



بررسی عددی تاثیر ژئوگرید بر ظرفیت باربری نهایی پی نواری تحت بار خارج از مرکز و تعیین چیدمان بهینه لایه‌های مسلح کننده

مسعود رابطی مقدم^{*}، جهانپور منفرد، منصور پرویزی

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۲-۰۸
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۴-۱۱
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۶-۰۲
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۶-۱۴

کلمات کلیدی:

ظرفیت باربری
پی نواری
ژئوگرید
بارگذاری با خروج از مرکزیت
چیدمان بهینه ژئوگریدها

خلاصه: در مطالعه حاضر به بررسی اثر ژئوگرید بر ظرفیت باربری پی نواری واقع بر خاک ماسه‌ای، تحت بار قائم با خروج از مرکزیت با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود PLAXIS 2D پرداخته شده است. بدین صورت که، پس از صحت‌سنجی مدل عددی، تاثیر پارامترهایی نظیر میزان خروج از مرکزیت بار قائم، مقدار بار قائم اعمال شده، تعداد و چیدمان لایه‌های مسلح کننده بر ظرفیت باربری نهایی پی نواری مطالعه شده است. نتایج حاصل از آنالیزها در قالب نمودارهای بدون بعد ترسیم و بر اساس آن عمق بهینه قرارگیری نخستین لایه ژئوگرید از کف پی، فواصل قائم لایه‌های مسلح کننده از هم، تعداد و چیدمان بهینه لایه‌های مسلح کننده ژئوگرید تعیین گردیده است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که، با افزودن لایه‌های ژئوگرید ظرفیت باربری پی تحت بار خارج از مرکز افزایش قابل توجهی می‌یابد. میزان این اثرگذاری، تابع چیدمان لایه‌ها و میزان خروج از مرکزیت بار می‌باشد. در حالت چیدمان بهینه، موقعیت لایه‌های ژئوگرید بستگی به تعداد لایه‌ها داشته و ترتیب ثابتی برای آن‌ها در عمق وجود ندارد. همچنین تعداد بهینه لایه‌های مسلح کننده برای حصول بیشترین ظرفیت در حالت بار خارج از مرکز در مطالعه حاضر برابر ۴ لایه به دست آمد که به ترتیب لایه‌های اول، دوم، سوم و چهارم در فواصل بهینه ۰/۵، ۰/۷، ۰/۳ و ۰/۹ متری از کف پی قرار می‌گیرند.

۱- مقدمه

امروزه در مهندسی ژئوتکنیک از مصالح ژئوسینتتیک جهت بهسازی خاک از جمله افزایش ظرفیت باربری خاک استفاده می‌شود. محققین در این زمینه با انجام آزمایش‌های کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس سعی در برآورد کارایی شالوده خاک مسلح و ایجاد روش‌های منطقی جهت طراحی را داشته‌اند. همچنین برخی از محققین مطالعات عددی را در این خصوص انجام داده‌اند و پارامترهای موثر بر رفتار مسلح کننده‌ها، خاک مسلح و افزایش ظرفیت باربری پی‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند. اکثر مطالعات گذشته با فرض اعمال بار به صورت بار قائم و در مرکز پی بوده است اما در عمل بارهای وارده به سازه‌ها

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: rabeti@yu.ac.ir

و متعاقباً به پی آنها، بارهایی با خروج از مرکزیت (نیروی قائم و لنگر خمشی) هستند. مطالعات انجام گرفته در این زمینه محدود می‌باشد. ساران و همکاران در سال ۲۰۰۸ با استفاده از مدل آزمایشگاهی به بررسی تاثیرات مسلح سازی خاک با استفاده از لایه‌های ژئوگرید تحت بارگذاری قائم خارج از مرکز و بارگذاری مایل بر روی ظرفیت باربری پی‌های نواری و مربعی با توجه به تعداد و ابعاد ژئوگرید، اقدام نمودند. آزمایش‌های آنها با استفاده از چهار لایه مسلح کننده و با بار با خروج از مرکزیت های $e/B=0, 0.1, 0.2$ صورت گرفت. همچنین فاصله اولین لایه از پی نواری و فاصله لایه‌های بعدی از هم برابر $0.25B$ فرض شد. یافته‌های آنها نشان می‌دهد که میزان باربری پی نواری با افزایش تعداد لایه‌ها تا سه لایه افزایش قابل توجهی دارد [۱]. صادقلو



روی ظرفیت باربری نهایی خاک ماسه‌ای پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد که استفاده از ژئوگریدها در خاک ماسه‌ای تاثیر چشم‌گیری در مقدار باربری نهایی پی نواری دارد و همچنین یافته‌های آنها نشان می‌دهد که قرارگیری چهار لایه ژئوگرید در خاک بر روی افزایش ظرفیت باربری خاک بسیار موثر می‌باشد [۶]. بدخشان و نورزاد در سال ۲۰۱۷ به بررسی آزمایشگاهی باربری خاک تحت نیروی خارج از مرکز و نیروی مرکزی در پی دایره‌ای و مربعی با استفاده از ژئوگرید در خاک، پرداختند. نتایج آنها افزایش باربری خاک در اثر استفاده از مسلح‌کننده‌ها را نشان می‌دهد. در پایان رابطه‌ای برای میزان باربری پی در نیروهای خارج از مرکز را ارائه نمودند [۷].

نتایج تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که نحوه چیدمان لایه‌های مسلح‌کننده ژئوگرید شامل فاصله اولین لایه مسلح‌کننده از کف پی (u)، فواصل قائم لایه‌های مسلح‌کننده از هم (h)، تعداد لایه‌های مسلح‌کننده (N)، طول مسلح‌کننده (L) و همچنین عمق مسلح‌سازی نقش مهمی در افزایش ظرفیت باربری شالوده‌های واقع بر خاک مسلح تحت بارگذاری با خروج از مرکزیت را دارند. با علم به اهمیت استفاده از ژئوگرید در افزایش ظرفیت باربری پی‌ها، تاکنون مطالعه ای در مورد چیدمان بهینه لایه‌های ژئوگرید بر ظرفیت باربری پی‌های سطحی تحت بارهای خارج از مرکز انجام نگرفته است. مطالعه حاضر بر آن است تا به بررسی نقش مسلح‌کننده ژئوگرید بر ظرفیت باربری پی منفرد نواری تحت بارهای خارج از مرکز در فضای بارگذاری VM (نیروی قائم V) همراه با لنگر خمشی (M) روی پی) با استفاده از روش عددی بپردازد و چیدمان بهینه لایه‌های ژئوگرید را بر این حالت بارگذاری به دست آورد.

۲- مدل‌سازی عددی

برای شبیه‌سازی مدل تاثیرات ژئوگرید بر روی ظرفیت باربری نهایی خاک تحت نیروی خروج از مرکز از نرم افزار المان محدود PLAXIS 2D استفاده شده است. مدل‌سازی مطابق با مطالعه لوكیدیس و همکاران (۲۰۰۸) [۸] انجام شده و نتایج مدل عددی با نتایج این مطالعه راستی آزمایی شده است. برای این منظور مدلی با ارتفاع شش متر و عرض ۱۳ متر ساخته شده و پی نواری از جنس بتن به عرض یک متر و ضخامت ۰/۵ متر در سطح زمین و در مرکز مدل واقع بر خاک ماسه‌ای، مدل‌سازی شده است. المان‌های مدل عددی

و همکاران (۲۰۰۹) با انجام آزمایش‌هایی بر روی خاک ماسه‌ای که با ژئوتکستایل مسلح شده و دارای بارگذاری با خروج از مرکزیت از مرکز پی نواری می‌باشد به این نتیجه رسیدند که افزودن مسلح‌کننده‌ها باعث بهبود ظرفیت باربری نهایی خاک می‌شوند و میزان کاهش ظرفیت باربری نهایی در هنگام بارگذاری با خروج از مرکزیت، در خاک مسلح شده کمتر است [۲]. ال ساواف در سال ۲۰۰۹ با استفاده از روش آزمایشگاهی و عددی به مطالعه تاثیرات مسلح‌سازی خاک ماسه‌ای با بارگذاری خروج از مرکزیت در پی‌های نواری دست زد. نتایج وی نشان می‌دهد که استفاده از مسلح‌کننده تاثیر چشم‌گیری در افزایش ظرفیت باربری خاک با بارگذاری خروج از مرکزیت‌های مختلف را دارد. مقدار بهینه طول مسلح‌سازی در این مطالعه $L/B \geq 4$ و تعداد لایه‌های بهینه مسلح‌سازی برابر ۳ به دست آمد [۳]. ارنک در سال ۲۰۱۳ به بررسی آزمایشگاهی میزان باربری خاک ماسه با میزان تراکم مختلف تحت بارگذاری با خروج از مرکزیت‌های مختلف از مرکز پی نواری همراه با اعمال بار مایل و با چهار عرض مختلف پی پرداخت. یافته‌های وی نشان می‌دهد که با افزایش میزان خروج از مرکزیت و زاویه اعمال بار، میزان باربری نهایی خاک ماسه در هر دو تراکم مورد استفاده، کاهش می‌یابد. این در حالی است که میزان این کاهش در خاک ماسه‌ای با تراکم بیشتر، کمتر است. نتایج به دست آمده همچنین نشان می‌دهد که تغییر در عرض پی‌های نواری تاثیر چندانی بر روی ظرفیت باربری نهایی خاک به خصوص در خاک ماسه‌ای سست، ندارد [۴]. بدخشان و نورزاد (۲۰۱۵)، در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی اثر خروج از مرکزیت بار بر روی رفتار شالوده‌های دایره‌ای واقع بر بستر ماسه‌ای مسلح‌شده به ژئوگرید اقدام نمودند. آنها در این مطالعه به تعیین عمق بهینه قرارگیری لایه‌های ژئوگرید و همچنین اثر تعداد لایه‌های ژئوگرید بر رفتار بار-نشست و دوران پی تحت خروج از مرکزیت‌های $e/B=0, 0.0625, 0.125, 0.01875, 0.25$ اقدام نمودند. نتایج مطالعات آنها نشان می‌دهد ظرفیت باربری نهایی در حالت مسلح در مقایسه با حالت غیرمسلح افزایش می‌یابد و همچنین عمق بهینه قرارگیری لایه اول ژئوگرید از کف پی را برابر $u/B=0.42$ و فاصله بهینه لایه‌های بعدی از یکدیگر را برابر $h/B=0.42$ گزارش نمودند [۵]. در سال ۲۰۱۷ ساهو و همکاران با بهره‌گیری از روش آزمایشگاهی و عددی به بررسی تاثیرات اعمال نیروی قائم خارج از مرکز و نیروی مرکزی به پی نواری با مسلح‌کننده‌های ژئوگریدی بر

جدول ۱. مشخصات مصالح به کار رفته در مدل عددی

Table 1. Properties of materials used in the numerical analyses

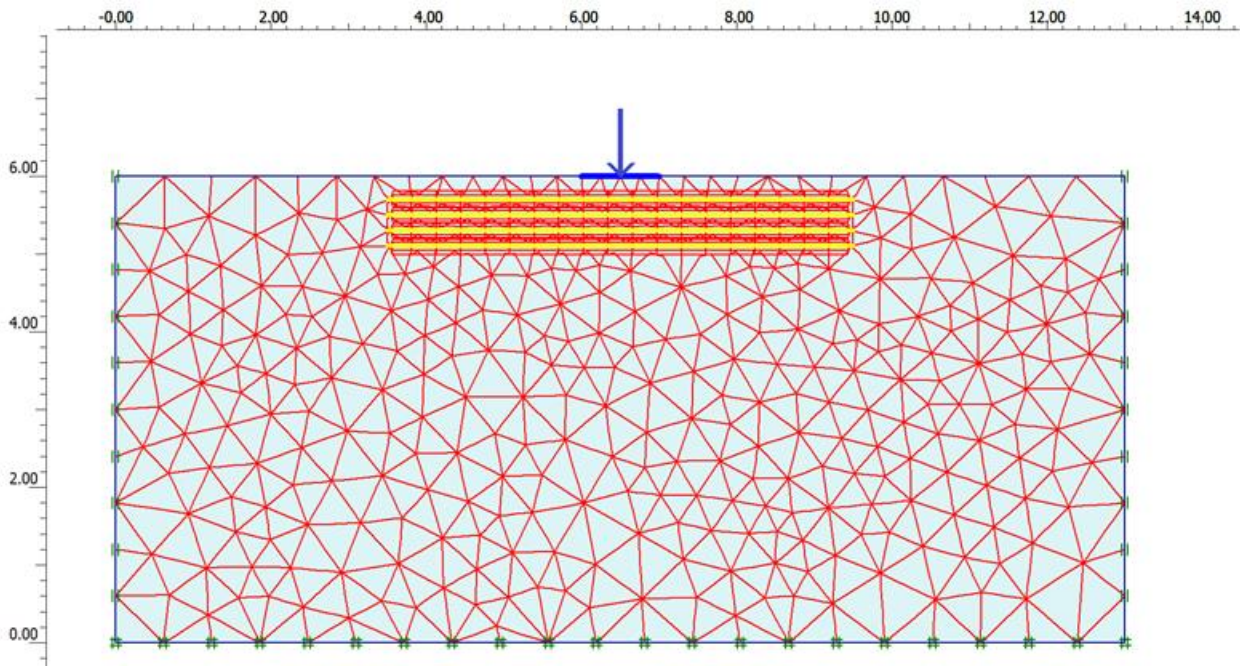
مقدار	واحد	نماد لاتین	پارامتر	مصالح
ماسه	-	-	نوع خاک	خاک
8×10^4	kPa	E_s	مدول الاستیسیته خاک	
۳۵	درجه (°)	ϕ	زاویه اصطکاک داخلی	
۰	kPa	c	چسبندگی	
۰/۳۵	-	μ	ضریب پواسون	
۲۰	kN/m ³	γ	وزن مخصوص خاک	
۶	درجه (°)	ψ	زاویه اتساع	
۰/۹	-	R_{int}	ضریب اینترفیس	
۱	m	B	عرض پی (m)	
۰/۵	m	h	ضخامت پی (m)	
۲۰	GPa	E_c	مدول الاستیسیته پی	
۲۰۰۰	kN/m	EA	سختی الاستیک ژئوگرید	ژئوگرید
۶	m	L	طول ژئوگرید	
۹۵۶	gr/m ²	m	جرم واحد سطح ژئوگرید	
۳۰۰	kN/m	F_u	مقاومت کششی نهایی ژئوگرید	
۹۸	kN/m	$F_{u,5\%}$	مقاومت کششی ژئوگرید در کرنش ۵٪	

از نوع ۱۵ گره‌ای و مش‌بندی از نوع ریز انتخاب شده است. همچنین جهت مدل‌سازی رفتار خاک از مدل و معیار گسیختگی موهر-کولمب استفاده شده است. برای تعریف مصالح استفاده شده در مدل‌سازی در خصوص پی بتنی از المان PLATE در نرم افزار PLAXIS استفاده شده است. پارامترهای ورودی برای المان Plate، سختی خمشی (EI) و سختی نرمال (EA) است که در آن‌ها E مدول الاستیسیته مصالح پی، I ممان اینرسی و A مساحت مقطع پی است. مقادیر این پارامترها با فرض $E_c = 20 \text{ GPa}$ برای مصالح بتن و بر اساس ابعاد در نظر گرفته شده برای پی نواری (ضخامت ۰/۵ متر و طول ۱ متر در جهت عمود بر صفحه) محاسبه گردید.

جهت مدل‌سازی مسلح‌کننده‌های ژئوگرید از المان Geogrid در نرم افزار PLAXIS استفاده می‌شود. با توجه به اینکه از المان‌های ۱۵ گره‌ای برای مدل‌سازی خاک استفاده شده است، نرم افزار المان‌های ژئوگرید را بطور خودکار به صورت ۵ گرهی فرض می‌کند. خصوصیات ژئوگریدهای استاندارد مورد استفاده (Miragrid®22XT) در تحلیل‌های عددی از شرکت معتبر جهانی میرافی Mirafi

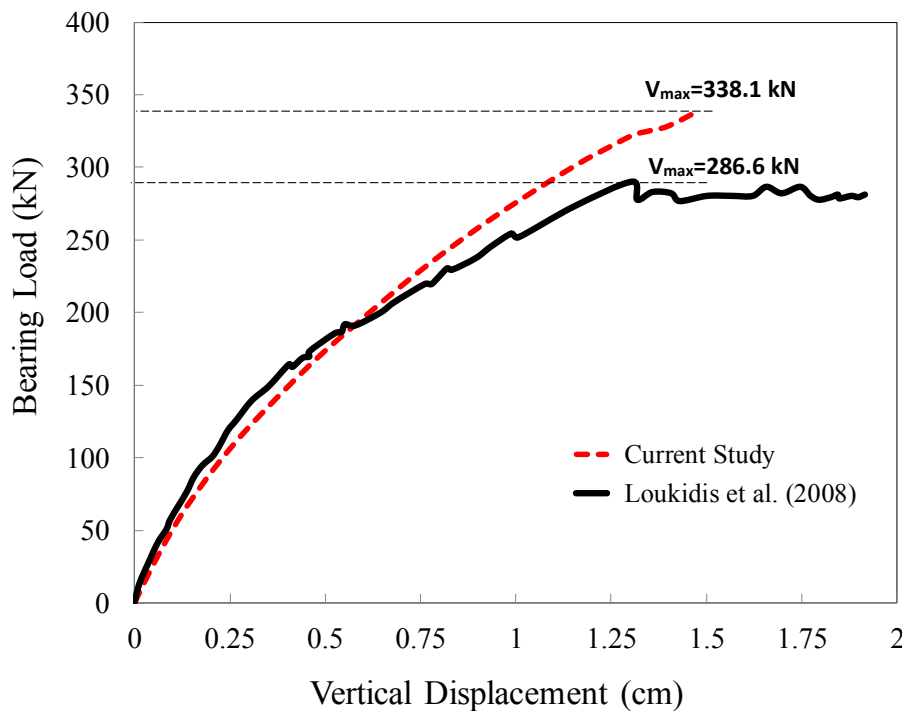
۳- صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی

به منظور بررسی صحت نحوه مدل‌سازی و نتایج حاصل از آنالیزهای عددی در حالت بارگذاری بار قائم با خروج از مرکزیت، نتایج حاصل از آنالیز مدل‌های عددی در نرم افزار PLAXIS با نتایج مطالعات لوکیدیس و همکاران (۲۰۰۸) و مطالعه آزمایشگاهی گتاردی و باترفیلد (۱۹۹۳) [۱۰]، در شرایط بدون استفاده از مسلح‌کننده ژئوگرید بررسی شده است.



شکل ۱. هندسه مدل عددی شبکه‌بندی شده

Fig. 1. General layout of the numerical model for the reinforced footing

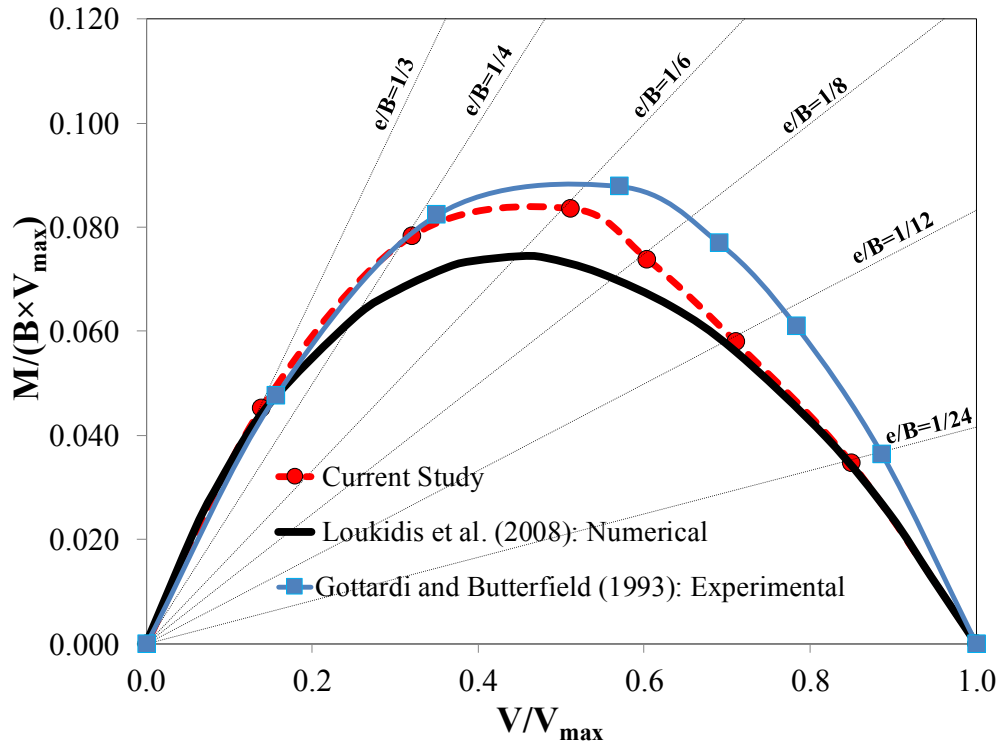


شکل ۲. منحنی بار-نشست پی تحت بارگذاری قائم بدون خروج از مرکزیت حاصل از مطالعه حاضر و لوکیدیس و همکاران (۲۰۰۸)

Fig. 2. Load-displacement curve without eccentricity obtained from the current study vs Loukidis et al. (2008)

همانگونه که در شکل دیده می‌شود، نمودار بار-نشست حاصل از مدلسازی عددی تطابق خوبی با نتایج مطالعه لوکیدیس و همکاران (۲۰۰۸) هم از نظر روند منحنی بار-نشست و هم از نظر میزان بار نهایی گسیختگی در حالت بارگذاری بدون خروج از مرکزیت دارد.

شکل (۲) نمودار بار-نشست حاصل از آنالیز عددی برای پی واقع بر خاک غیرمسلح تحت بارگذاری قائم در مرکز پی (V) در حالت بدون خروج از مرکزیت در این مطالعه و منحنی بار-نشست حاصل از مطالعات لوکیدیس و همکاران (۲۰۰۸)، را نشان میدهد.



شکل ۳. نمودار بدون بعد حاصل از آنالیزهای عددی مطالعه حاضر، مطالعه لوکیدیس و همکاران (۲۰۰۸) و در فضای بارگذاری VM
 Fig. 3. Dimensionless diagram in VM loading condition, this study vs Loukidis et al (2008)

جهت مقایسه نشان داده شده است. در این نمودار e میزان خروج از مرکزیت نیروی قائم از مرکز پی و B عرض پی نواری می‌باشد که در این مطالعه برابر ۱ متر در نظر گرفته شده است. همچنین در این شکل محور افقی V/V_{max} و محور قائم M/BV_{max} مطابق معادله (۱) در نظر گرفته شده است. در محور افقی V_{max} برابر حداکثر نیروی قابل تحمل پی در حالت بدون خروج از مرکزیت می‌باشد که مقدار آن برابر 338.1 kN حاصل شده است. همانگونه که در شکل (۳) نشان داده شده است، تطابق خوبی بین نتایج مدل‌سازی عددی مطالعه حاضر و نتایج حاصل از مطالعات لوکیدیس و همکاران (۲۰۰۸) و نتایج مطالعه آزمایشگاهی گتاردی و باترفیلد (۱۹۹۳) در فضای بارگذاری VM مشاهده می‌شود.

لازم به توضیح است، منحنی شکل (۳) بر اساس معادله (۱) ترسیم شده است. از آنجاییکه مقادیر B و V_{max} ثابت است، محور افقی بیانگر میزان بار قائم خارج از مرکز (V) و محور عمودی بیانگر میزان لنگر ($M=V*e$) می‌باشد. شیب خط گذرنده از مبدا، میزان خروج از مرکزیت بار قائم (e) را نشان می‌دهد. خط‌های با شیب بیشتر به معنای خروج از مرکزیت بالاتر است.

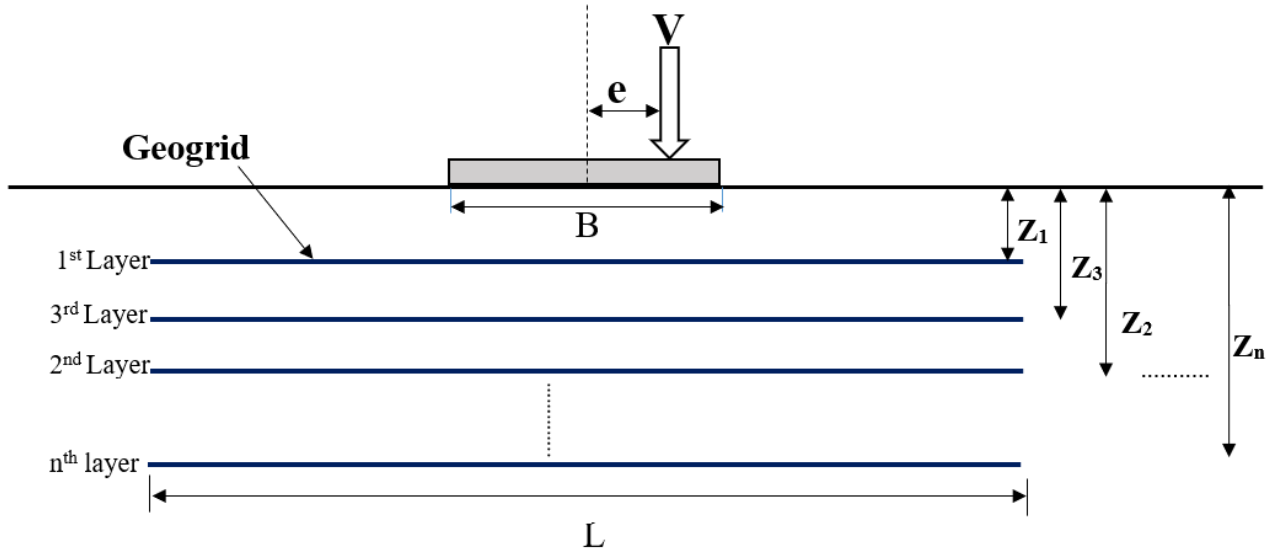
مقدار حداکثر باربری خاک (V_{max}) در مطالعه لوکیدیس برابر با $286/6 \text{ kN}$ و مقدار حداکثر باربری در مدل‌سازی مطالعه حاضر برابر $338/1 \text{ kN}$ می‌باشد.

گتاردی و باترفیلد (۱۹۹۳) از طریق مطالعه‌ی آزمایشگاهی به بررسی تاثیر خروج از مرکزیت پی بر ظرفیت باربری پی نواری بر روی خاک ماسه‌ای غیرمسلح پرداختند. آنها رابطه (۱) را برای تعیین حداکثر ظرفیت باربری پی در شرایط مختلف بارگذاری ترکیبی ارائه دادند:

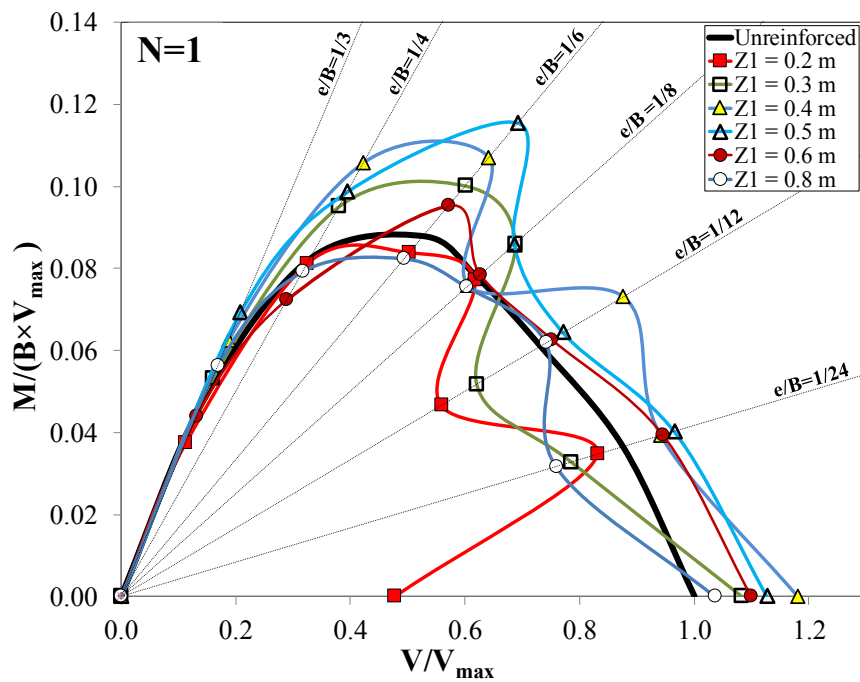
$$\frac{M}{B.V_{max}} = 0.36 \frac{V}{V_{max}} \left(1 - \frac{V}{V_{max}} \right) \quad (1)$$

که در آن M لنگر وارد بر پی ($M=V*e$)، V نیروی قائم وارد بر پی، V_{max} حداکثر باربری پی در حالت بدون خروج از مرکزیت و B عرض پی است.

در نمودار شکل (۳) نتایج مدل‌سازی عددی در نرم افزار PLAXIS با نتایج مطالعات لوکیدیس و همکاران (۲۰۰۸) و مطالعه آزمایشگاهی گتاردی و باترفیلد (۱۹۹۳) در فضای بارگذاری VM



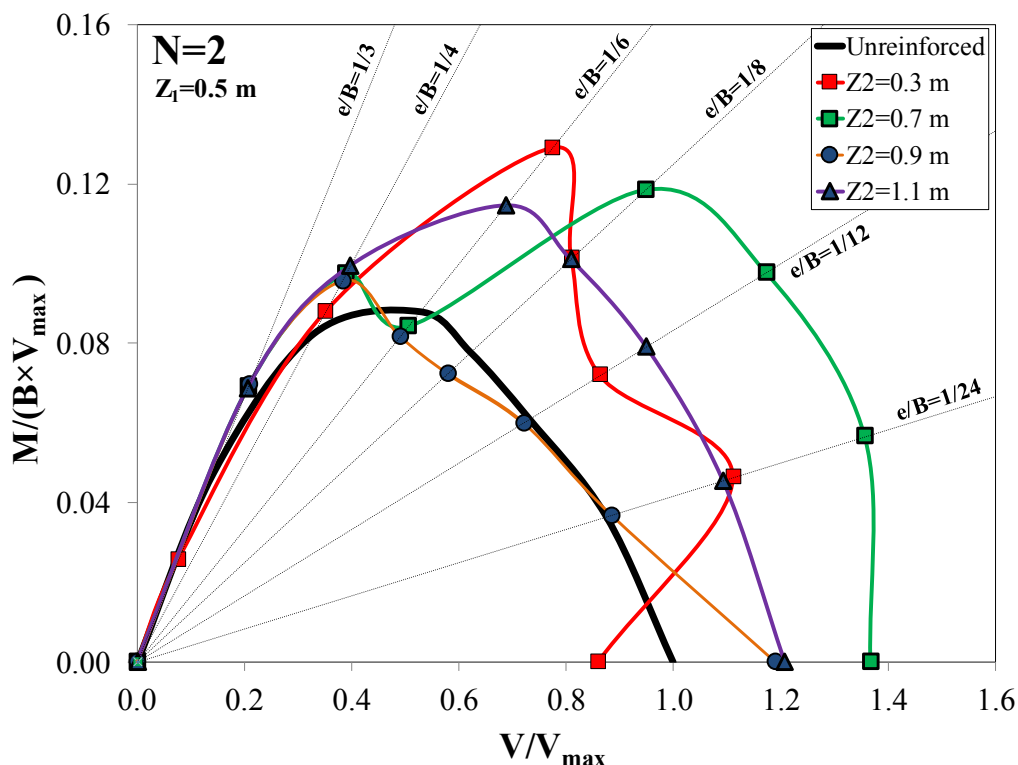
شکل ۴. نمایش شماتیکی پارامترهای به کار رفته در مطالعه حاضر جهت بهینه سازی چیدمان لایه های ژئوگرید
 Fig. 4. Parameters defined in the current study to obtain the optimum layout for geogrid layers.



شکل ۵. نمودار بدون بعد در فضای بارگذاری VM جهت تعیین عمق بهینه جایگذاری نخستین لایه مسلح کننده از کف پی (Z₁)
 Fig. 5. Dimensionless graph to determine the optimum depth for the first geogrid layer from the foundation in VM condition (Z₁)

و پس از آنالیزهای عددی نمودارهایی مطابق آنچه که در بخش ۳ در فضای VM تشریح گردید، به دست آمده است. نمودار شکل (۵) نتایج حاصل از آنالیزهای عددی برای اولین لایه مسلح کننده می باشد. اولین لایه مسلح کننده از کف پی (Z₁) در فواصل ۰/۲ تا ۰/۸ متری از کف پی قرار داده شده و برای هر حالت نمودار بدون بعد ظرفیت

۴-۱-۱- تاثیر یک لایه ژئوگرید (N=1) بر ظرفیت باربری پی در فضای VM و تعیین موقعیت بهینه لایه اول (Z₁) به منظور تعیین عمق بهینه جایگذاری نخستین لایه ژئوگرید از کف پی نواری تحت بارگذاری توام با قائم همراه با خروج از مرکزیت، لایه مسلح کننده را در فواصل متغیر نسبت به کف پی قرار داده شده



شکل ۶. نمودار بدون بعد در فضای بارگذاری VM جهت تعیین عمق بهینه جایگذاری دومین لایه مسلح کننده از کف پی (Z_2)

Fig. 6. Dimensionless graph to determine the optimum depth for the second geogrid layer from the foundation in VM condition (Z_2)

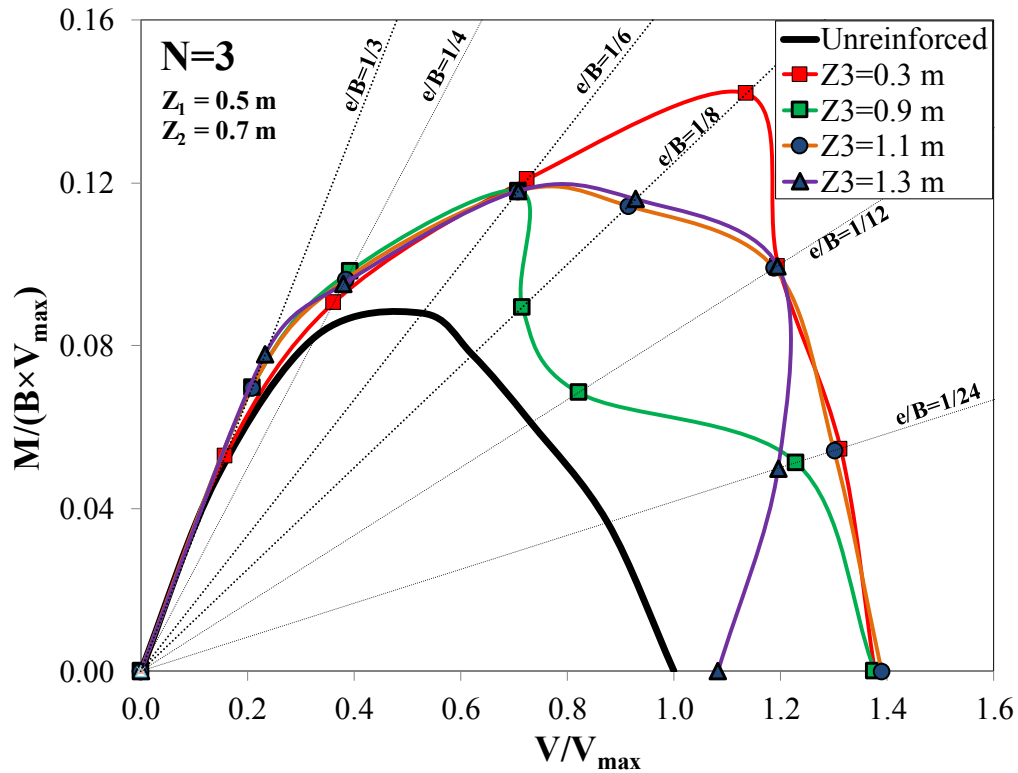
باربری در فضای VM ترسیم شده است. با توجه به شکل (۵) می توان به این مهم دست یافت که در خروج از مرکزیت های برابر $e/B = 1/4, 1/6, 1/8$ بیشترین افزایش ظرفیت باربری در فضای بارگذاری VM در تمامی حالت های جایگذاری مشاهده می شود اما با جایگذاری اولین لایه ژئوگرید در عمق 0.5 متری از کف پی بیشترین افزایش در مقایسه با سایر حالت های جایگذاری لایه اول مشاهده می شود. همچنین مشاهده می گردد در خروج از مرکزیت های $e/B = 1/24, 1/12$ میزان افزایش ظرفیت باربری در فضای VM ناچیز است و تقریباً در تمامی حالت های جایگذاری یکسان می باشد.

۲-۱-۴- تاثیر دو لایه ژئوگرید ($N=2$) بر ظرفیت باربری پی در فضای VM و تعیین موقعیت بهینه لایه دوم (Z_2)

به منظور تعیین عمق بهینه جایگذاری دومین لایه مسلح کننده در فضای بارگذاری VM، لایه اول در عمق بهینه خود ($Z_1=0.5$ m) قرار داده شده است و لایه دوم در فواصل متغیر نسبت به کف پی جاگذاری شده و پس از مدل سازی، نتایج حاصل از آنالیزهای عددی در قالب نمودار شکل (۶) نشان داده شده است.

با توجه به شکل بالا، با قراردادن دومین لایه مسلح کننده در اعماق مختلف نسبت به کف پی، در خروج از مرکزیت های مختلف

بنابراین می توان نتیجه گرفت که با قرار دادن اولین لایه مسلح کننده در عمق کم نسبت به کف پی ($Z_1=0.2$ m)، میزان ظرفیت باربری در مقایسه با حالت غیرمسلح کمتر شده است (به دلیل ایجاد مرز صلب در این فاصله)، اما به تدریج با افزایش عمق جایگذاری میزان ظرفیت باربری بهبود می یابد به نحوی که، با قراردادن لایه مسلح کننده ژئوگرید در فاصله 0.5 متری از کف پی میزان ظرفیت



شکل ۷. نمودار بدون بعد در فضای بارگذاری VM جهت تعیین عمق بهینه جایگذاری سومین لایه مسلح کننده از کف پی (Z_3)

Fig. 7. Dimensionless graph to determine the optimum depth for the third geogrid layer from the foundation in VM condition (Z_3)

حالات بیشتر می باشد. عمق بهینه دومین لایه مسلح کننده از کف پی برابر عمق 0.7 متر از کف پی حاصل شده است.

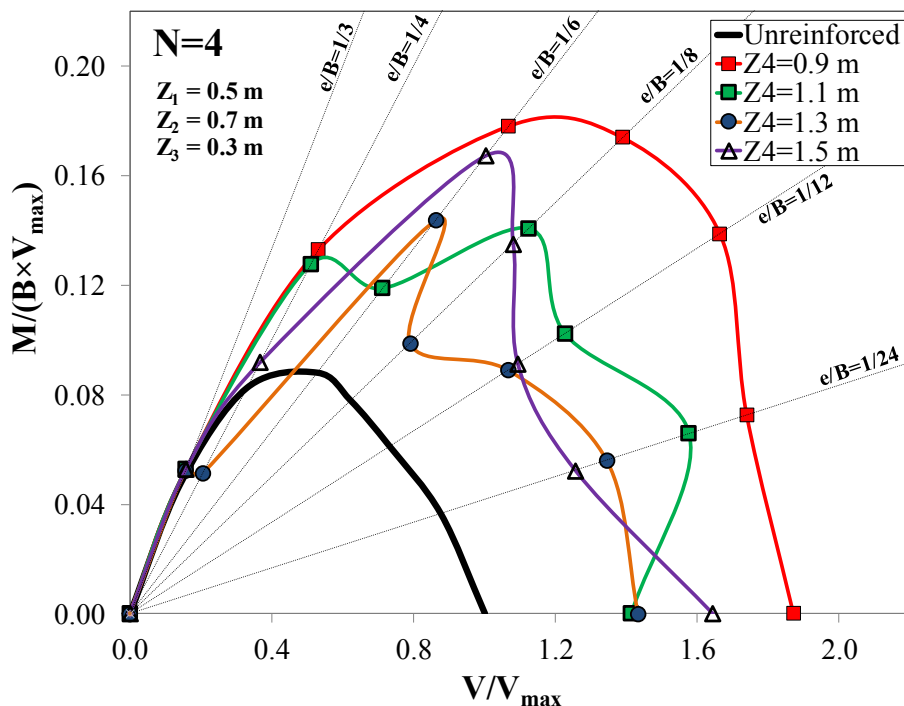
۳-۱-۴- تاثیر سه لایه ژئوگرید ($N=3$) بر ظرفیت باربری پی در فضای VM و تعیین موقعیت بهینه لایه سوم (Z_3)

با جایگذاری لایه های اول و دوم در عمق بهینه به دست آمده از مراحل قبل و بررسی چیدمان لایه سوم در فواصل متغیر نسبت به کف پی و انجام آنالیزهای عددی، نتایج حاصل از آنالیزهای عددی افزودن سومین لایه مسلح کننده در فضای بارگذاری VM در نمودار شکل (۷) نشان داده شده است.

با توجه به نمودار شکل (۷) مشاهده می شود که با جایگذاری سومین لایه مسلح کننده در عمق 0.3 متری از کف پی در تمامی خروج از مرکزیت ها بیشترین افزایش در ظرفیت باربری پی در فضای بارگذاری VM حاصل شده است. اما با افزایش عمق و با جایگذاری سومین لایه ژئوگرید در عمق 0.9 متری از کف پی علی رغم افزایش ظرفیت باربری نسبت به حالات غیرمسلح در تمامی خروج از مرکزیت ها با حالت جایگذاری لایه سوم در عمق 0.3 متری ظرفیت

رفتار متفاوتی مشاهده می گردد. به طور مثال با جایگذاری دومین لایه مسلح کننده در عمق 0.3 متری ظرفیت باربری در خروج از مرکزیت های $e/B=1/6, 1/8, 1/12$ نسبت به حالت غیرمسلح افزایش می یابد اما در سایر خروج از مرکزیت ها تغییر محسوسی مشاهده نمی شود. بیشترین افزایش ظرفیت باربری در خروج از مرکزیت $e/B=1/6$ با جایگذاری دومین لایه مسلح کننده در عمق 0.3 متری از کف مشاهده می شود. پس از آن با افزایش عمق جایگذاری لایه دوم و جایگذاری آن در عمق 0.7 متری از کف پی در خروج از مرکزیت های $e/B=0.0, 1/24, 1/12, 1/8$ در فضای VM در مقایسه با سایر حالت های جایگذاری دومین لایه مسلح کننده مشاهده می گردد. اما در خروج از مرکزیت های بیشتر $e/B=1/6, 1/4, 1/3$ مقدار افزایش ظرفیت باربری نسبت به حالت غیرمسلح و سایر حالت های جایگذاری ناچیز می باشد.

بنابراین می توان نتیجه گرفت در خروج از مرکزیت های مختلف چیدمان بهینه لایه های مسلح کننده متغیر می باشد، اما با توجه به اینکه مقدار افزایش ظرفیت باربری در فضای بارگذاری VM با جایگذاری دومین لایه مسلح کننده در عمق 0.7 متری از کف پی نسبت به سایر



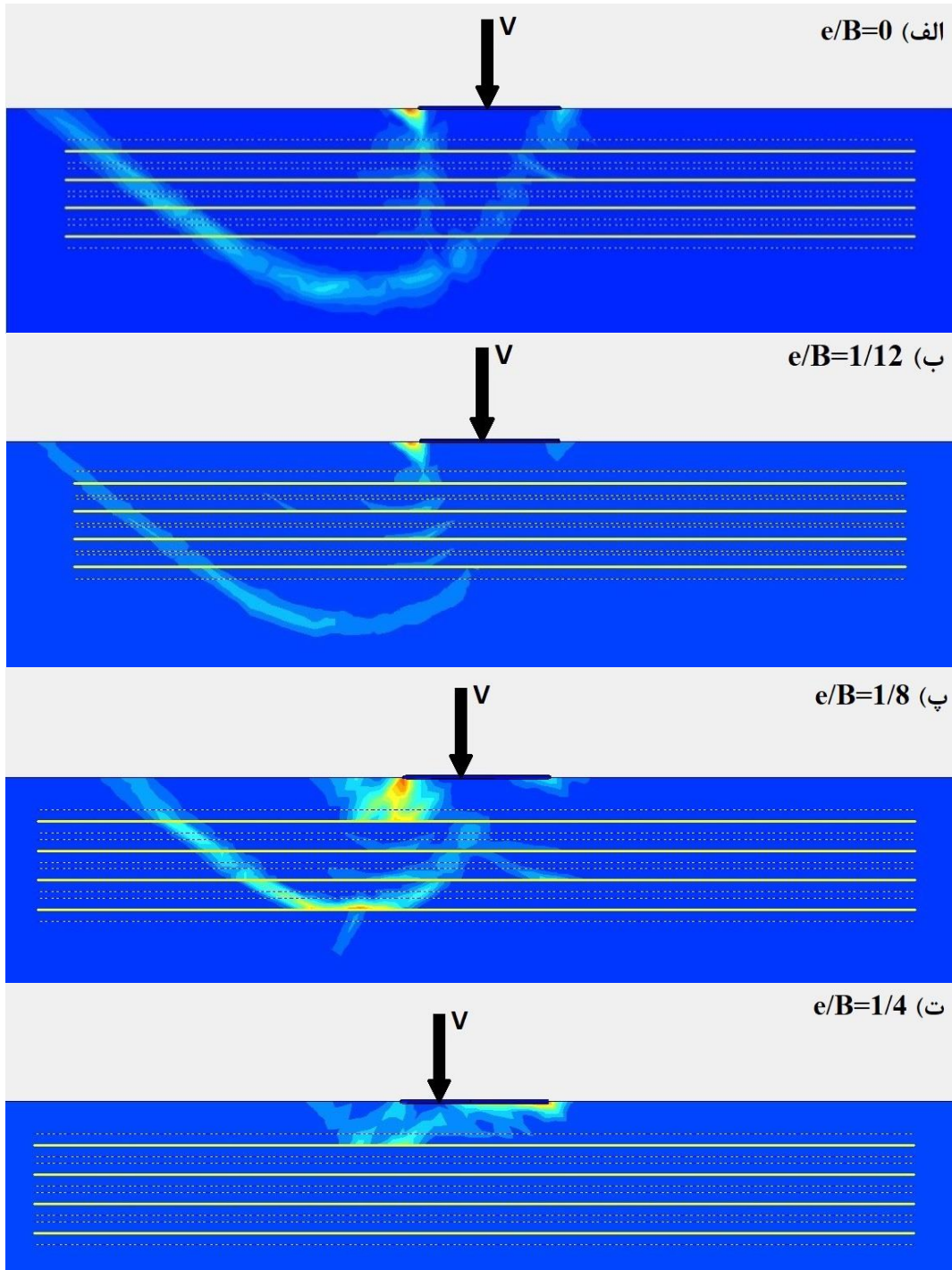
شکل ۸. نمودار بدون بعد در فضای بارگذاری VM جهت تعیین عمق بهینه جایگذاری چهارمین لایه مسلح کننده از کف پی (Z_4)
 Fig. 8. Dimensionless graph to determine the optimum depth for the fourth geogrid layer from the foundation in VM condition (Z_4)

۴-۱-۴ تاثیر ۴ لایه ژئوگرید ($N=4$) بر ظرفیت باربری پی در فضای VM و تعیین موقعیت بهینه لایه چهارم (Z_4)

به منظور تعیین عمق بهینه جایگذاری چهارمین لایه مسلح کننده از کف پی، با جایگذاری سه لایه اول مسلح کننده در عمق بهینه از کف پی برابر $Z_1=0.5$ m، $Z_2=0.7$ m، $Z_3=0.3$ m و با جایگذاری چهارمین لایه مسلح کننده در اعماق متغیر نسبت به کف پی و با انجام آنالیزهای عددی نتایج حاصل از آنالیزها در قالب نمودار شکل ۶ نشان داده شده است. همانگونه که از نمودار شکل (۸) مشخص است با جایگذاری چهارمین لایه مسلح کننده در عمق $0.9/3$ متری از کف پی بیشترین افزایش در ظرفیت باربری در فضای بارگذاری VM در تمامی خروج از مرکزیتها مشاهده می شود.

شکل (۹) گوه گسیختگی ایجاد شده را در خروج از مرکزیت‌های $e/B=0, 1/12, 1/8, 1/4$ و در چهار لایه ژئوگرید که در فواصل بهینه به دست آمده است را نشان می دهد. همانگونه که از شکل مشخص است با افزایش میزان خروج از مرکزیت، گوه های گسیختگی از عمق های بیشتر نسبت به کف پی به سطح زمین نزدیکتر شده است.

باربری کاهش یافته است و رفتار منظم در خروج از مرکزیت های مختلف همچون حالت $Z_3=0.3$ m، مشاهده نمی شود و در میزان خروج از مرکزیت های مختلف مقدار افزایش ظرفیت باربری تغییر می کند. با جایگذاری سومین لایه مسلح کننده در عمق $1/3$ و $1/1$ متری از کف پی، به مقدار تقریباً برابر با حالت جایگذاری سومین لایه مسلح کننده در عمق $0.3/3$ متری به جز از در خروج از مرکزیت $e/B=1/8$ = که در این حالت $Z_3=0.3$ m ظرفیت باربری بیشتری حاصل گردیده، ظرفیت باربری در فضای بارگذاری VM افزایش یافته است. در نتیجه برخلاف آنچه سایر محققین در جاگذاری لایه های ژئوگرید فرض می نمودند که لایه های مسلح کننده بعد از لایه نخستین قرار می گیرند، در این فضای بارگذاری VM، با جایگذاری سومین لایه مسلح کننده در عمق $0.3/3$ متری از کف پی، بیشترین افزایش ظرفیت باربری نسبت به فاصله های قرار گیری دیگر مشاهده شده است. بنابراین عمق بهینه جایگذاری سومین لایه مسلح کننده برابر $0.3/3$ متر به دست آمده است که قبل از جاگذاری نخستین لایه ژئوگرید می باشد.

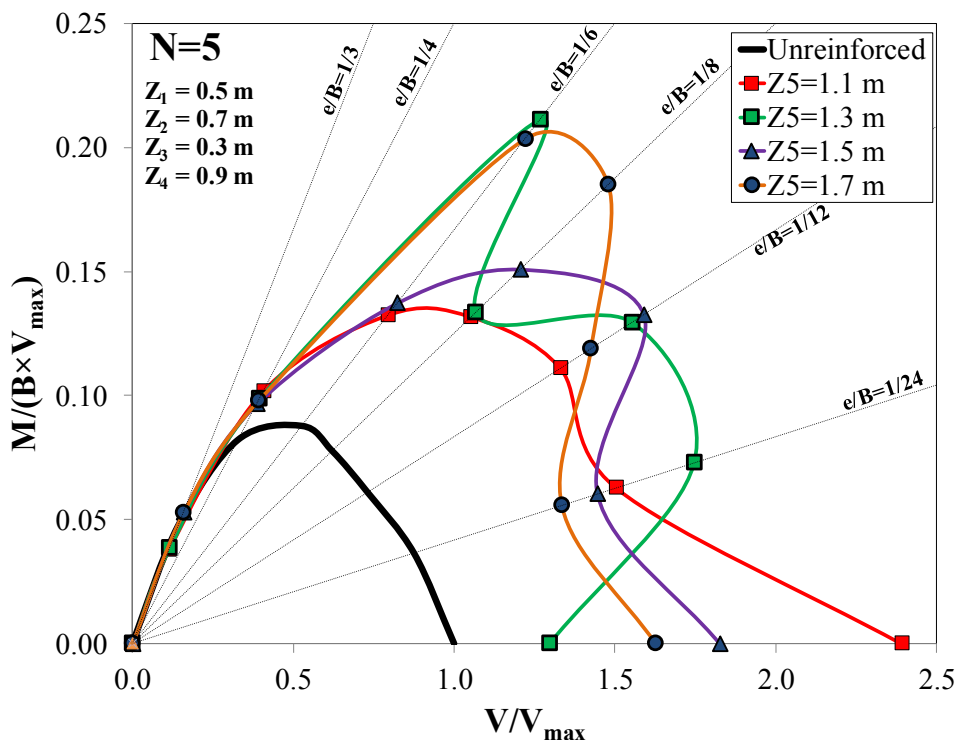


شکل ۹. گوه گسیختگی تشکیل شده در زیر پی نواری با ۴ لایه ژئوگرید در خروج از مرکزیت‌های مختلف الف) $e/B=0$ ب) $e/B=1/12$ پ) $e/B=1/8$ و ت) $e/B=1/4$

Fig. 9. Wedge Rupture formed under the strip with 4 layers of geogrid at different eccentricity a) $e/B=0$ b) $e/B=1/12$ c) $e/B=1/8$ d) $e/B=1/4$

با افزایش برون محوری در خروج از مرکزیت‌های بزرگتر از $e/B=1/4$ این روند متوقف می‌گردد. علت این تغییرات را می‌توان به نحوه شکل گوه‌های گسیختگی ایجاد شده در این خروج از مرکزیت‌ها مرتبط

در فضای بارگذاری V_M ، با افزایش میزان خروج از مرکزیت از نسبت $e/B=1/24$ تا مقدار $e/B=1/6$ ، اثر مثبت لایه‌های مسلح‌کننده ژئوگرید در افزایش لنگر قابل تحمل پی بیشتر می‌شود. اما پس از آن



شکل ۱۰. نمودار بدون بعد در فضای بارگذاری VM جهت تعیین عمق بهینه جایگذاری پنجمین لایه مسلح کننده از کف پی (Z_5)

Fig. 10. Dimensionless graph to determine the optimum depth for the fifth Geogrid layer from the foundation in VM condition (Z_5)

نمودار بدون بعد در فضای VM شکل (۱۰) نشان داده شده است. با جایگذاری پنجمین لایه مسلح کننده در عمق ۱/۳ متری از کف پی در خروج از مرکزیت برابر $e/B=1/6$ ، بیشترین ظرفیت باربری نسبت به سایر لایه‌ها مشاهده می‌شود. پس از آن با کاهش مقدار خروج از مرکزیت به مقدار $e/B=1/8$ ، میزان ظرفیت باربری در فضای بارگذاری VM کاهش یافته است، اما مجدداً با کاهش خروج از مرکزیت به مقدار $e/B=1/12$ ، $1/24$ ، میزان ظرفیت باربری در این فضا در مقایسه با سایر حالت‌های جایگذاری پنجمین لایه مسلح کننده افزایش یافته است.

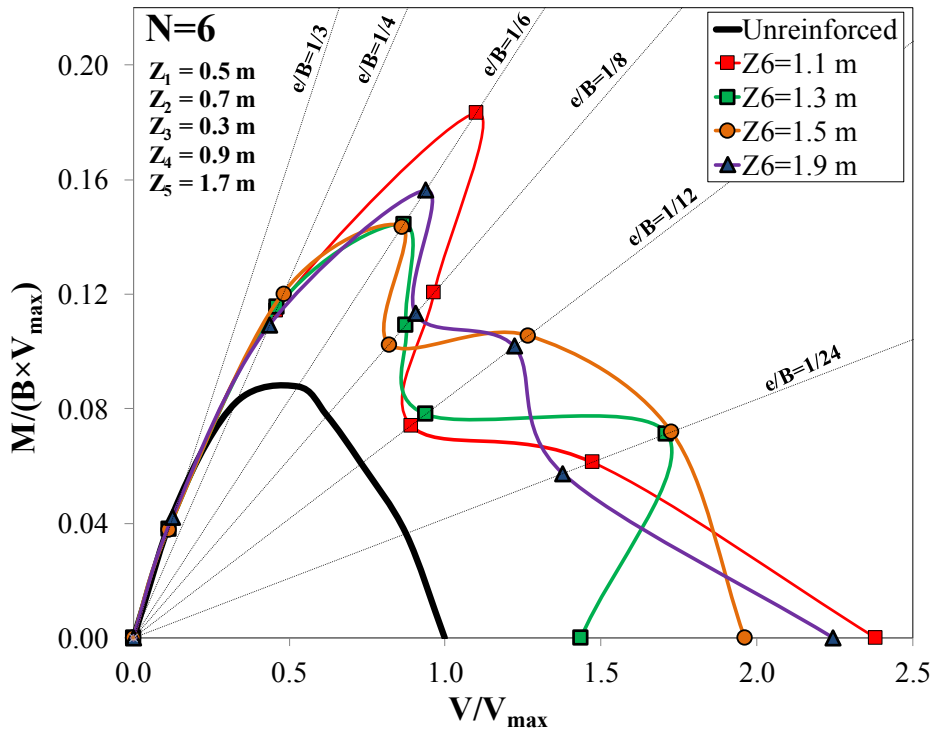
با جایگذاری پنجمین لایه مسلح کننده در عمق ۱/۵ متری از کف پی میزان افزایش ظرفیت باربری در فضای بارگذاری VM نسبت به سایر حالت‌های جایگذاری پنجمین لایه مسلح کننده به جزء حالت $Z_5=1.1$ m کمتر می‌باشد. بسته به میزان خروج از مرکزیت همانند حالت چهار لایه عمق بهینه جایگذاری پنجمین لایه مسلح کننده می‌تواند تغییر نماید.

همانگونه که از نمودار شکل (۱۰) مشخص است، در میزان خروج از مرکزیت‌های مختلف تاثیر پنجمین لایه مسلح کننده متغیر

دانست. هر چه خروج از مرکزیت بیشتر می‌شود عمق گوه گسیختگی سطحی‌تر شده و به سطح زمین نزدیکتر می‌شود و به تدریج حضور لایه‌های ژئوگرید در افزایش ظرفیت باربری کاهش می‌یابد. برای مثال دو گوه گسیختگی شکل گرفته در دو خروج از مرکزیت کم ($e/B=1/12$) و زیاد ($e/B=1/4$) در شکل (۹) را در نظر بگیرید. در خروج از مرکزیت کم گوه گسیختگی از تمامی لایه‌های ژئوگرید عبور کرده است اما در خروج از مرکزیت بالا، گوه گسیختگی فقط از بالاترین ژئوگرید عبور کرده است. بنابراین تاثیر حضور لایه ژئوگرید در خروج از مرکزیت‌های بالا به دلیل عمق کم گوه گسیختگی، کم‌رنگ تر شده است.

۱-۴-۵ تاثیر ۵ لایه ژئوگرید ($N=5$) بر ظرفیت باربری پی در فضای VM و تعیین موقعیت بهینه لایه پنجم (Z_5)

همانند حالت‌های قبل، آنالیزهای عددی به منظور تعیین عمق بهینه جایگذاری پنجمین لایه مسلح کننده از کف پی، با جایگذاری چهار لایه نخست در اعماق بهینه حاصل از مراحل قبل و قراردادن لایه پنجم در اعماق مختلف از کف پی انجام شده است و نتایج در قالب



شکل ۱۱. نمودار بدون بعد در فضای بارگذاری VM جهت تعیین عمق بهینه جایگذاری ششمین لایه مسلح کننده از کف پی (Z₆)

Fig. 11. Dimensionless graph to determine the optimum depth for the sixth Geogrid layer from the foundation in VM condition (Z₆)

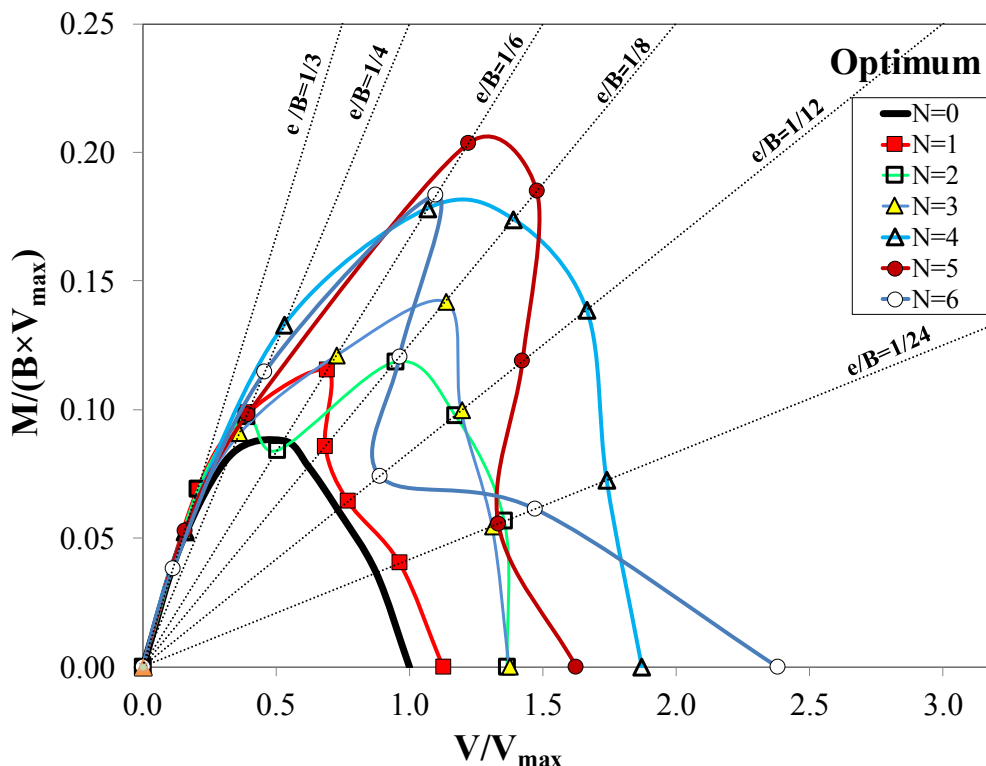
همانگونه که از نمودار شکل (۱۱) مشخص است، با جایگذاری ششمین لایه مسلح کننده در عمق ۱/۱ متری از کف پی در خروج از مرکزیت‌های برابر ۱/۶، ۱/۸ در مقایسه با سایر حالت‌های جایگذاری لایه ششم، ظرفیت باربری بیشتری در فضای بارگذاری VM حاصل شده است اما ظرفیت باربری قابل تحمل در مقایسه با حالت با پنج لایه مسلح کننده کاهش یافته است، زیرا در حالت با پنج لایه ژئوگرید با جایگذاری لایه پنجم در عمق ۱/۷ متری از کف پی در خروج از مرکزیت برابر $e/B=1/6$ مقدار بار قائم حداکثر قابل تحمل تقریباً برابر $V=1.4V_{max}$ بوده است اما با جایگذاری لایه ششم در عمق ۱/۱ متری از کف پی در همین مقدار خروج از مرکزیت بار قائم حداکثر قابل تحمل برابر $V=1.2V_{max}$ شده است. لذا با توجه به اینکه مقدار لنگر قابل تحمل از حاصلضرب خروج از مرکزیت در مقدار بار قائم به دست می‌آید، می‌توان به این نتیجه رسید در خروج از مرکزیت $e/B=1/6$ حداکثر لنگر قابل تحمل حالت بهینه شش لایه، نسبت به پنج لایه ژئوگرید کاهش یافته است. پس از این رو می‌توان نتیجه گرفت که افزایش لایه‌های مسلح کننده تا ۵ لایه باعث افزایش باربری پی می‌شود.

می‌باشد. به طور مثال در میزان خروج از مرکزیت‌های کم با جایگذاری لایه پنجم در عمق ۱/۳ متری از کف پی، بیشترین افزایش در ظرفیت باربری در فضای بارگذاری VM مشاهده شده است در حالی که با افزایش میزان خروج از مرکزیت، با جایگذاری لایه پنجم در فاصله بیشتری از کف پی و در عمق ۱/۷ متری از سطح زمین، میزان افزایش ظرفیت باربری بیشتری حاصل می‌گردد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت تعیین عمق بهینه جایگذاری لایه‌های مسلح کننده در فضای بارگذاری VM با توجه به میزان خروج از مرکزیت و یا به عبارت دیگر میزان لنگر وارده به پی تغییر نماید.

۶-۱-۴- تاثیر ۶ لایه ژئوگرید (N=6) بر ظرفیت باربری پی در فضای

VM و تعیین موقعیت بهینه لایه ششم (Z₆)

به منظور تعیین عمق بهینه جایگذاری ششمین لایه مسلح کننده در فضای بارگذاری VM، لایه‌های اول تا پنجم در عمق بهینه حاصل از آنالیزهای مراحل قبل قرار گرفته و لایه ششم در فواصل مختلف از کف پی قرار داده شده و آنالیزهای عددی صورت گرفته و نتایج آن در قالب نمودار شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۲. نمودار کلی از تعداد لایه‌های ژئوگرید در عمق قرار گیری بهینه هر لایه در فضای VM

Fig. 12. Dimensionless diagram for the optimum arrangement of geogrid layers in VM loading condition

کوچک از بار قائم اعمالی $1.2V_{max} < V < 1.4V_{max}$ ، و در خروج از مرکزیت‌های برابر $e/B=1/8, 1/6$ ، نسبت به حالت چهار لایه باعث افزایش ظرفیت باربری در فضای VM شده است. با صرف نظر کردن از این مقدار اندک اختلاف افزایش در ظرفیت باربری، بین حالت چهار لایه و پنج لایه مسلح‌کننده، تعداد بهینه لایه‌های مسلح‌کننده در فضای بارگذاری VM برابر چهار لایه انتخاب گردیده است.

ترتیب وضعیت نهایی چیدمان لایه‌های مسلح‌کننده در فضای بارگذاری VM به صورت شکل ۱۱ می‌باشد. با توجه به شکل (۱۳) مشاهده می‌شود که عمق نخستین لایه مسلح‌کننده از کف پی در حالت چهار لایه مسلح‌کننده برابر $0/3$ متر می‌باشد در حالیکه این مقدار برای یک لایه و دو لایه در حالت بهینه برابر $0/5$ متر شده است. این تفاوت به خاطر روش جدید بهینه سازی چیدمان لایه‌های ژئوگرید در مطالعه حاضر می‌باشد.

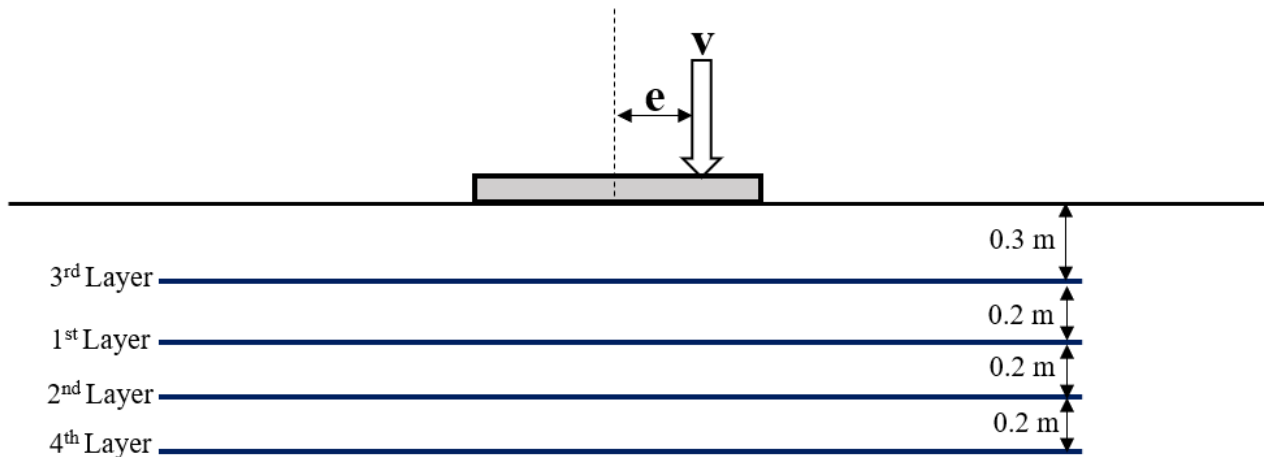
۵- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر به بررسی اثر ژئوگرید بر ظرفیت باربری پی نواری واقع بر خاک ماسه‌ای تحت بار قائم با خروج از مرکزیت (VM) با

۷-۴- مقایسه مقادیر بهینه تعداد لایه‌ها و انتخاب چیدمان بهینه کلی

برای نمایش بهتر از نحوه تغییر ظرفیت باربری پی نواری با افزایش لایه‌های ژئوگرید، مقادیر بهینه‌ترین حالت‌های بالا به صورت کلی در نمودار شکل (۱۲) نمایش داده شده است. همانگونه که از این شکل مشخص است افزودن لایه‌های مسلح‌کننده باعث بزرگتر شدن پوش گسیختگی و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری در فضای بارگذاری VM شده است. همچنین به وضوح مشخص است افزودن لایه‌های مسلح‌کننده تا پنج لایه باعث افزایش ظرفیت باربری در این فضا شده است اما با افزایش تعداد لایه‌ها به شش مسلح‌کننده این روند متوقف شده و ظرفیت باربری کاهش یافته است. بسته به میزان خروج از مرکزیت، چیدمان بهینه لایه‌های مسلح‌کننده می‌تواند تغییر کند. تعداد بهینه لایه‌های مسلح‌کننده در خروج از مرکزیت‌های بیشتر از $e/B=1/12$ برابر پنج لایه می‌باشد. این در حالی است که در خروج از مرکزیت‌های برابر $e/B=1/24, 1/12$ تعداد بهینه لایه‌های مسلح‌کننده برابر چهار لایه می‌باشد.

با توجه به شکل، در حالت با پنج لایه مسلح‌کننده در یک بازه



شکل ۱۳. چیدمان بهینه لایه های مسلح کننده در فضای بارگذاری VM
 Fig. 13. Optimum layout of reinforcement layers in the VM loading condition

نسبت $e/B=1/24$ تا مقدار $e/B=1/6$ ، اثر مثبت لایه های مسلح کننده ژئوگرید در افزایش لنگر قابل تحمل پی بیشتر می شود. اما پس از آن با افزایش برون محوری در خروج از مرکزیت های بزرگتر از $e/B=1/4$ این روند متوقف می گردد. در خروج از مرکزیت کم گوه گسیختگی از تمامی لایه های ژئوگرید نموده اما در خروج از مرکزیت بالا، گوه گسیختگی فقط از بالاترین لایه ژئوگرید عبور می کند. بنابراین تاثیر حضور لایه ژئوگرید در خروج از مرکزیت های بالا به دلیل سطحی تر شدن گوه گسیختگی، کمرنگ تر می باشد.

۵- تعداد بهینه لایه های مسلح کننده برای حصول بیشترین ظرفیت در حالت بار خارج از مرکز در مطالعه حاضر برابر ۴ لایه می باشد که به ترتیب لایه های اول، دوم، سوم و چهارم ژئوگرید در فواصل بهینه ۰/۵، ۰/۷، ۰/۳ و ۰/۹ متری از کف پی قرار می گیرند.

بر اساس نتایج مطالعه حاضر مشخص گردید که افزودن لایه های ژئوگرید به خاک، باعث افزایش توان باربری خاک در برابر بارهای خارج از مرکز به میزان قابل توجهی می گردد. به منظور حصول بیشترین ظرفیت باربری بهتر است از چیدمان بهینه در طراحی ها استفاده گردد. همچنین باید این مهم را مد نظر قرار داد که با توجه به اینکه این بررسی صرفاً برای یک مسئله خاص با هندسه و مشخصات ژئوتکنیکی خاص انجام پذیرفته است، بنابراین نتایج نیز ممکن است به این شرایط خاص وابسته باشد، ولیکن روند بهینه سازی چیدمان، مشابه روشی است که در این تحقیق ارائه شده است.

استفاده از نرم افزار اجزاء محدود PLAXIS 2D پرداخته شده است. بدین صورت که پس از صحت سنجی نتایج مدل عددی در فضای VM، تاثیر پارامترهایی نظیر میزان خروج از مرکزیت بار قائم، مقدار بار قائم اعمال شده، تعداد و چیدمان لایه های مسلح کننده بر ظرفیت باربری نهایی پی نواری مطالعه شد. نتایج حاصل از آنالیزها در قالب نمودارهای بدون بعد ترسیم و بر اساس آن عمق بهینه قرارگیری نخستین لایه ژئوگرید از کف پی، فواصل قائم لایه های مسلح کننده از هم و تعداد و چیدمان بهینه لایه های مسلح کننده ژئوگرید تعیین گردید. از جمله مهمترین نتایج حاصله در مطالعه حاضر می توان موارد زیر را برشمرد:

۱- نتایج تحلیل های عددی موید این مسئله است که با افزودن لایه های ژئوگرید، ظرفیت باربری پی تحت بار خارج از مرکز افزایش قابل توجهی می یابد. میزان این اثرگذاری، تابع چیدمان لایه ها و میزان خروج از مرکزیت بار می باشد.

۲- در حالت چیدمان بهینه، موقعیت لایه های ژئوگرید بستگی به تعداد لایه ها داشته و ترتیب ثابتی برای آن ها در عمق وجود ندارد.

۳- عمق بهینه اولین لایه مسلح کننده از کف پی (u) با تعداد لایه های مختلف تغییر می کند، بطوریکه در مطالعه حاضر با یک لایه ژئوگرید این عمق برابر ۰/۵ متر می باشد اما در حالت چهار لایه ای، عمق اولین لایه از کف پی به ۰/۳ متری می رسد.

۴- در فضای بارگذاری VM، با افزایش میزان خروج از مرکزیت از

- Engineering, 2(3), 2008, 179-197.
- [2] Sadoglu, E., Cure, E., Moroglu, B., and Uzuner, B. A. Ultimate loads for eccentrically loaded model shallow strip footing on geotextile-reinforced sand. *Geotextiles and Geomembrances*, 27(3), 2009, 176-182.
- [3] El Sawwaf, M. Experimental and numerical study of eccentrically loaded strip footing resting on reinforced sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(10), 2009, 1509-1518.
- [4] Ornek, M. Estimation of ultimate loads of eccentric-inclined loaded strip footing rested on sandy soils. *Neural Comput and Applic*, 25(1), 2013, 39-54.
- [5] Badakhshan, E., and Noorzad, A. Load eccentricity effects on behavior of circular footing reinforced with geogrid sheets. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(6), 2015, 691-699.
- [6] Sahu, R., Patra, C. R., and Sethy, B. P. Experimental and Numerical studies of eccentrically loaded strip footing by using plaxis. *Indian Geotechnical Conference*, 2017, 14-16.
- [7] Badakhshan, E., and Noorzad, A. A simplified method for prediction of ultimate bearing capacity of eccentric loaded foundation on geogrid reinforced sand. *Int. J. of Geosynth. And ground Eng.*, 3(14), 2017.
- [8] Loukidis, D., Chakraborty, T., and Salgado, R. Bearing capacity of strip footing on purely frictional soil under eccentric and inclined loads. *Can. Geotech. J.*, 45(6), 2008, 768-787.
- [9] Khing, K. H., Das, B. M., Puria, V. K., Cooka, E. E., and Yena, S. C. The bearing capacity of strip foundation on geogrid reinforced sand. *Geotextiles and Geomembrances*, 12(4), 1993, 351-361.
- [10] Gottardi, G., and Butterfield, R. On the bearing capacity of surface footing on sand under general planar loads. *Soils and Foundations*, 33(3), 1993, 68-79.

B	عرض پی نواری، m
E_s	مدول الاستیسیته خاک، kN/m^2
e	میزان خروج از مرکزیت نیرو، m
EA	سختی الاستیک ژئوگرید، kN/m
h	فاصله قائم ژئوگریدها از یکدیگر، m
L	طول ژئوگرید، m
M	لنگر خمشی، kN.m
N	تعداد لایه‌های ژئوگرید
R_{int}	ضریب اینترفیس
u	فاصله اولین لایه ژئوگرید از کف پی، m
V	نیروی قائم، kN
V_{max}	حداکثر نیروی قائم منجر به گسیختگی، kN
Z_1	فاصله ژئوگرید اول از کف پی، m
Z_2	فاصله ژئوگرید دوم از کف پی، m
Z_3	فاصله ژئوگرید سوم از کف پی، m
Z_4	فاصله ژئوگرید چهارم از کف پی، m
Z_5	فاصله ژئوگرید پنجم از کف پی، m
Z_6	فاصله ژئوگرید ششم از کف پی، m
φ	زاویه اصطکاک داخلی خاک، °
c	چسبندگی خاک، kPa
μ	ضریب پواسون
γ	وزن مخصوص خاک، kN/m^3
ψ	زاویه اتساع، °
E_c	مدول الاستیسیته بتن، N/m^2
E	مدول الاستیسیته، N/m^2

منابع و مراجع

- [1] Saran, S., Kumar, S., Garg, K., and Kumar, A. Model tests on eccentrically and obliquely loaded footing resting on reinforced sand. *International Journal of Geotechnical*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Rabeti Moghadam, J. Monfared, M. Parvizi, Numerical Analysis of Geogrid Reinforcement on the Ultimate Bearing Capacity of Strip Footing Under Eccentric Loads and Determination of Optimum Layout, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(12) (2021) 3109-3124.

DOI: 10.22060/ceej.2019.16233.6162

