعات قبلی را نشان می‌دهد. که در این اشکال q_{II} ظرفیت باربری نهایی، r قطر داخلی، R قطر خارجی، S نشست نهایی و D قطر خارجی پی دایره‌ای توپری می‌باشند. همچنین مقایسه و درصد خطا در جدول شماره ۳ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود همخوانی مطلوبی بین نتایج وجود دارد که حاکی از صحت پاسخ‌های مدلسازی عددی است.



شکل ۴- نمودار بار- نشست

شکل ۳- نمودار ظرفیت باربری- نسبت قطر داخلی به خارجی

جدول ۳- مقایسه نتایج به دست آمده تحقیق حاضر با مطالعات پیشین

r/R	q_{II} آزمایشگاه (لامن و یلدیز)	q_{II} اورنک و دمیر	q_{II} تحقیق حاضر	درصد خطا نسبت به آزمایشگاه (لامن و یلدیز)	درصد خطا نسبت به روش عددی اورنک و دمیر
۰	۲۰۸	۲۱۱٫۶۷	۲۱۳	٪۱٫۷۶ افزایش	٪۰٫۶۳ افزایش
۰/۲۹	۲۰۷	۱۹۸	۲۰۱٫۰۴	٪۲٫۸۷ کاهش	٪۱٫۵۳ افزایش
۰/۵۲	۱۵۶	۱۶۴	۱۶۸٫۳۴	٪۷٫۹۱ افزایش	٪۲٫۶۵ افزایش
۰/۶۴	۷۹٫۷	۱۱۰	۱۱۳٫۲۳	٪۴۲٫۰۷ افزایش	٪۲٫۹۴ افزایش

۴. بررسی تاثیر فاصله در پی‌های رینگی مجاور یکدیگر

همانطور که در جدول ۳ و شکل ۳ مشخص است در نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/۲۹ نتایج تحقیق حاضر با نتایج آزمایشگاهی لامن و یلدیز [۵] و نتایج عددی اورنک و دمیر [۱۲] هماهنگی قابل قبولی داشته و درصد خطا حداقل می‌باشد. به همین علت، جهت بررسی تاثیر فاصله در ظرفیت باربری و نشست پی‌های رینگی مجاور هم از پی رینگی با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰/۲۹ استفاده شده است.

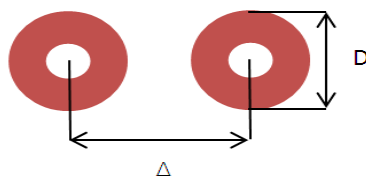


به منظور ارزیابی تاثیر اندر کنش پی‌های رینگی مجاور هم، ابتدا دو پی رینگی به فاصله D از هم و با نسبت $\frac{\Delta}{D}=1$ در نظر گرفته شد، که D قطر خارجی پی رینگی و Δ فاصله مرکز به مرکز پی‌های رینگی مجاور هم می‌باشد شکل شماره ۵ هندسه پی‌های رینگی مدل شده را نمایش می‌دهد. ظرفیت باربری و نشست پی‌های رینگی مجاور هم با نسبت $\frac{\Delta}{D}=1$ محاسبه شد. سپس در مراحل بعد پی‌های رینگی مجاور هم با مقدار نسبت $\frac{\Delta}{D}$ به ترتیب ۲، ۳، ۴ و طراحی و ظرفیت باربری و نشست هر کدام محاسبه گردید.

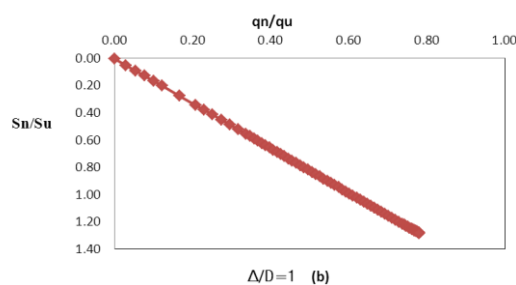
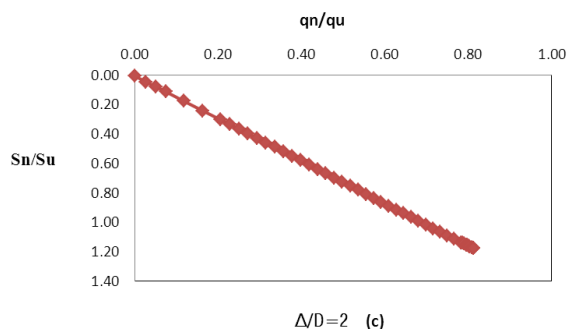
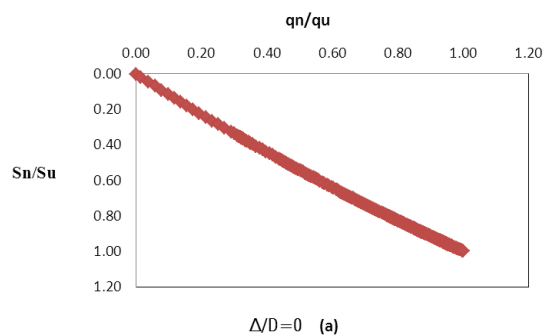
به منظور پی بعد سازی و کاربردی تر نمودن نتایج مطالعات پارامتریک، ظرفیت باربری و نشست به دست آمده برای نسبت‌های مختلف $\frac{\Delta}{D}$ پی‌های رینگی مجاور هم به ترتیب بر ظرفیت باربری و نشست پی رینگی دایره‌ای منفرد با نسبت قطر داخلی به خارجی $0/29$ (قطر خارجی ۸۴ میلی متر و قطر داخلی ۲۴ میلی متر) پی بعد شده‌اند و این پی با نسبت $\frac{\Delta}{D}=0$ مشخص شده است. جدول ۴ و شکل ۶ ظرفیت باربری و نشست پی‌های رینگی به همراه مقادیر پی بعد شده را نشان می‌دهد که S_n نشست ناشی از بار اعمالی بر پی‌های رینگی، S_u نشست نهایی پی رینگی دایره‌ای با نسبت قطر داخلی به خارجی $0/29$ ، q_n بار اعمالی بر پی‌های رینگی، q_u ظرفیت باربری نهایی پی رینگی دایره‌ای با نسبت قطر داخلی به خارجی $0/29$ می‌باشند.

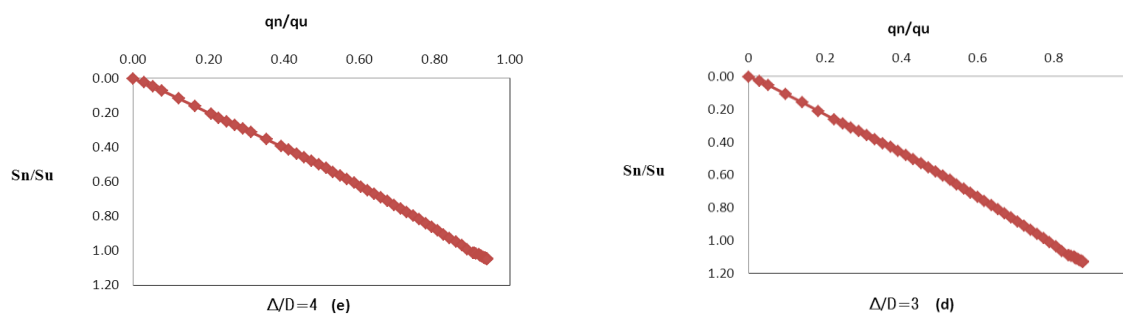
جدول ۴- ظرفیت باربری و نشست پی‌های رینگی به همراه مقادیر پی بعد شده

$\frac{\Delta}{D}$	۰	۱	۲	۳	۴
ظرفیت باربری (kpa)	۲۰۱	۱۵۰٫۷	۱۶۴٫۸	۱۷۸٫۹	۱۹۰٫۹
نشست (mm)	۳٫۸	۴٫۹	۴٫۵	۴٫۳	۴
ظرفیت باربری (پی بعد)	۱	۰٫۷۵	۰٫۸۲	۰٫۸۹	۰٫۹۵
نشست (پی بعد)	۱	۱٫۲۹	۱٫۱۸	۱٫۱۳	۱٫۰۵



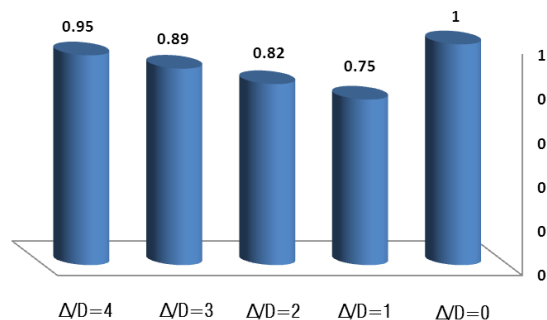
شکل ۵- هندسه پی‌های رینگی مدل شده



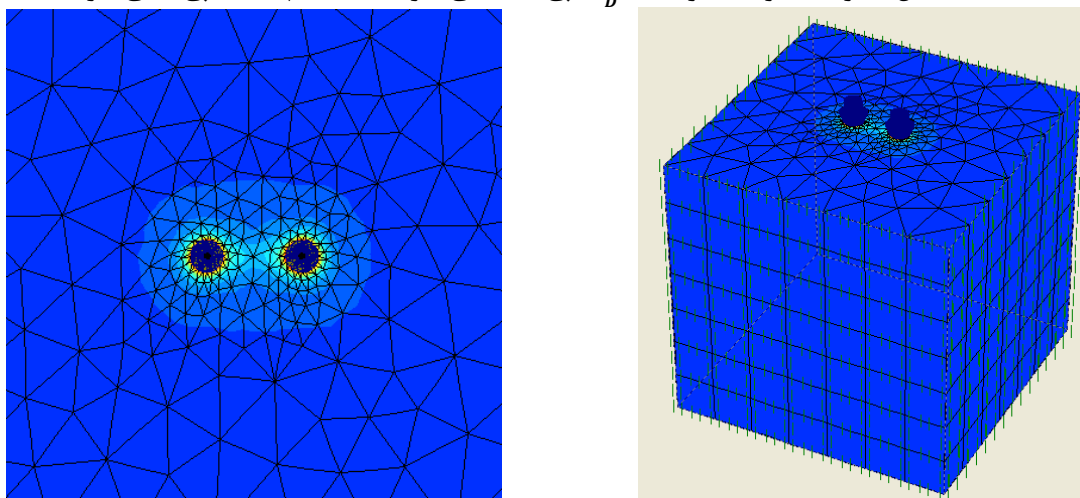


شکل ۶- نسبت بی بعد شده ظرفیت باربری - نشست پی های رینگ (a) $\frac{\Delta}{D}=0$ (b) $\frac{\Delta}{D}=1$ (c) $\frac{\Delta}{D}=2$ (d) $\frac{\Delta}{D}=3$ (e) $\frac{\Delta}{D}=4$

همانطور که در شکل ۶ و جدول ۴ مشاهده می شود، با تغییر اندازه نسبت $\frac{\Delta}{D}$ در پی های رینگ مجاور هم، ظرفیت های باربری متفاوتی به دست می آید. به عنوان نمونه با تغییر نسبت $\frac{\Delta}{D}$ پی های رینگ دایره ای مجاور هم در این مقاله به مقادیر ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب ۰.۲۵٪، ۰.۱۸٪، ۰.۱۱٪ و ۰.۰۵٪ کاهش ظرفیت باربری نسبت به پی رینگ دایره ای منفرد از خود نشان می دهند. می توان نتیجه گرفت که با نزدیک شدن پی های رینگ مجاور هم ظرفیت باربری آنها کاهش و نشست بیشتری ایجاد می شود. همچنین نسبت فاصله مرکز به مرکز ۴ برابر قطر خارجی پی های رینگ دایره ای بهینه ترین فاصله جهت طراحی پی های رینگ مجاور هم می باشد. به عبارت دیگر در این فاصله اندر کنش بین پی های رینگ کاهش یافته و تقریباً تاثیر آنها بر یکدیگر از بین می رود. در واقع در این فاصله جابجایی تنش بصورت مستقل عمل نموده و ظرفیت باربری هر کدام از پی ها نظیر ظرفیت باربری پی رینگ منفرد عمل می کند. شکل ۷ نمودار مقایسه ظرفیت باربری نسبت های مختلف $\frac{\Delta}{D}$ در پی های رینگ دایره ای مجاور هم و شکل ۸ نشست ایجاد شده در اطراف یک نمونه از پی های رینگ مدل شده را نشان می دهد.



شکل ۷- ظرفیت باربری مقادیر مختلف $\frac{\Delta}{D}$ در پی های رینگ دایره ای مجاور هم نسبت به پی رینگ منفرد



شکل ۸- نشست ایجاد شده در اطراف یک نمونه از پی های رینگ مدل شده



۵. نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی تاثیر فاصله بین پی‌های رینگی مجاور هم بر ظرفیت باربری فشاری نهایی آنها در قالب مطالعات پارامتریک پرداخته شده است. در این راستا خاک بستر ماسه‌ای و به منظور مدل سازی از نرم افزار اجزای محدود Plaxis 3D Foundation استفاده شده است. از جمله مهمترین نتایج به دست آمده می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. در پی‌های رینگی مجاور هم نسبت فاصله مرکز به مرکز پی‌های رینگی بر اندازه قطر خارجی آنها در ظرفیت باربری و نشست نسبت مستقیم دارد به طوری که با کاهش فواصل بین پی‌های رینگی دایره‌ای مجاور هم، تداخل تنش و اندرکنش بین آنها افزایش می‌یابد که منجر به کاهش مقادیر ظرفیت باربری می‌شود. همچنین با افزایش بین پی‌ها بر اثر کاهش اندرکنش بین آنها، ظرفیت باربری به سمت ظرفیت باربری پی رینگی منفرد گرایش می‌یابد.
۲. با کاهش فواصل بین پی‌های رینگی دایره‌ای مجاور هم، مقدار نشست ایجاد شده زیر پی‌ها افزایش می‌یابد.
۳. بهینه ترین فاصله مرکز به مرکز پی‌های رینگی مجاور هم جهت دستیابی به بیشترین ظرفیت باربری ۴ برابر اندازه قطر خارجی پی رینگی می‌باشد. یا به عبارت دیگر بیشتری ظرفیت باربری هنگامی است که اندازه نسبت $\frac{A}{D}$ برابر با مقدار ۴ باشد.
۴. نسبت قطر داخلی به خارجی در پی‌های رینگی دایره‌ای (r/R) در ظرفیت باربری نهایی موثر است.

۶. مراجع

1. Ismael, N. F. (1996). Loading tests on circular and ring plates in very dense cemented sands. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 122, No. 4, 281–287.
2. Ohri, M. L., Purhit, D. G. M. & Dubey, M. L. (1997). Behavior of ring footings on dune sand overlaying dense sand. International Conference of Civil Engineers, Tehran, Iran.
3. Hataf, N. & Razavi, M. R. 2003. Behavior of ring footing on sand. Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B, 27, 47–56.
4. Boushehrian, J. H. & Hataf, N. (2003). Experimental and numerical investigation of the bearing capacity of model circular and ring footings on reinforced sand. Geotextiles and Geomembranes, 21, No. 4, 241–256.
5. Laman, M. & Yildiz, A. (2003). Model studies of ring foundations on geogrid-reinforced sand. Geosynthetics International, 10, No. 5, 142–152.
6. Zhao L. & Wang J.H. 2007. Vertical bearing capacity for ring foundations. Computers and Geotechnics, 35, 292–304.
۷. علی الهی، ح.، حنیفی، س.، نعیم آبادی، ا.، (۱۳۹۲)؛ "تعیین مقادیر ضریب ظرفیت باربری N_7 برای پی‌های رینگی واقع بر خاک‌های لایه‌ای با استفاده از روش عددی"، اولین کنفرانس ملی ژئوتکنیک ایران، اردبیل.
۸. علی الهی، ح.، حنیفی، س.، صادقی عبدالهی، ع.، (۱۳۹۲)؛ "ارزیابی ظرفیت باربری پی‌های رینگی واقع بر خاک‌های لایه‌ای با استفاده از تحلیل عددی"، اولین کنفرانس ملی ژئوتکنیک ایران، اردبیل.
۹. علی الهی، ح.، صابر، ع.، (۱۳۹۲)؛ "تحلیل سه بعدی پی‌های رینگی با استفاده از روش عددی"، همایش ملی مهندسی عمران کاربردی و دستاوردهای نوین، کرج.
۱۰. علی الهی، ح.، صابر، ع.، (۱۳۹۳)؛ "بررسی تاثیر شکل هندسی پی‌های رینگی بر ظرفیت باری و نشست آنها با استفاده از روش عددی"، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، بابل.
11. Yildiz, A. (2002). Bearing Capacity of Shallow Foundations on Geogrid-Reinforced Sand. PhD thesis, University of Cukurova, Turkey.
12. M. Laman, A. Yildiz, M. Ornek & A. Demir. (2010). Three dimensional analyses of ring foundation. Numerical Methode in Geotechnical Engineering – Benz & Nordal (eds).



13. Abdel-Baki, M. S. & Raymond, G. P. (1994). Reduction of settlement using soil geosynthetic reinforcement. Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, ASCE, Vol. 1, pp. 525–537.
14. Yetimoglu, T., Wu, J. T. H. & Saglamer, A. (1994). Bearing capacity of rectangular footings on geogrid-reinforced sand. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 120, No. 12, 2083–2099.
15. Ismail, I. & Raymond, G. P. 1995. Geosynthetic reinforcement of granular layered soil. Proceedings of Geosynthetics 95 Conference, Vol. 1, pp. 317–330.
16. Kurian, N., Beena, K. S. & Kumar, R. K. (1997). Settlement of reinforced sand in foundations. Journal of Geotechnical Engineering, 123, No. 9, 818–827.
17. Chandrashekhara, K., Antony, S. J. & Mondal, D. (1998). Semianalytical finite element analysis of a strip footing on an elastic reinforced soil. Applied Mathematical Modelling, 22, 331–349.
18. Otani, J., Ochiai, H. & Yamamoto K. (1998). Bearing capacity analysis of reinforced foundation on cohesive soil. Geotextiles and Geomembranes, 16, No. 4, 195–206.
19. Yoo, C. (2001). Laboratory investigation of bearing capacity behaviour of strip footing on geogrid-reinforced sand slope. Geotextiles and Geomembranes, 19, No. 5, 279–298.
20. Laman, M. & Yildiz, A. (2007). Numerical studies of ring foundations on geogrid-reinforced sand. Geosynthetics International, 14, No. 2, 1–13.