



An Experimental Investigation of Ring Footings Resting on Granular Material Subject to Combined V-H-M Loading

A. H. Sadeghi fazel, J. Bolouri Bazaz*

Civil Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ABSTRACT: In some structures, such as oil platforms and wind turbines, depending on the type of utilization, the footing is subjected to combined vertical load, horizontal load, and bending moment (V-H-M). In this study, the behavior of the ring footings resting on sand subjected to combined V-H-M loading is experimentally investigated by conducting 100 tests using six load paths. Three values for the diameter ratio of the ring footing models are assumed, including $n=0.2$, 0.4 , and 0.6 , along with a circular foundation ($n=0$). The failure points were determined, on the basis of load-settlement diagrams, and by using the set of these points, the failure envelope was plotted in the vertical load-horizontal load, vertical load-bending moment, and horizontal-bending moment spaces. This failure envelope follows a parabolic curve in V-H and V-M/B spaces. The results indicate a parabolic curve for the failure envelope in V-H and V-M/B spaces which is dependent upon the diameter ratio. Moreover, the most efficient of a ring footing during eccentric or inclined loading takes place when n is within a range from 0.2 to 0.4 .

Review History:

Received: Aug. 16, 2019

Revised: Jan. 03, 2020

Accepted: Jan. 03, 2020

Available Online: Apr. 03, 2020

Keywords:

Experimental Modeling

Ring Footing

Combined Loading

Sandy Soil

Rupture Surface

1. Introduction

Ring footing is a special type of shallow foundation which is circular and hollow. The ring footing sometimes can provide a larger bearing capacity in comparison to a circular footing with the same diameter. The ring footings are used for supporting telecommunication towers, silos, bridge piers, advertisement boards, coastal and offshore structures. Vertical bearing capacity and settlement of ring footings are considered by researchers with various methods [1-6]. Based on the type of structure, the foundation may be affected by the inclined or eccentric loading or both of them. Classical researchers have studied the bearing capacity of shallow foundations under the aforementioned loads and reported some empirical factors [7, 8]. The inclined or eccentric loading can be considered as a combination of vertical force (V), horizontal force (H), and moment (M). This combination can affect the footing behavior. Some researchers investigated the behavior of shallow footings under combined loading including V-H-M, to find the mechanism of soil failure. This allows the plot of the three-dimensional failure envelope for a shallow footing. The behavior of a shallow foundation under different loading paths can be evaluated using a 3D failure envelope. Each point inside the failure envelope represents a state of possible loading, and the points on the border indicate the state of failure occurrence. In addition, if a point is outside the failure envelope, it is considered an impossible

point [9-15]. The aforementioned literature review indicates that researchers have focused on the effect of the diameter ratio upon settlement and bearing capacity of ring footings under vertical load. In addition, some studies were carried out to find the optimum diameter ratio when only a vertical load was applied on the ring footing. However, no attempt has been ever made to investigate the bearing capacity of a ring footing behavior that supports combined loading as V-H-M. Therefore, the current study investigates the bearing capacity of the ring footing under combined loading by considering various loading paths for different diameter ratios. The obtained results are used for plotting in the three-dimensional failure envelope of ring footings within V-H-M/B space.

2. Methodology

In this study, one circular and three-ring footings with a diameter ratio of 0.2 , 0.4 , and 0.6 were defined. The outer diameter of all footings was 200 -mm and made from 20 -mm-thick steel. The footings model were located on the soil surface ($D_f = 0$), and some sand was glued to the underside of each footing to get coarse, and thus to increase the interface friction. Drawing a failure envelope in V-H-M/B space for sandy soils needs to define various loading paths. By combining vertical and horizontal loads as well bending moment, six loading paths were tested as described below:

*Corresponding author's email: bolouri@um.ac.ir



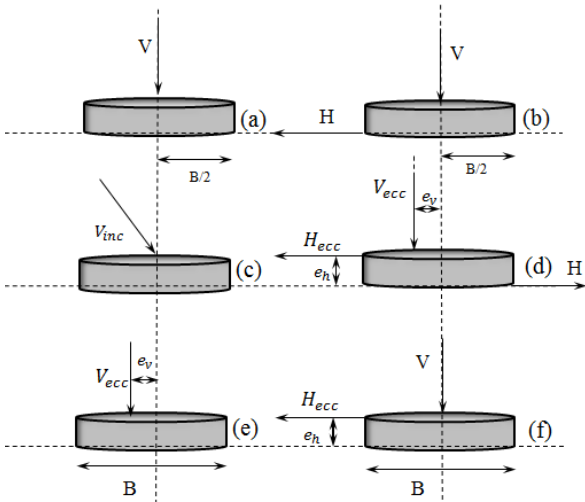


Fig. 1. Loading states

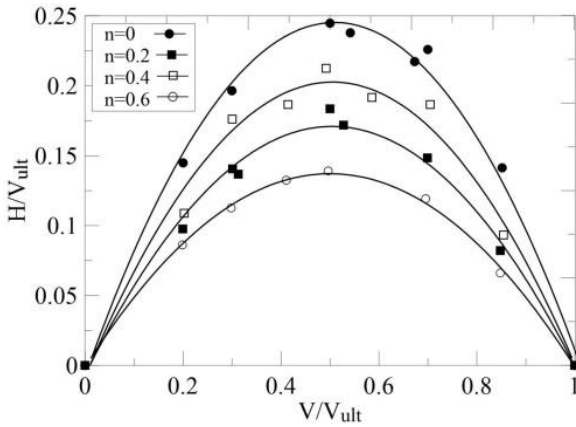


Fig. 2. Failure envelope of the ring footing in $H/V_{ult} - V/V_{ult}$ space

V-C path: The purpose of this loading path was to obtain the bearing capacity of both ring and circular footings under the central vertical load (V_{ult}) (Fig. 2(a)).

V-H path: Vertical loads of $0.2V_{ult}$, $0.3V_{ult}$, $0.5V_{ult}$, $0.7V_{ult}$, and $0.85V_{ult}$ were applied on the footings model, while the vertical load keeps constant, horizontal loading was applied until reaching failure (Fig. 2(b)).

I-C path: The inclined load was applied at the center of each footing by a constant angle of α with respect to the vertical direction as shown in Fig. 2(d).

M-V path: The moment was applied on the footing as a couple. First, the ring footing was vertically loaded ($0.3V_{ult}$, $0.5V_{ult}$, and $0.7V_{ult}$), then by keeping the vertical loads constant, the horizontal couples were applied.

E-V path: Vertical loading with a constant eccentricity (e_v) applied until reaching failure Fig. 1(e).

V-H-M path: Vertical loading was applied on the footing until a constant value ($0.3V_{ult}$, $0.5V_{ult}$, and $0.7V_{ult}$), then horizontal forces were applied with two certain eccentricities as shown in Fig. 1(f).

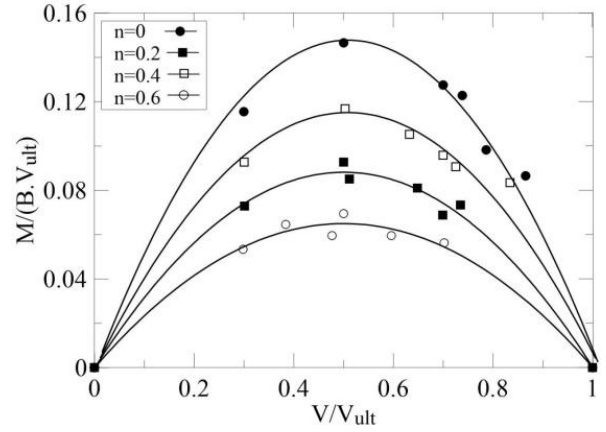


Fig. 3. Failure envelope of the ring footing in $M/(B.V_{ult}) - V/V_{ult}$ space

The failure criterion for the whole loading path is that the ultimate slope of each graph becomes zero. Since the sandy soil used in this study had a medium density, no maximum point was found in load-settlement curves.

The sand used in this research was chosen from Firuzkuh located in Tehran province, Iran. The internal friction angle of the soil was measured 36° by conducting a direct shear test. The specific gravity of the soil particles was determined 2.71 by the water pycnometer method. The pluviation system was employed to prepare medium sand with 70% relative density. Based on this density, dry unit weight was calculated as 15.2 kN/m^3 . The maximum and the minimum dry unit weights of the sand were found to be 16.38 and 14.05 kN/m^3 , respectively, using a vibratory table

3. Discussion and Results

Three spaces including V-H, M/B-V, and M/B-H are considered to investigate the shape of the failure envelope. Concerning the experimental observation, the failure envelope through V-H, M/B-V, and M/B-H spaces are investigated. It can be estimated as a parabolic curve for the failure envelope to predict the behavior of a ring footing. To compare the results, different failure envelopes are plotted in a dimensionless $V/V_{ult} - H/V_{ult}$ space. This provides an investigation into parameters do not affect on ultimate load (see Fig. 2).

The failure envelope for each diameter ratio is drawn in M/B-V space. By drawing the failure envelope in a dimensionless space such as $M/BV_{ult} - V/V_{ult}$, it is found that the graph maximum occurs at $0.5V_{ult}$. In addition, the most value of the envelope depends on the diameter ratio of the ring footing as shown in Fig. 3.

Three failure envelopes are drawn in $H/V_{ult} - M/BV_{ult}$ space for each diameter ratio using three plates with constant vertical loads of $0.3V_{ult}$, $0.5V_{ult}$, and $0.7V_{ult}$. Fig. 4 depicts three failure envelopes through $H/V_{ult} - M/BV_{ult}$ space for a ring footing with $n=0.4$. The results indicate that the biggest failure envelope in $H/V_{ult} - M/BV_{ult}$ space is related to $V=0.5V_{ult}$.

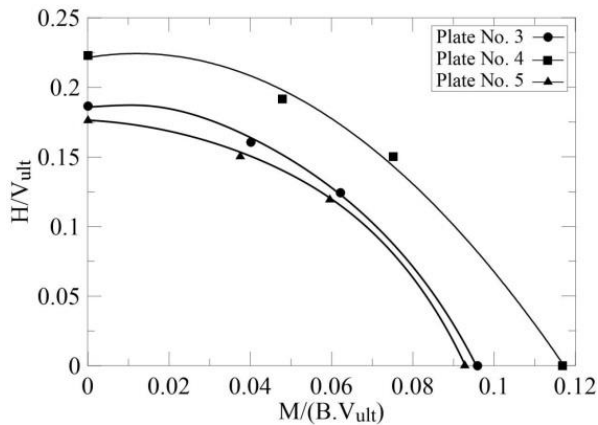


Fig. 4. Failure envelope of the ring footing in H/V_{ult} - $M/(B.V_{ult})$ space

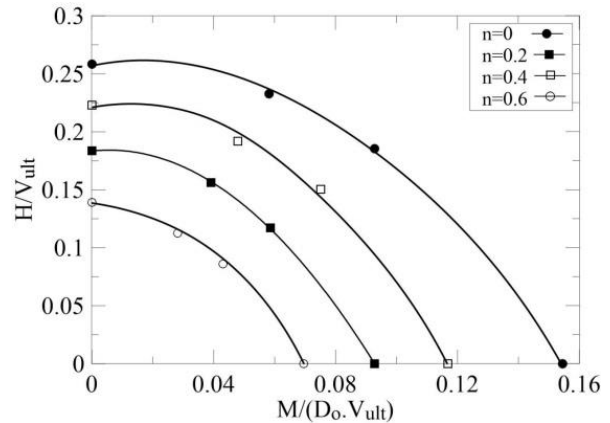


Fig. 5. Influence of diameter ratio of the ring footing on the size of plate 4 in H/V_{ult} - M/BV_{ult} space

Fig. 5 shows the effect of the diameter ratio on the failure envelopes in H/V_{ult} - M/BV_{ult} space.

Combining the results derived for the failure envelopes in 2D space leads to an equation that expresses the 3D shape of the failure envelope as follows:

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

Equation (1) describes the geometrical shape of a rugby ball, which is the shape of a ring footing failure envelope.

4. Conclusions

In this study, 100 experimental tests are performed to investigate the behavior of the ring footings resting on sandy soils under combined loading. Due to this, eight loading paths are considered and the obtained results are summarized as follows:

(1) Increase in the vertical load does not increase the horizontal bearing capacity of a ring footing all the time.

(2) The failure envelopes in H-V and M/B-V spaces are governed by a parabola, in which the maximum position of the curve occurs at $0.5V_{ult}$.

(3) The failure state is independent of the loading path and it is enough to touch the failure envelope through an arbitrary path.

(4) The geometrical shape of the failure envelope in M/BV_{ult} - H/V_{ult} - V/V_{ult} space is quite similar to a rugby ball, regardless of the other parameters of footing and soil. The volume of this 3D envelope varies with the ring footing diameter ratio.

References

[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] 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).

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

[4] 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).

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

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

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

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

[9] 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.

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

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

[12] C. Vulpe, B. Bienen, C. Gaudin, Predicting the undrained capacity of skirted spudcans under combined loading, Ocean Engineering 74 (2013) 178-188.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

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): 369-372.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17071.6450](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17071.6450)





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

امیر هوشنگ صادقی فاضل، جعفر بلوری بزاز*

گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

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

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 با استفاده 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 با استفاده 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. در ادامه با استفاده 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 هنگامی که تحت بارگذاری خارج محور یا مایل یا هردو قرار دارد دارای بازدهی بیشتری نسبت به سایر حالات است.

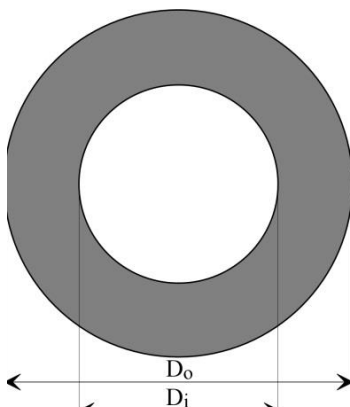
۱- مقدمه

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 این گونه از پی‌ها نسبت قطر است که به‌صورت رابطه‌ی (۱) تعریف می‌شود (شکل ۱).

$$\eta = \frac{D_i}{D_o} \quad (1)$$

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

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



شکل ۱. پی حلقوی
Fig. 1. Ring footing



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 $0/9$ به یک پی نواری اشاره کرد. السنند 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 بر روی ماسه انجام شده‌است نشان می‌دهد که این‌گونه پی‌ها در نسبت شعاعی $0/2$ تا $0/4$ 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] بر مبنای روش تعادل حدی رابطه‌ای 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] به کمک 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 با توجه 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 (گنورگیادیس و باترفیلد [۱۳] و نوا و مونترازیو [۱۴]) در جهت 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 در جهت پوش گسیختگی در صفحات دوبعدی ارائه نمودند. پس از آن گوتاردی و همکاران [۱۷] رفتار پی دایره‌ای بر روی خاک ماسه‌ای تحت بارگذاری همه‌جانبه تحت مسیرهای بارگذاری گوناگون را بررسی کردند. با استفاده 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 بین و همکاران [۱۸] به بررسی رفتار پی‌های سطحی با شش درجه آزادی تحت بارگذاری ترکیبی پرداختند.

هلزبی و کاسیدی [۱۹] با استفاده 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 (تیبب 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] با استفاده 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]، راثو و همکاران [۲۶]، تانگ و همکاران [۲۷] و تیسنتل 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 با استفاده از مسیرهای بارگذاری گوناگون با نسبت‌های قطر مختلف ارزیابی شده‌است. در این راستا با انجام صد

آنها بار مایل با زاویه اعمال بار ثابت می‌باشد.

* مسیر $M-V$: این نوع بارگذاری که اولین بار در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است به صورت 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 ($0,3V_{ult}$ ، $0,5V_{ult}$ ، $0,7V_{ult}$)، 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 با استفاده از یک کابل (که تنها مقاومت کششی دارد) به یک دیواره‌ی صلب متصل می‌گردد. به این ترتیب پی تا رسیدن به گسیختگی تحت لنگر خمشی خالص حاصل از کوپل نیرو قرار می‌گیرد. دوران پی با استفاده از سه تغییر مکان سنج که به صورت مثلثی روی پی نصب شده‌اند، محاسبه می‌شود.

* 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، به دست آوردن نقاط گسیختگی به منظور تعیین سطح گسیختگی و بررسی ظرفیت باربری پی حلقوی تحت بارگذاری خارج محور می‌باشد.

* مسیر $V-H-M$: در این مسیر بارگذاری پی حلقوی به طور هم‌زمان تحت بار قائم، بار افقی و لنگر خمشی قرار می‌گیرد. در این حالت نیز بار قائم پس از رسیدن به مقدار مشخص ($0,3V_{ult}$ ، $0,5V_{ult}$ ، $0,7V_{ult}$) ثابت نگه داشته می‌شود و بار افقی به صورت خارج محور با دو مقدار خروج از محوری به پی اعمال می‌شود. به این ترتیب پی تحت بارگذاری هم‌زمان قائم، افقی و لنگر خمشی قرار می‌گیرد.

در تمامی مسیرهای تعریف شده معیار گسیختگی باتوجه به نمودار نیرو- جابه‌جایی یا لنگر خمشی- دوران هنگامی در نظر گرفته شده است که شیب نمودار به سمت صفر میل کند. به دلیل تراکم متوسط خاک ماسه‌ای آزمایش شده در این پژوهش نقطه‌ی بیشینه در فضای بار نشست مشاهده نمی‌شود. مسیرهای بارگذاری معرفی شده در فضای سه‌بعدی $V-H-M/B$ در شکل (۲) نشان داده شده است. نقاط انتهایی مسیرهای بارگذاری که نشان‌دهنده‌ی وضعیت گسیختگی می‌باشند، پوش گسیختگی پی مربوط را تشکیل می‌دهند.

۳-۱- برنامه‌ی آزمایش‌ها

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

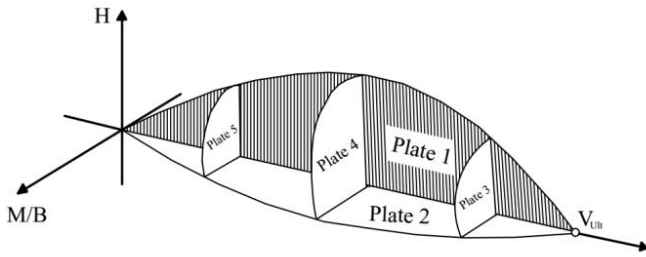
۳- روند انجام پژوهش

در این پژوهش چهار مدل پی به شکل حلقه و دایره به قطر خارجی ۲۰ سانتی‌متر و نسبت قطر $0,2$ ، $0,4$ و $0,6$ از جنس فولاد $ST37$ با ضخامت ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. به منظور افزایش اصطکاک، کف پی که بر روی سطح خاک قرار می‌گیرد ($Df=0$) با چسباندن ماسه زبر شده است. برای رسم پوش گسیختگی این پی‌ها در فضای کلی $V-H-M/B$ نیاز به تعریف چند مسیر بارگذاری در فضای سه‌بعدی می‌باشد؛ از این رو، شش مسیر بارگذاری که ترکیبی از بار قائم، بار افقی و لنگر خمشی می‌باشند مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. این شش مسیر که به صورت نمادین در شکل (۲) نشان داده شده‌اند به صورت زیر تعریف می‌شوند:

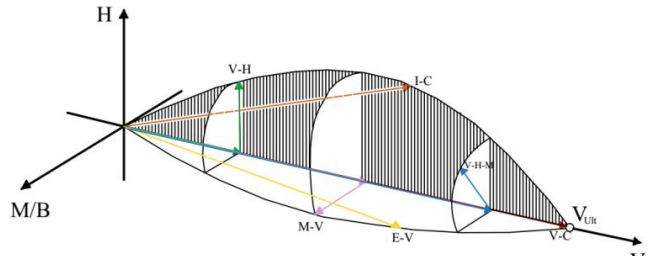
* مسیر $V-C$: هدف از این مسیر بارگذاری به دست آوردن ظرفیت باربری پی حلقوی و دایره‌ای تحت بارگذاری قائم مرکزی می‌باشد. مقدار $Vult$ با استفاده از این سری آزمایش‌ها به دست می‌آید. رفتار پی در فضای بار-نشست به گونه‌ای است که بار وارد به پی پس از رسیدن به مقدار مشخص به حالت تقریباً پایدار درمی‌آید و می‌توان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

* مسیر $V-H$: در این مسیر، بارگذاری قائم تا مقدار معین ($0,2V_{ult}$ ، $0,3V_{ult}$ ، $0,5V_{ult}$ ، $0,7V_{ult}$ ، $0,85V_{ult}$) انجام می‌شود سپس با ثابت نگه داشتن آن، بار افقی تا رسیدن به گسیختگی به مدل اعمال می‌گردد. بار نهایی به دست آمده از آزمایش‌های سری اول مبنای آزمایش‌های سری دوم می‌باشد.

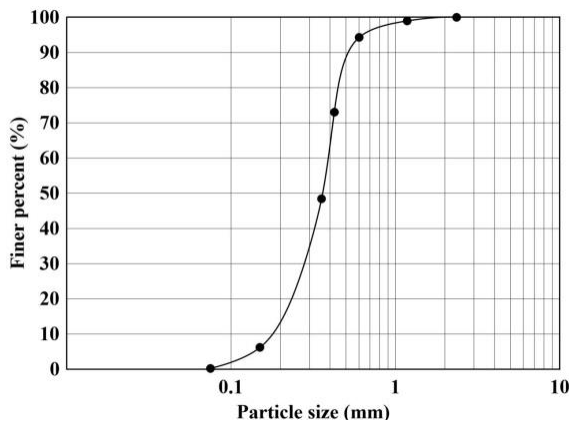
* مسیر $I-C$: در این حالت بار به صورت مرکزی مایل با زاویه‌ی انحراف ثابت نسبت به امتداد قائم به مدل پی اعمال می‌شود. هدف از انجام آزمون‌های این سری، به دست آوردن نقاط گسیختگی به منظور تعیین سطح گسیختگی و بررسی ظرفیت باربری پی حلقوی تحت بارگذاری مایل می‌باشد. لازم به ذکر است در این حالت بار قائم و افقی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



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



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



شکل ۴. منحنی دانه بندی خاک
Fig. 4. Particle size distribution of the used sand

فیروزکوه بوده است که منحنی دانه بندی آن در شکل ۴ نشان داده شده است. برای انجام آزمایش‌ها از یک مخزن به ابعاد ۱×۱ متر و ارتفاع ۱ متر استفاده شده است، این ابعاد به منظور جلوگیری از به وجود آمدن اثر مرزها بر نتایج انتخاب شده اند [۹]؛ بنابراین باتوجه به این که قطر مدل پی ۲۰ سانتی متر می باشد، ابعاد مخزن بیش از پنج برابر قطر پی یعنی ۱/۱ متر در نظر گرفته شده است. در این پژوهش آزمایش‌ها بر روی خاک با تراکم متوسط انجام شده و از سیستم بارش ماسه [۲۹]

به منظور ساده سازی روند به دست آمدن پوش‌های گسیختگی، پنج صفحه مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شده است. هب صفحه ۱ که در فضای دوبعدی V-H قرار دارد مربوط به حالتی است که هیچ گونه لنگر خمشی به سطح پی اعمال نمی شود. صفحه ۲ در فضای V-M/B تعریف شده است که در آن مقدار بار افقی صفر است. صفحات ۳، ۴ و ۵ در فضای H-M/B تعریف شده اند با این تفاوت که هر یک در صفحه‌ای با مقدار بار قائم ثابت مشخص قرار دارند. صفحات ۳، ۴ و ۵ به ترتیب مربوط به $0.3V_{ult}$ ، $0.7V_{ult}$ و $0.5V_{ult}$ می باشند. آزمایش‌ها به نحوی تعریف شده اند که صفحات پنجگانه‌ی مزبور در فضای مربوط قابل رسم باشند و بتوان معادله‌ی آنها را به دست آورد. با داشتن معادله‌ی این صفحات می توان معادله‌ی پوش‌های گسیختگی را در فضای مربوط تعیین نمود. باتوجه به این توضیحات تعداد صد آزمون آزمایشگاهی در جهت به دست آمدن پوش گسیختگی پی حلقوی با چهار نسبت قطر انجام شد که جزئیات آن در جدول ۱ آمده است.

۲-۳- آماده سازی نمونه ها

خاک مورد آزمایش از نوع ماسه‌ی استاندارد شماره‌ی ۱۶۱

جدول ۱. مشخصات آزمایش‌ها

Table 1. Characteristics of tests

ردیف	تعداد آزمایش‌ها	مسیر بارگذاری	V/V_{ult}	e_v	α (Degree)	e_1 (mm)	n
۱	۴	V-C	-	-	-	-	۰.۰۲، ۰.۰۴، ۰.۰۶
۲	۲۰	H-V	۰/۲، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷، ۰/۸۵	-	-	-	۰.۰۲، ۰.۰۴، ۰.۰۶
۳	۸	I-C	-	-	۱۸، ۲۴	-	۰.۰۲، ۰.۰۴، ۰.۰۶
۴	۲۰	M-V	۰/۲، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷، ۰/۸۵	-	-	۵۰	۰.۰۲، ۰.۰۴، ۰.۰۶
۵	۱۲	E-V	-	B/10، B/8، B/6	-	-	۰.۰۲، ۰.۰۴، ۰.۰۶
۶	۳۶	V-H-M	۰/۳، ۰/۵، ۰/۷	-	-	۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰	۰.۰۲، ۰.۰۴، ۰.۰۶

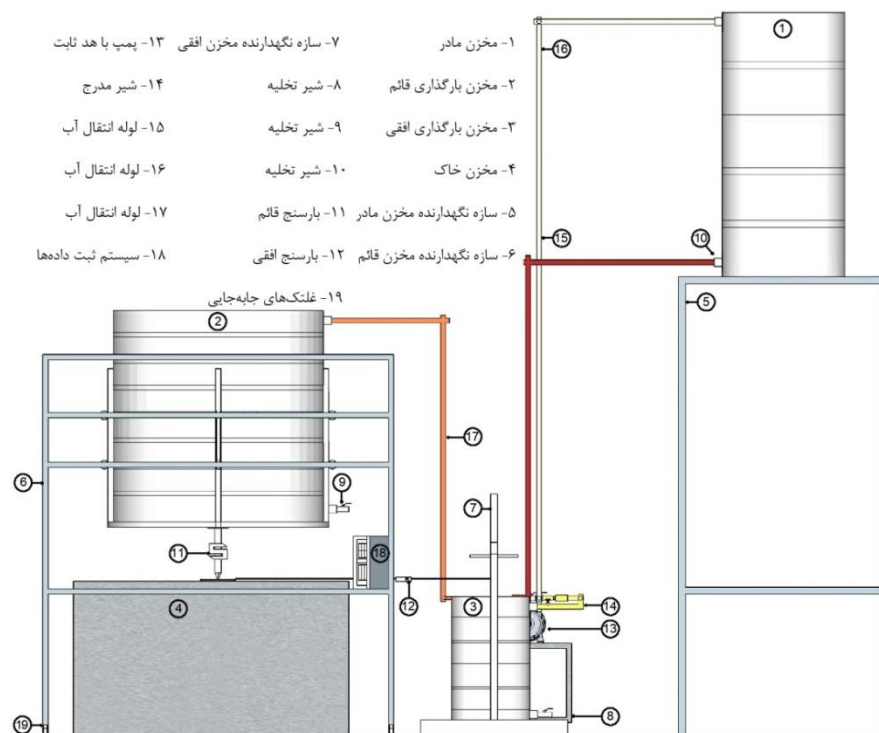
می‌شود. این مخازن یکی مربوط به بارگذاری قائم و دیگری مربوط به بارگذاری افقی می‌باشد. پس از خروج آب از پمپ، آب امکان حرکت در دو مسیر را دارد که این مسئله با استفاده از شیرهایی که در این دو مسیر کارگذاری شده‌است قابل مدیریت و فرماندهی است. زمانی که هدف، قرارگیری پی تحت بارگذاری قائم می‌باشد، شیر مربوط 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 بر روی یک چهارپایه‌ی متحرک سوار است و به وسیله‌ی هشت غلتک به آن متصل می‌شود. در چهار وجه سبد مذکور چهار ریل فلزی قرار داده شده‌است که دو غلتک بر روی هر ریل قرار گرفته‌اند و از حرکت جانبی و انحراف سبد و بالطبع آن مخزن، از راستای قائم جلوگیری می‌کنند و تنها اجازه‌ی حرکت در راستای 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 به صورت قائم به این صفحه جوش شده‌است و

در جهت 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 به ترتیب ۳۶ درجه و ۱۵/۲ کیلونیوتن بر مترمکعب می‌باشد. هم‌چنین چگالی، و وزن مخصوص بیشینه و کمینه‌ی ماسه به ترتیب 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 می‌آورد. این سیستم دارای قسمت‌های مختلفی می‌باشد که در شکل (۵) نشان داده شده‌است. اساس کار این دستگاه بر مبنای بارگذاری با استفاده از وزن آب است. ابتدا آب در یک مخزن اصلی که در ارتفاع ۲/۵ متری قرار دارد ذخیره می‌شود. این آب به وسیله‌ی شیر تخلیه از مخزن اصلی تخلیه می‌شود و آب به وسیله‌ی شیلنگ به سمت پمپ آب هدایت می‌شود. آب وارد شده به پمپ با هد ثابت به سمت مخازن بارگذاری پمپاژ



شکل ۵. تصویر شماتیک از چیدمان سیستم آزمایشات

Fig. 5. Schematic view of loading system

ارتفاع دل خواه به نمونه وارد شود و نحوه رفتار مدل پی تحت لنگر ناشی از بار افقی نیز مطالعه شود. پس از پایان عملیات بارگذاری و پایان آزمایش با شیرهای تخلیه موجود در هر دو مخزن بارگذاری، آب مخزن تخلیه می شود و با استفاده از پمپ به سمت مخزن آب مادر پمپاژ می شود و دستگاه برای انجام آزمایش بعدی آماده خواهد بود. تصویر دستگاه بارگذاری در شکل ۶ نشان داده شده است.

برداشت تغییرمکان ها در حین آزمایش با استفاده از سه تغییرمکان سنج قائم با چیدمان مثلثی برای قرائت نشست قائم و یک عدد تغییرمکان سنج افقی برای قرائت تغییرمکان افقی انجام می شود. بار وارد شده به سطح پی و بار جانبی با استفاده از دو عدد بارسنج قائم و افقی ثبت می شوند. داده های به دست آمده از ابزار دقیق توسط یک سیستم ثبت داده ضبط و به رایانه منتقل می شوند.

۴- مشاهدات آزمایشگاهی

مشاهدات آزمایشگاهی تحت مسیره های بارگذاری بیان شده در شکل های ۷ تا ۱۳ آورده شده است. رفتار پی حلقوی با چهار نسبت قطر در مسیر بارگذاری V-C در شکل ۷ نشان داده شده است. 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، به ترتیب در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده است. انطباق تقریبی نتایج تا قبل از اعمال بار افقی نشان از قابلیت تکرارپذیری آزمایش ها دارد.

نمودار تغییرات بار مایل در مقابل ضریب جابه جایی 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 شده است. ضریب جابه جایی به صورت $f = \sqrt{v^2 + h^2}$ تعریف می شود که در آن v نشست قائم و h جابه جایی افقی پی سطحی می باشد. همان گونه که دیده می شود با افزایش زاویه 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 شده است، نشان می دهد هنگامی که ۵۰ درصد بار نهایی به پی اعمال شود مقاومت آن در برابر لنگر بیشتر از سایر حالات است. به عبارتی سطح گسیختگی

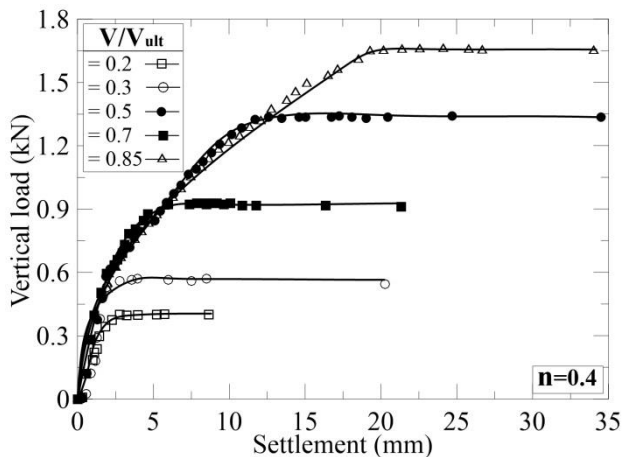
طرف دیگر سر میله که به صورت پیکانی درآمده است بر روی مدل پی قرار داده شده است. با پر شدن مخزن مدل پی تحت بارگذاری قائم قرار داده می شود. سر پیکانی میله ی بارگذاری به دلیل به وجود آمدن اتصال مفصلی میان میله و مدل پی قرار دارد و از انتقال لنگر از میله به مدل پی جلوگیری می کند. بارگذاری افقی به دلیل این که باعث حرکت مدل پی می شود، می تواند باعث انحراف مخزن بارگذاری قائم شود. برای جلوگیری کردن از این مسئله و بروز خطا در آزمایش ها سازه ی نگهدارنده ی مخزن قائم که در شکل (۵) با شماره ی ۶ نشان داده شده است، با استفاده از غلتک هایی که با شماره ی ۱۹ نشان داده شده اند قابلیت جابه جایی دارند که این مسئله مانع از بروز خطا در آزمایش ها می شود. لازم به ذکر است غلتک ها و کف کاملاً صیقلی شده اند تا از ایجاد نیروی مقاوم اصطکاک تا حد ممکن کاسته شود.

با توجه به این که مخزن بارگذاری قائم قابلیت جابه جایی افقی را به واسطه ی چهار پایه ی متحرک دارد، لذا برای بارگذاری خارج محور با جابه جا کردن سیستم و قرار دادن میله ی بارگذاری در محل مورد نظر و خروج از محوری کافی امکان بارگذاری خارج محور قائم نیز با این دستگاه فراهم است. با توجه 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 با استفاده از یک سیم که یک سر آن به مدل پی و سر دیگر به مخزن بارگذاری افقی متصل است انجام می شود. سیم بارگذاری از روی یک قرقره که قابلیت تنظیم ارتفاع دارد عبور می کند و بار افقی به این ترتیب به مدل پی اعمال می شود. به منظور تغییر در میزان بارگذاری افقی، در محل ورودی آب به داخل مخزن بارگذاری افقی، شیر آب مدرجی تعبیه شده است که با استفاده از آن می توان میزان آب ورودی به داخل مخزن بارگذاری افقی را کنترل کرد. با توجه به این که هد ایجاد شده توسط پمپ ثابت است و همچنین طول مسیر آب و شکل مسیر آب در تمامی آزمایش ها ثابت می باشد، لذا افت هد ایجاد شده ی ناشی از عوامل ذکر شده نیز ثابت است و می توان میزان آب وارد شده 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 می ماند. لازم به ذکر است تغییر ارتفاع قرقره این امکان را فراهم می کند که بار افقی در هر



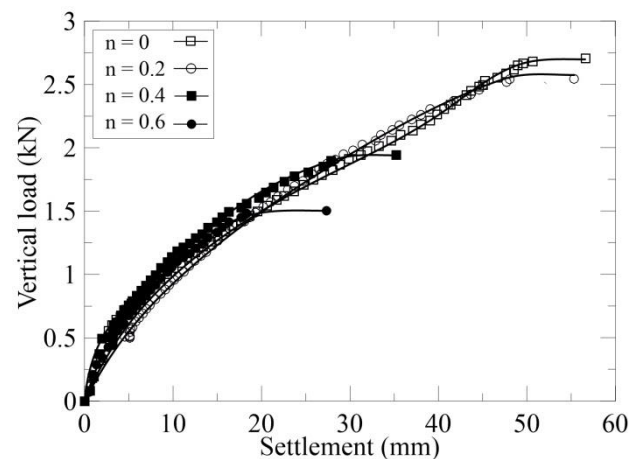
شکل ۶. دستگاه بارگذاری

Fig. 6. Loading system



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 ($n=0.4$)



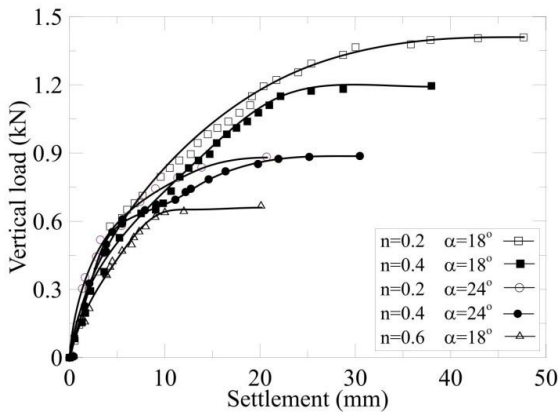
شکل ۷. بار قائم - نشست پی حلقوی با نسبت‌های شعاعی متفاوت

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

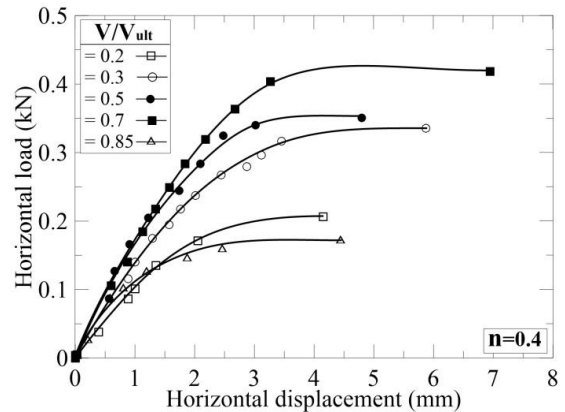
آخرین مسیر انتخاب شده مسیر بارگذاری V-H-M است که در آن پی تحت بارگذاری هم‌زمان بار قائم، افقی و لنگر خمشی قرار دارد. نتایج که در شکل (۱۳) نشان داده شده بیانگر این نکته است که ظرفیت باربری افقی پی حلقوی در این مسیر بارگذاری تابع مقدار بار قائم است و لنگر خمشی ناشی از بار افقی نیز عاملی تأثیرگذار خواهد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

در فضای M-H در صفحه‌ی $0.5V_{ult}$ بزرگ‌ترین سطح را خواهد داشت.

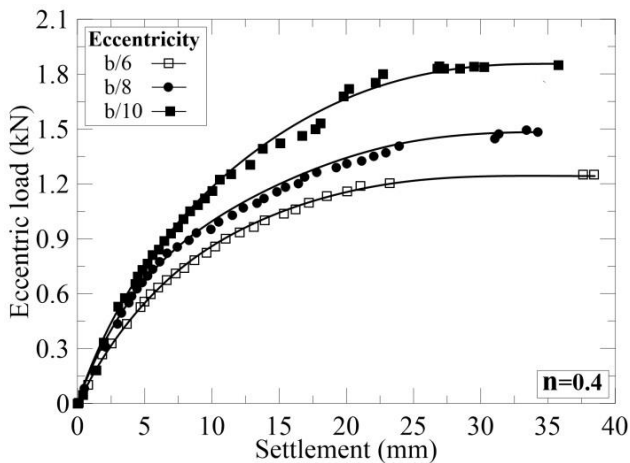
به‌منظور بررسی رفتار پی حلقوی با بار خروج از مرکز، مسیر بارگذاری E-V با خروج از محوری‌های $B/6$ ، $B/8$ ، $B/10$ و نسبت شعاعی ۰/۴ مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۱۲ ارائه شده‌است.



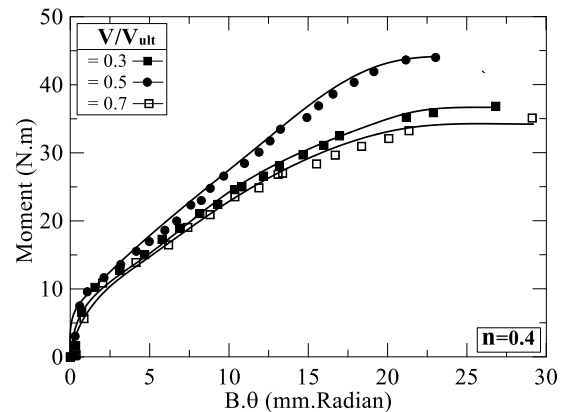
شکل ۱۰. بار مایل در مقابل جابه‌جایی پی حلقوی در مسیر I-C
 Fig. 10. Inclined load-displacement of ring footing in I-C path



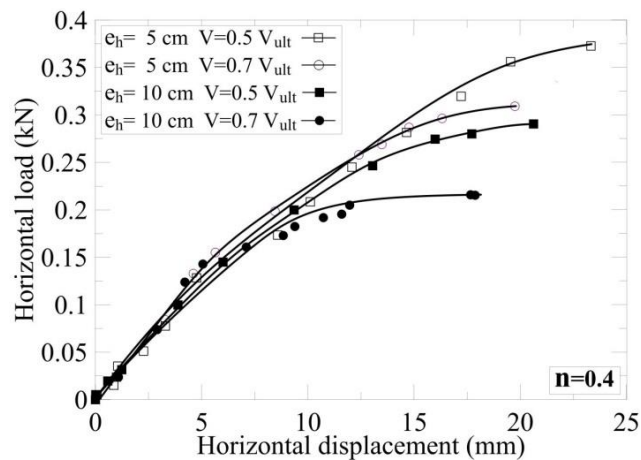
شکل ۹. بار افقی در مقابل جابه‌جایی افقی در مسیر V-H پی حلقوی با نسبت شعاعی ۰/۴
 Fig. 9. Horizontal load-horizontal displacement of ring footing in V-H loading path (n=0.4)



شکل ۱۲. بار خارج محور در مقابل جابه‌جایی پی حلقوی با نسبت شعاعی ۰/۴
 Fig. 12. Eccentric load-settlement of ring footing in E-V path (n=0.4)



شکل ۱۱. لنگر در مقابل 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)



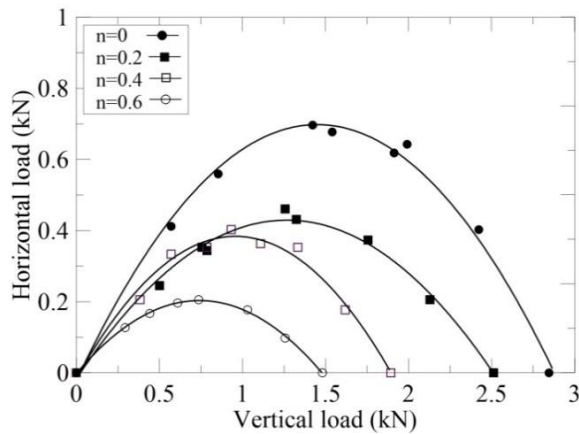
شکل ۱۳. بار افقی در مقابل جابه‌جایی افقی در مسیر V-H-M پی حلقوی با نسبت شعاعی ۰/۴
 Fig. 13. Horizontal load-horizontal displacement of ring footing in V-H-M loading path (n=0.4)

جدول ۲. مقادیر بار نهایی آزمایش‌ها در مسیرهای دو بعدی
Table 2. Ultimate load of tests in 2D loading paths

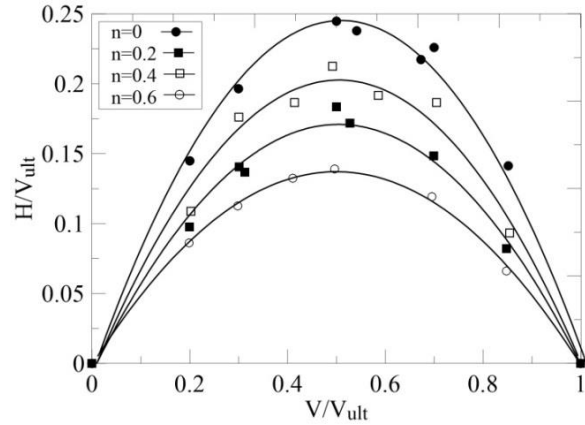
n=۰		n=۰/۲		n=۰/۴		n=۰/۶	
V-C	V _{ult} (N)	V-C	V _{ult} (N)	V-C	V _{ult} (N)	V-C	V _{ult} (N)
مسیر	۲۸۴۴/۹	مسیر	۲۵۱۱/۳۶	مسیر	۱۸۹۳/۳۳	مسیر	۱۵۰۸/۵۳
V/V _{ult} H (N)		V/V _{ult} H (N)		V/V _{ult} H (N)		V/V _{ult} H (N)	
۰/۲ ۴۱۲/۰۲		۰/۲ ۲۴۵/۲۵		۰/۲ ۲۰۶/۴۸		۰/۲ ۹۸/۱	
V-H	۰/۳ ۵۵۹/۱۷	V-H	۰/۳ ۳۵۳/۱۶	V-H	۰/۳ ۳۳۳/۵۴	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	
I-C		I-C		I-C		I-C	
α (Degree) H (N)		α (Degree) H (N)		α (Degree) H (N)		α (Degree) H (N)	
مسیر ۱۸ ۶۱۸/۰۳		مسیر ۱۸ ۳۴۳/۳۵		مسیر ۱۸ ۳۶۲/۹۷		مسیر ۱۸ ۱۴۷/۱۵	
۲۴ ۶۷۶/۸۹		۲۴ ۴۳۱/۶۴		۲۴ ۳۵۲/۸		۲۴ -	
M-V		M-V		M-V		M-V	
V/V _{ult} M (N.m)		V/V _{ult} M (N.m)		V/V _{ult} M (N.m)		V/V _{ult} M (N.m)	
۰/۳ ۶۵/۶۶		۰/۳ ۳۶/۵۵		۰/۳ ۳۵/۰۸		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-V		E-V		E-V		E-V	
e/B M (N.m)		e/B M (N.m)		e/B M (N.m)		e/B M (N.m)	
B/10 ۴۹/۲		B/10 ۳۶/۸۵		B/10 ۳۱/۵۶		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/V _{ult}	eh(mm)	H(N)	M(N.m)	V/V _{ult}	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	۵۰	۶۲۷/۲	۳۱/۴	۰/۵	۵۰	۳۶۲/۶	۱۸/۱
	۱۰۰	۴۹۹/۸	۵۰		۱۰۰	۲۸۴/۲	۲۸/۴
	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/V _{ult}	eh(mm)	H(N)	M(N.m)	V/V _{ult}	eh(mm)	H(N)	M(N.m)
۰/۳	۵۰	۲۹۴	۱۴/۷	۰/۳	۵۰	۱۲۵	۶/۳



(ب)



(الف)

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

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 با استفاده از نتایج آزمایش‌ها در مسیر بارگذاری E-V و M-V به دست آمده است. 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 به ترتیب در شکل‌های (الف-۱۵) و (ب-۱۵) نشان داده شده است. این پوش گسیختگی که نشان‌دهنده‌ی صفحه‌ی ۲ در فضای سه‌بعدی می‌باشد همواره یک منحنی درجه دو را نشان می‌دهد که بیشینه‌ی آن در $0.5V_{ult}$ رخ می‌دهد و مقدار آن بسته به نسبت قطر متغیر است.

۵-۳- پوش گسیختگی در فضای H-M/B

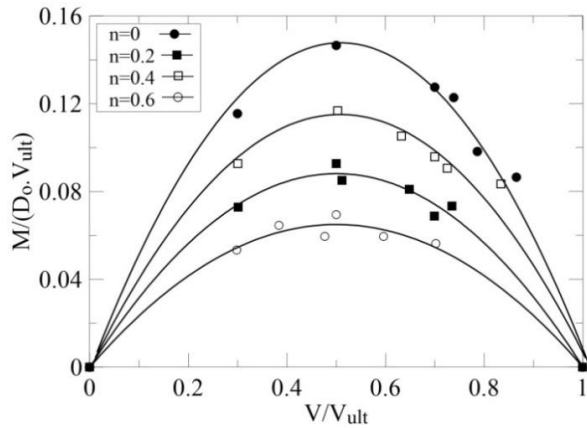
پوش گسیختگی در فضای H/V_{ult} - M/BV_{ult} در سه صفحه بار قائم ثابت $0.3V_{ult}$ ، $0.5V_{ult}$ و $0.7V_{ult}$ برای هر یک از نسبت‌های قطر پی حلقوی ترسیم شده است. این پوش‌ها هر یک با استفاده از پنج نقطه، که هر کدام نماینده‌ی یک آزمایش هستند، ترسیم شده‌اند. سه نقطه از نتایج مسیر بارگذاری V-H-M است که بار 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 به دست می‌آید. برآزش میان نقاط نشان‌دهنده‌ی ارتباط میان صفحات گسیختگی به دست آمده در آزمایش‌های قبل می‌باشد. در

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.

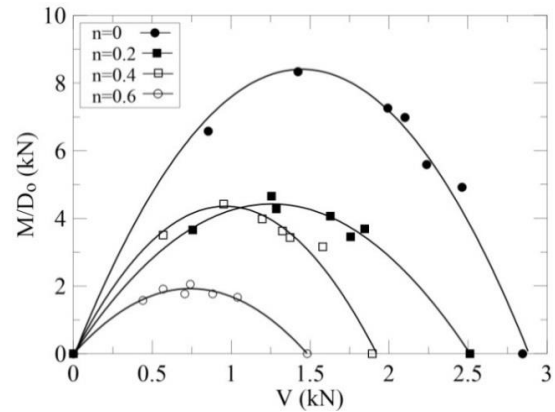
۵- پوش گسیختگی

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 با استفاده از هشت آزمایش به دست آمده، استفاده شده است. نقطه‌ی انتهایی نمودار که واقع بر محور افقی می‌باشد با استفاده از مسیر بارگذاری V-C به دست آمده و نشان‌دهنده‌ی ظرفیت باربری پی تحت بار قائم مرکزی است. برای به دست آمدن سایر نقاط از مسیر بارگذاری V-H و I-C استفاده شده است. منحنی درجه دوم که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی برآزش شده است، 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 (ب-۱۴) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد مقدار بار افقی قابل تحمل توسط پی حلقوی کاملاً به نسبت قطر وابسته است به گونه‌ای که در نسبت قطر 0.4 نسبت به حجم مصالح به‌کاررفته در مدل پی بیشترین بازدهی به دست می‌آید. هم‌چنین شکل پوش گسیختگی برای تمامی حالت‌ها از یک منحنی درجه دوم تبعیت می‌کند، که بیشینه‌ی آن در $0.5V_{ult}$ رخ می‌دهد



(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) 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.

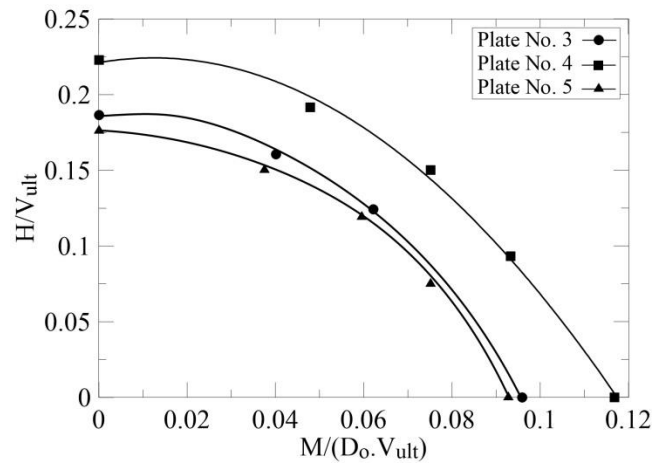
۶- تحلیل نتایج

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.

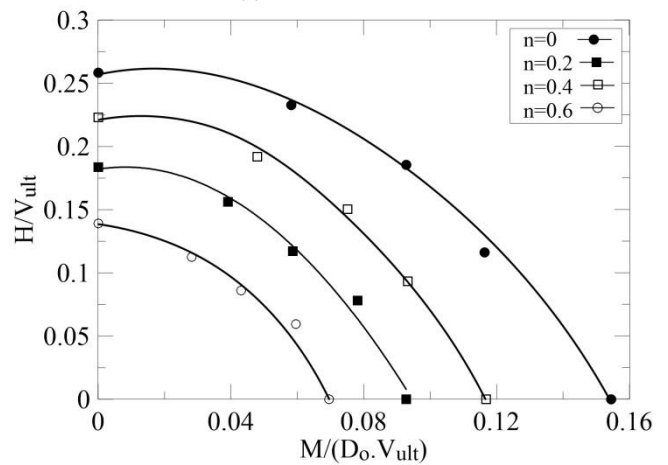
$$\frac{H}{V_{ult}} = \beta_1 \frac{V}{V_{ult}} (1 - \frac{V}{V_{ult}})^{\beta_2} \quad (2)$$

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 رابطه‌ی مشابه پوش گسیختگی در فضای $V/V_{ult}-H/V_{ult}$



شکل ۱۶. سطح گسیختگی پی حلقوی با نسبت قطر ۰/۴ بر روی خاک ماسه‌ای در فضای $H/V_{ult}-M/DoV_{ult}$
 Fig. 16. Failure envelope of ring footing in $H/V_{ult}-M/DoV_{ult}$ space ($n=0.4$)



شکل ۱۷. تأثیر نسبت شعاعی پی حلقوی بر اندازه‌ی صفحه‌ی ۴ در فضای $H/V_{ult}-M/DoV_{ult}$
 Fig. 17. Effect of diameter ratio on plate 4 in $H/V_{ult}-M/DoV_{ult}$ space

می‌آید، اما پارامترهای β_3 و β_1 که به ترتیب 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.

$$\left(\frac{H}{\beta_1 V_{ult}}\right)^2 + \left(\frac{M}{\beta_3 BV_{ult}}\right)^2 + c \frac{H}{\beta_1 V_{ult}} \frac{M}{\beta_3 BV_{ult}} = \left(\frac{V}{V_{ult}}\left(1 - \frac{V}{V_{ult}}\right)\right)^2 \quad (۴)$$

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

این رابطه بیانگر شکل هندسی یک توپ راگی می‌باشد. در حالتی که 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 زمانی که 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. در نتیجه، 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

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].

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

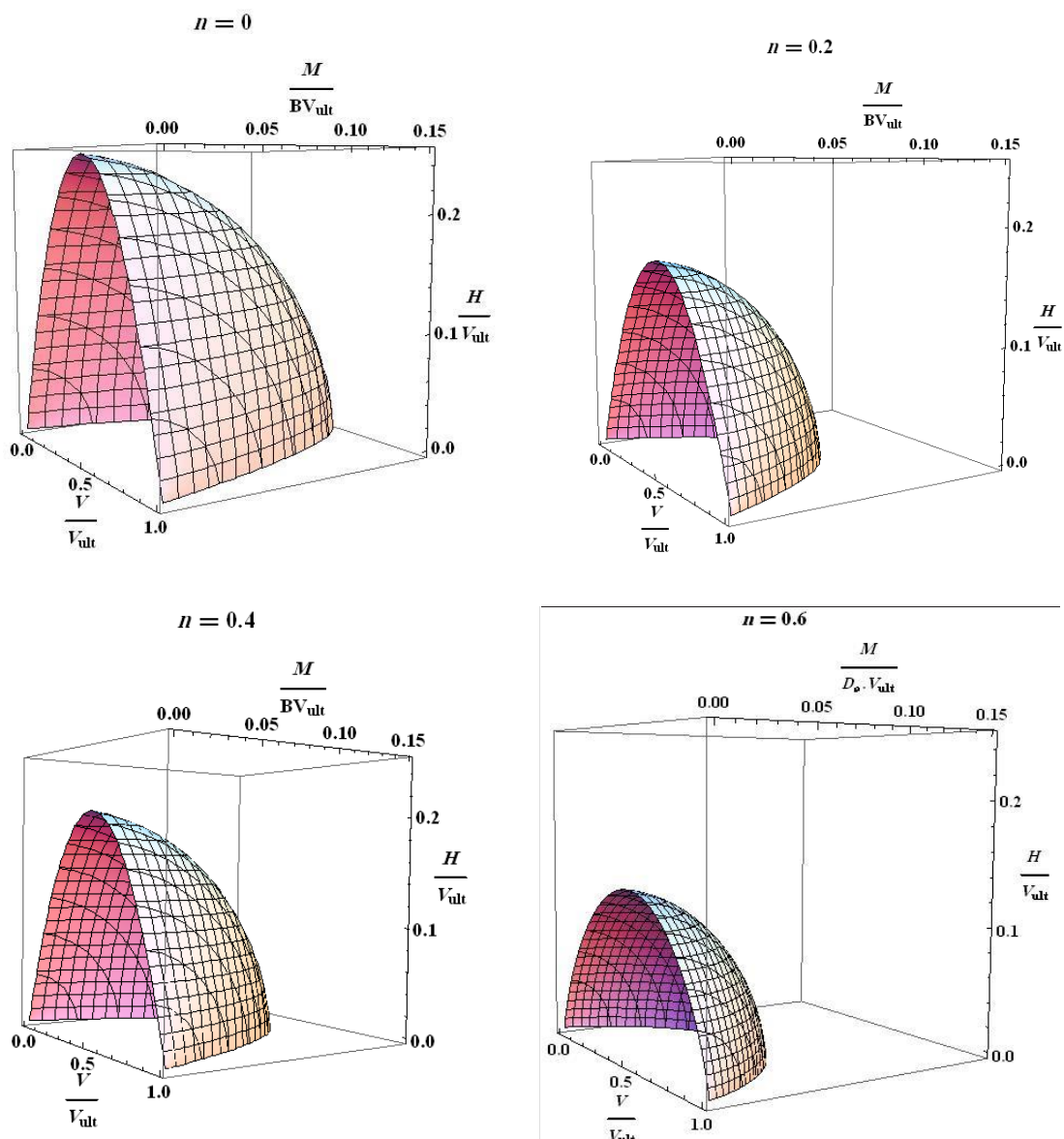
در این رابطه c ضریب ثابت می‌باشد و D مقدار ثابت است که وابسته به مقدار بار قائم در صفحه‌ی $H/V_{ult}-M/BV_{ult}$ می‌باشد و از رابطه‌ی ۵ به‌دست می‌آید.

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

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 معرفی شده وجود دارد. باتوجه به این که در تمامی سطوح گسیختگی مقدار H_{max} و M_{max} در $0.5 V_{ult}$ 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



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

Fig. 18. 3D failure envelope

تحقیقات قبلی در دو قسمت مقایسه شده‌است:

جدول ۵. ضریب ظرفیت باربری N_γ با توجه به مقدار نسبت قطر

Table 5. Effect of diameter ratio on N_γ

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

الف: پی تحت بارگذاری قائم

به‌منظور کنترل رفتار پی حلقوی تحت بارگذاری قائم ضریب

$$N_\gamma = \frac{q_u}{0.5B\gamma} \quad (7)$$

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

گسیختگی به دست آمده با روابط پیشنهادی برای پی دایره‌ای که توسط سایر محققان ارائه شده است مقایسه گردید و ضرایب برای پی‌های حلقوی با توجه به نتایج آزمایش‌ها اصلاح شد. مهم‌ترین نتایج این پژوهش در ادامه آمده است:

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 تعیین‌کننده مقدار بیشینه‌ی پوش گسیختگی به ترتیب در فضای H/V_{ult} -H/ V_{ult} -M/ و V/V_{ult} -H/ V_{ult} -M/ 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 به ترتیب در فضای V/V_{ult} -H/ V_{ult} -M/ و 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 زمانی که پی تحت بارگذاری افقی و یا لنگر خمشی و یا هر دو قرار دارد، با توجه به سطوح گسیختگی

نتایج آزمایش‌ها به دست آمده است.

ملاحظه می‌شود مقادیر ضریب ظرفیت باربری $N\gamma$ به دست آمده با توجه به نتایج آزمایش‌ها در محدوده‌ی مقادیر پیشنهادی توسط سایر محققان قرار دارد.

$$\frac{H}{H_{ult}} = 4 \frac{V}{V_{ult}} \left(1 - \frac{V}{V_{ult}}\right) \quad (8)$$

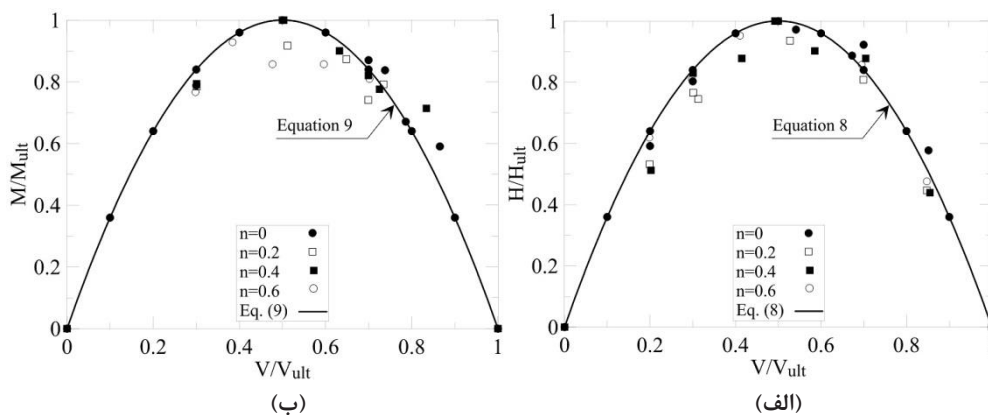
$$\frac{M}{M_{ult}} = 4 \frac{V}{V_{ult}} \left(1 - \frac{V}{V_{ult}}\right) \quad (9)$$

ب: پی تحت بارگذاری ترکیبی V-H-M

به منظور 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 به دست آمده در این پژوهش در مقایسه با روابط (۸) و (۹) به ترتیب در فضای H/H_{ult} -V/ V_{ult} و V/V_{ult} -M/ M_{ult} نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که نتایج به دست آمده 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 با استفاده از مسیرهای بارگذاری گوناگون انجام شد. در این راستا با انجام صد آزمایش در مقیاس آزمایشگاهی بر روی پی‌های حلقوی واقع بر خاک ماسه‌ای تحت هشت مسیر بارگذاری پوش



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

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

- [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, Géotechnique 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, Géotechnique 60(4) (2010) 265-273.
- [22] C. Vulpe, B. Bienen, C. Gaudin, Predicting the undrained capacity of skirted spudcans under combined
- به دست آمده از نتایج آزمایش‌ها، نسبت $0/4$ می‌باشد و نیز نسبت قطر $0/6$ 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 loose 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 N_{γ} 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.

- 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. Belouar, Numerical evaluation of the bearing capacity factor N_{γ}' 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).
- 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 N_{γ} and failure envelope of eccentrically and obliquely loaded strip footings on sand, *Canadian Geotechnical*

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](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17071.6450)

