نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۴، سال ۱۴۰۰، صفحات ۱۶۰۷ تا ۱۶۲۲
DOI: 10.22060/ceej.2020.17071.6450

بررسی آزمایشگاهی رفتار پی‌های حلقوی مستقر بر مصالح دانه‌ای تحت بارگذاری ترکیبی قائم، افقی و لنگر خمشی

امیرهوشنگ صادقی فاضل، جعفر بلوری بزاز*

گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

خلاصه: در بعضی از سازه‌ها مانند دکل‌های نفتی و توربین‌های بادی باتوجه به نوع کاربری، پی سازه تحت بارگذاری ترکیبی بار قائم، بار افقی و لنگر خمشی (V-H-M) قرار می‌گیرد. در این پژوهش بااستفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی، رفتار پی‌های حلقوی به‌عنوان نوعی ویژه از پی‌های دایره‌ای تحت بارگذاری ترکیبی (V-H-M) واقع بر خاک ماسه‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌است. در این راستا با انجام صد آزمایش در شش مسیر بارگذاری متفاوت اثر نسبت قطر ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و نیز پی دایره‌ای (نسبت قطر صفر) بر ظرفیت باربری در مسیرهای مختلف بارگذاری ارزیابی گردید؛ سپس براساس نمودارهای بار- نشست، نقاط گسیختگی تعیین شد و بااستفاده از مجموعه‌ی این نقاط، پوش گسیختگی در فضاهای بار قائم-بار افقی، بار قائم-لنگر خمشی و لنگر خمشی-بار افقی رسم گردید. این پوش در فضای V-H و V–M/B از یک منحنی درجه دوم تبعیت می‌کند که بیشینه‌ی آن وابسته به نسبت قطر می‌باشد. درادامه بااستفاده از پوش‌های گسیختگی ترسیمی در فضای دوبعدی، معادلات پوش‌های گسیختگی و ضرایب مربوط تعیین گردید. بررسی نتایج نشان داد استفاده از پی‌های حلقوی با نسبت قطر ۰/۲ تا ۰/۴ هنگامی‌که تحت بارگذاری خارج محور یا مایل یا هردو قرار دارد دارای بازدهی بیشتری نسبت به سایر حالات است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۵
بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۱۳
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۱/۱۵

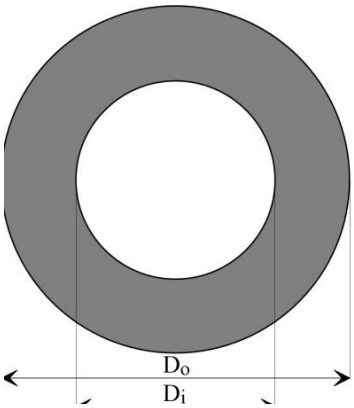
کلمات کلیدی:
پی حلقوی
مدل‌سازی آزمایشگاهی
ماسه
بارگذاری ترکیبی
پوش گسیختگی

۱- مقدمه

پی حلقوی گونه‌ای از پی‌های دایره‌ای است که در سازه‌هایی مانند برج‌های مخابراتی، سیلوها، پایه‌ی پل‌ها، تابلوهای تبلیغاتی، سازه‌های ساحلی و فراساحلی کاربرد دارد. مشخصه‌ی اساسی این‌گونه از پی‌ها نسبت قطر است که به‌صورت رابطه‌ی (۱) تعریف می‌شود (شکل ۱).

$$\eta = \frac{D_i}{D_o} \quad (۱)$$

در این رابطه n نسبت قطر، D_i قطر داخلی و D_o قطر خارجی



شکل ۱. پی حلقوی
Fig. 1. Ring footing

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: bolouri@um.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

پی حلقوی می‌باشد. ایگوروف [۱] رفتار پی‌های حلقوی را تحت بارگذاری قائم مورد ارزیابی قرار داد. از نتایج این مطالعات می‌توان به تغییر رفتار پی حلقوی به‌ازای نسبت شعاعی بزرگ‌تر از ۰/۹ به یک پی نواری اشاره کرد. السند و همکاران [۲] ظرفیت باربری پی حلقوی مستقر بر خاک ماسه‌ای بسیار متراکم سیمانته‌شده را با کمک آزمایش‌های بارگذاری صفحه بررسی کردند و نشان دادند در بعضی حالات ظرفیت باربری پی حلقوی در مقایسه با پی دایره‌ای کامل با همان قطر خارجی بیشتر است. هم‌چنین نتایج مطالعات دیگر محققان در زمینه‌ی ظرفیت باربری پی‌های حلقوی که برروی ماسه انجام شده‌است نشان می‌دهد که این‌گونه پی‌ها در نسبت شعاعی ۰/۲ تا ۰/۴ بیشترین ظرفیت باربری را دارند و خارج از این بازه ظرفیت باربری پی دایره‌ای با قطر خارجی مشابه بیشتر خواهد بود (بوشهریان و هاتف [۳]، رضوی و هاتف [۴] و الصواف و نذیر [۷]). کارولوف [۵] برمبنای روش تعادل حدی رابطه ای برای ظرفیت باربری پی حلقوی با فرض وجود تقارن محوری و رسیدن تمامی نقاط اطراف سطح گسیختگی به حالت خمیری کامل ارائه نمود. کومار و قوش [۶] به‌کمک روش خطوط مشخصه‌ی تنش، ضریب ظرفیت باربری $N\gamma$ برای پی‌های حلقوی با کف زبر و نرم را محاسبه کردند. دمیر و همکاران [۸] با انجام مطالعات صحرایی به بررسی اثر تغییر در نسبت قطر بر ظرفیت باربری پی حلقوی مستقر بر خاک رسی طبیعی پرداختند و نشان دادند برای خاک رسی طبیعی افزایش نسبت قطر در پی حلقوی منجر به کاهش ظرفیت باربری می‌شود. سرگزی و سیدی [۹] به بررسی عددی رفتار پی حلقوی واقع بر خاک غیر چسبنده تحت بارگذاری خارج محور پرداختند و ضرایبی را برای به‌دست آوردن ظرفیت باربری پی حلقوی تحت بارگذاری خارج محور ارائه نمودند.

پی بسیاری از سازه‌ها باتوجه به شرایط بهره‌برداری و نوع کاربری آن می‌تواند تحت تأثیر بارهای مایل و یا خارج محور و یا ترکیب آن‌ها قرار گیرد. محققان کلاسیک (میرهوف [۱۰]، هانسن [۱۱]) ضرایب ظرفیت باربری پی تحت تأثیر بار خارج محوری را ارائه نمودند. رفتار پی‌های سطحی تحت بارگذاری ترکیبی برای اولین بار توسط باترفیلد و تیکوف [۱۲] مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت؛ به این ترتیب که آنها با اعمال بار ترکیبی قائم (V)، افقی (H) و لنگر خمشی (M) گسیختگی خاک زیر پی سطحی را مورد مطالعه قرار دادند. این ایده توسط سایر محققان (گئورگیادیس و باترفیلد [۱۳] و نوا و مونترازیو [۱۴]) درجهت دست‌یابی به پوش گسیختگی بهینه مورد مطالعه و ارزیابی بیشتر قرار گرفت. گوتاردی و باترفیلد [۱۵] و گوتاردی و باترفیلد [۱۶] با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی به مطالعه‌ی رفتار پی سطحی تحت مسیرهای گوناگون بارگذاری پرداختند و در انتها معادلاتی درجهت پوش گسیختگی در صفحات دوبعدی ارائه نمودند. پس از آن گوتاردی و همکاران [۱۷] رفتار پی دایره‌ای برروی خاک ماسه‌ای تحت بارگذاری همه‌جانبه تحت مسیرهای بارگذاری گوناگون را بررسی کردند. بااستفاده از نتایج به‌دست‌آمده پیش‌بینی رفتار پی تحت بارگذاری همه‌جانبه و متعاقب آن ارائه‌ی مدل رفتاری مناسب برای خاک ماسه‌ای تحت بارگذاری مذکور انجام شد. در ادامه بینن و همکاران [۱۸] به بررسی رفتار پی‌های سطحی با شش درجه آزادی تحت بارگذاری ترکیبی پرداختند.

هلزبی و کاسیدی [۱۹] بااستفاده از روش تحلیل عددی، یک مدل رفتاری پلاستیک برای پی دایره‌ای واقع بر خاک ماسه‌ای ارائه دادند و آن را با داده‌های آزمایشگاهی صحت‌سنجی نمودند. هم‌چنین کاسیدی و همکاران [۲۰] به بررسی رفتار پی دایره‌ای واقع بر خاک ماسه‌ای کربناتی تحت بارگذاری ترکیبی پرداختند. بررسی رفتار پی‌های سطحی واقع بر خاک‌های چسبنده نیز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌است (تیبت و کارتر [۲۱]، ولپ و همکاران [۲۲]، شن و همکاران [۲۳]). نتایج نشان می‌دهد فارغ از مقدار چسبندگی خاک، سطح گسیختگی در فضای بدون بعد برای هر مدل پی نموداری یکتا خواهد بود. گورنک [۲۴] بااستفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS تأثیر ابعاد پی مستطیلی تحت بارگذاری همه‌جانبه بر سطح گسیختگی را مورد مطالعه قرار داد. در ادامه ولپ و همکاران [۲۵]، رائو و همکاران [۲۶]، تانگ و همکاران [۲۷] و تیستل و همکاران [۲۸] تحقیقاتی در زمینه‌ی پی سطحی تحت بارگذاری عمومی ترکیبی انجام دادند.

همان‌گونه که بیان شد، تحقیقات گذشته متمرکز بر تعیین ظرفیت باربری پی‌های حلقوی تحت اثر بار قائم و تعیین نسبت قطر بهینه بوده و فقط رفتار پی‌های دایره‌ای تحت بارگذاری ترکیبی V-H-M مورد مطالعه قرار گرفته‌است. در این پژوهش ظرفیت باربری پی حلقوی تحت بارگذاری ترکیبی بااستفاده از مسیرهای بارگذاری گوناگون با نسبت‌های قطر مختلف ارزیابی شده‌است. در این راستا با انجام صد

آزمایش روی پی‌های حلقوی ظرفیت باربری این‌گونه پی‌ها بررسی شده و پوش‌های گسیختگی ترسیم شده و تأثیر نسبت قطر بر آن بررسی گردیده‌است.

۳- روند انجام پژوهش

در این پژوهش چهار مدل پی به‌شکل حلقه و دایره به‌قطر خارجی ۲۰ سانتی‌متر و نسبت قطر ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ از جنس فولاد ST۳۷ با ضخامت ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌است. به‌منظور افزایش اصطکاک، کف پی که برروی سطح خاک قرار می گیرد (Df=۰) با چسباندن ماسه زبر شده‌است. برای رسم پوش گسیختگی این پی‌ها در فضای کلی V-H-M/B نیاز به تعریف چند مسیر بارگذاری در فضای سه‌بعدی می‌باشد؛ ازاین‌رو، شش مسیر بارگذاری که ترکیبی از بار قائم، بار افقی و لنگر خمشی می باشند مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. این شش مسیر که به‌صورت نمادین در شکل (۲) نشان داده شده‌اند به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

* مسیر V-C: هدف از این مسیر بارگذاری به‌دست آوردن ظرفیت باربری پی حلقوی و دایره‌ای تحت بارگذاری قائم مرکزی می‌باشد. مقدار Vult بااستفاده از این سری آزمایش‌ها به‌دست می‌آید. رفتار پی در فضای بار-نشست به‌گونه‌ای است که بار وارد به پی پس از رسیدن به مقدار مشخص به حالت تقریباً پایدار درمی‌آید و می‌توان بدون افزایش بار شاهد تغییر مکان‌های زیادی بود. بار متناظر با لحظه‌ای که رفتار پی به حالت پایدار می‌رسد به‌عنوان بار نهایی (Vult) درنظر گرفته می‌شود.

* مسیر V-H: دراین مسیر، بارگذاری قائم تا مقدار معین ($۰,۲V_{ult}$,$۰,۳V_{ult}$,$۰,۵V_{ult}$,$۰,۷V_{ult}$,$۰,۸۵V_{ult}$) انجام می‌شود سپس با ثابت نگه داشتن آن، بار افقی تا رسیدن به گسیختگی به مدل اعمال می‌گردد. بار نهایی به‌دست‌آمده از آزمایش‌های سری اول مبنای آزمایش‌های سری دوم می‌باشد.

* مسیر I-C: در این حالت بار به‌صورت مرکزی مایل با زاویه‌ی انحراف ثابت نسبت به امتداد قائم به مدل پی اعمال می‌شود. هدف از انجام آزمون‌های این سری، به‌دست آوردن نقاط گسیختگی به‌منظور تعیین سطح گسیختگی و بررسی ظرفیت باربری پی حلقوی تحت بارگذاری مایل می‌باشد. لازم به ذکر است در این حالت بار قائم وافقی با نسبت ثابت در طول آزمایش به مدل پی اعمال می‌شود که برآیند آنها بار مایل با زاویه اعمال بار ثابت می‌باشد.

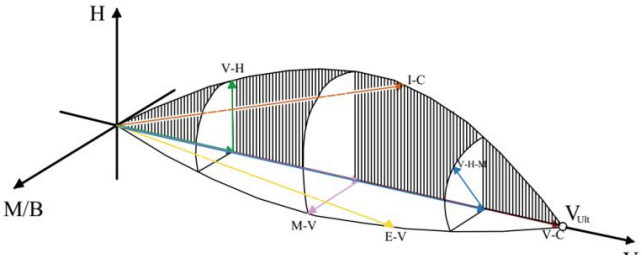
* مسیر M-V: این نوع بارگذاری که اولین بار در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته‌است به‌صورت کوپل نیرو (برای ایجاد لنگر) به مدل پی سطحی اعمال می‌شود. در این راستا ابتدا پی تحت بارگذاری قائم مرکزی قرار داده می‌شود و پس از رسیدن به بار قائم مورد نظر ($۰,۳V_{ult}$,$۰,۵V_{ult}$,$۰,۷V_{ult}$)، مقدار آن ثابت نگه داشته می‌شود و لنگر خمشی به مدل پی اعمال می‌گردد. مدل پی از یک طرف تحت بارگذاری افقی قرار می‌گیرد و درمقابل با یک خروج از محوری پی بااستفاده از یک کابل (که تنها مقاومت کششی دارد) به یک دیواره‌ی صلب متصل می‌گردد. به‌این‌ترتیب پی تا رسیدن به گسیختگی تحت لنگر خمشی خالص حاصل از کوپل نیرو قرار می‌گیرد. دوران پی بااستفاده از سه تغییرمکان‌سنج که به‌صورت مثلثی روی پی نصب شده‌اند، محاسبه می شود.

* مسیر E-V: در این مسیر، بارگذاری قائم خارج محور با مقدار خروج از محوری ثابت تا رسیدن به گسیختگی ادامه می‌یابد. هدف از انجام آزمون‌های این سری، به‌دست آوردن نقاط گسیختگی به‌منظور تعیین سطح گسیختگی و بررسی ظرفیت باربری پی حلقوی تحت بارگذاری خارج محور می‌باشد.

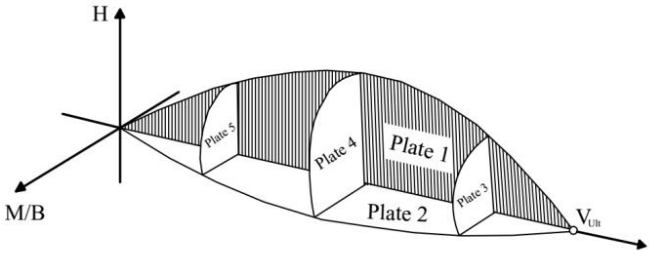
* مسیر V-H-M: در این مسیر بارگذاری پی حلقوی به‌طور هم‌زمان تحت بار قائم، بار افقی و لنگر خمشی قرار می‌گیرد. در این حالت نیز بار قائم پس از رسیدن به مقدار مشخص ($۰,۳V_{ult}$ ،$۰,۵$ V_{ult} و $۰,۷$ V_{ult}) ثابت نگه داشته می‌شود و بار افقی به‌صورت خارج محور با دو مقدار خروج از محوری به پی اعمال می شود. به‌این‌ترتیب پی تحت بارگذاری هم‌زمان قائم، افقی و لنگر خمشی قرار می‌گیرد.

در تمامی مسیرهای تعریف‌شده معیار گسیختگی باتوجه به نمودار نیرو- جابه‌جایی یا لنگر خمشی- دوران هنگامی در نظر گرفته شده‌است که شیب نمودار به‌سمت صفر میل کند. به‌دلیل تراکم متوسط خاک ماسه‌ای آزمایش‌شده در این پژوهش نقطه‌ی بیشینه در فضای بار نشست مشاهده نمی شود. مسیرهای بارگذاری معرفی‌شده در فضای سه‌بعدی V-H-M/B در شکل (۲) نشان داده شده‌است. نقاط انتهایی مسیرهای بارگذاری که نشان‌دهنده‌ی وضعیت گسیختگی می‌باشند، پوش گسیختگی پی مربوط را تشکیل می‌دهند.

۳-۱- برنامه‌ی آزمایش‌ها



شکل ۲. مسیرهای بارگذاری ششگانه
Fig. 2. Loading paths



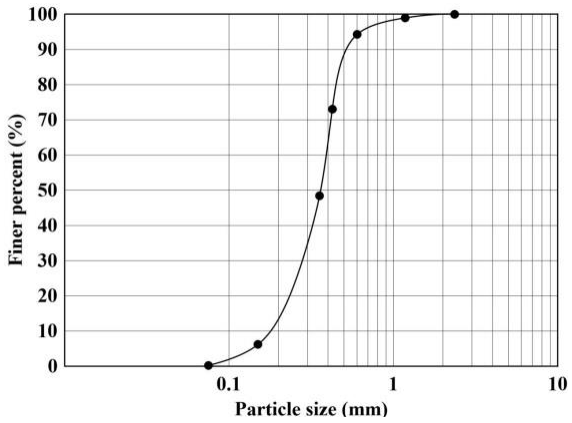
شکل ۳. صفحات فرضی در فضای سه‌بعدی
Fig. 3. Assumptive plates in 3D space

به‌منظور ساده‌سازی روند به‌دست آمدن پوش‌های گسیختگی، پنج صفحه مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شده‌است. ه‌یصفحه‌ی ۱ که در فضای دوبعدی V-H قرار دارد مربوط به حالتی است که هیچ‌گونه لنگر خمشی به سطح پی اعمال نمی‌شود. صفحه‌ی ۲ در فضای V-M/B تعریف شده‌است که در آن مقدار بار افقی صفر است. صفحات ۳، ۴ و ۵ در فضای H-M/B تعریف شده‌اند با این تفاوت که هر یک در صفحه‌ای با مقدار بار قائم ثابت مشخص قرار دارند. صفحات ۳، ۴ و ۵ به‌ترتیب مربوط به $۰,۵V_{ult}$ ،$۰,۷V_{ult}$ و $۰,۳V_{ult}$ می‌باشند. آزمایش‌ها به‌نحوی تعریف شده‌اند که صفحات پنجگانه‌ی مزبور در فضای مربوط قابل رسم باشند و بتوان معادله‌ی آنها را به‌دست آورد. با داشتن معادله‌ی این صفحات می‌توان معادله‌ی پوش‌های گسیختگی را در فضای مربوط تعیین نمود.

باتوجه به این توضیحات تعداد صد آزمون آزمایشگاهی درجهت به‌دست آمدن پوش گسیختگی پی حلقوی با چهار نسبت قطر انجام شد که جزئیات آن در جدول ۱ آمده‌است.

۳-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

خاک مورد آزمایش از نوع ماسه‌ی استاندارد شماره‌ی ۱۶۱ فیروزکوه بوده‌است که منحنی دانه‌بندی آن در شکل ۴ نشان داده شده‌است. برای انجام آزمایش‌ها از یک مخزن به‌ابعاد ۱×۱ متر و ارتفاع ۱ متر استفاده شده‌است، این ابعاد به‌منظور جلوگیری از به‌وجود آمدن اثر مرزها بر نتایج انتخاب شده‌اند [۹]؛ بنابراین باتوجه به این‌که قطر مدل پی ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد، ابعاد مخزن بیش از پنج برابر قطر پی یعنی ۱/۱ متر در نظر گرفته شده‌است. در این پژوهش آزمایش‌ها برروی خاک با تراکم متوسط انجام شده و از سیستم بارش ماسه [۲۹]



شکل۴. منحنی دانه‌بندی خاک
Fig. 4. Particle size distribution of the used sand

جدول ۱. مشخصات آزمایش‌ها
Table 1. Charactristics of tests

ردیف	تعداد آزمایش‌ها	مسیر بارگذاری	V/V_{ult}	e_v	α(Degree)	e_h(mm)	n
۱	۴	V-C	-	-		-	۰ ،۰/۲ ،۰/۴ ،۰/۶
۲	۲۰	H-V	۰/۲ ،۰/۳ ،۰/۵ ،۰/۷ ،۰/۸۵	-		-	۰ ،۰/۲ ،۰/۴ ،۰/۶
۳	۸	I-C	-	-	۱۸ ،۲۴	-	۰ ،۰/۲ ،۰/۴ ،۰/۶
۴	۲۰	M-V	۰/۲ ،۰/۳ ،۰/۵ ،۰/۷ ،۰/۸۵	-		۵۰	۰ ،۰/۲ ،۰/۴ ،۰/۶
۵	۱۲	E-V	-	B/10, B/8, B/6		-	۰ ،۰/۲ ،۰/۴ ،۰/۶
۶	۳۶	V-H-M	۰/۳ ،۰/۵ ،۰/۷	-		۵۰ ،۱۰۰ ،۲۰۰	۰ ،۰/۲ ،۰/۴ ،۰/۶

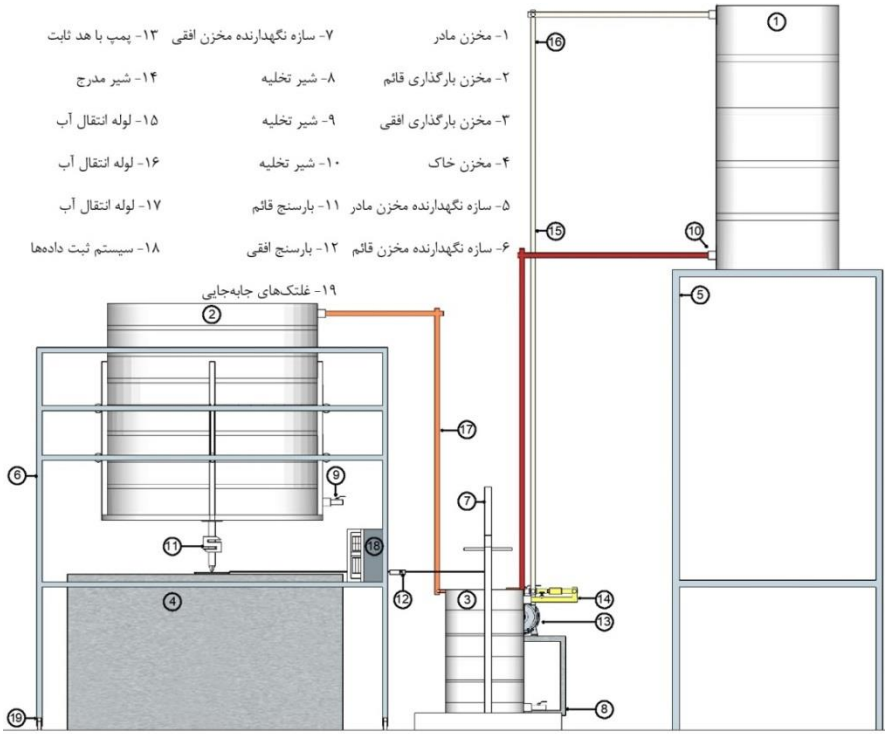
درجهت ایجاد تراکم نسبی یکنواخت ۷۰ درصدی برای خاک مخزن آزمایش استفاده شده‌است.

زاویه‌ی اصطکاک داخلی و وزن مخصوص ماسه‌ی مورد آزمایش، باتوجه به تراکم نسبی ۷۰ درصدی به‌ترتیب ۳۶ درجه و ۱۵/۲کیلونیوتن بر مترمکعب می‌باشد. هم‌چنین چگالی، و وزن مخصوص بیشینه و کمینه‌ی ماسه به‌ترتیب ۲/۷۱، ۱۴/۰۵ و ۱۶/۳۸ کیلونیوتن بر مترمکعب بوده‌است.

۳-۳- دستگاه بارگذاری

در پژوهش حاضر یک سیستم بارگذاری جدید طراحی و در آزمایشگاه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی اجرا شد که امکان بارگذاری در مسیرهای بارگذاری گوناگون را فراهم می آورد. این سیستم دارای قسمت‌های مختلفی می‌باشد که در شکل (۵) نشان داده شده‌است.

اساس کار این دستگاه برمبنای بارگذاری بااستفاده از وزن آب است. ابتدا آب در یک مخزن اصلی که در ارتفاع ۲/۵ متری قرار دارد ذخیره می‌شود. این آب به‌وسیله‌ی شیر تخلیه از مخزن اصلی تخلیه می‌شود و آب به‌وسیله‌ی شیلنگ به‌سمت پمپ آب هدایت می‌شود. آب واردشده به پمپ با هد ثابت به‌سمت مخازن بارگذاری پمپاژ می‌شود. این مخازن یکی مربوط به بارگذاری قائم و دیگری مربوط به بارگذاری افقی می باشد. پس از خروج آب از پمپ، آب امکان حرکت در دو مسیر را دارد که این مسئله بااستفاده از شیرهایی که در این دو مسیر کارگذاری شده‌است قابل مدیریت و فرماندهی است. زمانی که هدف، قرارگیری پی تحت بارگذاری قائم می‌باشد، شیر مربوط به مخزن بارگذاری افقی بسته نگاه داشته می‌شود و عملاً مخزن بارگذاری افقی از سیستم خارج می‌گردد؛ به این ترتیب آب وارد مخزن بارگذاری قائم می‌شود و در این حالت مخزن مذکور با سرعت ۲۰ لیتر بر دقیقه پر می‌شود. مخزن بارگذاری قائم در داخل یک سبد فلزی قرار دارد که این سبد برروی یک چهارپایه‌ی متحرک سوار است و به‌وسیله‌ی هشت غلتک به آن متصل می‌شود. در چهار وجه سبد مذکور چهار ریل فلزی قرار داده شده‌است که دو غلتک برروی هر ریل قرار گرفته‌اند و از حرکت جانبی و انحراف سبد و بالطبع آن مخزن، از راستای قائم جلوگیری می‌کنند و تنها اجازه‌ی حرکت درراستای قائم را به مخزن می‌دهند. لازم به ذکر است ریل‌ها کاملاً صیقلی بوده و حتی‌الامکان اصطکاک میان ریل و غلتک‌ها کاهش یافته‌است. در زیر سبد بارگذاری یک ورق فولادی وجود دارد که میله‌ی بارگذاری به‌صورت قائم به این صفحه جوش شده‌است و



شکل ۵. تصویر شماتیک از چیدمان سیستم آزمایشات

Fig. 5. Schematic view of loading system

طرف دیگر سر میله که به‌صورت پیکانی درآمده‌است برروی مدل پی قرار داده شده‌است. با پر شدن مخزن مدل پی تحت بارگذاری قائم قرار داده می‌شود. سر پیکانی میله‌ی بارگذاری به‌دلیل به‌وجودآمدن اتصال مفصلی میان میله و مدل پی قرار دارد و از انتقال لنگر از میله به مدل پی جلوگیری می‌کند. بارگذاری افقی به‌دلیل این‌که باعث حرکت مدل پی می‌شود، می‌تواند باعث انحراف مخزن بارگذاری قائم شود. برای جلوگیری کردن از این مسئله و بروز خطا در آزمایش‌ها سازه‌ی نگهدارنده‌ی مخزن قائم که در شکل (۵) با شماره‌ی ۶ نشان داده شده‌است، بااستفاده از غلتک‌هایی که با شماره‌ی ۱۹ نشان داده شده‌اند قابلیت جابه‌جایی دارند که این مسئله مانع از بروز خطا در آزمایش‌ها می‌شود. لازم به ذکر است غلتک‌ها و کف کاملاً صیقلی شده‌اند تا از ایجاد نیروی مقاوم اصطکاک تا حد ممکن کاسته شود.

با توجه به این‌که مخزن بارگذاری قائم قابلیت جابه‌جایی افقی را به‌واسطه‌ی چهار پایه‌ی متحرک دارد، لذا برای بارگذاری خارج محور با جابه‌جا کردن سیستم و قرار دادن میله‌ی بارگذاری در محل موردنظر و خروج از محوری کافی امکان بارگذاری خارج محور قائم نیز با این دستگاه فراهم است. باتوجه به توضیحات فوق، برای بارگذاری افقی بایستی شیر بارگذاری افقی باز نگه داشته شود تا مخزن بارگذاری افقی پر شود و بار افقی به مدل پی اعمال گردد. بارگذاری افقی بااستفاده از یک سیم که یک سر آن به مدل پی و سر دیگر به مخزن بارگذاری افقی متصل است انجام می‌شود. سیم بارگذاری از روی یک قرقره که قابلیت تنظیم ارتفاع دارد عبور می‌کند و بار افقی به این ترتیب به مدل پی اعمال می‌شود. به‌منظور تغییر در میزان بارگذاری افقی، در محل ورودی آب به داخل مخزن بارگذاری افقی، شیر آب مدرجی تعبیه شده‌است که بااستفاده از آن می‌توان میزان آب ورودی به داخل مخزن بارگذاری افقی را کنترل کرد. باتوجه به این‌که هد ایجادشده توسط پمپ ثابت است و همچنین طول مسیر آب و شکل مسیر آب در تمامی آزمایش‌ها ثابت می‌باشد، لذا افت هد ایجادشده‌ی ناشی از عوامل ذکرشده نیز ثابت است و می‌توان میزان آب واردشده به مخزن بارگذاری قائم را از تفاضل میزان آب ورودی به مخزن بارگذاری افقی از ۲۰ لیتر بر دقیقه محاسبه نمود و به این ترتیب نسبت آب ورودی به مخزن بارگذاری افقی به آب ورودی به مخزن بارگذاری قائم در طول آزمایش ثابت می‌ماند. لازم به ذکر است تغییر ارتفاع قرقره این امکان را فراهم می‌کند که بار افقی در هر ارتفاع دل‌خواه به نمونه وارد شود و نحوه‌ی رفتار مدل پی تحت لنگر ناشی از بار افقی نیز مطالعه شود. پس از پایان عملیات بارگذاری و پایان آزمایش با شیرهای تخلیه‌ی موجود در هر دو مخزن بارگذاری، آب مخازن تخلیه می‌شود و بااستفاده از پمپ به‌سمت مخزن آب مادر پمپاژ می‌شود و دستگاه برای انجام آزمایش بعدی آماده خواهد بود. تصویر دستگاه بارگذاری در شکل ۶ نشان داده شده‌است.

برداشت تغییرمکان‌ها در حین آزمایش بااستفاده از سه تغییرمکان‌سنج قائم با چیدمان مثلثی برای قرائت نشست قائم و یک عدد تغییرمکان‌سنج افقی برای قرائت تغییرمکان افقی انجام می‌شود. بار واردشده به سطح پی و بار جانبی بااستفاده از دو عدد بارسنج قائم و افقی ثبت می‌شوند. داده‌های به‌دست‌آمده از ابزار دقیق توسط یک سیستم ثبت داده ضبط و به رایانه منتقل می‌شوند.

۴- مشاهدات آزمایشگاهی

مشاهدات آزمایشگاهی تحت مسیرهای بارگذاری بیان‌شده در شکل های ۷ تا ۱۳ آورده شده‌است. رفتار پی حلقوی با چهار نسبت قطر در مسیر بارگذاری V-C در شکل ۷ نشان داده شده‌است.

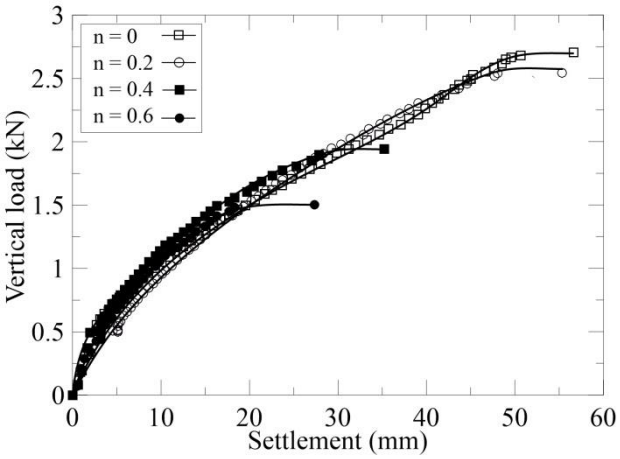
تغییرات بار- نشست و بار افقی- تغییرمکان افقی در مسیر بارگذاری H-V که با افزایش بار قائم تا مقداری معین و ثابت نگه داشتن آن در طول آزمایش و افزایش بار افقی تا رسیدن به گسیختگی برای پی حلقوی با نسبت شعاعی ۰/۴ انجام شد، به‌ترتیب در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده‌است. انطباق تقریبی نتایج تا قبل از اعمال بار افقی نشان از قابلیت تکرارپذیری آزمایش‌ها دارد.

نمودار تغییرات بار مایل در مقابل ضریب جابه‌جایی در مسیر بارگذاری I-C برای پی حلقوی با نسبت شعاعی ۰/۴ و زوایای بارگذاری ۲۴ و ۱۸ درجه در شکل ۱۰ نشان داده شده‌است. ضریب جابه‌جایی به‌صورت $f=\sqrt{v^2+h^2}$ تعریف می‌شود که در آن v نشست قائم و h جابه‌جایی افقی پی سطحی می‌باشد. همان‌گونه که دیده می‌شود با افزایش زاویه‌ی انحراف بار و افزایش نسبت قطر ظرفیت باربری پی سطحی کاهش می یابد.

برای مسیر بارگذاری M-V رفتار پی حلقوی با نسبت شعاعی ۰/۴ در فضای لنگر- دوران، که در شکل ۱۱ ترسیم شده‌است، نشان می‌دهد هنگامی‌که ۵۰ درصد بار نهایی به پی اعمال شود مقاومت آن دربرابر لنگر بیشتر از سایر حالات است. به‌عبارتی سطح گسیختگی

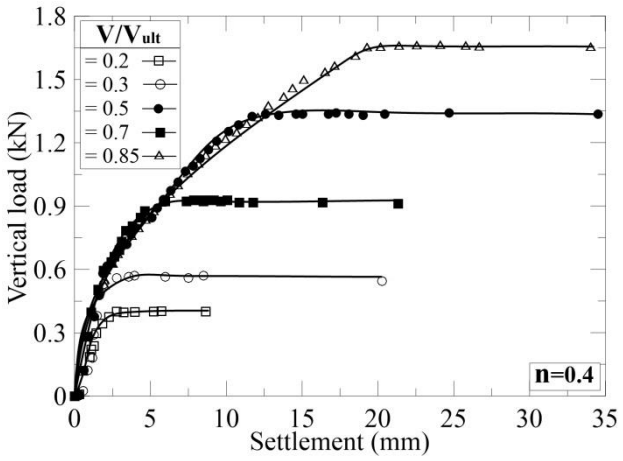
شکل ۶. دستگاه بارگذاری

Fig. 6. Loading system



شکل ۷. بار قائم – نشست پی حلقوی با نسبت‌های شعاعی متفاوت

Fig. 7. Load-setlement of ring footing subject to vertical load



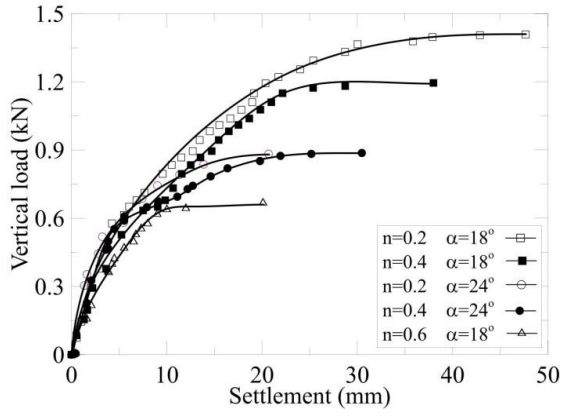
شکل ۸. بار قائم درمقابل نشست در مسیر V-H پی حلقوی با نسبت شعاعی ۰/۴

Fig. 8. Load-settlement of ring footing in V-H loading path (n=0.4)

در فضای M-H در صفحه‌ی $۰٫۵V_{ult}$ بزرگ‌ترین سطح را خواهد داشت.

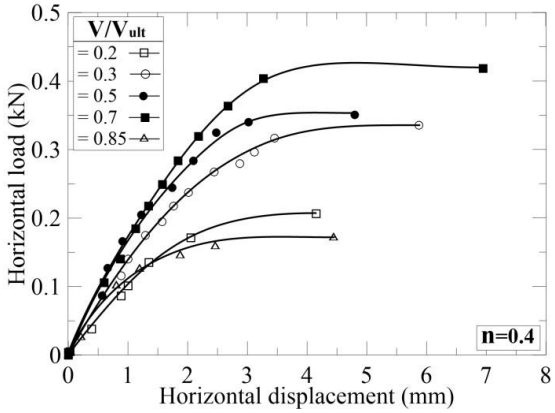
به‌منظور بررسی رفتار پی حلقوی با بار خروج از مرکز، مسیر بارگذاری E-V با خروج از محوری‌های B/10، B/8 و B/6 و نسبت شعاعی ۰/۴ مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۱۲ ارائه شده‌است.

آخرین مسیر انتخاب‌شده مسیر بارگذاری V-H-M است که در آن پی تحت بارگذاری هم‌زمان بار قائم، افقی و لنگر خمشی قرار دارد. نتایج که در شکل (۱۳) نشان‌داده شده بیانگر این نکته است که ظرفیت باربری افقی پی حلقوی در این مسیر بارگذاری تابع مقدار بار قائم است و لنگر خمشی ناشی از بار افقی نیز عاملی تأثیرگذار خواهد بود.



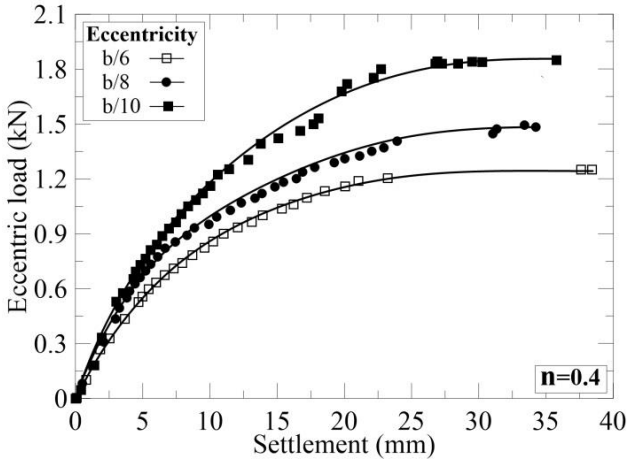
شکل ۱۰. بار مایل در مقابل جابجایی پی حلقوی در مسیر I-C

Fig. 10. Inclined load- displacement of ring footing in I-C path



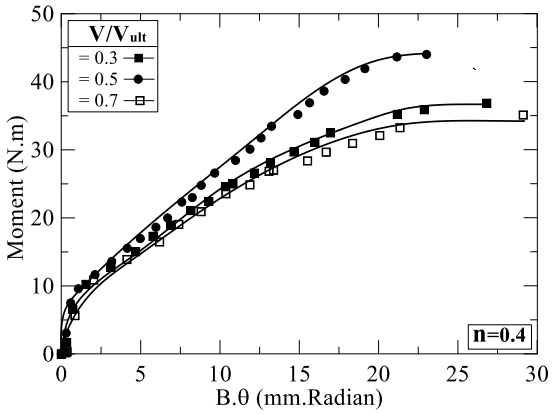
شکل ۹. بار افقی درمقابل جابه‌جایی افقی در مسیر V-H پی حلقوی با نسبت شعاعی ۰/۴

Fig. 9. Horizontal load-horizontal displacement of ring footing in V-H loading path (n=0.4)



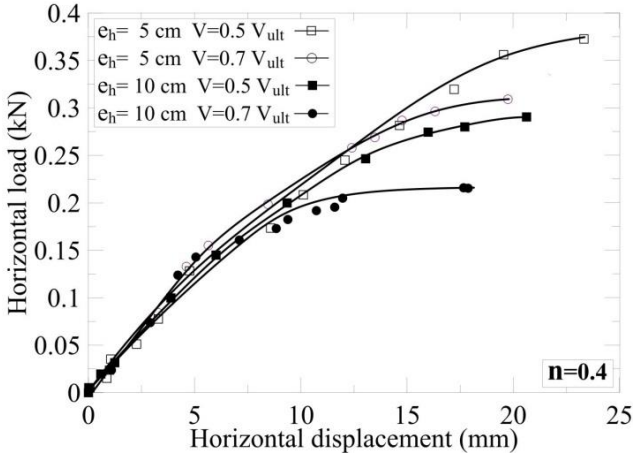
شکل ۱۲. بار خارج محور درمقابل جابه‌جایی مسیر E-V پی حلقوی با نسبت شعاعی ۰/۴

Fig. 12. Eccenteric load-settlement of ring footing in E-V path (n=0.4)



شکل ۱۱. لنگر درمقابل چرخش در مسیر M-V پی حلقوی با نسبت شعاعی ۰/۴

Fig. 11. Moment-rotation of ring footing in M-V path (n=0.4)



شکل ۱۳. بار افقی درمقابل جابه‌جایی افقی مسیر V-H-M پی حلقوی با نسبت شعاعی ۰/۴

Fig. 13. Horizontal load-horizontal displacement of ring footing in V-H-M loading path (n=0.4)

جدول ۲. مقادیر بار نهایی آزمایش‌ها در مسیرهای دو بعدی

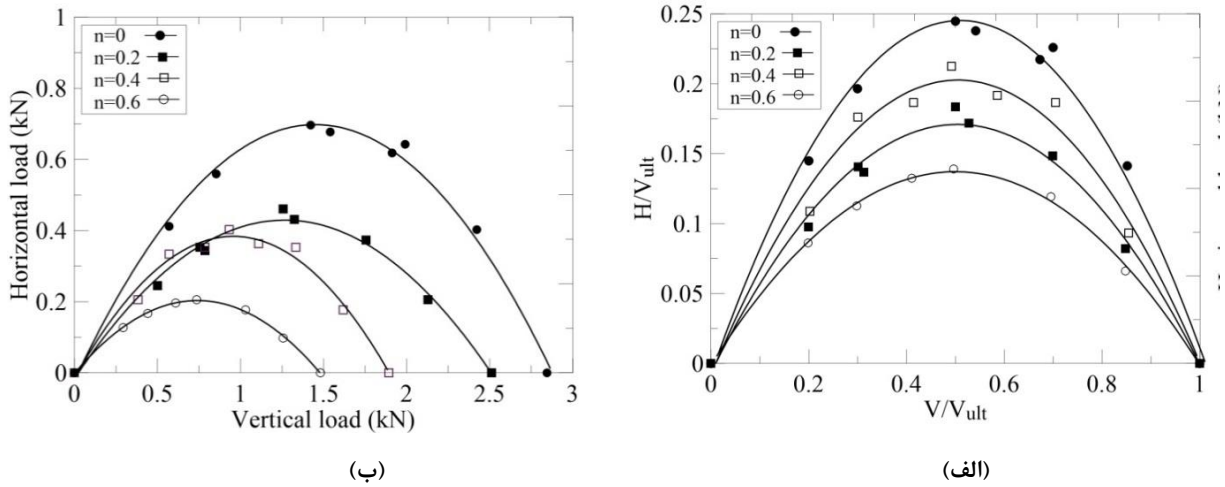
Table 2. Ultimate load of tests in 2D loading paths

n=۰			n=۰/۲			n=۰/۴			n=۰/۶		
V-C	V_{ult} (N)		V-C	V_{ult} (N)		V-C	V_{ult} (N)		V-C	V_{ult} (N)	
مسیر	۲۸۴۴/۹		مسیر	۲۵۱۱/۳۶		مسیر	۱۸۹۳/۳۳		مسیر	۱۵۰۸/۵۳	
	V/V_{ult}	H (N)		V/V_{ult}	H (N)		V/V_{ult}	H (N)		V/V_{ult}	H (N)
	۰/۲	۴۱۲/۰۲		۰/۲	۲۴۵/۲۵		۰/۲	۲۰۶/۴۸		۰/۲	۹۸/۱
V-H	۰/۳	۵۵۹/۱۷	V-H	۰/۳	۳۵۳/۱۶	V-H	۰/۳	۳۳۳/۵۴	V-H	۰/۳	۱۲۷/۵۳
مسیر	۰/۵	۶۹۶/۵۱	مسیر	۰/۵	۴۶۱/۰۷	مسیر	۰/۵	۴۰۲/۲۱	مسیر	۰/۵	۱۵۶/۹۶
	۰/۷	۶۴۷/۴۶		۰/۷	۳۷۲/۷۸		۰/۷	۳۵۳/۸۹		۰/۷	۱۳۷/۳۴
	۰/۸۵	۴۰۲/۲۱		۰/۸۵	۲۰۶/۰۱		۰/۸۵	۱۷۶/۵۸		۰/۸۵	۷۸/۴۸
	α (Degree)	H (N)		α (Degree)	H (N)		α (Degree)	H (N)		α (Degree)	H (N)
I-C	۱۸	۶۱۸/۰۳	I-C	۱۸	۳۴۳/۳۵	I-C	۱۸	۳۶۲/۹۷	I-C	۱۸	۱۴۷/۱۵
مسیر	۲۴	۶۷۶/۸۹	مسیر	۲۴	۴۳۱/۶۴	مسیر	۲۴	۳۵۲/۸	مسیر	۲۴	-
	V/V_{ult}	M (N.m)		V/V_{ult}	M (N.m)		V/V_{ult}	M (N.m)		V/V_{ult}	M (N.m)
M-V	۰/۳	۶۵/۶۶	M-V	۰/۳	۳۶/۵۵	M-V	۰/۳	۳۵/۰۸	M-V	۰/۳	۱۱/۸۶
مسیر	۰/۵	۸۳/۳	مسیر	۰/۵	۴۶/۵۶	مسیر	۰/۵	۴۴/۲	مسیر	۰/۵	۱۵/۳۹
	۰/۷	۷۲/۵۲		۰/۷	۳۴/۵		۰/۷	۳۶/۲۶		۰/۷	۱۲/۴۵
	e/B	M (N.m)		e/B	M (N.m)		e/B	M (N.m)		e/B	M (N.m)
E-V	B/10	۴۹/۲	E-V	B/10	۳۶/۸۵	E-V	B/10	۳۱/۵۶	E-V	B/10	۱۳/۲۳
مسیر	B/8	۵۵/۸۶	مسیر	B/8	۴۰/۶۷	مسیر	B/8	۳۴/۳	مسیر	B/8	۱۳/۳۳

جدول ۳. مقادیر بار نهایی آزمایش‌ها در مسیر سه بعدی

Table 3. Ultimate load of tests in 3D loading path

	n=۰				n=۰/۴			
	V/Vult	eh(mm)	H(N)	M(N.m)	V/Vult	eh(mm)	H(N)	M(N.m)
	۰/۳	۵۰	۴۱۱/۶	۲۳/۵	۰/۳	۵۰	۲۸۴/۲	۱۴/۲
		۱۰۰	۳۶۲/۶	۳۶/۳		۱۰۰	۲۲۵/۴	۲۲/۵
		۲۰۰	۲۲۵/۴	۴۵/۱		۲۰۰	۱۴۲/۱	۲۸/۴
	۰/۵	۵۰۰	۶۲۷/۲	۳۱/۴	۰/۵	۵۰	۳۶۲/۶	۱۸/۱
V-H-M		۱۰۰	۴۹۹/۸	۵۰		۱۰۰	۲۸۴/۲	۲۸/۴
مسیر		۲۰۰	۳۱۳/۶	۶۲/۷		۲۰۰	۱۷۶/۴	۳۵/۳
	۰/۷	۵۰	۵۰۹/۶	۲۵/۵	۰/۷	۵۰	۳۰۳/۸	۱۵/۲
		۱۰۰	۴۰۱/۸	۴۰/۲		۱۰۰	۲۳۵/۲	۲۳/۵
		۲۰۰	۲۶۴/۶	۵۲/۹		۲۰۰	۱۴۷	۲۹/۴
	n=۰/۲				n=۰/۶			
	V/Vult	eh(mm)	H(N)	M(N.m)	V/Vult	eh(mm)	H(N)	M(N.m)
	۰/۳	۵۰	۲۹۴	۱۴/۷	۰/۳	۵۰	۱۲۵	۶/۳



شکل ۱۴. سطح گسیختگی پی حلقوی در فضای (الف) H-V و (ب) V/V_{ult}-H/V_{ult}

Fig. 14. Failure envelope of ring footing in a) H-V b) H/V_{ult}-V/V_{ult} space

در جدول ۲ مقادیر بار نهایی هر یک از مدل‌های پی دایره‌ای و حلقوی تحت مسیرهای بارگذاری دو بعدی و در جدول ۳ مقادیر بار و لنگر نهایی تحت مسیر بارگذاری سه بعدی نشان داده شده است. نتایج به‌خوبی تاثیر مسیرهای بارگذاری مختلف و نسبت قطر بر مقدار بار نهایی را نشان می‌دهد.

۵- پوش گسیختگی

۵-۱- پوش گسیختگی در فضای V-H

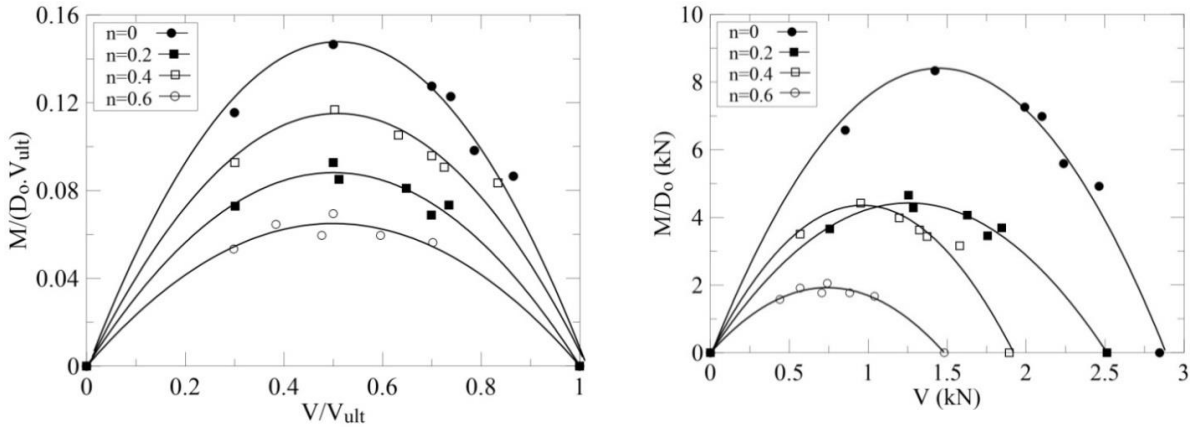
به‌منظور رسم پوش گسیختگی در فضای V-H از صفحه‌ی ۱ (شکل ۳) در این فضا که بااستفاده از هشت آزمایش به‌دست آمده، استفاده شده‌است. نقطه‌ی انتهایی نمودار که واقع بر محور افقی می‌باشد بااستفاده از مسیر بارگذاری V-C به‌دست آمده و نشان‌دهنده‌ی ظرفیت باربری پی تحت بار قائم مرکزی است. برای به‌دست‌آمدن سایر نقاط از مسیر بارگذاری V-H و I-C استفاده شده‌است. منحنی درجه دوم که بااستفاده از داده‌های آزمایشگاهی برازش شده‌است، نشان‌دهنده‌ی پوش گسیختگی پی حلقوی در فضای V-H می‌باشد (شکل ۱۴-الف). هم‌چنین پوش گسیختگی در فضای بدون بعد V/V_{ult}-H/V_{ult} در شکل (۱۴-ب) ارائه شده‌است. نتایج نشان می‌دهد مقدار بار افقی قابل تحمل توسط پی حلقوی کاملاً به نسبت قطر وابسته است به‌گونه ای که در نسبت قطر ۰/۴ نسبت به حجم مصالح به‌کاررفته در مدل پی بیشترین بازدهی به‌دست می‌آید. هم‌چنین شکل پوش گسیختگی برای تمامی حالت‌ها از یک منحنی درجه دوم تبعیت می‌کند، که بیشینه‌ی آن در ۰٫۵Vult رخ می‌دهد و مقدار آن وابسته به نسبت قطر پی حلقوی، متغیر است.

۵-۲- پوش گسیختگی در فضای V-M/B

پوش گسیختگی در فضای V-M/B بااستفاده از نتایج آزمایش‌ها در مسیر بارگذاری E-V و M-V به‌دست آمده‌است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها در فضای M/B-V و در فضای بدون بعد M/BV_{ult}-V/V_{ult} برای چهار نسبت شعاعی پی حلقوی به‌ترتیب در شکل‌های (۱۵-الف) و (۱۵-ب) نشان داده شده‌است. این پوش گسیختگی که نشان‌دهنده‌ی صفحه‌ی ۲ در فضای سه‌بعدی می‌باشد همواره یک منحنی درجه دو را نشان می‌دهد که بیشینه‌ی آن در ۰٫۵Vult رخ می‌دهد و مقدار آن بسته به نسبت قطر متغیر است.

۵-۳- پوش گسیختگی در فضای H-M/B

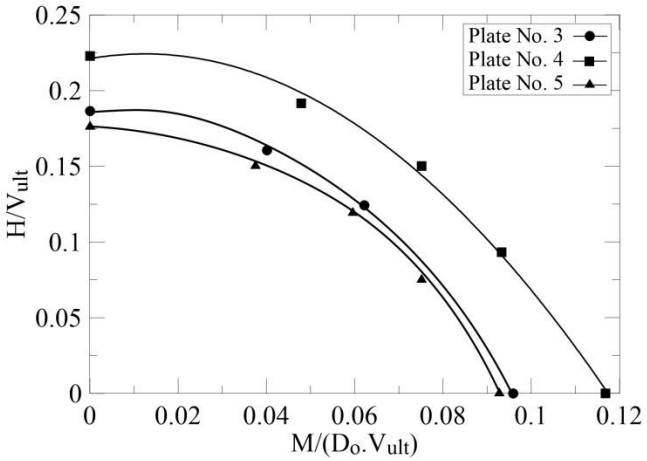
پوش گسیختگی در فضای H/V_{ult}-M/BV_{ult} در سه صفحه بار قائم ثابت $0{,}3V_{ult}$، $0{,}5V_{ult}$ و $0{,}7V_{ult}$ برای هر یک از نسبت‌های قطر پی حلقوی ترسیم شده‌است. این پوش‌ها هر یک بااستفاده از پنج نقطه، که هرکدام نماینده‌ی یک آزمایش هستند، ترسیم شده‌اند. سه نقطه از نتایج مسیر بارگذاری V-H-M است که بار با سه خروج از محوری متفاوت بار افقی به پی اعمال می‌شود، نقطه‌ی واقع بر محور قائم H/V_{ult} از نتایج آزمایش با مسیر بارگذاری H-V و نقطه‌ی واقع بر محور افقی M/BV_{ult} از نتایج آزمایش M-V به‌دست می‌آید. برازش میان نقاط نشان‌دهنده‌ی ارتباط میان صفحات گسیختگی به‌دست‌آمده در آزمایش‌های قبل می‌باشد. در



(ب) (الف)

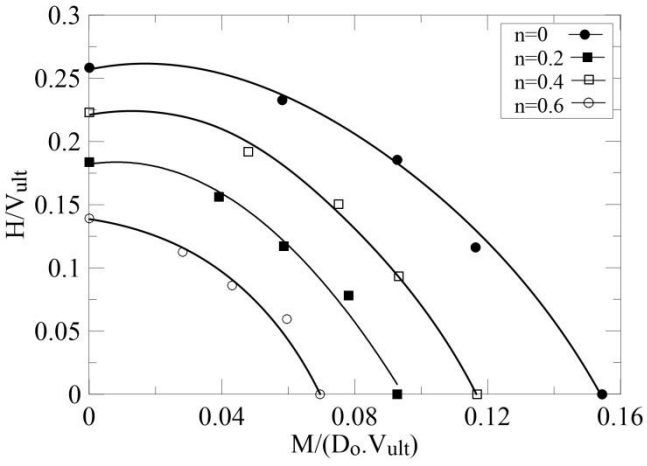
شکل ۱۵. سطح گسیختگی پی حلقوی در فضای (الف) M/Do-V و (ب) M (Do.Vult)/V/Vult

Fig. 15. Failure envelope of ring footing in a) M/Do-V b) M/DoV_{ult}-V/Vult space



شکل ۱۶. سطح گسیختگی پی حلقوی با نسبت قطر ۰/۴ برروی خاک ماسه‌ای در فضای H/V_{ult}- M/DoV_{ult}

Fig. 16. Failure envelope of ring footing in H/V_{ult}- $M/Do-V_{ult}$ space (n=0.4)



شکل ۱۷. تأثیر نسبت شعاعی پی حلقوی بر اندازه‌ی صفحه‌ی ۴ در فضای H/V_{ult}-M/BV_{ult}

Fig. 17. Effect of diameter ratio on plate 4 in H/V_{ult}- M/DoV_{ult} space

شکل (۱۶) سه صفحه‌ی گسیختگی (Plate ۳، Plate ۴ و Plate ۵) در فضای H/V_{ult}-M/BV_{ult} برای نسبت شعاعی ۰/۴ پی حلقوی رسم شده‌است.

شکل ۱۷ تأثیر پارامتر نسبت قطر پی حلقوی را بر اندازه‌ی صفحه‌ی ۴ نشان می‌دهد. بزرگ‌تر بودن پوش گسیختگی پی حلقوی در نسبت قطر ۰/۴ نسبت به سایر انواع پی حلقوی بازدهی اقتصادی بالای این نسبت قطر را در حالتی که پی حلقوی تحت بارگذاری افقی و لنگر خمشی قرار دارد، نشان می‌دهد.

۶- تحلیل نتایج

به‌منظور پیش‌بینی رفتار پی‌های دایره‌ای در فضای V/V_{ult}-H/V_{ult} در سال ۱۹۹۳ توسط گوتاردی و باترفیلد [۱۵] رابطه‌ی ۲ ارائه گردید.

$$\frac{H}{V_{ult}} = \beta_1 \frac{V}{V_{ult}} (1-\frac{V}{V_{ult}})^{\beta_2} \qquad (۲)$$

در این رابطه H بار افقی، V بار قائم و V_{ult} بار قائم نهایی هستند. β_1 و β_2 نیز دو ضریب ثابت‌اند که به‌ترتیب تعیین‌کننده‌ی مقدار و موقعیت بیشینه پوش گسیختگی در فضای V/V_{ult}-H/V_{ult} می‌باشند.

هم‌چنین معادله‌ی پوش گسیختگی در فضای M/BV_{ult}-V/V_{ult} از رابطه‌ای مشابه پوش گسیختگی در فضای V/V_{ult}-H/V_{ult}

تبعیت می‌کند، اما ضرایب در این حالت متفاوت خواهد بود؛ بنابراین رابطه‌ی پوش گسیختگی در فضای M/BV_{ult}-V/V_{ult} به‌صورت رابطه‌ی ۳ بازنویسی می‌شود [۱۵].

$$\frac{M}{BV_{ult}} = \beta_3 \frac{V}{V_{ult}}\left(1-\frac{V}{V_{ult}}\right)^{\beta_4} \quad (۳)$$

در این رابطه M لنگر خمشی، B قطر خارجی پی حلقوی هستند و β_3 و β_4 نیز ضرایب ثابت‌اند که کنترل‌کننده‌ی موقعیت بیشینه پوش گسیختگی و مقدار بیشینه در فضای M/BV_{ult}-V/V_{ult} می‌باشند.

شکل پوش گسیختگی در فضای H/V_{ult}-M/BV_{ult} از رابطه‌ی (۴) پیروی می‌کند [۱۷].

$$\left(\frac{H}{\beta_1 V_{ult}}\right)^2 + \left(\frac{M}{\beta_3 BV_{ult}}\right)^2 + c\,\frac{H}{\beta_1 V_{ult}}\frac{M}{\beta_3 BV_{ult}} = D \quad (۴)$$

در این رابطه c ضریب ثابت می‌باشد و D مقدار ثابت است که وابسته به مقدار بار قائم در صفحه‌ی H/V_{ult}-M/BV_{ult} می‌باشد و از رابطه‌ی ۵ به‌دست می‌آید.

$$D = \left(\frac{V}{V_{ult}}\left(1-\frac{V}{V_{ult}}\right)\right)^2 \quad (۵)$$

ارزیابی نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های پی حلقوی مشابهت روندها را با روابط ارائه‌شده برای پی دایره‌ای نشان می‌دهد؛ با این تفاوت که در حالت استفاده از پی حلقوی نیاز به اصلاح ضرایب معرفی‌شده وجود دارد. باتوجه به این‌که در تمامی سطوح گسیختگی مقدار Hmax و Mmax در ۰٫۵ Vult رخ می‌دهد، بنابراین با مشتق‌گیری از روابط (۲) و (۳) مقدار پارامترهای $\beta_4=\beta_2=1$ به‌دست

جدول ۴. نحوه‌ی تغییرات پارامترهای روابط پوش‌های گسیختگی در مقابل نسبت‌های قطر پی حلقوی

Table 4. Effect of diameter ratio on parameters of failure envelope equation

n	β_1	β_2,β_4	β_3	c
۰	۱	۱	۰/۶	۰/۲
۰/۲	۰/۷	۱	۰/۳۵	۰/۲
۰/۴	۰/۸	۱	۰/۴۵	۰/۲
۰/۶	۰/۲۸	۱	۰/۱۴	۰/۲

می‌آید، اما پارامترهای β_1 و β_3 که به‌ترتیب تعیین‌کننده‌ی مقدار بیشینه در فضای V/V_{ult}-H/V_{ult} و M/BV_{ult}-V/V_{ult} هستند، بسته به مقدار نسبت قطر متغیر می‌باشند. در جدول (۴) نحوه‌ی تغییرات پارامترهای مذکور در مقابل نسبت‌های قطر پی حلقوی باتوجه به نتایج آزمایش‌ها نشان داده شده‌است.

باتوجه به ضرایب به‌دست‌آمده، عدم وجود روند نزولی مقادیر ضرایب با افزایش مقدار نسبت قطر را می‌توان به‌دلیل بروز پدیده‌ی اثر لبه‌ها که به‌طور کامل در سال ۱۹۶۹ توسط جامیکیس[۳۲] توضیح داده شده‌است، تفسیر نمود.

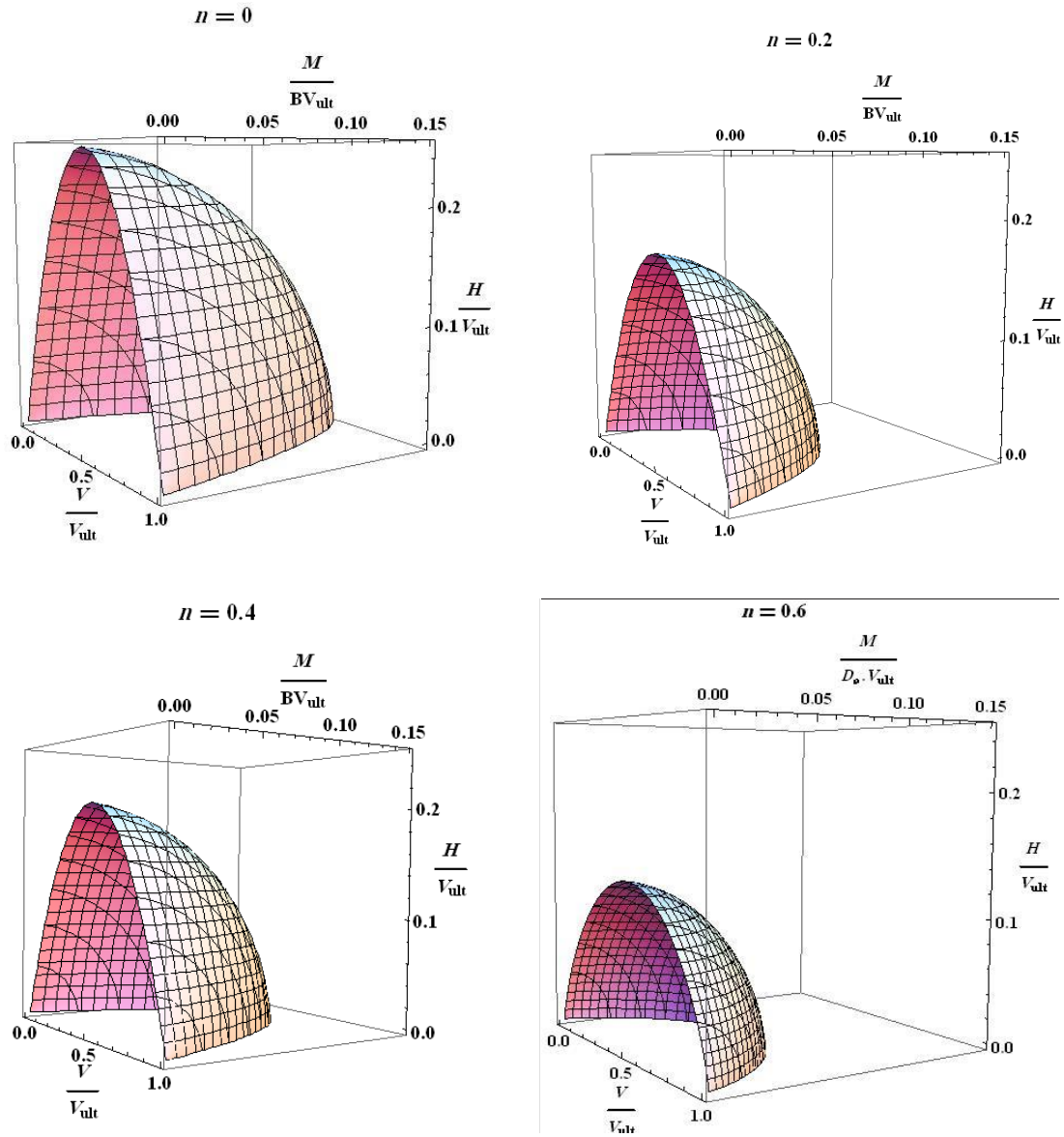
$$\left(\frac{H}{\beta_1 V_{ult}}\right)^2 + \left(\frac{M}{\beta_3 BV_{ult}}\right)^2 + c\,\frac{H}{\beta_1 V_{ult}}\frac{M}{\beta_3 BV_{ult}} = \left(\frac{V}{V_{ult}}\left(1-\frac{V}{V_{ult}}\right)\right)^2 \quad (۶)$$

با به‌دست‌آمدن معادلات سه‌گانه‌ی پوش‌های گسیختگی در سه فضای دوبعدی ارتباط میان این سطوح در فضای سه‌بعدی با پوش گسیختگی در فضای V/V_{ult}-H/V_{ult}-M/BV_{ult} بااستفاده از رابطه‌ی ۶ به‌دست می‌آید.

این رابطه بیانگر شکل هندسی یک توپ راگبی می‌باشد. در حالتی‌که لنگر وارد به سطح پی صفر باشد و یا خروج از محوری وجود نداشته باشد مقدار M/B مساوی صفر می‌شود و رابطه‌ی ۶ به‌صورت رابطه‌ی ۲ بازنویسی می‌شود. همین مطلب نیز درباره‌ی بار افقی صادق است و زمانی‌که بار نسبت به امتداد قائم انحرافی ندارد پارامتر H در رابطه‌ی فوق مساوی صفر در نظر گرفته می‌شود و رابطه‌ی ۶ به‌صورت رابطه‌ی ۳ بازنویسی می‌شود و بالأخره با ثابت در نظر گرفتن مقدار بار قائم V سمت چپ رابطه‌ی ۶ تبدیل به مقدار ثابت D می‌شود و رابطه‌ی ۶ به‌صورت رابطه‌ی ۴ بازنویسی می‌شود. درنتیجه، در حالت کلی می‌توان از رابطه‌ی ۶ به‌عنوان معادله‌ی کلی برای تعیین معادله‌ی پوش گسیختگی پی‌های حلقوی استفاده کرد با این نکته که نسبت قطر پی حلقوی بر ضرایب معادله‌ی کلی پوش گسیختگی مؤثر است. در شکل ۱۸ تأثیر نسبت قطر بر سطح گسیختگی پی حلقوی در فضای سه‌بعدی V/V_{ult}-H/V_{ult}-M/BV_{ult} نشان داده شده‌است.

۷- صحت‌سنجی نتایج

مقادیر ظرفیت باربری به‌دست‌آمده در این پژوهش با



شکل ۱۸. پوش گسیختگی سه‌بعدی پی حلقوی با چهار نسبت شعاعی

Fig. 18. 3D failure envelope

تحقیقات قبلی در دو قسمت مقایسه شده‌است:

الف: پی تحت بارگذاری قائم

به‌منظور کنترل رفتار پی حلقوی تحت بارگذاری قائم ضریب

$$N_\gamma = \frac{q_u}{0.5B\gamma} \qquad (۷)$$

ظرفیت باربری Nγ به‌دست‌آمده از نتایج آزمایش‌ها با نتایج سایر محققان در جدول (۵) مقایسه شده‌است. لازم به ذکر است مقدار Nγ بااستفاده از رابطه‌ی (۷) و با معلوم بودن مقادیر ظرفیت باربری qu از

جدول ۵. ضریب ظرفیت باربری Nγ باتوجه به مقدار نسبت قطر

Table 5. Effect of diameter ratio on Nγ

n	پژوهش حاضر	بن مبارک [۳۰]	سیدی حسینی نیا [۳۱]	سرگزی و سیدی حسینی نیا [۹]
۰	۵۷/۶	۵۶	۵۷	۶۵
۰/۲	۵۵/۹۵	۵۰	۵۱	۶۹
۰/۴	۵۰/۱	۳۳	۴۴	۵۲
۰/۶	۳۶/۴	۱۶	۳۹	۴۰

نتایج آزمایش‌ها به‌دست آمده‌است.

ملاحظه می‌شود مقادیر ضریب ظرفیت باربری $N\gamma$ به‌دست‌آمده باتوجه به نتایج آزمایش‌ها در محدوده‌ی مقادیر پیشنهادی توسط سایر محققان قرار دارد.

$$\frac{H}{H_{ult}} = 4\frac{V}{V_{ult}}(1-\frac{V}{V_{ult}}) \quad (۸)$$

$$\frac{M}{M_{ult}} = 4\frac{V}{V_{ult}}(1-\frac{V}{V_{ult}}) \quad (۹)$$

ب: پی تحت بارگذاری ترکیبی V-H-M

به‌منظور کنترل رفتار پی حلقوی تحت بارگذاری ترکیبی، از روابط (۸) و (۹) پیشنهادی گوتاردی و همکاران[۱۷] استفاده می‌شود.

در شکل‌های (۱۹-الف) و (۱۹-ب) نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش در مقایسه با روابط (۸) و (۹) به ترتیب در فضای H/H_{ult}-V/V_{ult} و M/M_{ult}-V/V_{ult} نشان‌داده شده‌است. ملاحظه می‌شود که نتایج به‌دست‌آمده برای پی حلقوی و دایره‌ای با دقت مناسبی بر روابط پیشنهادی انطباق دارد که نشان‌دهنده‌ی صحت نتایج می‌باشد.

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش بررسی رفتار پی‌های حلقوی تحت بارگذاری ترکیبی بااستفاده از مسیرهای بارگذاری گوناگون انجام شد. در این راستا با انجام صد آزمایش در مقیاس آزمایشگاهی برروی پی‌های حلقوی واقع بر خاک ماسه‌ای تحت هشت مسیر بارگذاری پوش گسیختگی به‌دست‌آمده با روابط پیشنهادی برای پی دایره‌ای که توسط سایر محققان ارائه شده‌است مقایسه گردید و ضرایب برای پی‌های حلقوی باتوجه به نتایج آزمایش‌ها اصلاح شد. مهم‌ترین نتایج این پژوهش در ادامه آمده‌است:

۱- همواره افزایش بار قائم باعث افزایش ظرفیت باربری افقی پی نمی‌شود، به عبارت دیگر با افزایش وزن سازه نمی‌توان انتظار داشت که پی حتماً قابلیت تحمل بارهای افقی بیشتری را داشته باشد.

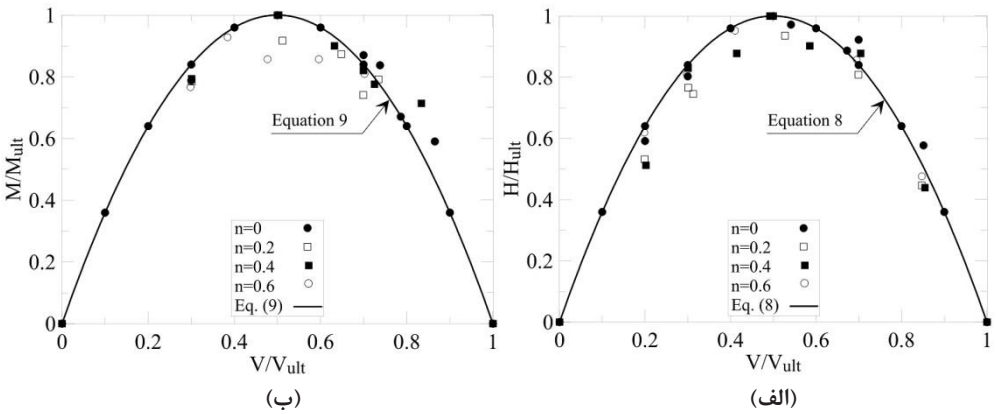
۲- در فضای H-V و M/B-V سطح گسیختگی پی حلقوی از یک تابع درجه دو تبعیت می‌کند که محل ماکزیمم آن در ۰,۵ Vult رخ می‌دهد و مقدار آن وابسته به نسبت قطر پی حلقوی متغیر می‌باشد.

۳- ضرایب β_1 و β_3 که تعیین‌کننده‌ی مقدار بیشینه‌ی پوش گسیختگی به‌ترتیب در فضای V/V_{ult}-H/V_{ult} و H/V_{ult}-M/BV_{ult} می‌باشند به طرز قابل توجهی به شکل پی وابسته هستند.

۴- شکل پی تأثیری در مقدار ضرایب β_2 و β_4 که کنترل‌کننده‌ی محل وقوع بیشینه پوش گسیختگی به‌ترتیب در فضای V/V_{ult}-H/V_{ult} و H/V_{ult}-M/BV_{ult} هستند، نخواهد داشت و مقدار آنها برابر واحد خواهد بود.

۵- رسیدن به وضعیت گسیختگی از مسیرهای بارگذاری مستقل است و تنها کافی است از طریق هر مسیر دلخواه تنها پوش گسیختگی لمس شود.

۶- نسبت قطر بهینه‌ی پی حلقوی زمانی‌که پی تحت بارگذاری افقی و یا لنگر خمشی و یا هردو قرار دارد، باتوجه به سطوح گسیختگی



شکل ۱۹. سطح گسیختگی پی حلقوی با نسبت‌های قطر مختلف در فضای بدون بعد الف) H/H_{ult}-V/V_{ult} و ب) M/M_{ult}-V/V_{ult} و مقایسه‌ی نتایج با روابط پیشنهادی گوتاردی و همکاران (۱۹۹۹)

Fig. 19. Faliure envelope of ring footing in a) H/H_{ult}-V/Vult b) M/M_{ult}-V/Vult and comparison with Gottardi et al. (1999) equation

به‌دست‌آمده از نتایج آزمایش‌ها، نسبت ۰/۴ می‌باشد و نیز نسبت قطر ۰/۶ کمترین کارایی را تحت بارگذاری ترکیبی دارد. هم‌چنین ملاحظه می‌شود پی دایره‌ای در مقایسه با پی‌های حلقوی سطح گسیختگی بزرگ‌تری دارد.

مراجع

[1] K.E. Egorov, Calculation of bed for foundation with ring footing, in: Proceeding International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, University of Toronto Press, Toronto, 1965, pp. 41-45.

[2] A.-S. H.A, I. N.F, R.P. Brenner, Settlement of circular and ring plates in very dense calcareous sands, Journal of Geotechnical Engineering 119(4) (1993).

[3] N. Hataf, M.R. Razavi, Model tests and finite element analysis of bearing capacity of ring footings on oose sand, IRANIAN JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY TRANSACTION B- ENGINEERING, 27(B1) (2003) 0-0.

[4] J.H. Boushehrian, N. Hataf, Experimental and numerical investigation of the bearing capacity of model circular and ring footings on reinforced sand, Geotextiles and Geomembranes, 21(4) 256-241 (2003).

[5] A.M. Karaulov, Static solution of the limiting-pressure problem for ring foundations on soil beds, Soil mechanics and foundation engineering, 42(6) (2005).

[6] J. Kumar, P. Ghosh, Bearing capacity factor Nγ for ring footings using the method of characteristics, Canadian Geotechnical Journal, 42(5) (2005) 1474-1484.

[7] M.E. Sawwaf, A. Nazir, Behavior of eccentrically loaded small scale ring footings resting on reinforced layered soil, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138(3) (2012).

[8] D. A., O. M., L. M., Y. A., Analysis of Ring Footing using Field Test Result, Geotechnical Testing Journal, 35(4) (2012) 575-586.

[9] O. Sargazi, E. Seyedi Hosseininia, Bearing capacity of ring footings on cohesionless soil under eccentric load, Computers and Geotechnics, 92 (2017) 169-178.

[10] G.G. Meyerhof, Some Recent Research on the Bearing Capacity of Foundations, Canadian Geotechnical Journal, 1(1) (1963) 16-26.

[11] J.B. Hansen, A revised and extended formula for bearing capacity Danish Geotechnical Institute, 28 (1970).

[12] R. Butterfield, J. Ticof, The use of physical models in design. Discussion, Proc. 7Th Eur. Con& Soil Mech, 4 (1979) 259-261.

[13] M. Georgiadis, R. Butterfield, Displacements of footings on sand under eccentric and inclined loads, Canadian Geotechnical Journal, 25(2) (1988) 199-212.

[14] R. Nova, L. Montrasio, Settlements of shallow foundations on sand, Géotechnique, 41(2) (1991) 243-256.

[15] G. Gottardi ,R. Butterfield, On the bearing capacity of surface footings on sand under general planar loads, Soils and foundations, 33(3) (1993) 68-79.

[16] G. Gottardi ,R. Butterfield, The displacements of a model rigid surface footing on dense sand under general planar loading, Soils and foundations, 35(3) (1995) 71-82.

[17] G. Gottardi, G.T. Houlsby, R. Butterfield, Plastic response of circular footings on sand under general planar loading, Géotechnique, 49(4) (1999) 453-469.

[18] B. Bienen , B. W. Byrne , G. T. Houlsby, M. J.Cassidy, Investigating six-degree-of-freedom loading of shallow foundations on sand, Ge´otechnique 56(6) (2006) 367–379.

[19] G.T. Houlsby, M.J. Cassidy, A plasticity model for the behaviour of footings on sand under combined loading, Géotechnique, 52(2) (2002) 117-129.

[20] M.J. Cassidy, B.W. Byrne, G.T. Houlsby, Modelling the behaviour of circular footings under combined loading on loose carbonate sand, Géotechnique, 52(10) (2002) 705-712.

[21] H. A. Taiebat, J. P. Carter, A failure surface for circular footings on cohesive soils, Ge´otechnique 60(4) (2010) 265–273.

[22] C. Vulpe, B. Bienen, C. Gaudin, Predicting the undrained capacity of skirted spudcans under combined

loading, Ocean Engineering 74 (2013) 178–188.

[23] Z. Shen, X. Feng, S. Gourvenec, Undrained capacity of surface foundations with zero-tension interface under planar V-H-M loading, Computers and Geotechnics 73 (2016) 47–57.

[24] S. Gourvenec, Shape effects on the capacity of rectangular footings under general loading, Géotechnique, 57(8) (2007) 637-646.

[25] C. Vulpe, S. Gourvenec, M. Power, A generalised failure envelope for undrained capacity of circular shallow foundations under general loading, Géotechnique Letters, 4(3) (2014) 187-196.

[26] P. Rao, Y. Liu, J. Cui, Bearing capacity of strip footings on two-layered clay under combined loading, Computers and Geotechnics, 69 (2015) 210-218.

[27] C. Tang, K.-K. Phoon, K.-C. Toh, Effect of footing width on Nγ and failure envelope of eccentrically and obliquely loaded strip footings on sand, Canadian Geotechnical Journal, 52(6) (2014) 694-707.

[28] J. Tistel, G. Grimstad, G.R. Eiksund, A macro model for shallow foundations on granular soils describing non-linear foundation behavior, Computers & Structures, (2017).

[29] ا. صادقی فاضل, ج. بلوری بزاز, بررسی آزمایشگاهی تاثیر حالت بارگذاری بر رفتار پی های سطحی واقع بر خاک ماسه ای, نشریه مهندسی عمران (امیرکبیر, ۲۰۱۹) .

[30] S. Benmebarek, M.S. Remadna, N. Benmebarek, L. Belounar, Numerical evaluation of the bearing capacity factor Nγ′ of ring footings, Computers and Geotechnics, 44 (2012) 132-138.

[31] E. Seyedi Hosseininia, Bearing Capacity Factors of Ring Footings, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 40 (2016).

[32] Jumikis, A. R. Theoretical soil mechanics, Van Nostrand Reinhold company,Canada (1969).

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

A. H. Sadeghi fazel, J. Bolouri Bazaz, An Experimental Investigation of Ring Footings Resting on Granular Material Subject to Combined V-H-M Loading, Amirkabir J. Civil Eng., 53(4) (2021): 1607-1622.

DOI: 10.22060/ceej.2020.17071.6450