

Investigating The Effect of Slope on the Coefficient of Undrained Bearing Capacity (N_c') of Ring and Circular Foundations

Reza Mohammad Ali Nejad¹, Meysam Bayat^{2*}

1- Assistant professor, Department of Civil Engineering, ahvaz Branch, Islamic Azad University, ahvaz, Iran

2- Assistant professor, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

ABSTRACT

Ring foundation is used for foundations of structures such as silos, water tanks and transmission towers. Sometimes these structures are placed in the near or on the slope. Therefore, investigating the effect of slope on the behavior of ring foundation is very important. In this research, with the help of finite element method and using PLAXIS3D software, the effect of slope on undrained bearing capacity factor (N_c') of ring and circular foundation is investigated. In this research, a ring foundation with a diameter of 2.5 meters and a ratio of inner diameter to outer diameter of 0.2, 0.4, 0.6 and 0.8 was modeled in three dimensions model and the effect of various factors such as angle of the slope, the dimensionless resistance ratio and the ratio of slope height to foundation diameter on N_c' was investigated. The results showed that with the increase of the angle of the slope, the amount of N_c' decreases linearly, and also with the increase of the ratio of the inner diameter to the outer diameter of the ring foundation, the effect of the slope on N_c' decreases. In the numerical analysis, 3 types of failure were observed, 2 of which were due to the failure caused by the bearing capacity and the third type of failure was due to the general failure of the slope. The results showed that with the increase of the dimensionless resistance ratio from 1 to 5, the value of N_c' increases, and for higher values of the dimensionless resistance ratio, the value of N_c' remains constant

ARTICLE INFO

Receive Date: 29 June 2024

Revise Date: 11 September 2024

Accept Date: 26 September 2024

Keywords:

Ring Foundation

Clay

Slope

Undrained

Bearing Capacity Factor

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.461964.3434](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.461964.3434)

*Corresponding author: Reza Mohammad Ali Nejad

Email address: Reza@iaiu.ac.ir

بررسی اثر شیروانی بر روی ضریب ظرفیت باربری زهکشی نشده (N_c') پی حلقوی و دایره‌ای شکل

رضا محمدعلی نژاد^{۱*}، میثم بیات^۲

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

چکیده

پی حلقوی جهت پی سازه‌هایی همانند سیلوها، مخازن آب و برج‌های انتقال استفاده می‌شود. این سازه‌ها در برخی اوقات در مجاورت و یا بر روی شیروانی قرار می‌گیرند؛ با توجه به اینکه در خصوص اثر شیروانی بر روی ظرفیت باربری زهکشی نشده پی دایره‌ای و حلقوی شکل تاکنون تحقیقی انجام نشده است لذا؛ بررسی اثر شیروانی بر روی رفتار زهکشی نشده پی حلقوی دارای اهمیت زیادی می‌باشد. در این تحقیق به کمک روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS3D به بررسی اثر شیروانی بر روی ضریب ظرفیت باربری زهکشی نشده (N_c') پی حلقوی و دایره‌ای شکل پرداخته می‌شود. در این تحقیق یک پی حلقوی به قطر ۲/۵ متر و با نسبت قطر داخلی به قطر خارجی ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ به صورت سه‌بعدی مدل گردیده و اثر عوامل مختلفی همانند شیب شیروانی، نسبت مقاومت بدون بعد و نسبت ارتفاع شیروانی به قطر پی بر روی N_c' مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش شیب شیروانی مقدار N_c' به صورت خطی کاهش می‌یابد و همچنین با افزایش نسبت قطر داخلی به قطر خارجی پی حلقوی اثر شیروانی بر روی N_c' کمتر می‌گردد. در آنالیزهای عددی ۳ نوع گسیختگی مشاهده گردید که ۲ نوع گسیختگی به دلیل گسیختگی ناشی از ظرفیت باربری و گسیختگی نوع سوم به دلیل گسیختگی کلی شیروانی بود. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت مقاومت بدون بعد از ۱ به ۵ مقدار N_c' افزایش می‌یابد و برای مقادیر بیشتر نسبت مقاومت بدون بعد مقدار N_c' ثابت می‌ماند.

کلمات کلیدی: پی حلقوی، رس، شیروانی، زهکشی نشده، ضریب ظرفیت باربری.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
	10.22065/jsce.2024.461964.3434	۱۴۰۲/۰۴/۰۹	۱۴۰۲/۰۶/۲۱	۱۴۰۳/۰۷/۰۵	۱۴۰۳/۰۷/۰۵	۱۴۰۴/۰۳/۳۱
		*نویسنده مسئول:		رضا محمدعلی نژاد		
		پست الکترونیکی:		Reza@iaou.ac.ir		

۱- مقدمه

پی بخشی از سازه‌های مهندسی می‌باشد که بارهای روبراه را مستقیماً به خاک و یا سنگ زیرین به‌طور ایمن منتقل می‌کند [۱]. امروزه با بیشتر شدن نیاز به طراحی‌های بهینه و اقتصادی ژئوتکنیکی و همچنین وجود شرایط مختلف تحت‌الارضی در سایت‌ها، سیستم فونداسیون را از لحاظ عمق قرارگیری در زمین به چهار دسته سطحی، سطحی به همراه بهسازی، نیمه عمیق و عمیق تقسیم می‌کنند [۲]. یکی از انواع پی‌های سطحی، پی حلقوی می‌باشد که به‌عنوان یک پی مناسب و اقتصادی برای سازه‌هایی مانند سیلوها، برج‌های سردکننده، برج‌های انتقال و مخازن آب استفاده می‌گردد. پی حلقوی با کاهش مصالح مصرفی ساخت پی، نسبت به پی دایره‌ای شکل اقتصادی می‌باشد [۳]. محققین مختلفی در گذشته به کمک روش‌های عددی، تجربی و تحلیلی، رفتار پی حلقوی را تحت بارهای استاتیکی مورد بررسی قرار دادند.

لامن و یلدیز [۴] به کمک تحلیل عددی به ارزیابی ظرفیت باربری نهایی پی حلقوی مستقر بر روی یک بستر شنی در دو حالت با و یا بدون مسلح‌کننده ژئوگرید پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در صورت استفاده از ژئوگرید، ظرفیت باربری پی حلقوی با توجه نحوه آرایش ژئوگریدها تا ۳ برابر نسبت به حالت عدم استفاده از ژئوگرید، افزایش یافت. ژائو و وانگ [۵] و نیمارک و همکاران [۶] به کمک آنالیز عددی و با استفاده از نرم‌افزار FLAC به ارزیابی ضریب ظرفیت باربری پی حلقوی در خاک‌های غیرچسبیده پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که N_p در پی با سطح زیرین زبر نسبت به پی با سطح صاف، بزرگ‌تر بوده و با افزایش نسبت قطر داخلی به قطر خارجی پی حلقوی، مقدار N_p کاهش می‌یافت. ناصری و حسینی‌نیا [۷] به کمک روش تفاضل محدود به بررسی نشست پی حلقوی مستقر بر روی نیم فضای الاستیک پرداختند و یک فرمول ریاضی کلی برای پیش‌بینی نشست الاستیک پی حلقوی با هندسه دلخواه پیشنهاد دادند. هملوی و همکاران [۸] به کمک روش تفاضل محدود، ظرفیت باربری زهکشی نشده پی حلقوی مستقر بر روی خاک رسی همگن و غیرهمگن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب ظرفیت باربری زهکشی نشده N_c' پی حلقوی مستقر بر روی سطح خاک همگن، با افزایش نسبت قطر داخلی به قطر خارجی پی حلقوی، کاهش می‌یابد.

کومار و چاک‌لورتی [۹] به بررسی ضرایب ظرفیت باربری پی‌های حلقوی با سطح زبر و صاف به کمک روش‌های حد بالا و حد پایین پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش نسبت قطر داخلی به قطر خارجی پی حلقوی، مقدار ظرفیت باربری پی حلقوی کاهش می‌یابد و در پی حلقوی با سطح زبر با افزایش نسبت قطر داخلی به قطر خارجی تا 0.7 ، کاهش ظرفیت باربری پی حلقوی کوچک می‌باشد. حسینی‌نیا [۱۰] به کمک شبیه‌سازی عددی پی‌های حلقوی به روش تفاضل محدود به بررسی ضرایب ظرفیت باربری پی‌های حلقوی (N_c ، N_q و N_p) برای نسبت‌های مختلف قطر داخلی به قطر خارجی پرداخت. نتایج مطالعه وی نشان داد که مقادیر ضرایب N_c ، N_q پی با افزایش نسبت قطر داخلی به قطر خارجی، کاهش می‌یابد. بیرید و چادوری [۳] به کمک روش المان محدود به بررسی اثر عوامل مختلفی همانند نسبت زبری سطح پی حلقوی، مقاومت برشی زهکشی نشده خاک رس، شیب تغییرات مقاومت برشی خاک رس غیرهمگن با عمق و نسبت عمق دفن شدن پی به قطر خارجی پی بر روی ظرفیت باربری زهکشی نشده پی حلقوی واقع بر روی خاک چسبیده پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقاومت برشی زهکشی نشده خاک چسبیده بیشترین تأثیر را بر روی ظرفیت باربری زهکشی نشده پی حلقوی دارد.

بی و همکاران [۱۱] ضرایب ظرفیت باربری زهکشی نشده پی حلقوی زبر واقع بر روی خاک رسی ناهمگن را بررسی کردند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که با افزایش نسبت قطر داخلی به قطر خارجی پی حلقوی مقدار (N_c) کاهش زیادی پیدا می‌کند. لی و همکاران [۱۲] به بررسی عددی ظرفیت باربری قائم پی حلقوی زبر واقع بر روی خاک دولایه رسی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که عمق بحرانی لایه فوقانی خاک که برای مقادیر بزرگ‌تر از آن عمق، ظرفیت باربری پی حلقوی تحت تأثیر لایه تحتانی خاک قرار نمی‌گیرد؛ به نسبت قطر داخلی به قطر خارجی پی و شیب تغییرات مقاومت برشی زهکشی نشده خاک فوقانی با عمق دارد.

تانگ و فون [۱۳] با استفاده از فرمولاسیون المان محدود و تئوری حد پایین به بررسی ظرفیت باربری پی حلقوی مستقر بر روی ماسه متراکم پرداختند. آن‌ها روش جدیدی جهت تعیین ظرفیت باربری پی حلقوی ارائه نمودند. آن‌ها نتایج روش ارائه‌شده را با نتایج آزمایش‌های مدل فیزیکی مقایسه کردند و مشاهده کردند که نتایج حاصله همخوانی خوبی دارد.

شارما و کومار [۱۴] رفتار پی حلقوی مستقر بر روی ماسه سست و ماسه مسلح شده با فیبر را به کمک روش المان محدود تحت بارهای مایل و با خروج از مرکزیت بررسی کردند. آن‌ها به کمک تحلیل رگرسیون یک نمودار تجربی برای محاسبه نشست پی حلقوی ارائه نمودند.

لای و همکاران [۱۵] به کمک روش المان محدود اثر تغییرات مقاومت برشی زهکشی نشده خاک رس غیرهمگن بر روی ضریب ظرفیت باربری زهکشی نشده (N_c') را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقدار N_c' با افزایش شیب تغییرات مقاومت برشی زهکشی خاک رس غیرهمگن با عمق، افزایش می‌یابد. والی و همکاران [۱۶] به کمک روش المان محدود ظرفیت باربری پی حلقوی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان دارد که با افزایش نسبت قطر داخلی قطر خارجی پی، ضرایب ظرفیت باربری پی حلقوی (N_c ، N_q و N_γ) کاهش می‌یابند. وانگ و همکاران [۱۷] به بررسی اثر عمق دفن شدن پی حلقوی بر روی ضریب ظرفیت باربری زهکشی نشده N_c' پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که با افزایش عمق دفن شدن پی حلقوی تا نصف قطر پی، N_c' افزایش می‌یابد و برای مقادیر بزرگ‌تر عمق دفن شدن پی، مقدار N_c' ثابت می‌ماند.

برخی از محققین به کمک روش تحلیلی، ضرایب ظرفیت باربری پی‌های سطحی را مورد بررسی قرار دادند [۲۲-۱۸]. کومار و جوش [۲۳] به کمک روش مشخصه تنش، ضریب ظرفیت باربری N_γ را برای پی حلقوی زبر و صاف ارائه کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که با افزایش نسبت قطر داخلی به قطر خارجی، مقدار N_γ پی به میزان قابل توجهی کاهش یافت. غلامی و حسینیان [۲۴]، کشاورز و کومار [۲۵] به کمک روش مشخصه تنش ضرایب ظرفیت باربری N_c ، N_q و N_γ را به دست آوردند. بررسی آن‌ها نشان داد که پی‌های با سطح زیرین صاف با افزایش نسبت قطر داخلی به قطر خارجی، ضرایب N_c و N_q کاهش می‌یابند و در پی با سطح زبر در یک مقدار معینی از نسبت قطر داخلی به قطر خارجی، ضرایب ظرفیت باربری حداکثر می‌گردند.

برخی از محققین با کمک آزمایش‌های آزمایشگاهی به بررسی ظرفیت باربری پی دایره‌ای و حلقوی مستقر روی خاک ماسه‌ای با و یا بدون مسلح‌کننده پرداختند [۳۰-۲۶]. شارما و کومار [۳۱، ۳۲] به بررسی ظرفیت باربری پی دایره‌ای و حلقوی شکل واقع بر خاک ماسه‌ای مسلح شده با فیبر به کمک آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی مدل فیزیکی پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از فیبر به عنوان مسلح‌کننده باعث افزایش ظرفیت باربری پی حلقوی می‌شود و مقدار بهینه فیبر جهت مسلح کردن خاک ماسه‌ای ۱٪ می‌باشد. ال-سوموای و همکاران [۳۳] به کمک آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی مدل فیزیکی به ظرفیت باربری پی حلقوی مستقر بر روی خاک ماسه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که با افزایش نسبت قطر داخلی به قطر خارجی پی حلقوی واقع بر روی ماسه متراکم تا مقدار ۴۵٪، ظرفیت باربری پی افزایش می‌یابد و برای مقادیر بیشتر نسبت قطر داخلی به قطر خارجی، ظرفیت باربری پی حلقوی کاهش می‌یابد.

در خصوص ضریب ظرفیت باربری زهکشی نشده پی حلقوی N_c' مستقر بر رأس شیروانی تاکنون تحقیقاتی صورت نپذیرفته است. با توجه به اینکه برخی از سازه‌های دارای پی حلقوی در مجاورت و یا بر روی شیروانی قرار می‌گیرند، بررسی اثر شیروانی بر روی ضریب ظرفیت باربری زهکشی نشده پی حلقوی، حائز اهمیت می‌باشد. در این تحقیق به کمک روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار PLAIIXS 3D بررسی ضریب ظرفیت باربری زهکشی نشده پی حلقوی مستقر بر رأس شیروانی رسی پرداخته می‌شود و اثر عواملی همانند شیب شیروانی، مقاومت برشی بی‌بعد شده و هندسه پی حلقوی بر روی ضریب ظرفیت باربری زهکشی نشده N_c' و نوع گسیختگی - های مشاهده شده در حین تحلیل عددی، مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج حاصل با سایر روش‌ها مقایسه گردید. در این تحقیق پی بر روی سطح زمین و در رأس شیروانی مدل گردید. هندسه پی حلقوی به وسیله نسبت قطر داخلی به قطر خارجی تعریف می‌گردد. در این تحقیق برای بررسی اثر هندسه بر روی N_c' پی حلقوی با ۵ نسبت قطر داخلی به قطر خارجی مدل گردید. برای بررسی اثر نسبت مقاومت بدون بعد، ۷ نسبت مقاومت بدون بعد متفاوت و جهت بررسی اثر شیب شیروانی، شیروانی با ۳ زاویه شیروانی متفاوت مدل گردید. در هر کدام از تحلیل‌ها انجام شده، نحوه گسیختگی به وقوع پیوسته مورد بررسی قرار گرفت و اثر ارتفاع شیروانی بر روی نحوه گسیختگی مورد بررسی قرار گرفت.

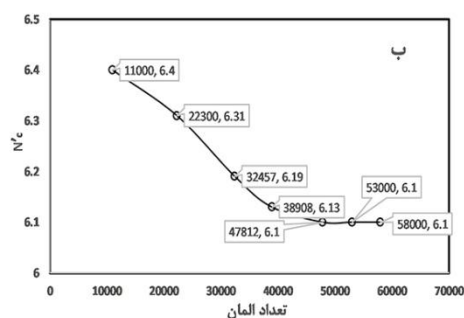
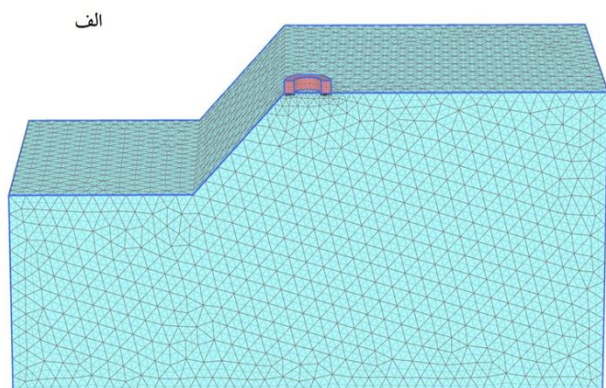
۲- مدل عددی

جهت مدل سازی عددی از نرم افزار PLAXIS3D استفاده شده است. با توجه به تقارن هندسه مدل، نصف پی حلقوی در نرم افزار مدل گردید. سطح مشترک بین سطح زیرین پی و خاک کاملاً زبر در نظر گرفته شد تا از حرکت نسبی در امتداد سطح مشترک خاک و پی جلوگیری شود. در نظر گرفتن سطح زبر بین کف پی و زمین برای مدل کردن شرایط واقعی پی، کاملاً مناسب است [۳۰،۳۱،۳۲،۳۳،۳۴،۳۵]. با توجه به این که اندازه المان های تشکیل دهنده مش در مدل سازی عددی بر روی نتایج حاصل تأثیرگذار می باشد، ابعاد المان های مش به گونه ای در نظر گرفته شد که بر روی نتایج تأثیرگذار نباشد. برای حالت ها و اندازه های مختلف هندسه مدل، آنالیز حساسیت برای تعیین ابعاد مدل و مش ها انجام داده شد. یک نمونه مدل پی حلقوی مستقر در رأس شیروانی با زاویه ۴۵ درجه و نسبت ارتفاع شیب به قطر خارجی پی برابر با ۲ ($H/D_0=2$) به همراه آنالیز حساسیت مربوطه جهت تعیین تعداد المان ها مش در شکل ۱ ارائه شده است. با افزایش ارتفاع شیروانی و کاهش زاویه شیروانی، افزایش ابعاد مدل ۳ بعدی به منظور عدم تأثیرگذاری مرزها بر روی نتایج، ضروری بوده و هم زمان با تغییر ابعاد مدل، مجدداً آنالیز حساسیت برای تعیین اندازه و تعداد المان ها لازم و مناسب برای مدل جدید انجام داده شد. برای مدل سازی از پی با قطر خارجی ۲/۵ متر استفاده گردید و قطر داخلی پی ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ و ضخامت پی ۰/۶ متر در نظر گرفته شد. مقدار C_u برابر با ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۱۰۰۰ کیلو پاسکال و شیب شیروانی ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه در نظر گرفته شد. زاویه اصطکاک خاک برابر صفر در نظر گرفته شد تا شرایط زهکشی نشده مدل سازی گردد [۳].

شیروانی به کمک روش حفاری در نرم افزار ساخته شد [۳۴،۳۶]. خاک با استفاده از مدل رفتاری موهر-کولمب و پی به کمک مدل الاستیک خطی مدل گردید [۴۰-۳۶]. خواص خاک و پی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات خاک و پی استفاده شده در آنالیز عددی

پارامتر	مقدار
C_u (kpa) چسبندگی خاک	۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۲۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۱۰۰۰
γ (KN/m ³) وزن مخصوص	۱۶
Φ^0 زاویه اصطکاک خاک	۰
μ ضریب پواسن	۰/۴۹۹
مدول الاستیسیته خاک (Mpa)	۵۰
قطر پی (m)	۲/۵
ضخامت پی (m)	۰/۶
فاکتور زبری خاک نسبت به کف پی	۱



شکل ۱: الف) مدل سه بعدی پی حلقوی با نسبت $H/D_0=2$ و $D_i/D_0=0.4$ (ب) آنالیز حساسیت

برای خاک‌های چسبنده ظرفیت باربری نهایی زهکشی نشده به صورت زیر تعریف می‌گردد [۳]:

$$q_{ult} = c S_d S_c N_c = c N'_c \quad (1)$$

$$\frac{Q_{ult}}{A} = c N'_c \quad (2)$$

به دلیل تقارن هندسه مدل، نصف پی مدل می‌گردد و در نتیجه ظرفیت باربری پی ۲ برابر مقدار به دست آمده از آنالیز عددی می‌باشد.

$$2Q_{ult} = c\pi(D_0^2 - D_i^2)N'_c / 4 \quad (3)$$

$$N'_c = \frac{8Q_{ult}}{c\pi(D_0^2 - D_i^2)} \quad (4)$$

در روابط بالا q_{ult} و Q_{ult} به ترتیب ظرفیت باربری نهایی و بار نهایی پی، S_d و S_c به ترتیب ضریب شکل و عمق، D_0 و D_i به ترتیب قطر داخلی و قطر خارجی پی حلقوی و N'_c ضریب ظرفیت باربری زهکشی نشده پی می‌باشد.

۲-۱- اعتبار سنجی مدل

برای بررسی توانایی مدل‌سازی ۳ بعدی در نرم‌افزار PLAXIS3D و FLAC3D جهت بررسی رفتار پی حلقوی، یک پی حلقوی با شعاع خارجی ۵ متر و مقادیر نسبت شعاع داخلی به شعاع خارجی مختلف را بر روی سطح زمین مسطح و پی دایره‌ای شکل در مجاورت شیروانی را مدل نموده و نتایج به دست آمده از مدل‌سازی را با مقدار به دست آمده توسط سایر محققین مقایسه گردید. در این مدل‌سازی مقدار C_u برابر با ۳۰ کیلو پاسکال و نسبت درشتی المان‌های خاک و پی به ترتیب ۰/۵ و ۰/۲ و سطح زیرین پی به صورت زبر در نظر گرفته شد. از فرمول شماره ۴ مقدار ضریب ظرفیت باربری زهکشی نشده (N'_c) محاسبه گردید. نتایج به دست آمده در جدول ۲ و ۳ ارائه شده است.

جدول ۲: مقدار N'_c پی حلقوی بر روی سطح زمین مسطح

D_p/D_o	روش	N'_c	درصد انحراف	روش آنالیز
۰	تحقیق حال حاضر	۶/۱	-	المان محدود
(پی دایره‌ای)	اسکمپتون [۴۱]	۶/۰۵	+۰/۸	تئوری پلاستیک
	اسون و شیلد [۴۲]	۶/۰۵	+۰/۸	تئوری پلاستیک
	کاکس و همکاران [۴۳]	۶/۰۵	+۰/۸	روش مشخصه تنش
	هانسن [۴۴]	۶/۱۷	-۱/۱	تئوری الاستوپلاستیک
	وسیک [۴۵]	۶/۱۷	-۱/۱	
	تانی و کریگ [۴۶]	۶/۳۴	-۲/۲	
	سالگادو [۴۷]	۶/۱۳	-۰/۵	المان محدود
	ادواردز و همکاران [۴۸]	۶/۰۹	+۰/۲	المان محدود (کرنش کوچک)
	لی و همکاران [۱۲]	۶/۰۸	+۰/۳	المان محدود (کرنش کوچک)
	کشاوری و کومار [۲۵]	۶/۰۵	+۰/۸	روش مشخصه تنش
۰/۲	تحقیق حال حاضر	۵/۸	+۱/۹	المان محدود
	بیرید و همکاران [۳]	۵/۶۹	-	المان محدود
۰/۴	تحقیق حال حاضر	۵/۷۷	+۱/۵	المان محدود
	بیرید و همکاران [۳]	۵/۶۸	-	المان محدود
۰/۶	تحقیق حال حاضر	۵/۸۶	+۲/۴	المان محدود
	بیرید و همکاران [۳]	۵/۷۲	-	المان محدود
۰/۸	تحقیق حال حاضر	۶/۰۷	+۲	المان محدود
	بیرید و همکاران [۳]	۵/۹۵	-	المان محدود

جدول ۳: مقدار N'_c پی دایره‌ای شکل در مجاورت شیروانی ($H/D_o=1$)

شیب	روش	N'_c	درصد انحراف	روش آنالیز
۱۵	تحقیق حال حاضر	۵/۴۷	-۱/۱	المان محدود
	تحقیق حال حاضر	۵/۴۳	-۱/۸	تفاضل محدود
	هانسن [۴۴]	۵/۵۳	-	تئوری الاستوپلاستیک
۳۰	تحقیق حال حاضر	۴/۸۸	-۰/۸	المان محدود
	تحقیق حال حاضر	۴/۸۲	-۲	تفاضل محدود
	هانسن [۴۴]	۴/۹۲	-	المان محدود
۴۵	تحقیق حال حاضر	۴/۲۵	-۰/۷	المان محدود
	تحقیق حال حاضر	۴/۱۸	-۲/۳	تفاضل محدود
	هانسن [۴۴]	۴/۲۸	-	تئوری الاستوپلاستیک

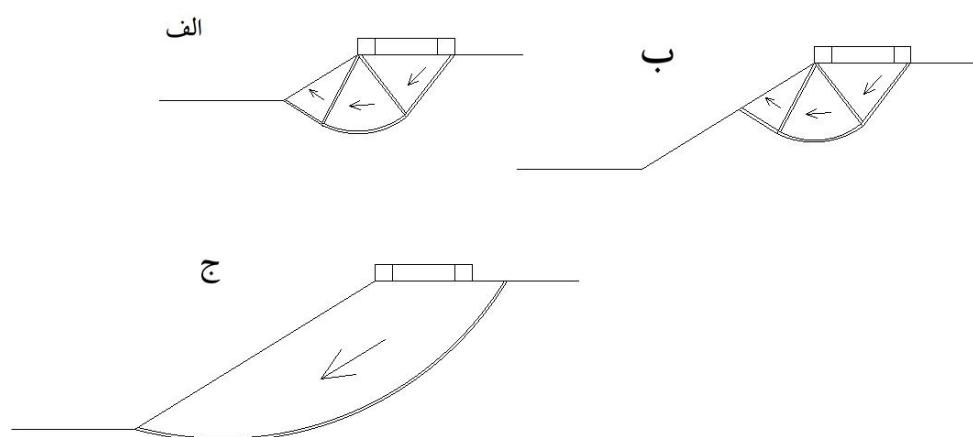
نتایج به دست آمده از آنالیز المان محدود با مقادیر پیشنهادی محققین مختلف همخوانی مناسبی دارد که نشان دهنده توانایی مدل ۳ بعدی المان محدود، جهت پیش بینی رفتار زهکشی نشده پی حلقوی می باشد.

۳- نتایج

۳-۱- انواع گسیختگی مشاهده شده

در آنالیزهای المان محدود انجام شده، ۳ نوع گسیختگی مشاهده گردید. گسیختگی نوع اول و دوم (شکل ۲-الف و ۲-ب) مشابه مکانیسم گسیختگی پرنده برای پی‌های واقع در سطح افقی پی می باشد که در این تحقیق از آن‌ها به عنوان گسیختگی ناشی از ظرفیت باربری پی، نام برده می شود. ارتفاع شیروانی در این دو حالت از ارتفاع بحرانی شیروانی H_{cr} کمتر می باشد. ارتفاع بحرانی شیروانی با استفاده

از فرمول عدد پایداری شیروانی تیلور، $N_s = C_u / (\gamma H F.S)$ و با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۱ به دست می‌آید [۲۸]. حالت (الف) بیانگر حالتی است که مکانیسم گسیختگی توسط ارتفاع شیروانی محدود می‌گردد و ظرفیت باربری پی به ارتفاع شیروانی بستگی دارد و حالت (ب) بیانگر حالتی است که ظرفیت باربری پی به ارتفاع شیروانی بستگی ندارد. گسیختگی نوع سوم ناشی از ناپایداری شیروانی تحت بارهای ثقلی می‌باشد و کل شیب را در بر می‌گیرد که از آن به عنوان گسیختگی کلی شیروانی نام برده می‌شود و ارتفاع شیروانی از ارتفاع بحرانی شیروانی H_{cr} بیشتر می‌باشد و شیروانی تحت بار ثقلی وزن خود دچار گسیختگی می‌شود و در این حالت امکان بارگذاری پی وجود ندارد. (شکل ۲-ج).



شکل ۲: حالت‌های گسیختگی (الف) و (ب) گسیختگی ناشی از ظرفیت باربری (ج) گسیختگی ناشی از گسیختگی شیروانی

۲-۳- اثر شیب شیروانی

در این بخش پی حلقوی بر روی رأس شیروانی با نسبت ارتفاع شیروانی به قطر خارجی پی $(H/D_0=1)$ و نسبت مقاومت بدون بعد $(C_u/\gamma D_0=1)$ با شیب ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه مدل گردید. نتایج تحلیل در شکل ۳ و جدول ۴ ارائه شده است. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه شیروانی برای نسبت‌های مختلف قطر داخلی به قطر خارجی پی حلقوی، ضریب N'_c به صورت خطی کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که برای هر ۳ شیب شیروانی (۳۰، ۱۵ و ۴۵ درجه) با افزایش نسبت قطر داخلی به قطر خارجی اثر شیروانی بر روی پی حلقوی کمتر گردید، به طوری که با افزایش نسبت D_i/D_0 از ۰ به ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۰/۸ در شیروانی با شیب ۴۵ درجه میزان کاهش ضریب N'_c نسبت به حالت زمین مسطح از ۲۶٪ به ترتیب به مقادیر ۲۲٪، ۲۰٪، ۱۸٪ و ۱۱٪ کاهش یافت.

مقایسه نتایج حاصل از تحلیل المان محدود پی دایره‌ای ($D_i/D_0=0$) و روش‌های هانسن [۴۴] و باولز [۴۹] در شکل ۴ ارائه شده است. نتایج المان محدود برای نسبت مقاومت بدون بعد $(C_u/\gamma D_0=5)$ همخوانی خوبی با نتایج باولز [۳۹] دارد. نتایج به دست آمده از آنالیز المان محدود برای مقاومت بدون بعد $(C_u/\gamma D_0=1)$ نسبت به روش هانسن در شیب‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ به ترتیب ۱٪، ۳٪ و ۵٪ بیشتر بود.

جدول ۴: مقادیر ضرایب ظرفیت باربری زهکشی نشده پی حلقوی برای شیروانی با شیب‌های متفاوت و نسبت مقاومت بدون بعد

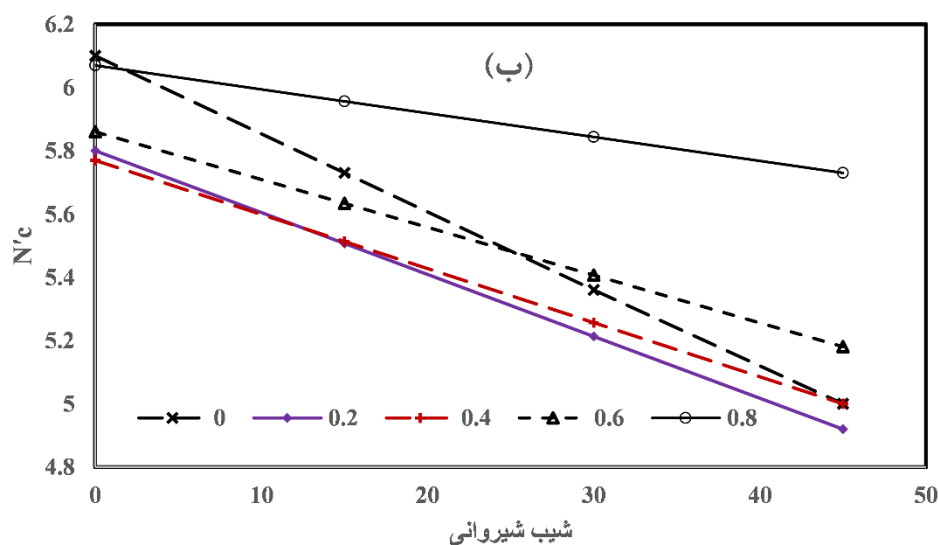
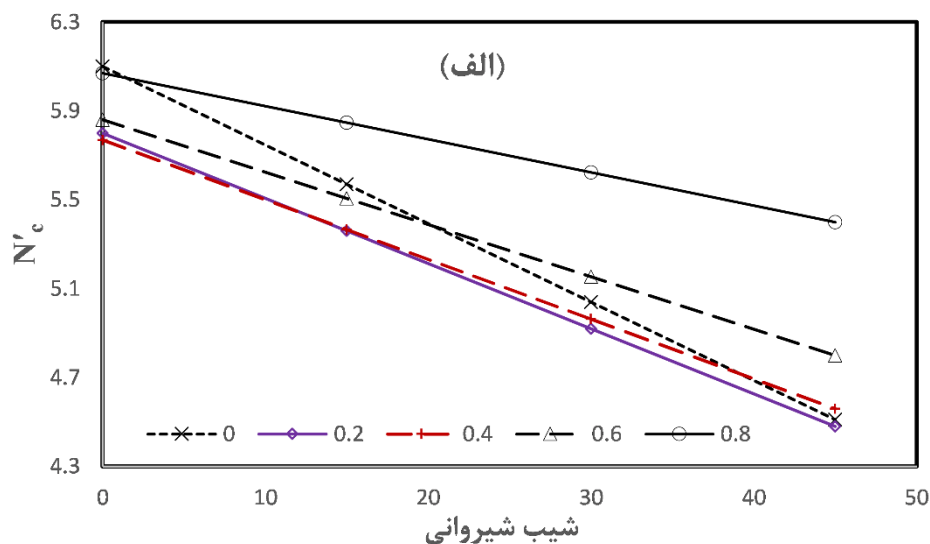
D_i/D_0	$\beta=0$	$\beta=15$		$\beta=30$		$\beta=45$	
		N'_c	درصد تغییرات	N'_c	درصد تغییرات	N'_c	درصد تغییرات
۰ (دایره‌ای)	۶/۱	۵/۵۷	۹	۵/۰۴	۱۷/۴	۴/۵۱	۲۶/۱
۰/۲	۵/۸	۵/۳۶	۷/۶	۴/۹۲	۱۵/۲	۴/۴۸	۲۲/۸
۰/۴	۵/۷۷	۵/۳۷	۷	۴/۹۶	۱۴	۴/۵۶	۲۱
۰/۶	۵/۸۶	۵/۵۱	۶	۵/۱۵	۱۲/۱	۴/۸	۲۰
۰/۸	۶/۰۷	۵/۸۵	۳/۶	۵/۶۲	۷/۴	۵/۴	۱۱

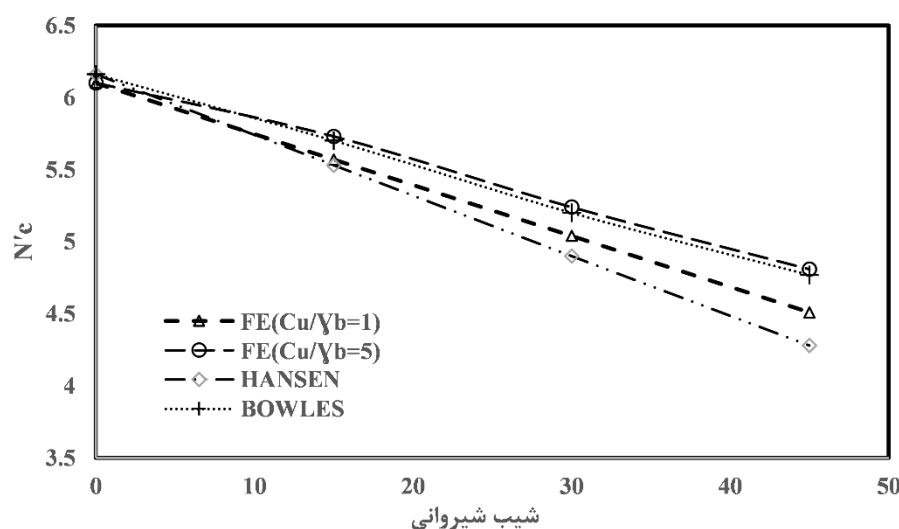
آزوز و بلیق [۵۰] با فرض دایره‌ای بودن سطح گسیختگی شیروانی، یک دامنه ایمنی برای شیروانی تحت بار ثقلی به صورت زیر تعریف نمودند:

$$\Delta(\gamma.H / c_u) = N_s - \gamma.H / c_u \quad (۵)$$

N_s : عدد پایداری شیروانی می‌باشد.

نتایج آن‌ها شامل دو دامنه ایمنی $\Delta(\gamma H / C_u)$ ، ۱ و ۳ برای نسبت عرض پی به ارتفاع شیروانی ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ برای شیروانی با زوایای ۱۵، ۴۵ و ۹۰ درجه تعریف نمودند. در این تحقیق نتایج آنالیزهای عددی برای زاویه ۱۵ و ۴۵ درجه و نسبت عرض پی به ارتفاع شیروانی ۰/۲۵ و دامنه ایمنی ۳ مقایسه می‌گردد (ارتفاع شیروانی ۱۰ و عرض پی ۲/۵ متر در نظر گرفته شد). عدد پایداری برای زوایای ۱۵ و ۴۵ درجه به ترتیب ۵/۸۶ و ۷/۹ به دست می‌آید [۵۱، ۵۲] و در نتیجه C_{II} برای زوایای ۱۵ و ۴۵ درجه با توجه به فرمول ۵ به ترتیب ۳۲/۶۵ و ۴۱/۴۵ کیلو پاسکال در محاسبات و مدل‌سازی عددی لحاظ گردید. نتایج حاصل در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که نتایج روش المان محدود برای زاویه شیروانی ۱۵ درجه برای پی حلقوی با نسبت قطر خارجی به قطر داخلی ۰ (پی دایره‌ای) همخوانی دارد.



شکل ۳: تغییرات N'_c با شیب شیروانی الف) $C_u/\gamma D_o=1$ (ب) $C_u/\gamma D_o=5$ شکل ۴: مقایسه نتایج تحقیق حال حاضر (پی دایره‌ای $D_i/D_o=0$) با روش هانسن و بولزجدول ۵: مقایسه N'_c حاصل از روش المان محدود و روش آروز و بلیق

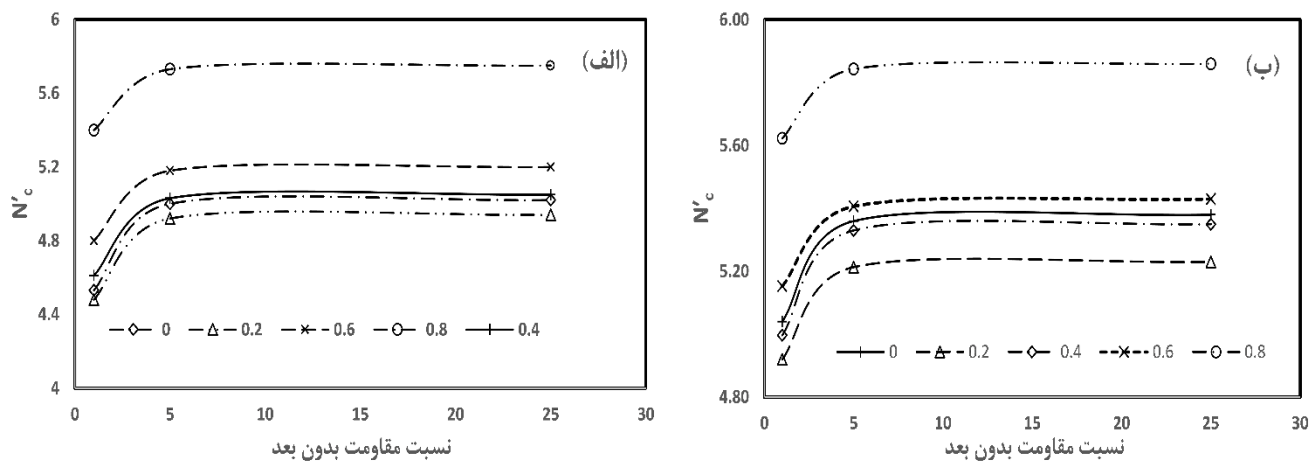
شیب شیروانی	آروز و بلیق	تحقیق حال حاضر					
		$D_i/D_o=0$	$D_i/D_o=0.2$	$D_i/D_o=0.4$	$D_i/D_o=0.6$	$D_i/D_o=0.8$	
۱۵	N'_c	۵/۶۵	۵/۵۹	۵/۳۸	۵/۳۹	۵/۴۹	۵/۸۷
	درصد انحراف	-	-۱/۱	-۴/۷	-۴/۷	-۱/۷	+۳/۸
۴۵	N'_c	۴/۴۰	۴/۵۱	۴/۴۸	۴/۵۶	۴/۷	۵/۴
	درصد انحراف	-	+۲/۵	+۱/۸	+۳/۶	+۶/۸	+۲۲/۷

۳-۳- اثر نسبت مقاومت بدون بعد

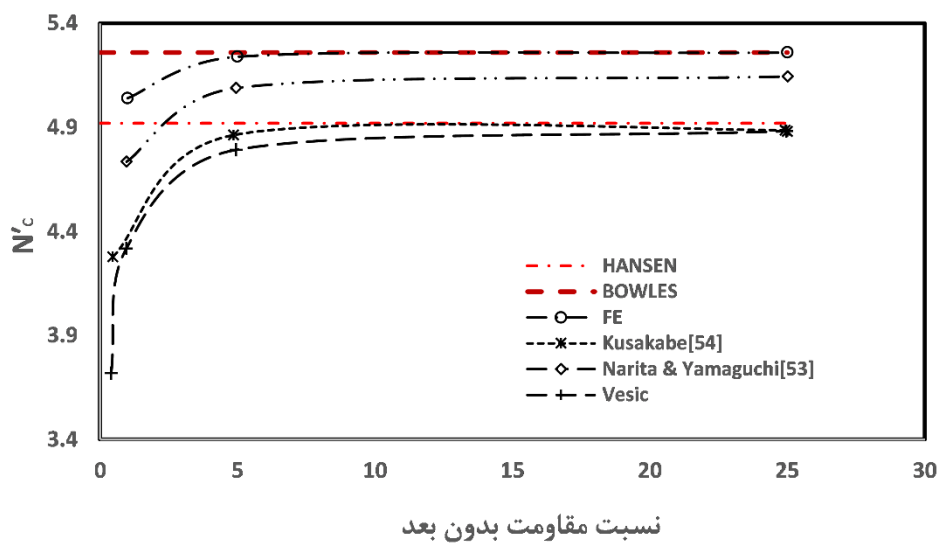
در این بخش به بررسی اثر نسبت مقاومت بدون بعد ($C_u/\gamma D_o$) بر روی N'_c پرداخته می‌شود. نتایج در جدول ۶ و اشکال ۵ و ۶ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت بدون بعد از ۱ تا ۵ مقدار N'_c افزایش می‌یابد و پس از آن تقریباً ثابت می‌ماند. در شکل شماره ۶ نتایج به دست آمده برای پی با نسبت قطر داخلی به قطر خارجی ۰ (پی دایره‌ای)، نسبت مقاومت بدون بعد ۱، زاویه شیروانی ۳۰ درجه و نسبت ارتفاع به قطر ۳ با نتایج سایر روش‌ها مقایسه گردید. نتایج نشان داد که برای نسبت‌های مقاومت بدون بعد مساوی و بزرگ‌تر از ۵، نتایج این تحقیق همخوانی خوبی با روش بولز دارد و در نسبت مقاومت بدون بعد ۱، روش بولز مقدار N'_c را ۴/۳٪ بیشتر تخمین می‌زند. روش هانسن مقدار N'_c را در نسبت مقاومت بدون بعد ۱، ۲/۴٪ و در نسبت مقاومت بدون بعد ۵ مقدار N'_c را ۶/۷٪ کمتر تخمین می‌زند.

نتایج نشان داد که در تمامی نسبت‌های D_i/D_o با افزایش شیب شیروانی، میزان افزایش N'_c ناشی از افزایش نسبت مقاومت بدون بعد از ۱ به ۵، بیشتر می‌شود. به عنوان مثال در پی حلقوی با نسبت $D_i/D_o=0.2$ ، میزان افزایش N'_c ناشی از افزایش نسبت مقاومت بدون بعد از ۱ به ۵، برای شیب‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درجه به ترتیب ۲/۷٪، ۶٪ و ۹/۸٪ می‌باشد. در تمامی شیروانی‌ها با افزایش نسبت D_i/D_o ، میزان افزایش N'_c ناشی از تغییرات نسبت مقاومت بدون بعد از ۱ به ۵، کاهش می‌یابد. به عنوان مثال در شیروانی با شیب ۴۵ درجه با

افزایش نسبت مقاومت بدون بعد از ۱ به ۵، مقدار N'_c برای پی حلقوی با نسبت‌های D_i/D_o ، ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ به ترتیب ۰/۹/۸، ۰/۹/۵، ۰/۹/۴، ۰/۹/۳ و ۰/۹/۲ افزایش می‌یابد.



شکل ۵: اثر نسبت مقاومت بدون بعد بر روی N'_c (الف) شیب ۴۵ درجه (ب) شیب ۳۰ درجه



شکل ۶: مقایسه نتایج المان محدود این تحقیق برای پی دایره‌ای با سایر روش‌ها

جدول ۶: مقادیر ضرایب ظرفیت باربری زهکشی نشده پی حلقوی برای شیروانی با شیب‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ و نسبت مقاومت بدون بعد ۱ و ۵

D_i/D_o	$\beta=15$		$\beta=30$		$\beta=45$	
	$C_u/\gamma D_o=1$	$C_u/\gamma D_o=5$	$C_u/\gamma D_o=1$	$C_u/\gamma D_o=5$	$C_u/\gamma D_o=1$	$C_u/\gamma D_o=5$
۰ (دایره‌ای)	۵/۵۷	۵/۷۳	۵/۰۴	۵/۳۶	۴/۵۱	۵
۰/۲	۵/۳۶	۵/۵۱	۴/۹۲	۵/۲۱	۴/۴۸	۴/۹۲
۰/۴	۵/۳۷	۵/۵۱	۴/۹۶	۵/۲۶	۴/۵۶	۵
۰/۶	۵/۵۱	۵/۶۳	۵/۱۵	۵/۴۱	۴/۸	۵/۱۸

۳-۳- اثر نسبت ارتفاع شیروانی به قطر پی

برای بررسی اثر ارتفاع شیروانی بر روی ضریب ظرفیت باربری زهکشی نشده، در مدل ۳ بعدی المان محدود، پی حلقوی بر رأس شیروانی‌هایی با ارتفاع‌های مختلف، آنالیز گردید. نتایج به دست آمده در شکل ۷ ارائه شده است. نمودارها دارای سه بخش می‌باشد در بخش اول مقدار N'_c نسبت به حالت زمین مسطح کمتر می‌گردد و در بخش دوم N'_c ثابت است و در بخش سوم N'_c با شیب زیادی به سمت صفر میل می‌کند. در این آنالیزها ۳ نوع گسیختگی مشاهده گردید که در بخش ۳-۱ شرح داده شد. بخش اول نمودارها مکانیسم گسیختگی توسط ارتفاع شیروانی محدود می‌گردد (گسیختگی شکل ۲-الف). در مقادیر بیشتر از یک نسبت معین ارتفاع شیروانی به قطر خارجی پی (H/D_0) ؛ گسیختگی تحت تأثیر ارتفاع شیروانی قرار نمی‌گیرد (بخش دوم نمودار و گسیختگی شکل ۲-ب). شاخه سوم نمودار شامل گسیختگی کلی شیروانی است (شکل ۲-ج). این گسیختگی زمانی رخ می‌دهد که ارتفاع شیروانی به مقدار نهایی خود برای پایداری تحت بارگذاری ثقلی نزدیک شود.

مقدار (H/D_0) ؛ به شیب شیروانی و نسبت قطر خارجی به قطر داخلی پی حلقوی بستگی دارد. مقادیر (H/D_0) برای شیروانی با شیب‌های ۳۰ و ۴۵ درجه در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج نشان داد که با افزایش شیب شیروانی مقدار (H/D_0) افزایش یافت.

در یک شیب ثابت با افزایش نسبت قطر داخلی به قطر خارجی مقدار (H/D_0) کاهش یافت.

جدول ۷: مقادیر (H/D_0) برای شیب ۳۰ و ۴۵ درجه

D_i/D_0	$\beta=45$	$\beta=30$
۰ (دایره‌ای)	۰/۷۲	۰/۴۵
۰/۲	۰/۷	۰/۳۸
۰/۴	۰/۵	۰/۳
۰/۶	۰/۴۴	۰/۲۶
۰/۸	۰/۲۸	۰/۱۹

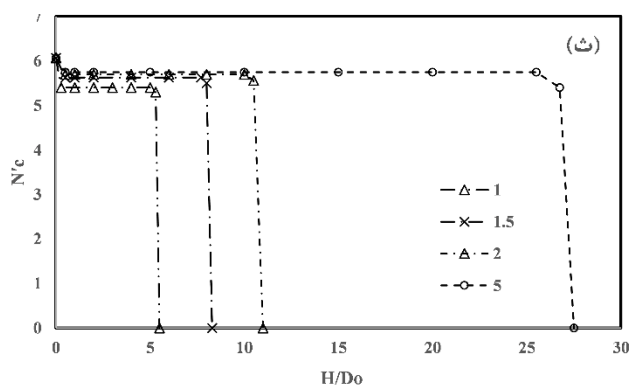
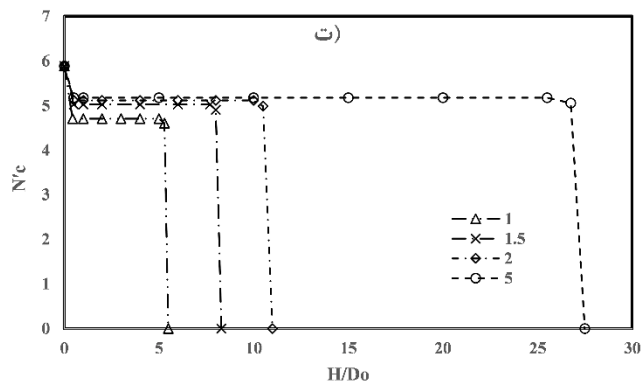
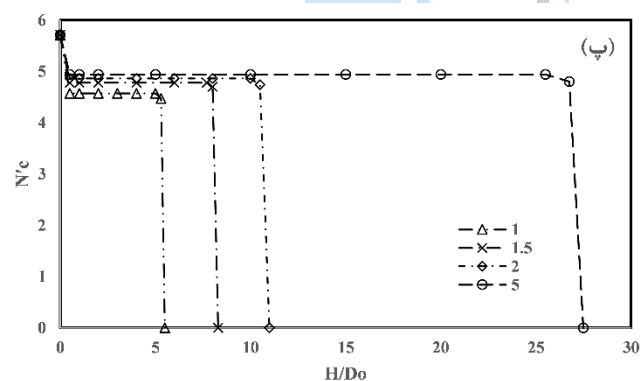
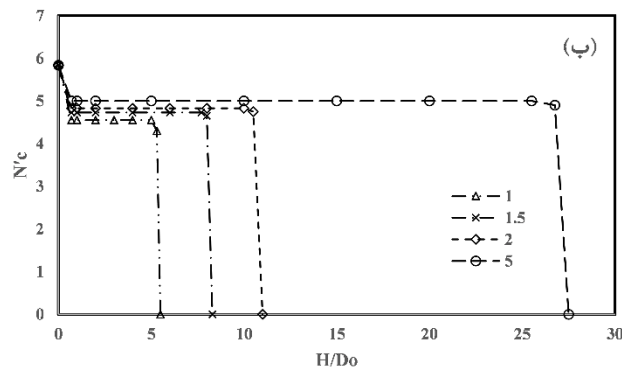
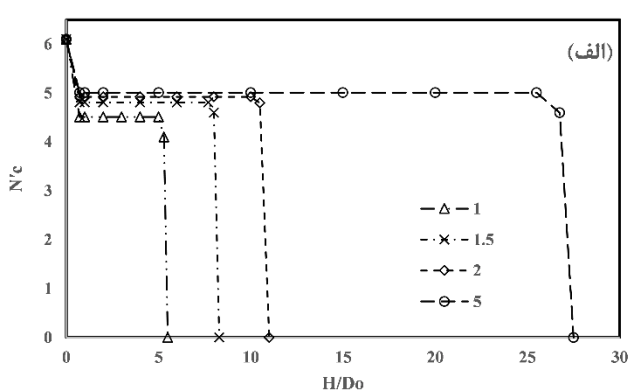
برای مقادیر کوچک نسبت مقاومت بدون بعد $(C_u/\gamma D_0)$ نمی‌توان به گسیختگی ناشی از ظرفیت باربری دست یافت زیرا در تمام نسبت‌های H/D_0 با گسیختگی کلی شیروانی مواجه می‌شویم و شیروانی تحت بارگذاری ثقلی دچار گسیختگی می‌گردد.

مایرهورف [۵۵] نموداری برای تعیین ضریب ظرفیت باربری زهکشی نشده مجاور شیروانی ارائه نمود. مایرهورف برای شیب‌هایی با ارتفاع کمتر از عرض پی، گسیختگی را ناشی از گسیختگی کلی شیروانی را در نظر گرفت و مقدار N'_c را تابعی از زاویه شیروانی، فاصله پی از رأس شیروانی و عدد پایدار شیروانی در نظر گرفت. برای شیروانی با ارتفاع مساوی یا بزرگ‌تر از عرض پی، گسیختگی را ناشی از گسیختگی ظرفیت باربری پی را در نظر گرفت و N'_c را تابعی از زاویه شیروانی و فاصله پی از رأس شیروانی در نظر گرفت. به همین دلیل یک جهش غیرواقعی در مقدار ضریب ظرفیت باربری زهکشی نشده (N'_c مواجه می‌شویم (شکل ۸)). نتایج آنالیز پی حلقوی با نسبت $D_i/D_0=0$ (پی دایره‌ای) در مقایسه با روش مایرهورف برای نسبت مقاومت بدون بعد ۱ و شیروانی با زاویه ۳۰ درجه در شکل ۸ ارائه شده است. در مقادیر نسبت ارتفاع شیروانی به قطر پی ۱ الی ۵ نتایج المان محدود و روش مایرهورف همخوانی دارند؛ ولی در مقادیر نسبت ارتفاع شیروانی به قطر پی کمتر از ۱، روش مایرهورف مقدار N'_c را کمتر تخمین می‌زند. در روش المان محدود با افزایش نسبت ارتفاع شیروانی به

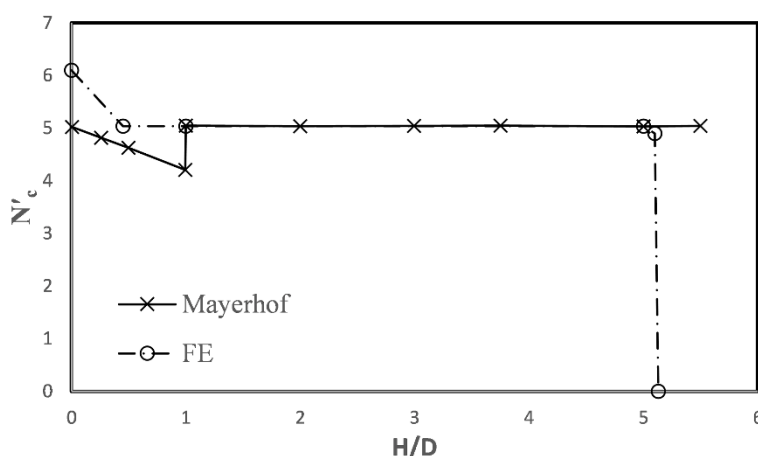
قطر پی، ابتدا با یک کاهش در N'_c مقدار مواجه می‌شویم (گسیختگی نوع اول، شکل ۲-الف)، سپس با یک بخش افقی که نشان‌دهنده مقدار ثابتی برای N'_c است، مواجه می‌شویم (گسیختگی نوع ۲، شکل ۲-ب) و در انتها با یک افت نهایی به دلیل گسیختگی شیروانی مواجه می‌شویم (گسیختگی نوع ۳، شکل ۲-ج) ولی در روش مایرهورف گسیختگی شیروانی برای مقادیر بزرگ در نظر گرفته نشده است.

جدول ۸: مقایسه N'_c حاصل از روش المان محدود و روش مایرهورف (نسبت مقاومت بدون بعد مساوی ۱ و زاویه شیروانی ۳۰ درجه)

مایرهورف	تحقیق حال حاضر					
	$D_i/D_o=0$	$D_i/D_o=0.2$	$D_i/D_o=0.4$	$D_i/D_o=0.6$	$D_i/D_o=0.8$	
N'_c	۵/۰۴	۵/۰۴	۴/۹۲	۴/۹۶	۵/۰۹	۵/۶۲
درصد انحراف	-	۰	-۲/۳	-۱/۶	+۱	+۱۱/۵



شکل ۷: تغییرات N'_c در مقابل نسبت H/Do برای نسبت‌های مختلف $C_u/\gamma D_o$



شکل ۸: تغییرات N'_c پی دایره‌ای در مقابل نسبت H/D_0 برای نسبت‌های مختلف $C_u/\gamma D_0$

۳-۴- مقایسه نتایج تحلیل المان محدود و تفاضل محدود

در این بخش حاصل از نتایج تحلیل روش‌های المان محدود و تفاضل محدود با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در این قسمت پی حلقوی بر روی رأس شیروانی با نسبت ارتفاع شیروانی به قطر خارجی پی $(H/D_0=1)$ و نسبت مقاومت بدون بعد $(C_u/\gamma D_0=1)$ با شیب 15° در نرم‌افزار FLAC3D مدل گردید. با توجه به اینکه اندازه المان‌ها مدل بر روی نتایج حاصل تأثیرگذار می‌باشد، از آنالیز حساسیت جهت تعیین ابعاد المان‌های مدل استفاده گردید. نتایج حاصل در جدول ۹ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد N'_c حاصل از روش تفاضل محدود مقدار بین 1% تا 2% کوچک‌تر از روش المان محدود می‌باشد. روند تغییرات N'_c با افزایش نسبت D_i/D_0 مشابه هم می‌باشد. در هر دو روش المان محدود و تفاضل محدود با افزایش نسبت D_i/D_0 تا 0.2 ، N'_c کاهش می‌یابد و برای مقادیر نسبت D_i/D_0 بزرگ‌تر از 0.2 ، N'_c افزایش می‌یابد.

جدول ۸: مقایسه N'_c حاصل از روش المان محدود و تفاضل محدود

	$D_i/D_0=0$	$D_i/D_0=0.2$	$D_i/D_0=0.4$	$D_i/D_0=0.6$	$D_i/D_0=0.8$
المان محدود	۴/۵۱	۴/۴۸	۴/۵۶	۴/۸	۵/۴
تفاضل محدود	۴/۴	۴/۳۸	۴/۴۹	۴/۷۳	۵/۳۲

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر شیروانی بر روی ضریب ظرفیت باربری زهکشی نشده پی حلقوی به کمک روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. در آنالیزهای انجام‌شده اثرات نسبت قطر داخلی به قطر خارجی پی، ارتفاع شیروانی، شیب شیروانی و نسبت مقاومت بدون بعد خاک رسی بر روی ضریب ظرفیت باربری زهکشی نشده N'_c مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق می‌تواند برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های حلقوی سازه‌هایی مانند مخازن نفت، سیلوها و پایه پل مجاور شیروانی توسط مهندسیین مورد استفاده قرار گیرد.

۱- در پی‌های حلقوی مجاور شیروانی، با افزایش نسبت D_i/D_0 تا 0.4 مقدار N'_c کاهش می‌یابد و برای نسبت‌های D_i/D_0 بزرگ‌تر از 0.4 مقدار N'_c کاهش می‌یابد. این تغییرات در تمامی شیب‌های شیروانی‌ها مشاهده گردید.

- ۲- میزان کاهش N'_c پی‌های حلقوی مجاور شیروانی نسبت به پی‌های حلقوی مستقر بر روی زمین مسطح با افزایش نسبت D_i/D_0 کاهش می‌یابد. این تغییرات در تمامی شیب‌های شیروانی‌ها مشاهده گردید.
- ۳- در پی‌های حلقوی مجاور شیروانی، با افزایش مقاومت بدون بعد از ۱ تا ۵، N'_c به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد و برای مقادیر افزایش مقاومت بدون بعد بزرگ‌تر از ۵ N'_c تقریباً ثابت می‌ماند. این تغییرات در تمامی شیب‌های شیروانی‌ها و نسبت‌های D_i/D_0 مشاهده گردید.
- ۴- در پی‌های حلقوی مجاور شیروانی، میزان افزایش N'_c ناشی از افزایش نسبت مقاومت بدون بعد از ۱ به ۵، با افزایش شیب شیروانی، بیشتر می‌شود. این تغییرات در تمامی نسبت‌های D_i/D_0 مشاهده گردید.
- ۵- در پی‌های حلقوی مجاور شیروانی، میزان افزایش N'_c ناشی از تغییرات نسبت مقاومت بدون بعد از ۱ به ۵، با افزایش نسبت D_i/D_0 ، کاهش می‌یابد. این تغییرات در تمامی شیب‌های شیروانی‌ها مشاهده گردید.
- ۶- مکانیسم گسیختگی در پی‌های حلقوی مجاور شیروانی تا یک نسبت معین ارتفاع شیروانی به قطر خارجی پی (H/D_0) توسط ارتفاع شیروانی محدود می‌گردد و برای نسبت ارتفاع شیروانی بزرگ‌تر از (H/D_0) ، گسیختگی تحت تأثیر ارتفاع شیروانی قرار نمی‌گیرد.

۵- مراجع

- [1] Baban, T. M. (2016). *Shallow foundations: discussions and problem solving*. John Wiley & Sons, 76.
- [2] Ebrahimipour, A., & Eslami, A. (2024). Analytical study of piles behavior for marine challenging substructures. *Ocean Engineering*, 292, 116514.
- [3] Birid, K., & Choudhury, D. (2021). Undrained bearing capacity factor N_c for ring foundations in cohesive soil. *International Journal of Geomechanics*, 21(2), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001900](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001900).
- [4] Zhao, L., and J. H. Wang. (2008). Vertical bearing capacity for ring footings. *Comput. Geotech.* 35 (2): 292–304. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2007.05.005>.
- [5] Benmebarek, S., M. S. Remadna, N. Benmebarek, and L. Belouar. (2012). Numerical evaluation of the bearing capacity factor N_γ of ring footings. *Comput. Geotech.* 44: 132–138. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.04.004>.
- [6] Naseri, M., and E. S. Hosseininia. (2015). Elastic settlement of ring foundations. *Soils Found.* 55 (2): 284–295. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.02.005>
- [7] Naseri, M., and E. S. Hosseininia. (2015). Elastic settlement of ring foundations. *Soils Found.* 55 (2): 284–295. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.02.005>.
- [8] Hamlaoui, S., Messameh, A., Mabrouki, A., Bougouffa, I., & Bouaicha, A. (2023). Three-dimensional elasto-plastic analysis for the undrained capacity of ring and circular footings embedded in heterogeneous clay. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 10(5), 856-870.
- [9] Kumar, J., and M. Chakraborty. (2015). Bearing capacity factors for ring foundations. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 141 (10): 06015007.
- [10] Hosseininia, E. S. (2016). Bearing capacity factors of ring footings. *Iran. J. Sci. Technol. , Trans. Civ. Eng.* 40 (2): 121–132. <https://doi.org/10.1007/s40996-016-0003-6>.
- [11] Lee, J. K., S. Jeong, and S. Lee. (2016). Undrained bearing capacity factors for ring footings in heterogeneous soil. *Comput. Geotech.* 75: 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.01.021>.
- [12] Lee, J. K., S. Jeong, and J. Q. Shang. (2016b). Undrained bearing capacity of ring foundations on two-layered clays. *Ocean Eng.* 119: 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.04.019>.
- [13] Tang, C., and K. Phoon. (2018). Prediction of bearing capacity of ring foundation on dense sand with regard to stress level effect. *Int. J. Geomech.* 18 (11): 04018154. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001312](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001312).
- [14] Sharma, V., and A. Kumar. (2018). Behavior of ring footing resting on reinforced sand subjected to

- eccentric-inclined loading. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 10 (2): 347–357. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.11.005>.
- [15] Lai, V. Q., Shiau, J., Keawsawasvong, S., & Tran, D. T. (2022). Bearing capacity of ring foundations on anisotropic and heterogenous clays: FEA, NGI-ADP, and MARS. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(7), 3913-3928.
- [16] Vali, R., Alinezhad, E., Fallahi, M., Beygi, M., Saberian, M., & Li, J. (2024). Developing a novel big dataset and a deep neural network to predict the bearing capacity of a ring footing. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- [17] Wang, A. H., Zhang, Y. F., Xia, F., Luo, R. P., & Wang, N. (2022). Ultimate Bearing Capacity of Ring Foundations Embedded in Undrained Homogeneous Clay. *Geofluids*, 2022(1), 6382799.
- [18] Choudhury, D., and K. S. Subba Rao. (2005). Seismic bearing capacity of shallow strip footings. *Geotech. Geol. Eng.* 23 (4): 403–418. <https://doi.org/10.1007/s10706-004-9519-9>.
- [19] Pain, A., D. Choudhury, and S. K. Bhattacharyya. (2016). The seismic bearing capacity factor for surface strip footings.” In: *Geo-Chicago, Chicago*, pp. 197–206.
- [20] Nadgouda, K., & Choudhury, D. (2019). Seismic bearing capacity factor N_{γ} for shallow strip footing using modified pseudo-dynamic method. In: *Eighth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, Reston, VA: American Society of Civil Engineers, pp. 12-21
- [21] Nadgouda, K., and D. Choudhury. (2020). Seismic bearing capacity factor N_{γ} for dry sand beneath strip footing using modified pseudo-dynamic method with composite failure surface. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(2), 171-180. <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1707994>.
- [22] Choudhury, D., and K. S. Subba Rao. (2006). Seismic bearing capacity of shallow strip footings embedded in slope. *Int. J. Geomech.* 6 (3): 176–184. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2006\)6:3\(176\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2006)6:3(176)).
- [23] Kumar, J., and P. Ghosh. (2005). Bearing capacity factor N_{γ} for ring footings using the method of characteristics. *Can. Geotech. J.* 42 (5): 1474–1484. <https://doi.org/10.1139/t05-051>.
- [24] Gholami, H., and E. S. Hosseininia. (2017). Bearing capacity factors of ring footings by using the method of characteristics. *Geotech. Geol. Eng.* 35 (5): 2137–2146. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0233-9>.
- [25] Keshavarz, A., and J. Kumar. (2017). Bearing capacity computation for a ring foundation using the stress characteristics method. *Comput. Geotech.* 89: 33–42.
- [26] Boushehrian, J. H., Hataf, N. (2003). Experimental and numerical investigation of the bearing capacity of model circular and ring footings on reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 21(4), 241-256. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(03\)00029-3](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(03)00029-3).
- [27] Gholami, H., and E. S. Hosseininia. (2017). Bearing capacity factors of ring footings by using the method of characteristics. *Geotech. Geol. Eng.* 35 (5): 2137–2146.
- [28] El Sawwaf, M., and A. Nazir. (2012). Behavior of eccentrically loaded small-scale ring footings resting on reinforced layered soil. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 138 (3): 376–384. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000593](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000593).
- [29] Naderi, E., and N. Hataf. (2014). Model testing and numerical investigation of interference effect of closely spaced ring and circular footings on reinforced sand. *Geotext. Geomembr.* 42 (3): 191–200. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2013.12.010>
- [30] Fayaz, S., & Shah, M. Y. (2024). Experimental Investigation of the Behavior of Ring and Circular Footings on Geogrid Reinforced Layered Soil Strata. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 1-26.
- [31] Sharma, V., and A. Kumar. (2017a). Influence of relative density of soil on performance of fiber-reinforced soil foundations. *Geotext. Geomembr.* 45 (5): 499–507.
- [32] Sharma, V., and A. Kumar. (2017b). Strength and bearing capacity of ring footings resting on fiber-reinforced sand. *Int. J. Geosynth. Ground Eng.* 3 (9), pp. 1-17, <https://doi.org/10.1007/s40891-017-0086-6>.
- [33] Al-Sumaiday, H., Khalaf, W. D., & Muhawiss, F. M. (2024). Experimental Investigation of Bearing Capacity of Circular and Ring Footings on Geogrid-Reinforced Cohesionless Soils. *Civil and Environmental Engineering*, 20(1), 349-363
- [34] Georgiadis, K. (2010). Undrained bearing capacity of strip footings on slopes. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 136(5), 677-685.
- [35] Gourvenec, S. M., and D. S. K. Mana. (2011). Undrained vertical bearing capacity factors for shallow foundations. *Géotech. Lett.* 1 (4): 101–108. <https://doi.org/10.1680/geolett.11.00026>.

- [36] Ke, L., Gao, Y., Zhao, Z., Zhou, Y., & Ji, J. (2021). Undrained bearing capacity of strip footing near slopes considering the orientation of strength increase. *International Journal of Geomechanics*, 21(7), 06021016.
- [37] Mohammadzadeh, M., Nadi, B., Hajiannia, A., & Mahmoudi, E. (2023). The undrained vertical bearing capacity of skirted foundations located on slopes using finite element limit analysis. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(4), 121.
- [38] Zhou, H., Zhang, J., Yu, X., Hu, Q., Zheng, G., Xu, H., ... & Yang, S. (2024). Stochastic Bearing Capacity and Failure Mechanism of Footings Placed Adjacent to Slopes considering the Anisotropic Spatial Variability of the Clay Undrained Strength. *International Journal of Geomechanics*, 24(4), 04024022.
- [39] Keshavarz, A., Beygi, M., & Vali, R. (2019). Undrained seismic bearing capacity of strip footing placed on homogeneous and heterogeneous soil slopes by finite element limit analysis. *Computers and Geotechnics*, 113, 103094.
- [40] Benmebarek, S., Saifi, I., & Benmebarek, N. (2017). Undrained vertical bearing capacity factors for ring shallow footings. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35, 355-364.
- [41] Skempton, A. W. (1951). The bearing capacity of clays. In: *Building Research Congress*, 180-189. <https://doi.org/10.1002/j.1477-8696.1951.tb01280.x>
- [42] Eason, G., and R. T. Shield. (1960). The plastic indentation of a semiinfinite solid by a perfectly rough circular punch. *J. Appl. Math. Phys.* 11: 33-43. <https://doi.org/10.1007/BF01591800>
- [43] Cox, A. D., Eason, G., & Hopkins, H. G. (1961). Axially symmetric plastic deformations in soils. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 254(1036), 1-45.
- [44] Hansen, J. B. (1970). A revised and extended formula for bearing capacity. Bulletin No. 28. Lyngby, Denmark: Danish Geotechnical Institute.
- [45] Vesic, A. S. (1973). Analysis of ultimate loads of shallow foundations. *J. Soil Mech. Found. Div.* 99 (1): 45-73.
- [46] Tani, K., and W. H. Craig. (1995). Bearing capacity of circular foundations on soft clay of strength increasing with depth. *Soils Found.* 35 (4): 21-35. https://doi.org/10.3208/sandf.35.4_21. Terzaghi, K. 1943. *Theoretical soil mechanics*. New York: Wiley.
- [47] Salgado, R., A. V. Lyamin, S. W. Sloan, and H. S. Yu. (2004). Two-and three-dimensional bearing capacity of foundations in clay. *Géotechnique* 54 (5): 297-306. <https://doi.org/10.1680/geot.2004.54.5.297>.
- [48] Edwards, D. H., L. Zdravkovic, and D. M. Potts. (2005). Depth factors for undrained bearing capacity. *Géotechnique* 55 (10): 755-758. <https://doi.org/10.1680/geot.2005.55.10.755>.
- [49] Bowles J. E. (1996). *Foundation analysis and design*, 5th Edition, McGraw-Hill Companies, Inc., New York, New York. Pp 258-263.
- [50] Azzouz A. S. and Baligh M. M. (1983). Loaded areas on cohesive slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 109, No. 5, pp.724-729.
- [51] Chen W. F. (1975). *Limit analysis and soil plasticity*. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam.
- [52] Michalowski R. L. (1989). Three-dimensional analysis of locally loaded slopes. *Geotechnique*, Vol. 39, No. 1, pp. 27-38.
- [53] Narita K. and Yamaguchi H. (1990). Bearing capacity analysis of foundations on slopes by use of log-spiral sliding surfaces. *Soils and Foundations*, Vol.30, No. 3, pp. 144-152.
- [54] Kusakabe O, Kimura T and Yamaguchi H. (1981). Bearing capacity of slopes under strip loads on the top surfaces. *Soils and Foundations*, Vol. 21, No. 4, pp 29-40.
- [55] Meyerhof G G. (1957). The ultimate bearing capacity of foundations on slopes. In :*Proceedings of the 4th ICSMFE*, London, pp 384-386.