

Estimation of the undrained bearing capacity of strip footings on two-layer clay soils adjacent to the geogrid-stabilized slope under the effect of combined loading

Meisam Mahboubi Niazmandi^{1*}

1- Ph.D. Graduated, Department of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of technology, Shiraz, Iran

ABSTRACT

The present paper aimed to determine the bearing capacity of strip footings on two-layered of clayey soil in the vicinity of geogrid-stabilized slope under the effect of combined loading by applying horizontal (H), vertical (V) and bending anchor (M) loads. To this aim, by modeling the finite elements of a strip foundation in ABAQUS software and analyzing the probe method based on the load-displacement controlled approach, the failure envelopes and the ultimate vertical (V_{ult}/BC_{ul}) and bending (M_{ult}/B^2C_{ul}) bearing capacities of strip footings under combined loadings in V-H and V-M spaces have been determined. The results obtained in two slope conditions, unreinforced and reinforced with geogrids, have been evaluated by performing parametric studies regarding the effect of changes in the distance of the footing from the edge of the slope, the number of geogrids, and the placement or angle of rotation of geogrids relative to the horizon (θ/β) on the bearing capacity of footings. The results showed that in both loading conditions, the reinforcement of the slope has a great effect on vertical (V_{ult}/BC_{ul})- and bending (M_{ult}/B^2C_{ul}) bearing capacities. The optimal number of geogrids to achieve the maximum V_{ult}/BC_{ul} and M_{ult}/B^2C_{ul} were obtained as 3 and 4 geogrids, respectively. The optimal distance of the footing position relative to the crest of the slope to achieve the V_{ult}/BC_{ul} and M_{ult}/B^2C_{ul} were determined to be equal to 4 and 3 times the width of the footing, respectively. By increasing θ/β under both V-H and V-M modes, the failure envelopes and the changes in V_{ult}/BC_{ul} and M_{ult}/B^2C_{ul} decrease. The results of the present paper provide a clear understanding of the behavior mechanism of strip footings under the effect of a wide range of parametric changes for the development of new experimental equations and executive works.

ARTICLE INFO

Receive Date: 19 June 2023

Revise Date: 29 August 2023

Accept Date: 03 October 2023

Keywords:

Finite element analysis,
Strip footings,
Two-layered clayey soil,
Geogrid-reinforced slope,
Combined loading, ABAQUS
software.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.402512.3146>

*Corresponding author: Meisam Mahboubi Niazmandi

Email address: m.mahboubi@sutech.ac.ir

تخمین ظرفیت باربری زهکشی نشده پی‌های نواری روی خاک‌های دو لایه رسی مجاور شیب تثبیت شده با ژئوگرید تحت اثر بارگذاری ترکیبی

میثم محبوبی نیازمندی^{*}

۱- دکترای ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

چکیده

هدف اصلی مقاله حاضر تعیین ظرفیت باربری پی‌های نواری مستقر بر خاک دو لایه رسی در مجاورت یک شیب تثبیت شده با ژئوگرید تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی با اعمال بارهای افقی (H)، قائم (V) و لنگر خمشی (M) می‌باشد. برای دستیابی به این هدف، با مدلسازی اجزای محدود یک پی نواری در نرم‌افزار ABAQUS و تحلیل پروب بر مبنای روش بار-جابجایی کنترل شده، پوش‌های گسیختگی و ظرفیت‌های باربری نهایی قائم و خمشی پی‌های نواری تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی در فضای بارگذاری $V-H$ و $V-M$ تعیین شد. نتایج حاصله در دو حالت شیب فاقد تثبیت و تثبیت شده با ژئوگرید و با انجام مطالعات پارامتریک در خصوص اثر تغییرات فاصله پی از لبه شیب، تعداد لایه‌های ژئوگرید و قرارگیری یا زاویه چرخش ژئوگریدها نسبت به افق (θ/β) بر ظرفیت باربری پی‌ها مورد بررسی قرار گرفت. برای ارائه نتایج کاربردی، از ظرفیت‌های باربری نهایی قائم (V_{ult}) و خمشی (M_{ult}) بدون بعدشده نسبت به عرض پی (B) و چسبندگی زهکشی نشده لایه خاک رسی اول ($Cu1$) یعنی $V_{ult}/BCu1$ و M_{ult}/B^2Cu1 استفاده شد. نتایج نشان داد که در هر دو حالت بارگذاری، تسلیح شیب رسی تأثیر زیادی بر $V_{ult}/BCu1$ و M_{ult}/B^2Cu1 دارد. تعداد بهینه لایه‌های ژئوگرید، جهت دستیابی به حداکثر $V_{ult}/BCu1$ و M_{ult}/B^2Cu1 به ترتیب برابر با ۳ و ۴ ژئوگرید به دست آمد. فاصله بهینه موقعیت قرارگیری پی نسبت به تاج شیب جهت دستیابی به حداکثر $V_{ult}/BCu1$ و M_{ult}/B^2Cu1 به ترتیب معادل ۴ و ۳ برابر عرض پی تعیین شد. با افزایش θ تحت اثر هر دو حالت بارگذاری ترکیبی $V-H$ و $V-M$ ، پوش‌های گسیختگی و تغییرات $V_{ult}/BCu1$ و M_{ult}/B^2Cu1 روند کاهشی می‌یابند. نتایج تحقیق حاضر درک واضحی را از مکانیزم رفتاری این پی‌ها تحت اثر طیف گسترده‌ای از تغییرات پارامتریک جهت توسعه معادلات تجربی جدید و کارهای اجرایی ارائه می‌نماید.

کلمات کلیدی: پی نواری، خاک رسی دو لایه، شیب تثبیت شده با ژئوگرید، بارگذاری ترکیبی، نرم‌افزار ABAQUS.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2023.402512.3146	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2023.402512.3146	۱۴۰۳/۰۳/۳۱	۱۴۰۲/۰۷/۱۱	۱۴۰۲/۰۷/۱۱	۱۴۰۲/۰۶/۰۷	۱۴۰۲/۰۳/۲۹
میثم محبوبی نیازمندی m.mahboubi@sutech.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

ظرفیت باربری پی‌های نواری واقع بر خاک‌های همگن را می‌توان با استفاده از معادله کلاسیک ترزاقی و عوامل ظرفیت باربری مرتبط با آن تخمین زد [۱ و ۲]. با این حال، در واقعیت، پروفیل‌های خاک همگن نبوده و ممکن است از لایه‌های متمایز با ویژگی‌های متفاوت تشکیل شده باشند. در خاک‌های چندلایه‌ای که ضخامت لایه بالایی کم یا در مقایسه با عرض پی ناچیز باشد، مکانیزم گسیختگی به لایه‌های زیرین انتقال یافته و این مسئله منجر به کاهش ظرفیت باربری پی می‌گردد. در چنین مواردی تعیین رفتار باربری پی با استفاده از روابط کلاسیک چندان دقیق به نظر نمی‌رسد [۳]. تاکنون رویکردهای مختلفی همچون روش‌های نیمه تجربی [۴ و ۵]، تعادل حدی [۶ و ۷] و عددی [۸ و ۹] برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های نواری واقع بر خاک‌های چندلایه ارائه شده است. بیشتر روش‌های قبلی تنها بارهای قائم اعمالی بر روی پی را در نظر می‌گیرند. این در حالی است که در شرایط واقعی پی‌ها ممکن است تحت تأثیر همزمان بارهای قائم، افقی و لنگر خمشی (V-H-M) قرار بگیرند. بنابراین، لزوم توجه به رفتار باربری پی‌های نواری واقع بر خاک‌های چندلایه تحت اثر اعمال بارهای ترکیبی بسیار حائز اهمیت است [۱۰]. این موضوع به‌ویژه در شرایطی که طرح و اجرای پی‌های نواری در مجاورت زمین‌های شیب‌دار اجتناب‌ناپذیر است، منجر به وخیم‌تر شدن اوضاع پی در زیر سازه گردیده و شیب‌داری زمین از یک سو و اعمال همزمان بارهای ترکیبی بر روی پی از سوی دیگر می‌تواند بر پیچیدگی رفتار باربری پی بیافزاید [۱۱].

استفاده از مسلح‌کننده‌های پلیمری همچون ژئوگریدها جهت افزایش ظرفیت باربری پی‌های نواری واقع بر خاک‌های چندلایه در مجاورت زمین‌های شیب‌دار، تعیین رفتار پی‌های نواری تحت اثر بارهای ترکیبی یکی از موضوعات مورد علاقه مهندسی ژئوتکنیک به‌شمار می‌رود [۱۲]. مطالعات عددی و آزمایشگاهی گسترده‌ای در خصوص ظرفیت باربری پی‌های نواری واقع بر خاک‌های چندلایه تحت اثر بارهای ترکیبی و مسلح‌سازی خاک زیر پی با ژئوگریدها انجام شده است. به‌طور مثال برگادو^۱ و همکاران [۱۳] با مدلسازی آزمایشگاهی و عددی خاکریزهای تثبیت‌شده با لایه‌های ژئوتکستایل، دریافتند که ژئوتکستایل‌های با مقاومت بالا، تغییرشکل‌های پلاستیک را در خاک‌های مستقر در زیر پی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهند. یو^۲ [۱۴] با استفاده از تست‌های آزمایشگاهی و تحلیل‌های عددی، به ارزیابی تأثیر عوامل مختلفی همچون شرایط مرزی، اندازه هندسی و تعداد لایه‌های ژئوگرید بر ظرفیت باربری پی‌های نواری مستقر بر خاکریزهای چندلایه ماسه‌ای شیب‌دار و تثبیت‌شده با ژئوگریدها پرداخته‌اند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که با افزودن لایه‌های ژئوگرید، ظرفیت باربری پی نواری بر روی سطح شیب‌دار به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. آنها همچنین مقادیر بحرانی پارامترهای طراحی ژئوگریدها را برای مسلح‌سازی خاک در زیر پی‌های نواری مستقر بر سطوح شیب‌دار پیشنهاد نموده‌اند. گورونک و راندولف^۳ [۱۵] با بررسی اثر مقاومت ناهمسانگرد خاک بر ظرفیت باربری پی‌های دایره‌ای واقع بر خاک رسی تحت اثر بارهای ترکیبی، به این نتیجه رسیدند که با اعمال بارهای ترکیبی در مقایسه با بارهای مجزا بر روی پی، منحنی پوش گسیختگی خاک زیر پی کوچکتر شده و ظرفیت باربری پی کاهش می‌یابد. هالسی و پوزرین^۴ [۱۶] با تحلیل ظرفیت باربری پی نواری واقع بر خاک رسی تحت اثر بارگذاری ترکیبی و با در نظر گرفتن اندرکنش بین خاک و پی، دریافتند که لحاظ کردن اندرکنش باعث افزایش قابل توجهی در ظرفیت باربری پی نواری می‌گردد. باسوجار^۵ و همکاران [۱۷] با در نظر گرفتن اندرکنش بین خاک و ژئوگرید، به بررسی تأثیر عمق مسلح‌کننده و تغییرات خصوصیات خاک بر رفتار نشست پی‌های نواری مستقر بر خاک تثبیت‌شده با ژئوگرید پرداخته‌اند. این محققین دریافتند که با افزایش مدول الاستیسیته و نسبت پواسون، نشست پی کاهش می‌یابد. ال‌ساوواف^۶ [۱۸] با بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار پی‌های نواری واقع بر شیب‌های ماسه‌ای تثبیت‌شده با ژئوگرید مستقر بر یک بستر رسی نرم، دریافتند که ظرفیت باربری پی با بهبود خاک رس نرم در شیب با استفاده از روش جایگزینی لایه ماسه‌ای تثبیت‌شده، به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. همچنین تأثیر تثبیت‌شده ژئوگرید بر عملکرد پی، وابسته به موقعیت

¹ Bergado

² Yoo

³ Gurnich and Randolph

⁴ Hulsby and Puzrin

⁵ Basudhar

⁶ El Sawwaf

پی نسبت به شیب بوده و با وقتی فاصله گرفتن پی از لبه شیب، تأثیر لایه‌های ژئوگرید افزایش می‌یابد. شارما^۷ و همکاران [۱۹] با استفاده از نتایج مطالعات عددی و آزمایشگاهی پیشین، اقدام به ارائه یک مدل تحلیلی برای تخمین ظرفیت باربری پی‌های نواری مستقر بر خاک‌های رسی و ماسه‌ای تثبیت‌شده با ژئوگرید نمودند. باین^۸ و همکاران [۲۰] به بررسی عددی رفتار پی‌های دامنی^۹ تحت اثر بارهای ترکیبی قائم، افقی و خمشی (V-H-M) پرداخته و با بررسی پروفیل‌های مقاومت برشی دریافتند که مکانیزم‌های گسیختگی خاک پی‌های دامنی تحت اثر بارگذاری ترکیبی در مقایسه با بارگذاری قائم نامنظم‌تر بوده و این مسئله ظرفیت باربری این پی‌ها را به شدت کاهش می‌دهد. راتو^{۱۰} و همکاران [۲۱] با بررسی عددی ظرفیت باربری پی‌های نواری مستقر بر خاک‌های دو لایه رسی تحت اثر بارهای ترکیبی، مکانیزم گسیختگی خاک زیر پی را به‌ازای مقادیر مختلف عمق به عرض پی (D/B) تعیین نمودند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که ظرفیت باربری پی با افزایش نسبت مقاومت برشی زهکشی‌نشده لایه‌های رسی افزایش یافته و هرچه لایه رسی بالایی (نزدیک پی) قوی‌تر باشد، ظرفیت باربری پی قرار گرفته بر روی آن افزایش بیشتری می‌یابد. همچنین این محققین دریافتند که با افزایش نسبت D/B ، از اثر بارهای ترکیبی بر روی پی کاسته شده و تأثیر مقاومت برشی لایه‌های خاک به تدریج کاهش می‌یابد. در نسبت‌های بالاتر D/B اثر مقاومت برشی لایه‌های خاک تقریباً از بین رفته و خاک به‌صورت یک محیط تک لایه رسی عمل می‌نماید. تانگ^{۱۱} و همکاران [۲۲] با استفاده از روش اجزای محدود، رویکردی را جهت تعیین اثر بارگذاری‌های ترکیبی بر ظرفیت باربری قائم، افقی و خمشی پی نواری مستقر بر خاک ماسه‌ای پیشنهاد نموده‌اند. با بهره‌گیری از رویکرد پیشنهادی توسط این محققین می‌توان به پیش‌بینی‌های قابل قبولی از ظرفیت باربری نرمالایز شده خاک از طریق منحنی‌های پوش گسیختگی در فضاهای مختلف بارگذاری ترکیبی (V-H، V-M، V-H-M) دست یافت. مهرآور و همکاران [۲۳] با استفاده از روش اجزای محدود سه‌بعدی به بررسی تأثیر نسبت قرارگیری (L/D) پی‌های سنگین بر پوش‌های گسیختگی زهکشی‌نشده تحت بارگذاری تک‌محوری و ترکیبی پرداخته‌اند. این محققین با مقایسه ظرفیت‌های باربری پیش‌بینی شده با سایر مدل‌ها، یک سری معادلات تجربی را برای پیش‌بینی فاکتورهای ظرفیت باربری پی کیسون تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی در خاک‌های همگن زهکشی‌نشده پیشنهاد نموده‌اند. هنتای^{۱۲} و همکاران [۲۴] با در نظر گرفتن تغییرپذیری مکانی مقاومت برشی خاک با استفاده از روش اجزای محدود تصادفی، ظرفیت باربری نهایی، مکانیزم شکست و پوش‌های گسیختگی احتمالی پی‌های نواری را تحت اثر بارگذاری H-M تعیین نموده‌اند. حقیقی و همکاران [۲۵] با استفاده از تحلیل‌های حدی اجزای محدود کرنش صفحه‌ای به بررسی ظرفیت باربری پی‌های نواری مستقر بر خاک دو لایه دانه‌ای بر روی خاک رس تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی پرداخته‌اند. این محققین روابطی را برای تخمین پوش‌های گسیختگی براساس هندسه مسئله و خصوصیات مصالح پیشنهاد نموده‌اند.

اخیراً ژیا^{۱۳} و همکاران [۲۶] با استفاده از روش اجزای محدود و مطالعات پارامتریک، به بررسی تأثیر ضخامت خاک رس بالایی و هندسه پی بر مکانیزم گسیختگی و ظرفیت باربری خاک متناظر کیسون‌ها مستقر بر خاک رس سخت بر روی رس نرم تحت بارگذاری ترکیبی V-H-M پرداخته‌اند. این محققین براساس نتایج عددی، یک رویکرد طراحی تجربی را برای پیش‌بینی پوش‌های گسیختگی پی‌های سنگین در موقعیت‌های مختلف بارگذاری پیشنهاد نموده‌اند. شن^{۱۴} و همکاران [۲۷] با استفاده از تحلیل المان محدود تصادفی به بررسی تأثیر تغییرپذیری فضایی خاک بر مکانیزم‌های گسیختگی و ظرفیت‌های باربری زهکشی‌نشده پی‌های نواری مستقر بر رسوبات رسی دریایی تحت بارگذاری‌های تک‌محوری پرداخته‌اند. نتایج مطالعات این محققین نشان داد که تفاوت در پوش‌های گسیختگی بین موارد قطعی و احتمالی حداقل است و می‌تواند برای اهداف کاربردی نادیده گرفته شود. همچنین از ظرفیت‌های باربری تک‌محوری احتمالی در این مطالعه می‌توان برای اندازه‌گیری پوش‌های گسیختگی احتمالی استفاده نمود. کو^{۱۵} و همکاران [۲۸] با استفاده از تحلیل اجزای محدود سه‌بعدی، به

⁷ Sharma

⁸ Bienen

⁹ Skirted Foundations

¹⁰ Rao

¹¹ Tang

¹² Hentati

¹³ Xia

¹⁴ Shen

¹⁵ Ko

مطالعه عددی ظرفیت باربری زهکشی نشده پی‌های دایره‌ای مستقر بر خاک دو لایه رسی تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی پرداخته‌اند. این محققین با در نظر گرفتن دو نوع اندرکنش خاک و پی، پوش‌های گسیختگی نرم‌الایز شده را برای طیف گسترده‌ای از ضخامت خاک رسی در لایه اول و نسبت‌های مختلف مقاومت برشی زهکشی نشده تعیین نموده‌اند. فتحی‌پور و همکاران [۲۹] با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود کرنش صفحه‌ای دوبعدی، به مطالعه تأثیر ناهمسانگردی ذاتی خاک بر ظرفیت باربری نهایی پی‌های نواری کم‌عمق مستقر بر خاک‌های دانه‌ای بدون چسبندگی تحت اثر بارگذاری‌های خارج از مرکز و مایل پرداخته‌اند. این محققین با در نظر گرفتن زوایای اصطکاک داخلی متغیر در جهات مختلف و بهینه‌سازی فرم غیرخطی معیار شکست عمومی موهر-کولمب، یک معادله کلی را برای تخمین ظرفیت باربری پی‌های کم‌عمق در شرایط مذکور ارائه نموده‌اند. محبوبی و همکاران [۳۰] با مدل‌سازی عددی، ظرفیت باربری زهکشی نشده پی‌های نواری مستقر بر خاک‌های دو لایه رسی در مجاورت شیب مسلح‌شده با ژئوگرید تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی را بررسی نموده و دریافتند که با افزایش نسبت‌های مقاومت زهکشی نشده لایه‌های خاک رسی ظرفیت باربری قائم افزایش می‌یابد.

مروری بر ادبیات فنی به‌وضوح نشان می‌دهد که مسئله ظرفیت باربری پی‌های نواری واقع بر خاک‌های چند لایه تحت اثر همزمان بارهای ترکیبی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. حال آنکه عموماً این قضیه در طراحی مرسوم پی‌های نواری صرف‌نظر شده و همین موضوع می‌تواند منجر به تخمین‌های غیرایمن ظرفیت باربری پی آن هم در زمین‌های شیب‌دار می‌گردد. علاوه بر این، مروری بر تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که اگرچه مسئله ظرفیت باربری پی‌های نواری مستقر بر خاک‌های چندلایه و زمین‌های شیب‌دار با در نظر گرفتن عواملی همچون بارهای ترکیبی اعمالی بر روی پی، مسلح‌سازی خاک زیر پی‌ها با استفاده از ژئوگریدها مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته، اما در بیشتر این تحقیقات به‌صورت مجزا به بحث و بررسی در این زمینه‌ها پرداخته شده است. این در حالی است که مسائلی همچون خصوصیات هندسی مسئله و نحوه قرارگیری ژئوگریدها در مجاورت شیب‌ها و تأثیر آن بر ظرفیت باربری پی‌های نواری تحت اثر همزمان بارهای ترکیبی افقی، قائم و لنگر (V-H-M) چندان مورد توجه قرار نگرفته است. این در حالی است که شناخت رفتار واقعی و پیچیده پی‌های نواری واقع بر خاک‌های دو لایه رسی در مجاورت شیب‌های تثبیت‌شده با ژئوگریدها تحت اثر همزمان بارهای ترکیبی می‌تواند به عنوان یک زمینه تحقیقاتی جدید در مهندسی ژئوتکنیک مورد توجه قرار بگیرد.

هدف پژوهش حاضر، بررسی تأثیر خصوصیات هندسی مسئله و نحوه قرارگیری ژئوگریدها بر ظرفیت باربری پی‌های نواری واقع بر خاک‌های دو لایه رسی در مجاورت شیب تثبیت‌شده با ژئوگرید تحت اثر همزمان بارهای ترکیبی می‌باشد. برای دستیابی به این هدف از مدل‌سازی اجزای محدود هندسه مسئله در نرم‌افزار ABAQUS و مطالعات عددی پارامتریک بهره گرفته شده است. برای این منظور، خاک دو لایه رسی زهکشی نشده که لایه رس بالایی با ژئوگرید تثبیت‌شده در نرم‌افزار شبیه‌سازی شد. سپس با اعمال شرایط مختلف بارگذاری ترکیبی (V-M و V-H) بر روی پی و تحلیل رفتار پی‌ها، نتایج به‌صورت پوش‌های گسیختگی و همچنین تغییرات ظرفیت باربری افقی، قائم و لنگر خمشی پی به‌ازای موقعیت‌های هندسی مختلف قرارگیری پی نسبت به شیب و چیدمان ژئوگریدها مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- تعریف مسئله

مسئله ظرفیت باربری پی‌های نواری همواره توجه بسیاری از محققین همچون دیویس و بوکر^{۱۶} [۳۱]، هالسی و روس^{۱۷} [۳۲] را به خود جلب نموده است. به‌طور مثال، پیشنهادات مختلفی برای اصلاح فاکتور ظرفیت باربری تحت بار کاملاً قائم، با در نظر گرفتن تأثیر شکل پی، زاویه بارگذاری و خروج از مرکزیت بار توسط محققین زیادی همچون ترزاقی^{۱۸} [۳۳]، مایرهورف [۳۴]، هسن^{۱۹} [۳۵] ارائه گردیده است. با این حال، مسئله ظرفیت باربری پی‌ها تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی موضوع نسبتاً جدیدی است که تنها در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته و به‌علاوه تنها به پی‌های نواری محدود گردیده است. در واقعیت، پی‌ها تحت اثر بارهای ترکیبی و مجموعه‌ای از بارهای عمودی (V)، خمشی (M) و افقی (H) قرار دارند (شکل ۱ الف) [۳۶]. در گذشته عمدتاً با بهره‌گیری از فرضیات ساده‌کننده و

¹⁶ Davis and Booker

¹⁷ Hulsby and Wroth

¹⁸ Terzaghi

¹⁹ Hansen

روش‌های میانگین‌گیری، ظرفیت باربری پی‌های نواری تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی تخمین زده می‌شود. چنین تحلیل‌هایی عمدتاً محافظه‌کارانه بوده و از توانایی کافی برای تعیین پاسخ دقیق رفتار پی‌ها تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی برخوردار نمی‌باشند. این مسئله به ویژه در شرایطی که خاک زیر پی چندلایه بوده و یا نیاز به استفاده از سیستم‌های مسلح‌سازی در خاک زیرین پی باشد، از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و استفاده از روش‌های سنتی برای تحلیل رفتار پی‌ها در این شرایط منطقی نیست [۲۱].

تحقیقات اخیر [۱۵، ۳۶-۳۸] نشان داده است که برای در نظر گرفتن تأثیر بارگذاری‌های ترکیبی بر ظرفیت باربری پی‌ها باید از مکانیزم گسیختگی متفاوتی در مقایسه با روش‌های ساده موجود برای پی‌ها تحت اثر بارگذاری‌های مجزا استفاده نمود. از جمله تحقیقاتی که به صورت دقیق اثر بارگذاری‌های ترکیبی اعمالی بر روی پی‌های نواری را مورد بررسی قرار داده‌اند، می‌توان به مطالعات برانسی و راندولف^{۲۰} [۳۶] و یوکریتنچون^{۲۱} و همکاران [۳۹] اشاره نمود. نتایج اولیه این تحقیقات نشان داده است که برای پی‌های نواری، استفاده از روش‌های سنتی با در نظر گرفتن اثر زاویه‌دار بودن بار و خروج از مرکزیت نیز منجر به دستیابی به نتایج غیرواقعی و غیرمحافظه‌کارانه می‌شود [۱۸]. از جمله راه‌حل‌های ارائه شده جهت تحلیل باربری پی‌های نواری تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی می‌توان به روش پیشنهادی توسط پرانتل^{۲۲} [۴۰] با استفاده از تئوری پلاستیسیته [۴۱] اشاره نمود. برخی از محققین نیز در گذشته با ارائه روش‌های تقریبی و یا تجربی به بررسی مسئله ظرفیت باربری پی‌های نواری تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی پرداخته‌اند [۴۲-۴۴]. از مطالعات دیگر در زمینه تأثیر بارگذاری‌های ترکیبی بر ظرفیت باربری پی‌های سطحی واقع بر خاک‌های چسبنده همگن می‌توان به تحقیق طیبات و کاتر^{۲۳} [۳۷ و ۳۸] اشاره نمود. این محققین دریافتند که با در نظر گرفتن بارگذاری‌های ترکیبی، ظرفیت باربری پی کاهش می‌یابد [۳۷]. علاوه بر این، مطالعات آنها در خصوص ظرفیت باربری پی‌های نواری و دایره‌ای بر روی خاک‌های رسی تحت اثر بارهای با خروج از مرکزیت زیاد نشان داد که با افزایش خروج از مرکزیت بار، ظرفیت باربری این پی‌ها کاهش یافته، ولی این تغییرات کاهش در پی‌های نواری بیشتر می‌باشد [۳۸].

تحقیقات برانسی و راندولف [۳۶] نشان داده است که جهت تحلیل مکانیزم گسیختگی یک پی نواری تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی باید اثر بارها را در فضای بارگذاری V-H-M به صورت توأمان در نظر گرفت. براساس این مکانیزم گسیختگی، صفحه شکست خاک زیر پی را می‌توان مطابق تابع زیر در نظر گرفت:

$$f\left(\frac{V}{A_{eff}}, \frac{M}{D.A_{eff}}, \frac{H}{A_{eff}}\right) = s \quad (1)$$

به طوری که در این رابطه، f تابعی است که بیانگر فضای گسیختگی خاک زیر پی تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی می‌باشد. پارامترهای A_{eff} نیز مساحت مؤثر پی، D قطر و یا عرض پی و s مقاومت خاک یا تنش مؤثر در زیر پی بوده و H ، V و M نیز به ترتیب نیروهای افقی، قائم، خمشی وارد بر پی هستند. بر این اساس، ظرفیت باربری نهایی پی طبق معادله (۲) قابل تعیین خواهد بود:

$$Q_{ult} = s.A_{eff} \quad (2)$$

شکل ۱ (ب) یک پی نواری به عرض B مستقر بر خاک دو لایه رسی را نشان می‌دهد. مطابق این شکل یک لایه خاک رسی با ضخامت H_1 و مقاومت برشی زهکشی‌نشده C_{u1} بر روی یک لایه خاک رسی دیگر با مقاومت برشی زهکشی‌نشده C_{u2} که فراتر از ناحیه نفوذ پی گسترش می‌یابد، قرار گرفته است. بار اعمالی به صورت مایل با زاویه α و دارای خروج از مرکزیت e بر روی این پی وارد شده است. در این حالت می‌توان پی را تحت اثر سه نوع مؤلفه استاتیکی بارگذاری معادل شامل مؤلفه‌های افقی (H)، قائم (V) و لنگر خمشی (M) در نظر گرفت که طبق معادلات ۳ قابل محاسبه هستند:

$$H = Q.\sin \alpha, \quad V = Q.\cos \alpha, \quad M = Q.e.\cos \alpha \quad (3)$$

²⁰ Bransby and Randolph

²¹ Ukritchon

²² Prandtl

²³ Taiebat and Carter

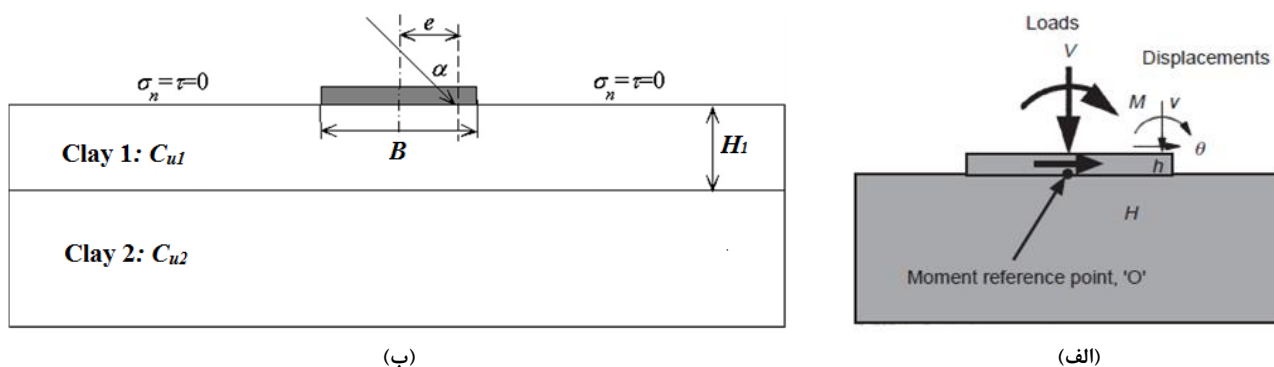
با تعیین بارهای فوق، تمامی ترکیب‌های احتمالی از بارگذاری‌های افقی، قائم و لنگر خمشی که باعث گسیختگی پی شده و پوش گسیختگی آن را تشکیل می‌دهند، بایستی در تحلیل‌ها به صورت تابع $f = (V, H, M)$ در نظر گرفته شوند. بر همین اساس، هدف مقاله حاضر تعیین تابع $f(V, M, H) = 0$ می‌باشد که برحسب بارهای بدون بعد (معادلات ۴) نشان داده می‌شوند:

$$v' = \frac{V}{BC_{u1}}, \quad h' = \frac{H}{BC_{u1}}, \quad m' = \frac{M}{B^2 C_{u1}} \quad (۴)$$

که نشان‌دهنده اندازه مطلق پوش گسیختگی برحسب بارهای نرمال شده (معادلات ۵) می‌باشند:

$$v = \frac{v' V_{ult}}{V}, \quad h = \frac{h' H_{ult}}{H}, \quad m = \frac{m' M_{ult}}{M} \quad (۵)$$

به طوری که در این معادلات، V_{ult} ، H_{ult} و M_{ult} به ترتیب ظرفیت باربری نهایی قائم، افقی و خمشی پی در لحظه گسیختگی را نشان می‌دهند. این معادلات شکل و اندازه نسبی پوش گسیختگی پی را تعیین می‌نمایند. در چنین شرایطی ظرفیت باربری پی نواری تابعی از نسبت‌های C_{u1}/C_{u2} و H_1/B خواهد بود.



شکل ۱: (الف) نمای شماتیک از بارهای ترکیبی اعمال شده بر روی یک پی نواری [Error! Bookmark not defined.]. (ب) حالت خاصی از بارگذاری ترکیبی (V-H) اعمالی بر روی یک پی نواری مستقر بر خاک دو لایه رسی [Error! Bookmark not defined.]

۳- متدولوژی حل مسئله

۳-۱- مدل‌سازی اجزای محدود

امروزه با توجه به پیشرفت سریع علوم کامپیوتر، استفاده از روش‌های عددی برای حل مسائل ژئوتکنیکی گسترش چشمگیری یافته است [۴۵]. همانگونه که پیش از این نیز بیان شد هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی رفتار پی‌های نواری واقع بر شیب‌های خاکی رسی دو لایه و تثبیت‌شده با ژئوگرید می‌باشد. به همین منظور با مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار ABAQUS دویعدی اقدام به انجام مطالعات پارامتریک در خصوص پارامترهای موثر بر مسئله گردیده است. نرم‌افزار ABAQUS [۴۶] یک برنامه رایانه‌ای مبتنی بر روش اجزای محدود است که از قابلیت‌های بالایی همچون در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، محاسبه تغییر شکل‌های بزرگ، مدل‌های رفتاری مختلف خاک و سازه و در نظر گرفتن فشار آب حفره‌ای و غیره برخوردار است [۴۷ و ۴۸]. در ABAQUS، حل غیرخطی روابط جابجایی براساس مفهوم نمو (نرخ)- تکرار صورت می‌گیرد، به علاوه این نرم‌افزار از روش نیوتن-رافسون^{۲۴} برای تحلیل مسائل استفاده می‌کند. در این حالت بار به صورت گام به گام (نمو) اعمال شده و ماتریس سختی از جابجایی‌ها و تنش‌های نمو آخر محاسبه می‌شوند. به این صورت که بارگذاری به تعدادی بازه تقسیم‌بندی شده و تعادل در انتهای هر بازه تعیین می‌شود. در نهایت مجموع همه پاسخ‌های نموها پاسخ تحلیل غیرخطی را

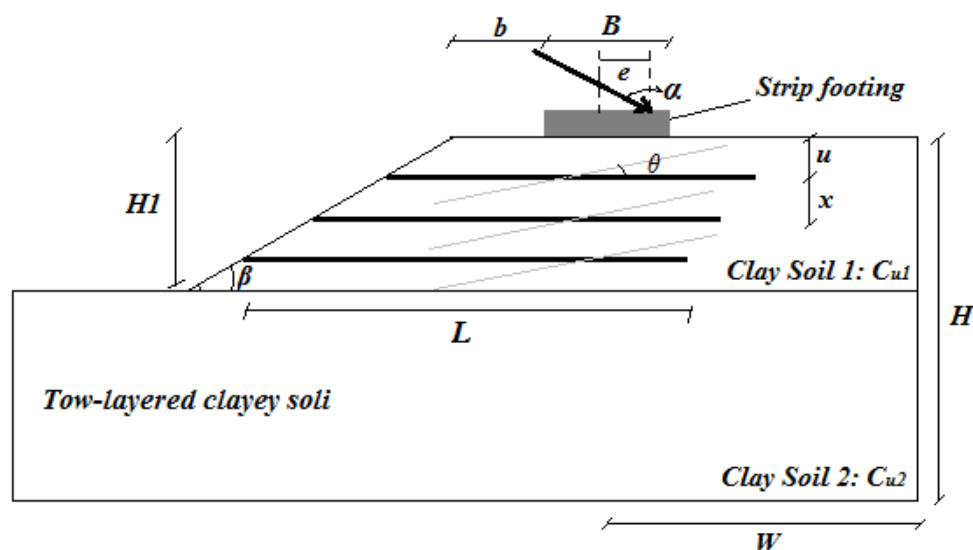
²⁴ Newton-Rophson

تشکیل می‌دهد [۴۵]. این نرم‌افزار با استفاده از یک محیط گرافیکی، کاربر را قادر به ساختن یک شبکه‌بندی واقعی از هندسه مسئله و تحلیل تنش‌ها، کرنش‌ها و تغییرشکل‌های محیط‌های خاکی با دقت و سرعت بالا می‌نماید [۴۶].

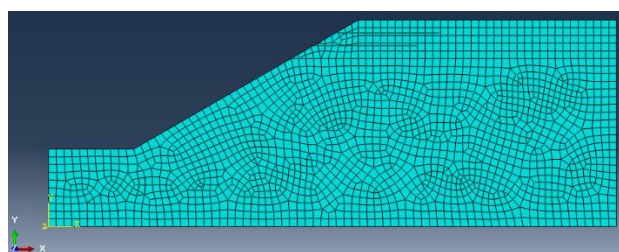
اولین گام در حل یک مسئله ژئوتکنیکی در ABAQUS، ساخت هندسه مسئله با انتخاب محدوده مناسب مدل و مش‌بندی آن است. هندسه اولیه مدل مورد مطالعه در این تحقیق شامل یک پی نواری واقع بر یک خاک دو لایه رسی در مجاورت یک زمین شیب‌دار با زاویه ۳۰ درجه نسبت به افق مطابق شکل ۲ (الف) می‌باشد. مطابق این شکل، B عرض پی نواری، b فاصله پی نواری از شیب، H_1 ضخامت لایه اول، u فاصله اولین لایه ژئوگرید از زیر پی، x فواصل بین ژئوگریدها، L طول ژئوگریدها، β زاویه شیب و θ زاویه چرخش المان‌های ژئوگرید می‌باشند. المان‌های انتخاب‌شده برای مدلسازی لایه‌های خاک رسی از نوع المان یکپارچه کاهش‌یافته (CPE8R) می‌باشد. لایه‌های ژئوگرید نیز مطابق با پیشنهاد SIMULIA [۴۶]، به صورت خطی الاستیک و گسسته با استفاده از نوع المان خرابایی دوبعدی خطی دوگره‌ای (T2D2) با ضخامت $0/003$ متر که در برابر نیروهای محوری مقاومت بوده و در مقابل هیچ‌گونه اعمال خمشی مقاومت نمی‌کنند، در نظر گرفته شدند.

یکی از نکات مهم که تأثیر عمده‌ای بر نتایج تحلیل‌های عددی دارد، محدوده انتخابی برای هندسه مدل شبیه‌سازی شده است. بر این اساس محدوده مدلسازی، موقعیت مرزها و ابعاد المان‌ها باید به گونه‌ای انتخاب شود که اثرات ناشی از مرزها در مدلسازی بر نتایج حاصل از تحلیل به حداقل ممکن کاهش یابد. با کنترل تغییرمکان در مرزها و افزایش کرنش و تنش‌ها می‌توان به صحت ابعاد محدوده مدلسازی برد. به همین منظور با توجه به طول گسترش گوه گسیختگی در خاک می‌توان حداقل ابعاد افقی و قائم را با سعی و خطا و کنترل کانتورهای جابجایی به دست آورد [۴۹]. در مطالعه حاضر فاصله محیط مدل شده در دو جهت افقی تا محور تقارن به اندازه ۱۰ برابر عرض پی ($W = 10B$) و در جهت قائم نیز ۵ برابر عرض پی ($H = 5B$) در نظر گرفته شده است (شکل ۲ (الف)). این ابعاد طوری انتخاب گردیده که اثری روی تنش نهایی نداشته باشد. زیرا چه در آزمایشات و چه در تحلیل‌های عددی ظرفیت باربری، فاصله نهایی بخش گسیختگی خاک تا کناره پی از حدود $3.5B$ تا $4B$ تجاوز نمی‌کند [۵۰]. شکل ۲ (ب) یک نمونه از مدل‌های عددی مورد بررسی با دو لایه ژئوگرید به فواصل $0/5$ متر که در خاک لایه اول قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در تمامی مدل‌ها تنها لایه اول تثبیت شده و فاصله اولین لایه ژئوگرید از زیر پی برابر $0/5$ متر می‌باشد. در این نمونه پی نواری دقیقاً در مجاورت شیب قرار گرفته است و در نمونه‌های دیگر اثر فاصله از شیب نیز لحاظ شده است. شکل ۲ (ج) مدل نهایی مش‌بندی شده قبل از تحلیل را نشان می‌دهد.

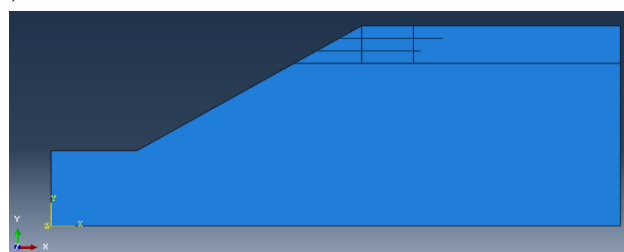
تمرکز مطالعات پارامتریک در این تحقیق بر روی گستره وسیعی از متغیرها شامل طول لایه‌های ژئوگرید، فاصله پی از لبه شیب و تأثیر زاویه چرخش لایه‌های ژئوگرید نسبت به پی بر رفتار پی‌های نواری در مجاورت شیب تثبیت‌شده با ژئوگرید می‌باشد. برای تحلیل‌های پارامتریک، سه سری از پارامترهای ثابت و متغیر مطابق جدول ۱ در هر تحلیل در نظر گرفته شده است. در این جدول N تعداد لایه‌های ژئوگرید بوده و به منظور امکان مقایسه بهتر در تمامی تحلیل‌ها مقدار u و x برابر $0/5$ متر و مقاومت برشی زهکشی‌نشده لایه دوم برابر مقدار ثابت 10 کیلوپاسکال ($C_{u2} = 10 \text{ KPa}$) در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که محدوده‌های انتخاب‌شده برای این پارامترها، بیشتر مسائل مورد علاقه عملی را پوشش می‌دهد.



(الف)



(ج)



(ب)

شکل ۲: (الف) مشخصات هندسی، (ب) شبیه‌سازی عددی هندسه مسئله، (ج) مش‌بندی مدل در ABAQUS

جدول ۱: متغیرهای تحلیل‌های پارامتریک مورد استفاده در مدل‌سازی عددی

پارامترهای متغیر	پارامترهای ثابت	سری تحلیل‌های پارامتریک
Reinforced ($N = 0, 1, 2, 3$ and 4)	$C_{u1}/C_{u2} = 3, b/B = 0, H_1/B = 1.5, L/B = 2, \theta/\beta = 0$	۱
$b/B = 0, 0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4$ and 5	$C_{u1}/C_{u2} = 3, H_1/B = 1.5, L/B = 2, \theta/\beta = 0, \text{Reinforced } (N = 2)$	۲
$\theta/\beta = 0, 0.08, 0.16, 0.32$ and 0.48	$C_{u1}/C_{u2} = 3, b/B = 0, H_1/B = 1.5, L/B = 2, \text{Reinforced } (N = 2)$	۳

پس از ساخت هندسه مسئله، باید یک مدل رفتاری مناسب به هر یک از مصالح اختصاص داده شود [۵۱]. به‌طور کلی، مدل‌های رفتاری زیادی برای شبیه‌سازی مصالح خاکی شناخته شده است که از جمله این مدل‌ها می‌توان به موهر-کولمب، ترسکا، کم‌کلی و مدل اصلاح شده آن (MCC)، اس‌کلی ۱، سنی‌کلی، در مطالعه حاضر، برای تعیین خصوصیات لایه‌های خاک رسی از مدل رفتاری پلاستیسیته موهر-کولمب (جدول ۲) استفاده شد. این مدل از توانایی بالای برای نمایش خصوصیات مصالح الاستوپلاستیک با رفتار سخت‌شدگی همچون لایه‌های خاک رسی برخوردار است که به موجب آن مقاومت برشی توسعه‌یافته در خاک تابعی از اصطکاک داخلی، پیوستگی و تنش اعمالی است. از جمله مزایای مدل موهر-کولمب در مقایسه با سایر مدل‌های رفتاری می‌توان به سادگی رابطه ریاضی، توانایی بالای آن در مدل‌سازی رفتار الاستیک-کاملاً پلاستیک مصالح خاکی و نیاز به تعداد محدودی پارامتر ثابت (۵ پارامتر اصلی) اشاره نمود. علاوه بر این، مدل از توانایی بالایی برای نمایش خصوصیات مصالح الاستوپلاستیک با رفتار سخت‌شدگی همچون لایه‌های خاک رسی برخوردار است که به موجب آن مقاومت برشی توسعه‌یافته در خاک تابعی از اصطکاک داخلی، پیوستگی و تنش اعمالی است. این مدل از ترکیب قانون هوک و معیار گسیختگی کولمب استفاده می‌کند و پارامترهای مورد نیاز آن به دو دسته پارامترهای الاستیک (مدول الاستیسیته، نسبت پواسون) و پلاستیک (زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و زاویه اتساع) تقسیم می‌شوند. هنگامی که زاویه اصطکاک داخلی صفر باشد (خاک صرفاً چسبنده که مبنای مطالعه حاضر را تشکیل می‌دهد)، معیار موهر-کولمب به معیار ترسکا تبدیل شده و تنها به ۳ پارامتر اصلی (مدول الاستیسیته، نسبت پواسون و چسبندگی) نیاز دارد. شرط تسلیم موهر-کولمب حالت توسعه‌یافته قانون کولمب برای وضعیت تنش‌ها در

حالت کلی می‌باشد. در واقع این شرایط، برقراری قانون اصطکاک موهر-کولمب در هر صفحه دلخواه در داخل المان مصالح را تضمین می‌نماید. شرط تسلیم موهر-کولمب را می‌توان به‌طور دقیق با استفاده از سه تابع تسلیم که به صورت مولفه‌هایی از کرنش‌های اصلی فرمول‌بندی شده‌اند، تشریح کرد. با توجه به اینکه کرنش‌های القاء شده در بتن و لایه‌های ژئوگرید بسیار کوچک است و در محدوده الاستیک در نظر گرفته می‌شود، لذا خصوصیات سایر مصالح یعنی بتن پی و لایه‌های ژئوگرید با استفاده از مدل الاستیک خطی با خصوصیات مندرج در جدول ۳ مدلسازی گردید [۵۲]. لازم به ذکر است که خصوصیات لایه‌های خاک در جدول ۲ تنها برای یک حالت خاص نسبت مقاومت برشی زهکشی‌نشده لایه‌ها ($C_{ul}/C_{u2} = 1.5$) در نظر گرفته شده و با تغییرات پارامتریک در هر تحلیل برخی خصوصیات مکانیکی تغییر می‌یابند. به‌طور مثال برای حالت $C_{ul}/C_{u2} = 2$ ، مقدار مقاومت برشی زهکشی‌نشده لایه اول (C_{ul}) برابر با ۲۰ کیلونیوتن بر مترمربع در نظر گرفته شده و مدول الاستیسیته نیز متناظر با آن تغییر می‌یابد. در این خصوص لازم به ذکر است که رابطه مستقیمی بین تغییرات مدول الاستیسیته (E) و چسبندگی زهکشی‌نشده (C_{ul}) خاک رسی وجود ندارد و برای این منظور می‌توان به رابطه همبستگی بین E و C_{ul} پیشنهاد شده توسط استاندارد آشتو [۵۳] مطابق جدول ۴ و یا مراجع [۵۴ و ۵۵] اشاره نمود.

جدول ۲: مشخصات مکانیکی لایه‌های خاک رسی بر مبنای مدل رفتاری موهر-کولمب

لایه‌های خاک رسی	چسبندگی زهکشی‌نشده، C_{ul} [kN/m ²]	زاویه اصطکاک داخلی، ϕ [Degree]	مدول الاستیسیته، E [kN/m ²]	نسبت پواسون، ν [-]
لایه اول	۱۵	۰	۱۵۰۰۰	۰/۴۹
لایه دوم	۱۰	۰	۱۰۰۰۰	۰/۴۹

جدول ۳: مشخصات مکانیکی مصالح بتن پی و لایه‌های ژئوگرید بر مبنای مدل رفتاری الاستیک خطی [۵۲]

مصالح	چگالی، ρ [Kg/m ³]	مدول الاستیسیته، E [kN/m ²]	نسبت پواسون، ν [-]
بتن پی	۲۴۰۰	۲۹۷۵۰	۰/۲
لایه‌های ژئوگرید	۱۵۰۰	۲×۱۰ ^۵	۰/۳۵

جدول ۴: رابطه همبستگی بین مدول الاستیسیته و چسبندگی زهکشی‌نشده خاک رسی بنا بر پیشنهاد استاندارد آشتو [۵۳]

خاک	رس نرم حساس	رس متوسط تا سخت	رس خیلی سخت
مدول الاستیسیته (E)	$400C_{ul} - 1000C_{ul}$	$1500C_{ul} - 2400C_{ul}$	$3000C_{ul} - 4000C_{ul}$

تحلیل مسئله مورد بررسی در این پژوهش به‌صورت دوبعدی و در شرایط کرنش صفحه‌ای انجام شده است. با توجه به فرض مذکور، شرایط مرزی استاندارد برای مدل در نظر گرفته شده است [۴۶]. بر این اساس، مرزهای قائم با نرمال در جهت x (در صفحات موازی $y-z$) با آزادی در جهات y و z و گیردار در جهت x ($u_x = 0$)، مرزهای قائم با نرمال در جهت y (در صفحات موازی $x-z$) با آزادی در جهات x و z و گیردار در جهت y ($u_y = 0$)، صفحه کف مدل در تمامی جهات گیردار ($u_x = u_y = u_z = 0$) و سطح بالایی مدل (سطح زمین) نیز در تمامی جهات با آزادی حرکت در نظر گرفته شده‌اند. پی به‌صورت صلب و رفتار خاک در حالت زهکشی‌نشده در نظر گرفته شده است. محاسبات با فرض چسبندگی کامل بین خاک و پی صورت گرفته و از اندرکنش بین خاک و پی صرف‌نظر گردیده است. اندرکنش بین لایه‌های ژئوگرید و خاک با استفاده از قید منطقه جاسازی شده^{۲۵} تعریف شده است. این روش زمانی به‌کار گرفته می‌شود که نیاز به مدفون کردن یک المان یا گروهی از آنها در المان‌های میزبان^{۲۶} باشد [۵۶]. نرم‌افزار ABAQUS روابط هندسی بین گره‌های المان‌های مدفون شده و میزبان را جستجو می‌کند [۴۷]. اگر گره المان مدفون شده در داخل المان میزبان قرار داشته باشد، درجات آزادی انتقالی^{۲۷} و فشار منافذ^{۲۸} در گره‌ها حذف شده و گره به «گره مدفون شده» تبدیل می‌گردد. درجات آزادی انتقالی و فشار منافذ گره مدفون شده، مقید به مقادیر درونیایی شده از درجات آزادی المان میزبان می‌باشند. المان‌های مدفون شده مجاز به داشتن درجات آزادی چرخشی هستند، اما این چرخش‌ها با مدفون شدن، مقید و محدود نمی‌شوند [۵۷ و ۵۸]. با توجه به توضیحات مذکور و ضخامت ناچیز لایه‌های ژئوگرید و توده

²⁵ Embedded Region

²⁶ Host

²⁷ Translational degrees of freedom

²⁸ Pore pressure degree of freedom

حجیم خاک و در نظر گرفتن مدفون بودن ژئوگریدها در محیط خاک در مدلسازی حاضر، لذا از این روش برای اعمال اندرکنش بین ژئوگریدها و خاک استفاده شد.

در آخرین مرحله به حل نهایی مدل پرداخته می‌شود. بدین منظور از تحلیل ژئواستاتیک [۴۶] جهت برقراری تنش‌های اولیه در مدل جهت منظور نمودن تاریخچه بارگذاری خاک بهره گرفته شده است. در ادامه با اعمال بارگذاری‌های مختلف ترکیبی به صورت استاتیکی (با استفاده از روش جابجایی تا ۲۰ میلی‌متر) بر روی پی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی درخصوص تخمین ظرفیت باربری پی تفسیر گردیده است. مطابق شکل ۱ (الف) بار اعمالی به صورت مایل با زاویه α و دارای خروج از مرکزیت e بر روی این پی وارد شده است. همچنین شایان ذکر است که جهت کاربردی نمودن نتایج و ارائه معیارهای مهندسی، تمامی پارامترهای به دست آمده نسبت به عرض پی (B) بی‌بعد شده و مقادیر بهینه برای هر یک از متغیرهای تحلیل جهت دستیابی به بیشترین ظرفیت باربری پی تعیین شده است.

۲-۳- روند تحلیل تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی

بارگذاری‌های ترکیبی اعمال شده بر روی پی شامل دو دسته بارگذاری‌های V-H و V-M می‌باشند که به ترتیب شامل اثر همزمان بارگذاری قائم-افقی، بارگذاری قائم-لنگر خمشی و بارگذاری قائم-افقی-لنگر خمشی هستند. برای تحلیل نتایج، پوش‌های گسیختگی در هرکدام از تحلیل‌های پارامتریک تعیین شده است. برای ترسیم پوش گسیختگی و تعیین ظرفیت باربری پی‌های نواری تحت بارگذاری‌های ترکیبی در فضای بارگذاری دوبعدی با استفاده از محاسبات اجزای محدود، معمولاً از روش بار کنترل شده با جابجایی بر مبنای دو نوع آنالیز (۱) پروب^{۲۹} و (۲) سواپ^{۳۰} استفاده می‌کنند [۱۵ و ۳۶]. گسیختگی در این آزمایش‌ها زمانی اتفاق می‌افتد که بارهای افقی، قائم و لنگر خمشی به حد نهایی خود برسند. بدین صورت که در آنالیز پروب، یک جابجایی با نسبت ثابت در مسیرهای بار متفاوت بر روی پی اعمال می‌شود (پی به تدریج بارگذاری می‌شود). بزرگی جابجایی‌های ثابت به تدریج افزایش داده می‌شود تا زمانی که به حالت حدی در نسبت ثابت جابجایی‌های قائم به افقی، قائم به دوران و افقی به دوران برسد و گسیختگی حادث شود. نقطه‌ای که نرمال بر پوش گسیختگی با نسبت جابجایی ثابت تعیین شده مطابقت داشت، طبق تئوری نرمالیتی، به عنوان نقطه گسیختگی در مسیر بار انتخاب می‌گردد. به عبارت دیگر، پس از رسیدن به پوش گسیختگی، هر مسیر بارگذاری در اطراف پوش حرکت می‌کند تا زمانی که به نقطه‌ای برسد که در آن نسبت نرمال بر پوش گسیختگی با نسبت جابجایی ثابت تعیین شده مطابقت داشته باشد. بدین طریق نقاط گسیختگی روی پوش گسیختگی (مسیر بار) ردیابی می‌گردد. مبنای رسیدن به پوش گسیختگی، جابجا کردن و/یا چرخاندن پی تا رسیدن به حالت بار ثابت (نیروی محدود) می‌باشد. ساده‌ترین حالت این است که پی به صورت عمودی به داخل خاک فشار داده شود تا زمانی که بار قائم صاف شود که در این حالت رأس پوش گسیختگی V-H-M زمانی که $H = M = 0$ باشد، حاصل می‌گردد. با این حال، برای تعریف یک پوش گسیختگی کامل، انواع مختلفی از ترکیب جابجایی‌های قائم، افقی و چرخشی مورد نیاز است. با هر آنالیز پروب یک نقطه از پوش گسیختگی تعیین می‌گردد و با اتصال تمام نقاط پایانی، پوش گسیختگی کامل به دست می‌آید. در آنالیز سواپ، پس از رسیدن پی به گسیختگی اولیه تحت یک جابجایی خاص، جابجایی متفاوت دیگری به طور پیوسته اعمال می‌شود تا پی در وضعیت تکامل خرابی باقی بماند. اگرچه آنالیز سواپ امکان ردیابی پوش گسیختگی را فراهم می‌آورد، اما گاهی اوقات قادر به تعیین پوش کامل نیست. همچنین برای بارگذاری V-H-M در فضای سه‌بعدی، از آنالیز بار-پروب^{۳۱} استفاده می‌شود. به طور کلی تعیین مکانیزم گسیختگی با روش سواپ کمی گیج‌کننده است، اما دو روش دیگر سطح گسیختگی واضحی را مطابق با بارگذاری ترکیبی ارائه می‌دهند [۵۹].

با توجه به در نظر گرفتن شرایط کرنش صفحه‌ای در تحقیق حاضر، انجام آنالیزها در حالت‌های $V \geq 0$ و $H, M \geq 0$ برای تعریف پوش گسیختگی کامل در هر یک از صفحات بارگذاری V-H و V-M کافی می‌باشد. بنابراین، آنالیزهای انجام گرفته برای بارهای مایل و خارج از مرکز به ترتیب تنها برای حالت‌های بارگذاری ترکیبی $(H \geq 0, V \geq 0)$ و $(V \geq 0, M \geq 0)$ مورد ارزیابی قرار گرفته است. از همین رو

²⁹ Probe

³⁰ Swipe

³¹ Load-Probe

در تحقیق حاضر از روش پروب برای بارگذاری در فضاهای مختلف V-H و V-M برای تحلیل‌های المان محدود استفاده شده است که در ادامه هر یک از این روش‌ها برحسب نوع بارگذاری ترکیبی شرح داده می‌شود.

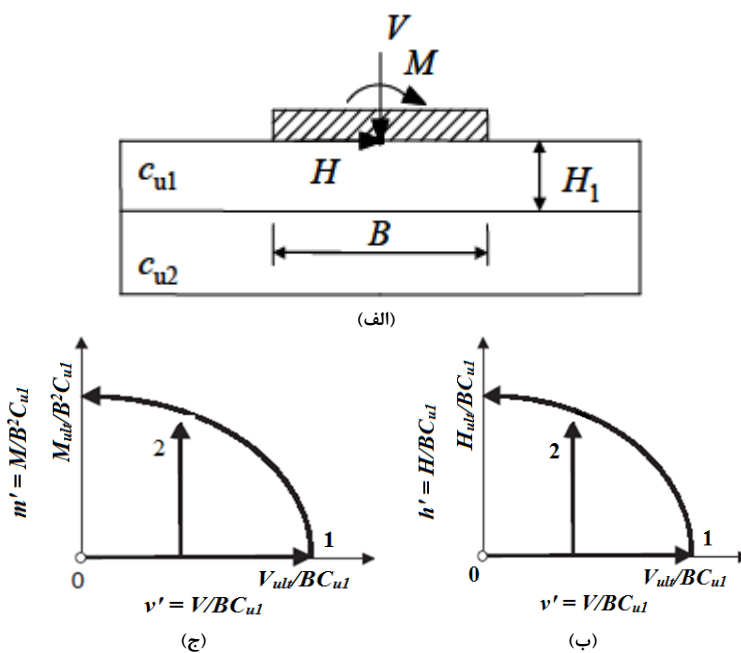
شکل ۳ (الف) یک تصویر شماتیک از پی نواری قرار گرفته بر روی یک خاک دو لایه رسی را نشان می‌دهد. مطابق این شکل H_1 ضخامت لایه خاک رسی اول است که بر روی لایه خاک رسی دوم با ضخامت زیاد مستقر می‌باشد. لازم به ذکر است که ضخامت لایه خاک رسی دوم و نیز فاصله از طرفین پی به اندازه کافی زیاد در نظر گرفته شده است تا تنش‌های ناشی از بارگذاری به مرزها نزدیک نبوده و بر نتایج نهایی تاثیرگذار نباشند. مقادیر C_{u1} و C_{u2} به ترتیب مقاومت برشی زهکشی نشده لایه‌های خاک اول و دوم هستند. شایان ذکر است که در تمامی مدل‌سازی‌ها، همچون شرایط اجرایی مرسوم در واقعیت، لایه رس قوی‌تر بر روی لایه ضعیف قرار گرفته است. بار قائم V ، بار افقی H و لنگر خمشی M به مرکز پی اعمال می‌شوند. جابجایی‌های متناظر با این بارها نیز به ترتیب با v ، h و θ نشان داده می‌شوند.

فضای بارگذاری V-H

پوش گسیختگی در حالت بارگذاری V-H مطابق شکل ۳ (ب) طی دو گام به دست می‌آید. در گام اول، یک جابجایی قائم بر روی پی اعمال می‌گردد تا V_{ult} تعیین شود. بدین ترتیب اولین نقطه از پوش گسیختگی با مختصات $(V_{ult}/BC_{u1}, 0)$ به دست می‌آید. در گام دوم، ابتدا یک نیروی قائم (V) کمتر از V_{ult} به پی اعمال شده و مقدار مؤلفه افقی برابر V/BC_{u1} تعیین می‌گردد. سپس یک جابجایی افقی بزرگ به پی اعمال می‌گردد تا خاک به گسیختگی برسد. طی این مرحله مقدار نیروی افقی (H) محاسبه شده و با تقسیم H بر BC_{u1} مقدار مؤلفه قائم نیز به دست می‌آید. مراحل فوق آنقدر تکرار می‌شود تا نقاط کافی برای رسم پوش گسیختگی حاصل گردد.

فضای بارگذاری V-M

پوش گسیختگی در حالت بارگذاری V-M مطابق با شکل ۳ (ج) و همانند بارگذاری V-H به دست می‌آید؛ با این تفاوت که در مرحله دوم از گام دوم به جای اعمال جابجایی، یک دوران بزرگ به پی اعمال گردیده و لنگر (M) در لحظه گسیختگی محاسبه می‌شود. همچنین در این حالت برای بدون بعدسازی پوش، لنگر به دست آمده بر B^2C_{u1} تقسیم می‌شود.

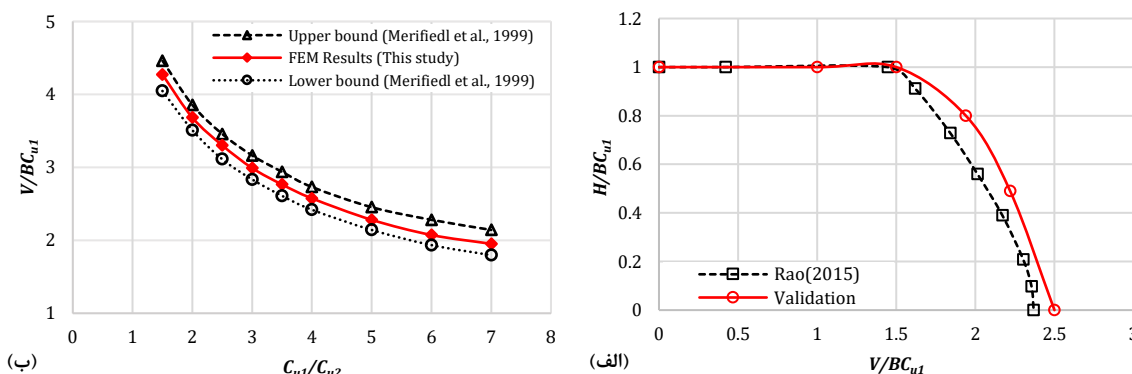


شکل ۳: (الف) پی نواری بر روی یک خاک دو لایه رسی، گام‌های محاسبه پوش گسیختگی بر مبنای روش پروب در (ب) بارگذاری V-H و (ج) بارگذاری V-M

۳-۳- صحت سنجی

به منظور اطمینان از صحت نتایج مدلسازی از جمله شرایط بارگذاری، شرایط تکیه‌گاهی، خصوصیات مصالح و اندرکنش مصالح، از دو تکنیک بهره گرفته شد. در تکنیک اول، پوش گسیختگی بر مبنای مقاله رائو و همکاران [۲۱] صحت‌سنجی شد. شکل‌های ۱ (الف) و (ب) وضعیت لایه‌بندی، خصوصیات هندسی و شرایط بارگذاری مدل مرجع [۲۱] مورد استفاده برای صحت‌سنجی را نشان می‌دهند. مطابق این شکل‌ها، یک پی نواری با عرض ۲ متر واقع بر خاک دو لایه رسی با مشخصات مندرج در جدول ۲ تحت بارگذاری ترکیبی قائم-افقی (V-H) قرار گرفته است. شکل ۴ (الف) پوش گسیختگی به دست آمده از مدلسازی عددی در مقایسه با مقاله مرجع [۲۱] برای بارگذاری V-H و به ازای $C_{u1}/C_{u2} = 3$ و $H1/B = 0.25$ را نشان می‌دهد. برای تعیین میزان اختلاف بین نتایج حاصل از مدل اجزای محدود مقاله حاضر و مدل مرجع، همبستگی بین نتایج برحسب ضریب تبیین (R^2) و با استفاده از تحلیل رگرسیون تعیین شد. مقادیر R^2 بین نتایج مطالعه حاضر و مدل مرجع به ازای V/BC_{u1} و H/BC_{u1} به ترتیب برابر با ۰/۹۹۷ و ۰/۹۸۷ تعیین شد. براساس نتایج مشاهده می‌شود که پوش گسیختگی حاصل از مدل المان محدود ساخته شده در نرم‌افزار از انطباق نسبتاً بالایی با مقاله مرجع [۲۱] برخوردار است. اختلاف اندک مشاهده شده بین پوش‌های گسیختگی را می‌توان به تفاوت در مش‌های المان محدود در نظر گرفته شده در مقاله حاضر نسبت به مدل مرجع نسبت داد.

در تکنیک دوم برای اطمینان از صحت نتایج مدل عددی، نتایج حاصله با نتایج تحلیل حدی (کران پایین و کران بالا) ظرفیت باربری پی پیشنهاد شده توسط مریفیلد و همکاران [۷] مورد مقایسه قرار گرفت. شکل ۴ (ب) نتایج مقادیر کران پایین و بالای ظرفیت باربری قائم بدون بعد پی (V/BC_{u1}) حاصل از تحلیل حدی را به ازای مقادیر مختلف $H1/B$ و C_{u1}/C_{u2} در مقایسه با آنالیزهای المان محدود حاضر نشان می‌دهد. مطابق این شکل می‌توان مشاهده نمود نتایج تحلیل المان محدود بین راه‌حل‌های حد پایین و حد بالا قرار داشته و اختلاف بار گسیختگی قائم از تطابق نسبتاً خوبی با ترکیب بارهای حد پایین و حد بالای مریفیلد و همکاران [۷] برخوردار است.



شکل ۴: (الف) مقایسه پوش گسیختگی حاصل از مدلسازی عددی در مقایسه با مقاله مرجع [۲۱]. (ب) شکل ۵: مقایسه ظرفیت باربری قائم بدون بعد پی (V/BC_{u1}) مطالعه حاضر با مقادیر حد پایین و بالا [۷]

۴- بحث و بررسی نتایج

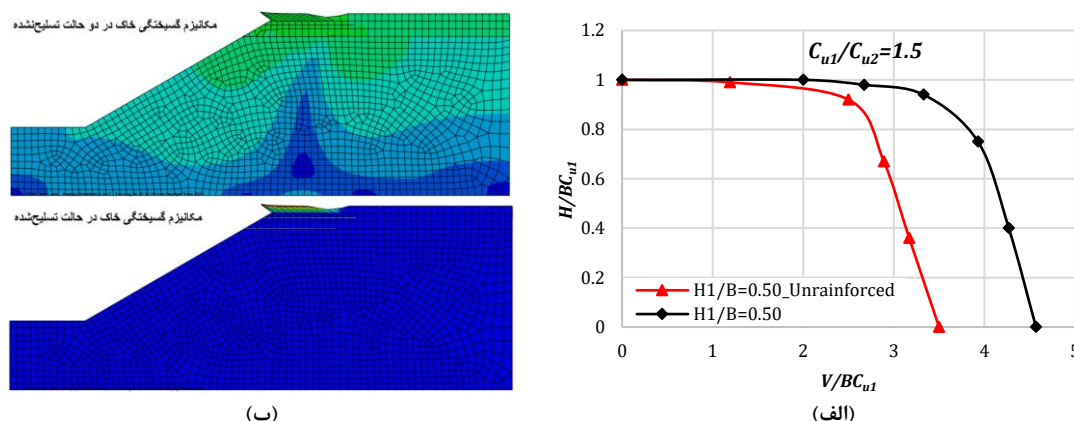
در این بخش نتایج مدلسازی‌های عددی در خصوص تأثیر خصوصیات هندسی مسئله و نحوه قرارگیری ژئوگریدها بر ظرفیت باربری پی‌های نواری واقع بر خاک‌های دو لایه رسی در مجاورت شیب‌های تشبیه شده با ژئوگرید تحت اثر همزمان بارگذاری‌های ترکیبی (V-H-M) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله به صورت پوش‌های گسیختگی، مکانیزم گسیختگی و همچنین تغییرات ظرفیت باربری نهایی افقی و قائم پی در دو حالت مختلف بارگذاری ترکیبی ($H \geq 0, V \geq 0$) و ($V \geq 0, M \geq 0$) اعمالی بر روی پی تعیین گردیده

³² Merifield et al.

است. جهت بررسی مسئله، موقعیت‌های مختلف قرارگیری پی نسبت به شیب، چیدمان ژئوگریدها (شامل تعداد لایه‌های ژئوگرید و زاویه چرخش لایه‌های ژئوگرید نسبت به افق (θ) مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است.

۴-۱- نتایج در حالت بارگذاری V-H

شکل ۵ (الف) پوش‌های گسیختگی پی نواری قرار گرفته در مجاورت شیب با نسبت‌های $H_1/B = 0.5$ و $C_{u1}/C_{u2} = 1.5$ را در حالتی که شیب رسی فاقد تسلیح ژئوگرید باشد در مقایسه با شیب تثبیت‌شده با ژئوگرید تحت اثر بارگذاری ترکیبی V-H نشان می‌دهد. علاوه بر این، جهت مقایسه مکانیزم گسیختگی خاک در دو حالت تسلیح‌شده و نشده، توزیع تغییرشکل محیط خاکی به‌ازای حالت حدی (حداکثر ظرفیت باربری قائم) در شکل ۵ (ب) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌گردد، استفاده از لایه‌های ژئوگرید جهت تسلیح شیب رسی تأثیر زیادی بر ظرفیت باربری قائم پی نواری داشته است. به‌طوری‌که مقدار V_{ult}/BC_{u1} از $3/5$ به $4/57$ افزایش یافته و این به معنی افزایش 31 درصدی ظرفیت باربری قائم پی می‌باشد. اما در خصوص ظرفیت باربری افقی این تغییر بسیار ناچیز است. به‌طوری‌که مقدار H_{ult}/BC_{u1} از $0/98$ به $1/0$ افزایش یافته که این به معنی افزایش 2 درصدی ظرفیت باربری افقی پی نواری است. دلیل مشاهده چنین نتایجی را می‌توان به لایه‌بندی خاک در راستای قائم نسبت داد. چرا که بزرگی پوش گسیختگی به ظرفیت باربری قائم وابسته است. بنابراین در حالتی که فقط بارگذاری افقی بر روی پی اعمال گردد، تنها همان لایه اول خاک درگیر لغزش می‌شود. در سمت مقابل، در صورت عدم وجود نیروی قائم یا ناچیز بودن اثر آن، H_{ult} (ظرفیت باربری نهایی افقی) نزدیک به مقادیر BC_{u1} خواهد بود. به این معنی که هیچ لغزشی بر اثر نیروی افقی رخ نداده است. بنابراین تغییرات H_{ult}/BC_{u1} در این دو حالت ناچیز (تنها 2 درصد) می‌باشد.

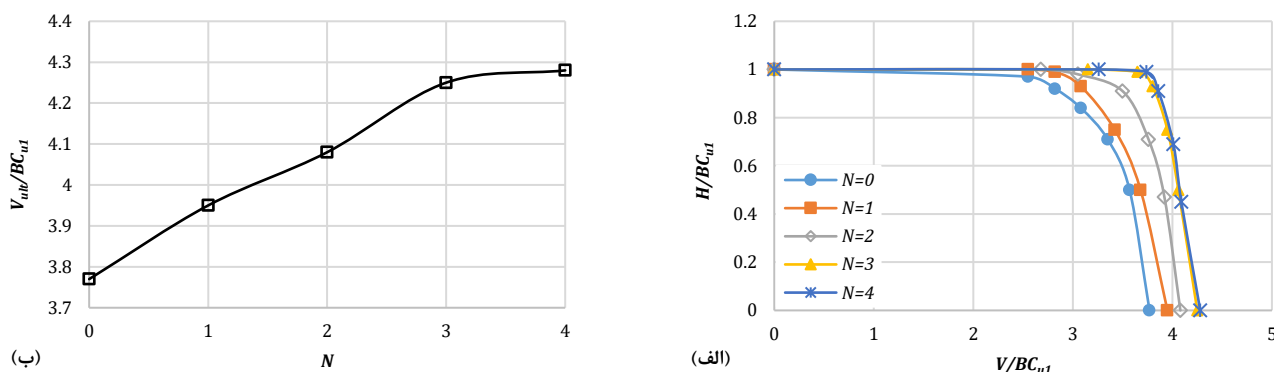


شکل ۵: (الف) مقایسه پوش‌های گسیختگی در حالت‌های شیب تسلیح‌شده با ژئوگرید و شیب بدون تسلیح در بارگذاری V-H، (ب) مقایسه مکانیزم گسیختگی در دو حالت تسلیح‌شده و نشده

۴-۱-۱- بررسی اثر تعداد لایه‌های ژئوگرید

به منظور بررسی تأثیر تعداد لایه‌های ژئوگرید بر ظرفیت باربری پی‌های نواری مستقر بر خاک دو لایه رسی در مجاورت شیب تثبیت‌شده با ژئوگرید، به مقایسه پوش‌های گسیختگی پی در دو حالت شیب رسی بدون وجود المان تسلیح و شیب رسی تسلیح‌شده با تعداد متغیر لایه‌های ژئوگرید پرداخته شده است. نتایج بدست آمده در شکل ۶ (الف) حاکی از آن است که با افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید، پوش گسیختگی بزرگتر شده و از یک جایی به بعد این افزایش متوقف می‌شود. به‌طوری‌که افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید از 1 تا 4 ، به ترتیب باعث افزایش $4/77$ ، $8/22$ ، $12/73$ و $13/52$ درصدی ظرفیت باربری قائم پی (V_{ult}/BC_{u1}) نسبت به حالت بدون تسلیح ($N=0$) گردیده است. به عبارت دیگر تعداد بهینه لایه‌های ژئوگرید جهت افزایش ظرفیت باربری قائم پی نواری، مطابق شکل ۶ (ب) برابر 3 می‌باشد. در توجیه این پدیده می‌توان گفت که افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید باعث افزایش ظرفیت باربری پی‌ها شده که علت این پدیده می‌تواند بر اثر مقاومت حالت مقاوم خاک و قفل و بست در اعضای مسلح‌کننده خاک باشد. مقاومت بسیج شده توده خاک محدود شده به علت مقاومت کششی لایه‌های ژئوگرید موجب حرکت توده بزرگتری از خاک یا به عبارت دیگر سبب عمیق‌تر شدن ناحیه گسیختگی خاک زیر پی

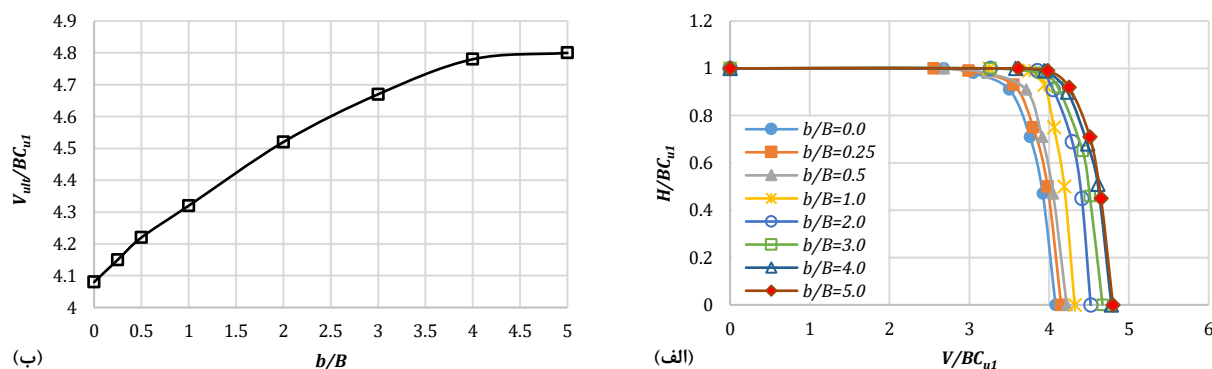
می‌شود که این عامل باعث افزایش ظرفیت باربری پی می‌گردد. اما افزایش بیش از حد تعداد لایه‌های ژئوگرید تأثیر بیشتری بر اندرکنش بین ژئوگریدها و خاک نخواهد داشت.



شکل ۶: (الف) تأثیر تعداد لایه‌های ژئوگرید (N) بر پوش‌های گسیختگی محوری، (ب) تغییرات ظرفیت باربری گسیختگی محوری در مقابل N در بارگذاری V-H

۴-۱-۲- تأثیر موقعیت قرارگیری پی نسبت به شیب

شکل ۷ (الف) تغییرات پوش‌های گسیختگی را در مقابل نسبت فاصله پی از لبه شیب به عرض پی (b/B) تحت اثر بارگذاری ترکیبی V-H نشان می‌دهد. براساس نتایج حاصله، با دور شدن موقعیت پی نسبت به لبه شیب، فاصله بهینه موقعیت قرارگیری پی نسبت به تاج شیب در افزایش ظرفیت باربری پی نواری معادل ۴ برابر عرض پی می‌باشد. چراکه پوش گسیختگی مربوط به b/B برابر با ۴ و ۵ تقریباً بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند. این موضوع در شکل ۷ (ب) با وضوح بیشتری قابل مشاهده است. به طوری که مطابق این شکل ظرفیت باربری قائم از نسبت $b/B \geq 4$ بدون تغییر باقی مانده است. علت این افزایش در پوش گسیختگی و ظرفیت باربری قائم این است که با دور شدن پی از لبه شیب، مقاومت خاک از شیب تا زیر گوشه پی افزایش یافته و این موضوع ضمن عمیق‌تر کردن گسیختگی توده خاک، منجر به افزایش ظرفیت باربری پی می‌گردد.

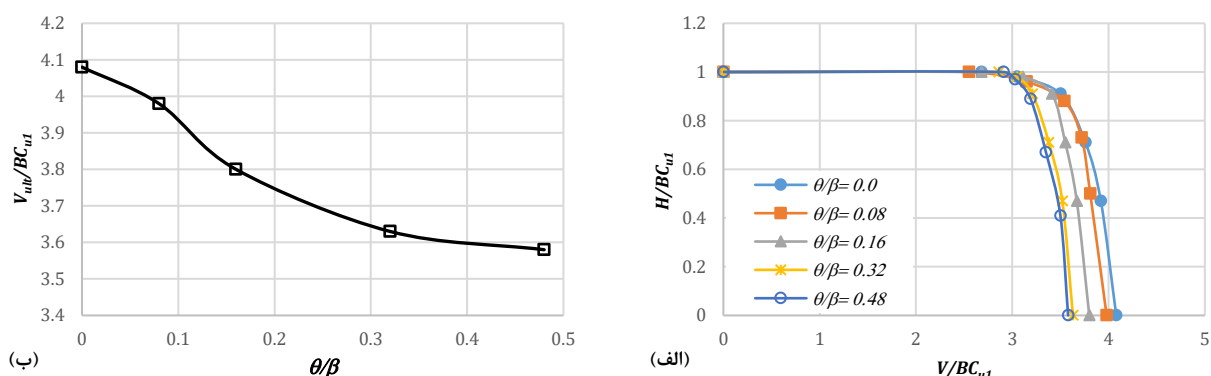


شکل ۷: (الف) تأثیر موقعیت قرارگیری پی نسبت به شیب (b/B) بر پوش‌های گسیختگی محوری، (ب) تغییرات ظرفیت باربری گسیختگی محوری در مقابل b/B در بارگذاری V-H

۴-۱-۳- تأثیر نسبت زاویه چرخش لایه‌های ژئوگرید نسبت به افق

شکل‌های ۸ (الف) و (ب) به ترتیب تأثیر زاویه چرخش لایه‌های ژئوگرید نسبت به افق (θ/β) بر پوش‌های گسیختگی و تغییرات ظرفیت باربری در مقابل θ را نشان می‌دهند. همانطور که در این شکل مشاهده می‌گردد با افزایش θ/β ، ظرفیت باربری قائم پی روند کاهشی دارد. بدین صورت که در حالت $\theta/\beta = 0$ (قرارگیری لایه‌های ژئوگرید به صورت افقی در زیر پی)، بیشترین ظرفیت باربری پی حاصل می‌گردد. این در حالی است که با افزایش θ/β ، ظرفیت باربری کاهش می‌یابد. این موضوع بدین علت است که با افزایش θ/β در خلاف جهت

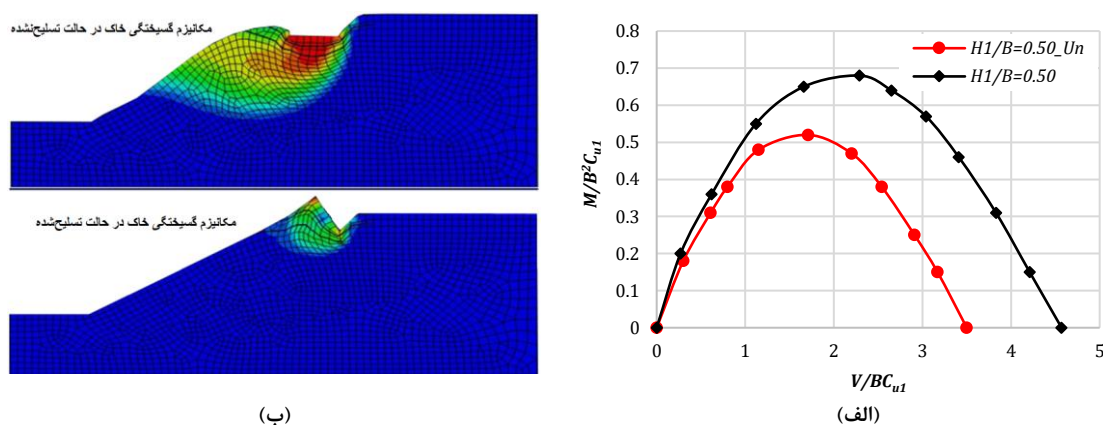
عقره‌های ساعت، توده خاک گسیخته شده به سمت شیب هدایت شده و گسیختگی با سرعت بیشتری رخ می‌دهد. این پدیده موجب عدم بسیج شدن کامل مقاومت خاک در برابر لغزش آن گردیده و این موضوع به نوبه خود کاهش ظرفیت باربری نهایی پی را به دنبال دارد.



شکل ۸: (الف) تأثیر زاویه چرخش لایه‌های ژئوگرید نسبت به افق (θ/β) بر پوش‌های گسیختگی محوری، (ب) تغییرات ظرفیت باربری گسیختگی محوری در مقابل θ/β در بارگذاری V-H

۴-۲- نتایج در حالت بارگذاری V-M

شکل ۹ (الف) پوش‌های گسیختگی پی در دو حالت شیب تسلیح شده با ژئوگرید و شیب بدون تسلیح را تحت اثر بارگذاری ترکیبی V-M با نسبت $H_1/B = 0.5$ و $C_{u1}/C_{u2} = 1.5$ به صورت مقایسه‌ای نشان می‌دهد. علاوه بر این، شکل ۹ (ب) مکانیزم گسیختگی خاک در دو حالت تسلیح شده و نشده در حالتی با ظرفیت لنگر خمشی حداکثر را نشان می‌دهد. همان‌طوری که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود استفاده از لایه‌های ژئوگرید جهت تسلیح شیب رسی تأثیر زیادی بر ظرفیت باربری قائم ($V_{ult}/B C_{u1}$) داشته است. به طوری که مقدار $V_{ult}/B C_{u1}$ از $3/5$ به $4/57$ افزایش یافته است که به معنی افزایش ۳۱ درصدی ظرفیت باربری قائم پی می‌باشد. همچنین در خصوص بیشینه لنگر خمشی لازم جهت گسیختگی پی ($M_{ult}/B^2 C_{u1}$) این تغییر به صورت افزایشی بوده است. به طوری که این مقدار از $0/51$ به $0/69$ افزایش یافته و این موضوع به معنی افزایش ۳۵ درصدی ظرفیت باربری نهایی لنگر خمشی پی می‌باشد.

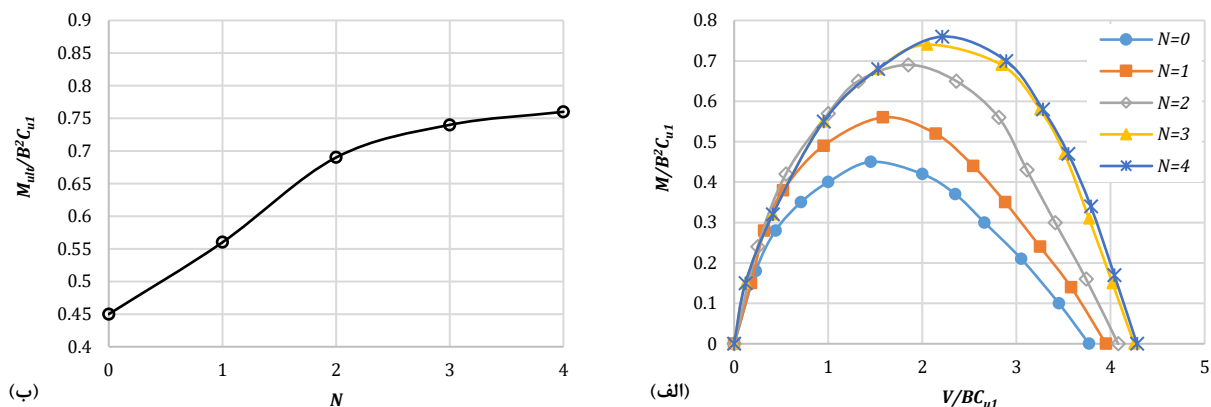


شکل ۹: (الف) مقایسه پوش‌های گسیختگی خمشی در حالت‌های شیب تسلیح شده با ژئوگرید و شیب بدون تسلیح در بارگذاری V-M، (ب) مقایسه مکانیزم گسیختگی در دو حالت تسلیح شده و نشده

۴-۲-۱- بررسی اثر تعداد لایه‌های ژئوگرید

شکل ۱۰ تأثیر تعداد لایه‌های ژئوگرید بر ظرفیت باربری و پوش‌های گسیختگی پی‌های نواری را تحت اثر بارگذاری V-M نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل ۱۰ (الف) مشاهده می‌گردد، تعداد لایه‌های ژئوگرید تأثیر به‌سزایی بر مقدار بیشینه لنگر گسیختگی

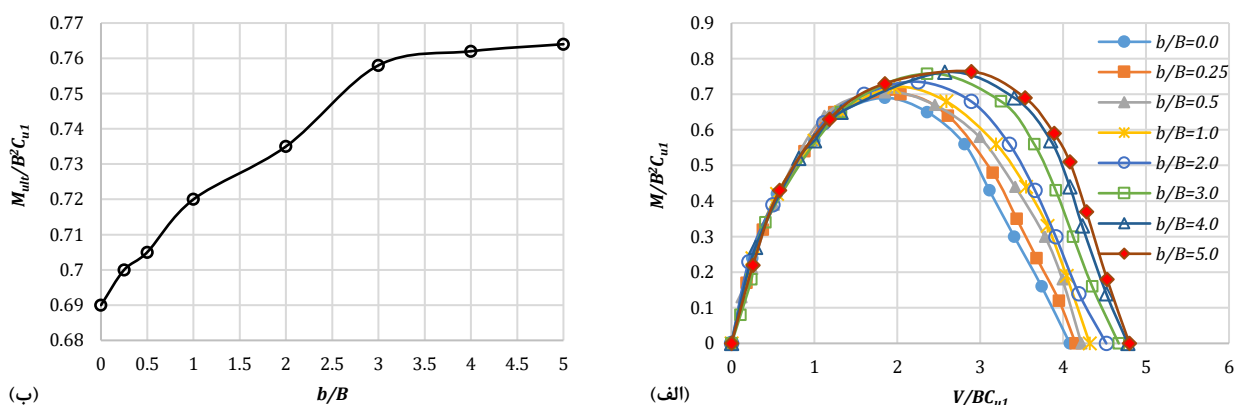
داشته است. به طوری که با افزایش تعداد لایه‌های ژئوگريد از ۱ تا ۴، به ترتیب باعث افزایش $۲۴/۴۴$ ، $۵۳/۳۳$ ، $۶۴/۴۴$ و $۶۸/۸۸$ درصدی در مقدار M_{ult}/B^2C_{ul} نسبت به حالت بدون تسلیح ($N=0$) گردیده است. بر این اساس تعداد بهینه لایه‌های ژئوگريد جهت افزایش ظرفیت باربری نهایی لنگر خمشی پی نواری، مطابق با شکل ۱۰ (ب) برابر ۴ می‌باشد؛ در صورتی که این تعداد در تحلیل V-H جهت دستیابی به ظرفیت باربری نهایی قائم پی برابر ۳ لایه به دست آمده است.



شکل ۱۰: (الف) تأثیر تعداد لایه‌های ژئوگريد (N) بر پوش‌های گسیختگی خمشی، (ب) تغییرات ظرفیت باربری گسیختگی خمشی در مقابل N در بارگذاری V-M

۴-۲-۲- تأثیر موقعیت قرارگیری پی نسبت به شیب

شکل ۱۱ (الف) تغییرات پوش‌های گسیختگی را در مقابل نسبت فاصله پی از لبه شیب به عرض پی (b/B) تحت اثر بارگذاری V-M نشان می‌دهد. براساس نتایج حاصله مشاهده می‌گردد که با دور شدن موقعیت پی نسبت به لبه شیب (افزایش b/B)، فاصله بهینه موقعیت قرارگیری پی نسبت به تاج شیب در افزایش ظرفیت باربری نواری معادل ۳ برابر عرض پی می‌باشد که این مقدار در تحلیل V-H برابر ۴ بدست آمده است. این نتیجه در شکل ۱۱ (ب) با وضوح بیشتری قابل مشاهده است. به طوری که در این شکل ظرفیت باربری قائم از نسبت $b/B \geq 3$ تقریباً بدون تغییر باقی مانده است.

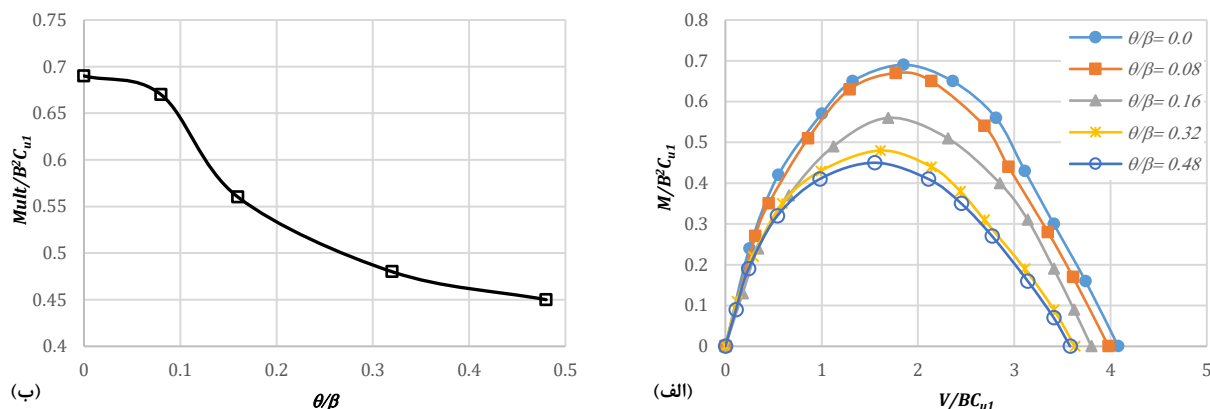


شکل ۱۱: (الف) تأثیر موقعیت قرارگیری پی نسبت به شیب (b/B) بر پوش‌های گسیختگی خمشی، (ب) تغییرات ظرفیت باربری گسیختگی خمشی در مقابل b/B در بارگذاری V-M

۴-۲-۳- تأثیر زاویه چرخش لایه‌های ژئوگريد نسبت به افق

شکل ۱۲ (الف) تأثیر زاویه چرخش لایه‌های ژئوگريد نسبت به افق (θ/β) را بر پوش‌های گسیختگی پی نواری تحت اثر بارگذاری V-M نشان می‌دهد. جهت سهولت درک نتایج، شکل ۱۲ (ب) نتایج تغییرات ظرفیت باربری پی در مقابل θ/β تحت اثر بارگذاری V-M را

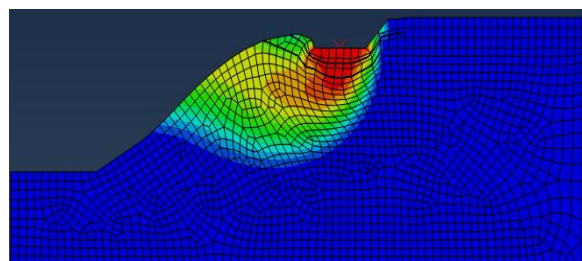
نشان می‌دهد. براساس نتایج حاصله مشاهده می‌گردد که همانند تحلیل در فضای بارگذاری V-H، در حالت بارگذاری V-M نیز با افزایش θ/β ، پوش‌های گسیختگی و ظرفیت باربری لنگر خمشی پی نواری روند کاهشی به خود می‌گیرند. به طوری که در $\theta/\beta = 0$ ، بیشترین ظرفیت باربری لنگر خمشی پی حاصل می‌گردد.



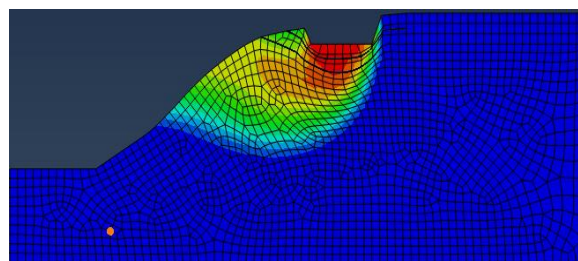
شکل ۱۲: (الف) تأثیر زاویه چرخش لایه‌های ژئوگرید نسبت به افق (θ/β) بر پوش‌های گسیختگی خمشی، (ب) تغییرات ظرفیت باربری گسیختگی خمشی در مقابل θ/β در بارگذاری V-M

۴-۳- مقایسه مکانیزم گسیختگی تحت بارگذاری‌های مختلف V-H و V-M

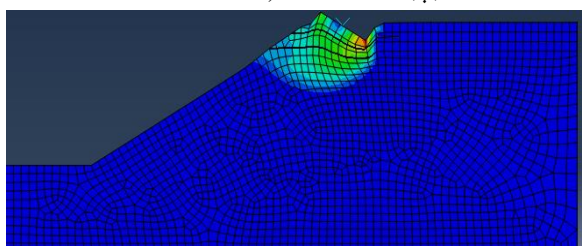
در این بخش به مقایسه مکانیزم‌های گسیختگی خاک زیر پی تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی V-H و V-M پرداخته شده است. شکل ۱۳ مکانیزم‌های گسیختگی در نسبت‌های $H_1/B = 0.5$ و $C_{u1}/C_{u2} = 1.5$ را تحت دو حالت بارگذاری مذکور به صورت مقایسه‌ای نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل‌های ۱۳ (الف) و (ب) مشاهده می‌گردد، در حالتی که تنها بارگذاری قائم وجود دارد، بدیهی است که مکانیزم گسیختگی تحت هر دو نوع بارگذاری V-H و V-M نسبتاً یکسان بوده و حجم بیشتری از خاک دچار گسیختگی می‌شود. در چنین شرایطی، گسیختگی‌های ایجادشده در زیر پی تحت هر دو نوع بارگذاری V-H و V-M عمدتاً به شکل شکست لغزشی روی سطح مشترک بین پی و زیر خاک متمرکز می‌شوند. شکل ۱۳ (ج) نشان می‌دهد که با افزایش تدریجی بار افقی و کاهش بار قائم تحت بارگذاری V-H، ناحیه کوچکتری از خاک زیر پی گسیخته شده و گسیختگی به شکل شکست برشی نزدیک می‌گردد. به این معنی که در روند بارگذاری از یک جایی به بعد، بار قائم تأثیر قابل توجهی بر مکانیزم گسیختگی ندارد. این موضوع تحت بارگذاری V-M نیز صدق کرده و همانگونه که شکل ۱۳ (د) نشان می‌دهد، با کاهش تدریجی بار قائم و افزایش لنگر خمشی در این حالت، حجم کوچکتری از خاک گسیخته شده و مکانیزم گسیختگی به صورت یک صفحه شکست برشی قوسی شکل یک‌طرفه در زیر خاک امتداد می‌یابد. این موضوع نشان‌دهنده تغییر مود گسیختگی از شکست لغزشی به شکست برشی است.



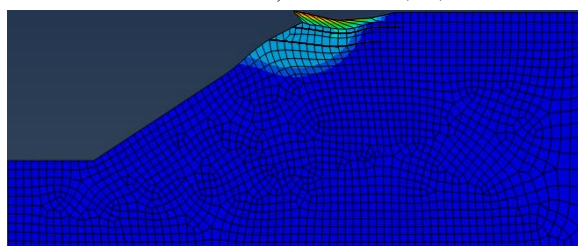
(ب) $V/BC_{ul}=4.57, M/B^2C_{ul}=0.00$



(الف) $V/BC_{ul} = 4.57, H/C_{ul} = 0.00$



(د) $V/BC_{ul}=3.83, M/B^2C_{ul}=0.31$



(ج) $V/BC_{ul} = 4.27, H/C_{ul} = 0.50$

شکل ۱۳: مقایسه مکانیزم‌های گسیختگی پی نواری قرار گرفته بر روی خاک دو لایه رسی در مجاورت شیب تثبیت‌شده با ژئوگرید با نسبت‌های H_1/B $V-M$ و $V-H$ تحت بارگذاری‌های $C_{u1}/C_{u2} = 1.5$ و $= 0.5$

۵- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر با استفاده از آنالیز اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS به بررسی ظرفیت باربری پی‌های نواری مستقر بر خاک رسی دو لایه در مجاورت شیب تثبیت‌شده با ژئوگرید پرداخته شد. بدین منظور طی سه سری مطالعات پارامتریک، تأثیر نسبت مقاومت‌های برشی زهکشی‌نشده لایه‌های رسی (C_{u1}/C_{u2}) و نسبت ضخامت لایه رسی اول به عرض پی نواری (H_1/B) بر پوش‌های گسیختگی ظرفیت باربری پی نواری تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی مختلف ($V-H$ و $V-M$) تعیین شد. نتایج کلی تحقیق به شرح زیر قابل بیان است:

- (۱) مقایسه پوش‌های گسیختگی در دو حالت شیب فاقد تسلیح و تسلیح‌شده با ژئوگرید تحت اثر بارهای ترکیبی $V-H$ و $V-M$ نشان داد که تسلیح شیب تحت هر دو بارگذاری، تأثیر زیادی بر ظرفیت باربری نهایی قائم (V_{ult}/BC_{ul}) و ظرفیت باربری نهایی لنگر خمشی (M_{ult}/B^2C_{ul}) دارد. به طوری که تسلیح شیب به ترتیب باعث افزایش ۳۱ و ۳۵ درصدی V_{ult}/BC_{ul} و M_{ult}/B^2C_{ul} در مقایسه با حالت بدون تسلیح شده است. این افزایش برای ظرفیت باربری افقی (H_{ult}/BC_{ul}) بسیار ناچیز و در حدود ۲ درصد است.
- (۲) با افزایش تعداد ژئوگریدها، منحنی‌های پوش گسیختگی بزرگتر (منبسط‌تر) شده و از یک جایی به بعد با ادامه افزایش تعداد لایه‌ها، این انبساط متوقف می‌گردد. این موضوع به معنی تعداد بهینه لایه‌های ژئوگرید جهت دستیابی به حداکثر ظرفیت باربری پی است. به طوری که این تعداد برای دستیابی به ظرفیت باربری نهایی قائم پی (V_{ult}/BC_{ul}) تحت اثر بارگذاری $V-H$ و ظرفیت باربری نهایی لنگر خمشی (M_{ult}/B^2C_{ul}) پی تحت اثر بارگذاری $V-M$ به ترتیب برابر با ۳ و ۴ ژئوگرید تعیین شد.
- (۳) دور شدن پی از لبه شیب (افزایش b/B) تأثیر زیادی بر پوش‌های گسیختگی تحت اثر حالت‌های مختلف بارگذاری ($V-H$ و $V-M$) دارد. فاصله بهینه موقعیت قرارگیری پی نسبت به لبه شیب جهت دستیابی به حداکثر V_{ult}/BC_{ul} معادل ۴ برابر عرض پی می‌باشد. این فاصله برای دستیابی به حداکثر ظرفیت باربری نهایی لنگر خمشی معادل ۳ برابر عرض پی تعیین شد.
- (۴) با افزایش زاویه چرخش لایه‌های ژئوگرید نسبت به افق (θ/β) تحت اثر بارگذاری‌های $V-H$ و $V-M$ ، پوش‌های گسیختگی و ظرفیت‌های باربری نهایی قائم و لنگر خمشی پی روند کاهشی پیدا می‌کنند. به طوری که با افقی شدن قرارگیری لایه‌های ژئوگرید در زیر پی ($\theta/\beta = 0$)، بیشترین ظرفیت باربری قائم و لنگر خمشی حاصل می‌گردد. زیرا با افزایش θ/β ، توده خاک

گسیخته‌شده به سمت شیب هدایت شده و گسیختگی با سرعت بیشتری رخ می‌دهد. این پدیده موجب عدم بسیج کامل مقاومت خاک در برابر لغزش شده و کاهش ظرفیت باربری نهایی را به دنبال دارد.

(۵) مقایسه مکانیزم‌های گسیختگی خاک زیر پی تحت اثر بارگذاری‌های ترکیبی V-H و V-M نشان داد که در حالت بارگذاری قائم مستقل، مکانیزم گسیختگی تحت هر دو نوع بارگذاری نسبتاً یکسان بوده و به شکل شکست لغزشی روی سطح مشترک بین پی و زیر خاک ظاهر می‌شود. اما با کاهش تدریجی بار قائم و افزایش بارهای افقی و لنگر خمشی به ترتیب تحت بارگذاری V-H و V-M، گسیختگی به صورت شکست برشی رخ می‌دهد.

مراجع

- [1] Kimmerling, R.E. (2002), *Shallow Foundations, Geotechnical Engineering*, No. 6, FHWA-SA-02-054.
- [2] Vesic, A.S. (1973). Analysis of ultimate loads of shallow foundations, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 99(1), 45-73.
- [3] Georgiadis, M., and Michalopoulos, A.P. (1985). Bearing capacity of gravity bases on layered soil, *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(6), 712-729.
- [4] Brown, J.D., and Meyerhof, G.G. (1969). Experimental study of bearing capacity in layered clays, *Proceedings of 7th international conference on soil mechanics and foundation engineering*, Mexico, 2, 45-51.
- [5] Meyerhof, G.G., and Hanna, A.M. (1978). Ultimate bearing capacity of foundations on layered soils under inclined load, *Canadian Geotechnical Journal*, 15(4), 565-572.
- [6] Sloan, S.W., and Kleeman, P.W. (1995). Upper-bound limit analysis using discontinuous velocity fields, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 127, 293-314.
- [7] Merifield, R.S., Sloan, S.W., Yu, H.S. (1999). Rigorous plasticity solutions for the bearing capacity of two-layered clays, *Géotechnique*, 49(4), 471-90.
- [8] Burd, H.J., and Frydman, S. (1997). Bearing capacity of plane strain footings on layered soils, *Canadian Geotechnical Journal*, 34, 241-53.
- [9] Yu, L., Liu, J., Kong, X.J., and Hu, Y.X. (2011). Three-dimensional large deformation FE analysis of square footings in two-layered clays, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(1), 52-58.
- [10] Hung, L.C., and Kim, S.R. (2014). Evaluation of undrained bearing capacities of bucket foundations under combined loads, *Marine Georesources & Geotechnology*, 32(1), 76-92.
- [11] Pham, Q.N., Ohtsuka, S., Isobe, K., Pham, V.N., and Hoang, H.P. (2023). Limit load space of rigid strip footing on sand slope subjected to combined eccentric and inclined loading, *Computers and Geotechnics*, 162, 105652.
- [12] Bransby, M.F. and Yun, G.J. (2009). The undrained capacity of skirted strip foundations under combined loading, *Geotechnique*, 59 (2), 115-125.
- [13] Bergado, D.T., Long, P.V., and Murthy, B.R. (2002). A case study of geotextile-reinforced embankment on soft ground, *Geotextiles and Geomembranes*, 20, 343-365.
- [14] Yoo, C.H. (2001). Laboratory investigation of bearing capacity behavior of strip footing on geogrid-reinforced sand slope, *Geotextiles and Geomembranes*, 19, 279-298.
- [15] Gourvenec, S., and Randolph, M.F. (2003). Effect of strength non-homogeneity on the shape and failure envelopes for combined loading of strip and circular foundations on clay, *Geotechnique*, 53(6), 575-586.
- [16] Houlsby, G.T., and Puzrin, A.M. (2005). The bearing capacity of a strip footing on clay under combined loading, *Proceedings of the Royal Society A*, London, 455, 893-916.
- [17] Basudhar, P.K., Dixit, P.M., Gharpure, A., and Deb, K. (2007). Finite element analysis of geotextile-reinforced sand-bed subjected to strip loading, *Geotextiles and Geomembranes*, 26, 91-99.
- [18] El Sawwaf, M. (2007). Behavior of strip footing on geogrid-reinforced sand over a soft clay slope, *Geotextiles and Geomembranes*, 25 (1), 50-60.
- [19] Sharma, R., Chen, Q., Abu-Farsakh, M., and Yoon, M. (2009). Analytical modeling of geogrid reinforced soil foundation, *Geotextiles and Geomembranes*, 27, 63-72.
- [20] Bienen, B., Gaudin, C., Cassidy, M.J., Rausch, M., Purwana, A., and Krisdani, H. (2012). Numerical modeling of a hybrid skirted foundation under combined loading, *Computers and Geotechnics*, 45, 127-139.
- [21] Rao, P., Liu, Y., and Cui, J. (2015). Bearing capacity of strip footings on two-layered clay under combined loading, *Computers and Geotechnics*, 69, 210-218.
- [22] Tang, C., Phoon, K.K., and Toh, K.C. (2014). Effect of footing width on N_γ and failure envelope of eccentrically and obliquely loaded strip footings on sand, *Canadian Geotechnical Journal*, 52(6), 694-707.
- [23] Mehravar, M., Harireche, O., and Faramarzi, A. (2016). Evaluation of undrained failure envelopes of caisson foundations under combined loading, *Applied Ocean Research*, 59, 129-137.

- [24] Hentati, A., Selmi, M., Kormi, T., and Bel Hadj Ali, N. (2018). Probabilistic HM failure envelopes of strip foundations on spatially variable soil, *Computers and Geotechnics*, 102, 66–78.
- [25] Haghghi, A., Hu, P., Tom, J.G., and Krabbenhoft, K. (2019). Combined loading of strip footings on sand-over-clay with layers of varying extents, *Soils and Foundations*, 59(2), 433–442.
- [26] Xia, H., Zhou, X., Zhou, M., Niu, F., and Zhang, X. (2021). Capacity of caissons in stiff-over-soft clay under combined V–H–M loadings, *Ocean Engineering*, 229, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109007>.
- [27] Shen, Z., Jin, D., Pan, Q., Yang, H., and Chian, S.C. (2021). Effect of soil spatial variability on failure mechanisms and undrained capacities of strip foundations under uniaxial loading, *Computers and Geotechnics*, 139, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104387>.
- [28] Ko, J., Seo, H., and Lee, J.K. (2022). Failure envelopes for circular foundations on two-layered clay under combined loading, *International Journal of Geomechanics*, 22(7), [https://ascelibrary.org › \(ASCE\)GM.1943-5622.0002395](https://ascelibrary.org › (ASCE)GM.1943-5622.0002395).
- [29] Fathipour, H., Payan, M., Jamshidi Chenari, R., and Fatahi, B. (2022). General failure envelope of eccentrically and obliquely loaded strip footings resting on an inherently anisotropic granular medium, *Computers and Geotechnics*, 146, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.104734>.
- [30] Mahboubi Niazmandi, M., Mirasi, S., Hashemi jokar, M., and Momeni, M. (2023). The effect of combined loading on the bearing capacity of strip footings located on two-layered clayey soils adjacent to geogrid-reinforced slopes. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, (), -. doi: 10.22060/ceej.2023.21741.7812.
- [31] Davis, E.H., and Booker, J.R. (1973). The effect of increasing strength with depth on the bearing capacity of clays, *Geotechnique*, 23(4), 551–563.
- [32] Houlsby, G.T., and Wroth, C.P. (1983). Calculation of stresses on shallow penetrometers and footings, *Proceedings of IUTAM/IUGG Seabed Mechanics*, Newcastle, 107–112.
- [33] Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*, New York: Wiley.
- [34] Meyerhof, G.G. (1951). The ultimate bearing capacity of foundations, *Geotechnique*, 2(4), 301–332.
- [35] Hansen, J.B. (1970). *A revised and extended formula for bearing capacity*, Bulletin 28, 5–11. Copenhagen: Danish Geotechnical Institute.
- [36] Bransby, M.F., and Randolph, M.F. (1998). Combined loading of skirted foundations, *Geotechnique*, 48(5), 637–655.
- [37] Taiebat, H.A., and Carter, J.P. (2000). Numerical studies of the bearing capacity of shallow foundations on cohesive soil subjected to combined loading, *Geotechnique*, 50(4), 409–418.
- [38] Taiebat, H.A., and Carter, J.P. (2002). Bearing capacity of strip and circular foundations on undrained clay subjected to eccentric loads, *Geotechnique*, 52(1), 61–64.
- [39] Ukritchon, B., Whittle, A.J., and Sloan, S.W. (1998). Undrained limit analysis for combined loading of strip footings on clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(3), 265–276.
- [40] Prandtl, G. (1921). *Eindringungsfestigkeit und festigkeit von schneiden*, Abhandlungen. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [41] Hill, R. (1950). *The mathematical theory of plasticity*, Oxford: Clarendon Press.
- [42] Bell, R.W., Houlsby, G.T., and Burd, H.J. (1991). Finite element analysis of axisymmetric footings subjected to combined loads, *Proceedings of the International conference on computer methods and advances in geomechanics*, Cairns, Australia, 3, 1765–1770.
- [43] Martin, C.M. (1994). *Physical and numerical modeling of offshore foundations under combined loads*. D. Phil thesis, University of Oxford.
- [44] Salencon, J., and Pecker, A. (1995). Ultimate bearing capacity of shallow foundations under inclined and eccentric loads. Part 1: purely cohesive soil, *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 14(3), 349–375.
- [45] Helwany, S. (2007). *Applied soil mechanics with Abaqus applications*, John Wiley & Sons.
- [46] ABAQUS, 2011, *ABAQUS user's manual*, Version 6.13.1.
- [47] Moradi, G., Hassankhani, E., and Halabian, A. (2020). Investigation of applied earth load on buried box culverts in trenches using induced trench method under embankment pressure. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 35.2(4.2), 53–65. doi:10.24200/j30.2018.5720.2271.
- [48] Moradi, G., Hassankhani, E., and Halabian, A.M. (2022). Experimental and numerical analyses of buried box culverts in trenches using geofoam. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 175(3), 311–322. doi:10.1680/jgeen.19.00288.
- [49] Potts, D.M., and Zdravkovic, L. (2001). *Finite element analysis in geotechnical engineering: Theory*, Thomas Telford Publishing.
- [50] Sitharam, T.G., and Sireesh, S. (2004). Model studies of embedded circular footing on geogridreinforce sand beds, *Ground Improvement*, 8(2), 69–75.
- [51] Lashkari, A., and Mahboubi, M. (2015). Use of hyper-elasticity in anisotropic clay plasticity models. *Scientia Iranica*, 22(5), 1643–1660. https://scientiairanica.sharif.edu/article_1986.html.
- [52] Chua, B.T., and Nepal, K.P. (2023). A new approach to estimate bearing capacity of strip footings on geogrid-stabilised granular layer over clay. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 10(4), 569–594.

- [53] Transportation Officials. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, 1995 (Vol. 2). Aashto.
- [54] Strózyk, J., and Tankiewicz, M. (2016). The elastic undrained modulus E_{u50} for stiff consolidated clays related to the concept of stress history and normalized soil properties. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 38(3), 67-72.
- [55] Farias, M.M., and Llano-Serna, M.A. (2016). Simple methodology to obtain critical state parameters of remolded clays under normally consolidated conditions using the fall-cone test. *Geotechnical Testing Journal*, 39(5), 855-864.
- [56] Abdi, M.R., and Mirzaeifar, H. (2017). Experimental and PIV evaluation of grain size and distribution on soil-geogrid interactions in pullout test. *Soils and foundations*, 57(6), 1045-1058.
- [57] Mandhaniya, P., Shahu, J.T., and Chandra, S. (2022). Numerical analysis on combinations of geosynthetically reinforced earth foundations for high-speed rail transportation. *Structures*, 43, 738-751.
- [58] Gu, F., Luo, X., Luo, R., Lytton, R.L., Hajj, E.Y., and Siddharthan, R.V. (2016). Numerical modeling of geogrid-reinforced flexible pavement and corresponding validation using large-scale tank test. *Construction and Building Materials*, 122, 214-230.
- [59] Zhan, Y.-G. (2011). Undrained bearing capacity behavior of strip footings on two-layer clay soil under combined loading, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 16, 251-268.