

# ارزیابی رفتار باربری پی های نواری بر روی خاک لایه‌ی مسلح با ژئوگرید

سید مجدالدین میرمحمدحسینی\* (استاد)

محمد مهدی صالحی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۴ (۱۳۹۴)  
دوری ۲ - ۳۱، شماره ۴/۱، ص. ۸۳-۸۸، (پادداشت فنی)

در شرایطی که خاک زیر پی ضعیف باشد و تحمل بارهای وارده را نداشته باشد، بهسازی خاک با جایگزینی خاک مناسب، راهی منطقی و مناسب است. استفاده از مسلح‌کننده‌های ژئوگرید با توجه به مکانیزم اندرکنش با خاک، امکان دستیابی به ظرفیت باربری بیشتر و یا کاهش ضخامت لایه‌ی متراکم را ممکن می‌سازد. در این نوشتار، ضمن بررسی اثر لایه‌ی جایگزین شده‌ی خاک دانه‌ی سست با خاک دانه‌ی متراکم در ظرفیت باربری و نشست نهایی شالوده‌ی نواری به بررسی و تحلیل اثر وجود مسلح‌کننده‌ی ژئوگرید در مرز دو لایه‌ی مذکور در محیط نرم افزار تفاضل محدود FLAC ۲D پرداخته شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهند که افزایش عمق لایه‌ی خاک متراکم بیشتر از ۲/۵ برابر عرض پی، تأثیری در افزایش ظرفیت باربری نهایی پی نواری نخواهد داشت و بهینه‌ترین بهسازی برای خاک سست با شیوه‌ی جایگزینی لایه‌ی خاک متراکم، استفاده از مسلح‌کننده‌ی ژئوگرید با عرض کافی در مرز دو لایه و عمق بهسازی حدود ۰/۷۵ عرض پی است. همچنین اثر مسلح‌سازی خاک لایه‌ی با افزایش عمق بهسازی کاهش می‌یابد. استفاده از لایه‌ی مسلح‌کننده با عرض کمتر از ۵ برابر عرض پی نیز پیشنهاد نمی‌شود.

واژگان کلیدی: ظرفیت باربری، پی نواری، بهسازی، خاک مسلح، ژئوگرید.

mirh53@yahoo.com  
mm.salehi@aut.ac.ir

## ۱. مقدمه

واقع بر خاک نرم اصلاح شده با لایه‌ی ماسه و یک لایه‌ی ژئوتکستایل<sup>۳</sup> در مرز دو لایه، افزایش ظرفیت باربری تا عمق بهینه‌ی ۰/۸ برابر عرض پی نشان داده شده است. همچنین در پژوهش دیگری (۲۰۰۸) با بررسی رفتار بستر ماسه‌ی مسلح شده به ژئوگرید قرارگرفته روی خاک نرم و ضعیف به این نتیجه رسیده‌اند که وجود بستر ماسه‌ی مسلح به کاهش اساسی نشست خاک زیرین منجر خواهد شد. در میان مطالعات انجام‌شده، در پژوهش‌های اندکی به بررسی جایگزینی لایه‌ی خاک دانه‌ی سست با خاک دانه‌ی متراکم مسلح به ژئوگرید پرداخته شده است. برای مثال، در پژوهشی در سال ۲۰۰۷، ضمن بررسی موضوع ذکرشده، افزایش ظرفیت باربری پی نواری به میزان ۳ تا ۴ برابر در شرایط جایگزینی خاک ضعیف با خاک خوب دانه‌بندی شده به ضخامت ۰/۸ عرض پی و مسلح به ۲ تا ۴ لایه‌ی ژئوگرید نتیجه گرفته شده است.<sup>[۱۷]</sup>

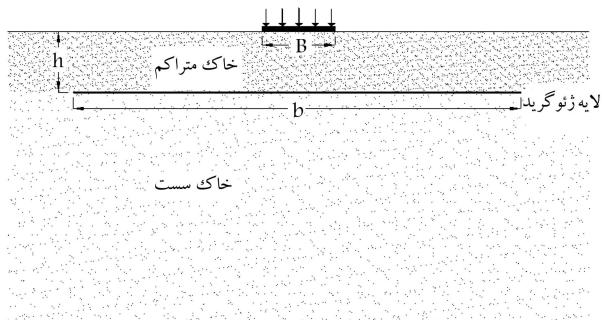
در این پژوهش، با استفاده از مدل‌سازی عددی پی نواری و خاک زیر آن به بررسی جایگزینی لایه‌ی بالایی خاک دانه‌ی سست با خاک متراکم پرداخته شده است. لذا، ابتدا تأثیر لایه‌ی متراکم بدون مسلح‌کننده با ضخامت‌های مختلف بررسی و ضخامت بهینه معرفی شده است. سپس با استفاده از یک لایه‌ی مسلح‌کننده‌ی ژئوگرید در مرز دو لایه‌ی ضعیف و متراکم، ظرفیت باربری و نشست در عمق‌های مختلف قرارگیری ژئوگرید مورد بررسی قرار گرفته است.

در شرایطی که خاک زیر پی، مقاومت کافی برای تحمل بارهای وارده را نداشته باشد، می‌توان از روش جایگزین کردن خاک مناسب و متراکم به جای خاک ضعیف استفاده کرد. در برخی موارد ضخامت خاک جایگزین شده، پاسخ‌گوی ظرفیت باربری موردنیاز نیست و یا علاوه بر این، محدودیت‌های هندسی و اقتصادی وجود خواهد داشت. در این شرایط استفاده از مسلح‌کننده‌هایی با قابلیت تحمل کشش به منظور تسلیح و افزایش ظرفیت باربری خاک، راهکاری مناسب خواهد بود.

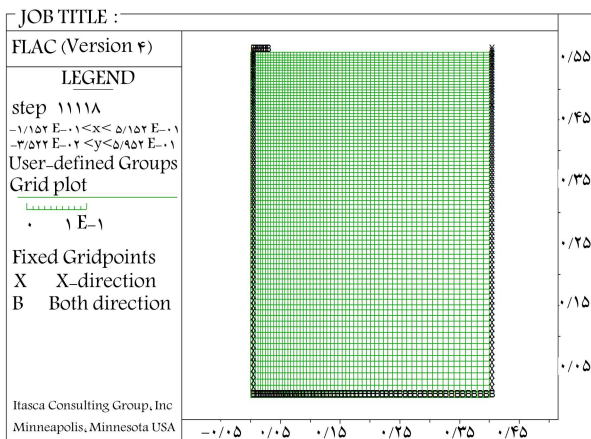
استفاده از مصالح پلیمری مانند ژئوگرید<sup>۱</sup> به منظور افزایش ظرفیت باربری خاک در چند دهه‌ی اخیر مورد توجه مهندسان و پژوهشگران قرار گرفته است. از اوایل دهه‌ی ۱۹۸۰ میلادی، پژوهشگران بسیاری با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و عددی به ارزیابی ظرفیت باربری نهایی و همچنین نشست پی‌های سطحی، که خاک زیر آن توسط لایه‌های ژئوگرید یا هر نوع دیگر از ژئوسینتتیک‌ها<sup>۲</sup> با عملکرد مسلح‌سازی مسلح شده است، پرداخته‌اند.<sup>[۱۱-۱۳]</sup> مطالعات انجام شده روی تأثیر تسلیح خاک سست و نرم در ظرفیت باربری و نشست، نیز موفقیت ژئوسینتتیک‌ها را نشان می‌دهند.<sup>[۱۴-۱۶]</sup> در پژوهشی در سال ۱۹۹۹، با استفاده از مدل عددی پی نواری

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۵/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۲/۱۱/۲۳، پذیرش ۱۳۹۲/۱۲/۲۰



شکل ۱. پارامترهای هندسی مدل عددی.



شکل ۲. مدل عددی محیط خاک.

جدول ۱. پارامترهای مدل رفتاری خاک.

$K$	$n$	$R_f$	
۷۵۷,۲۸	۰,۴۶۳۴	۰,۸۹۲۷	خاک دانه‌بی متراکم
۲۳۹,۶۲	۰,۶۶۶۶	۰,۸۵۴۹	خاک دانه‌بی سست

خاک در حالت متراکم و سست با چگالی خشک به ترتیب  $۱/۶۱ \text{ gr/cm}^3$  و  $۱/۵۲ \text{ gr/cm}^3$  و با تغییرات زاویه‌ی اصطکاک داخلی معادل روابط ۴ و ۵ در مدل عددی اعمال شده است:

$$\phi = 43.67 - 0.184\sigma_r \quad (4)$$

$$\phi = 40.68 - 0.328\sigma_r \quad (5)$$

که در آن‌ها، واحد تنش همه‌جانبه کیلوپاسکال است.

مدل‌سازی عددی المان ژئوگرید با توجه به اندرکنش آن با خاک به دو صورت اصطکاک بین خاک و مسلح‌کننده و مقاومت اتکایی خاک در جلو نوارهای عرضی ژئوگرید به صورت المان کابل انجام شده است. المان کابل با رفتاری محوری و اندرکنش با محیط اطراف به صورت مقاومت برشی در طول المان، ژئوگرید را به خوبی مدل‌سازی خواهد کرد. مشخصات مدل عددی المان ژئوگرید در جدول ۲ ارائه داده شده است.

این تذکر لازم است که تمام مشخصات ذکرشده با توجه به مشخصات خاک و ژئوگرید مدل آزمایشگاهی موجود،<sup>[۱۸]</sup> انتخاب و محاسبه شده است. صحت‌سنجی مدل عددی با استفاده از خاک یک لایه‌بی متراکم در دو حالت غیرمسلح و مسلح و همچنین مقایسه با نتایج مدل آزمایشگاهی موجود تحت

## ۲. شرایط تحلیل عددی و مدل المان محدود

به منظور بررسی ظرفیت باربری و نشست خاک دانه‌بی و مسلح به ژئوگرید، با توجه به نواری بودن پی و شرایط کرنش مسطح از مدل دو بُعدی در نرم‌افزار تقاضل محدود FLAC استفاده شده است. مدل عددی با مقیاس و مشخصات مدل آزمایشگاهی موجود ساخته شده است، تا امکان صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی عددی نیز میسر باشد. مدل مذکور یک محفظه‌ی خاک از جنس Plaxi Glass با ابعاد داخلی: طول ۸۰ سانتی‌متر، عرض ۳۴/۲ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۵ سانتی‌متر، و شالوده‌ی نواری نیز از آلیاژ آلومینیوم و به منظور تأمین شرایط کرنش مسطح، به ابعاد: عرض ۵ سانتی‌متر، طول ۳۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۷/۵ سانتی‌متر بوده است. در مدل آزمایشگاهی موجود، ماسه‌ی فیروزکوه با دانه‌بندی یکنواخت ( $D_{10} = 0.75 \text{ mm}$ ) و وزن مخصوص خشک کمیته و بیشینه‌ی  $۱/۴۲ \text{ kN/m}^3$  و  $۱/۶۹ \text{ kN/m}^3$  به روش بارش در هوا با ارتفاع نهایی ۵۶ سانتی‌متر استفاده شده است. المان ژئوگرید در این مدل با توجه به مقاومت کششی پایین و چشمه‌های مناسب با دانه‌بندی مصالح دانه‌بی انتخاب شده است.<sup>[۱۸]</sup>

هندسه‌ی مدل عددی همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، شامل یک پی نواری به عرض B واقع بر لایه‌ی خاک متراکم جایگزین شده با خاک سست به ضخامت h و یک لایه‌ی ژئوگرید به عرض b در مرز خاک سست و متراکم بوده است.

با توجه به تقارن موجود در هندسه‌ی مدل، فقط نیمی از محیط خاک و شالوده‌ی نواری مدل‌سازی شده است. ابعاد مدل عددی خاک، ۴۰ سانتی‌متر عرض و ۵۶ سانتی‌متر ارتفاع بوده و عرض شالوده‌ی نواری نیز ۵ سانتی‌متر انتخاب شده است، که نصف آن مدل‌سازی شده است. شکل ۲، مدل عددی محیط خاک را نشان می‌دهد. مرزهای قائم مدل، حرکت قائم آزاد و حرکت افقی محدود و بسته‌شده دارد. برای مرزکف نیز جابجایی در هر دو جهت قائم و افقی بسته شده است. المان‌بندی خاک همان‌طور که ملاحظه می‌شود، از ریزترین المان زیر شالوده (۴ میلی‌متر) تا درشت‌ترین المان در کناره‌ی سمت راست پایین مدل (۱ سانتی‌متر) بوده است. شالوده‌ی نواری نیز با استفاده از روش مقیدکردن گره‌ها در هر دو جهت قائم و افقی همانند یک پی صلب و کف زیر مدل‌سازی شده است.

مدل رفتاری خاک با توجه به نوع خاک و بارگذاری، هایپرولیک دانکن با پوش گسیختگی موهر - کولمب انتخاب شده است (رابطه‌ی ۱):

$$E = [1 - R_f S_I]^2 K P_a \left( \frac{\sigma_r}{P_a} \right)^n \quad (1)$$

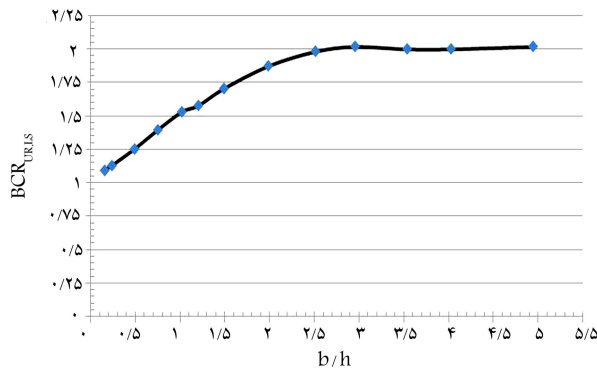
که در آن،  $P_a$  فشار اتمسفر و  $S_I$  معرف سطح تنش است. همچنین  $S_I$  از رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:

$$S_I = \frac{\sigma_1 - \sigma_r}{(\sigma_1 - \sigma_r)_f} \quad (2)$$

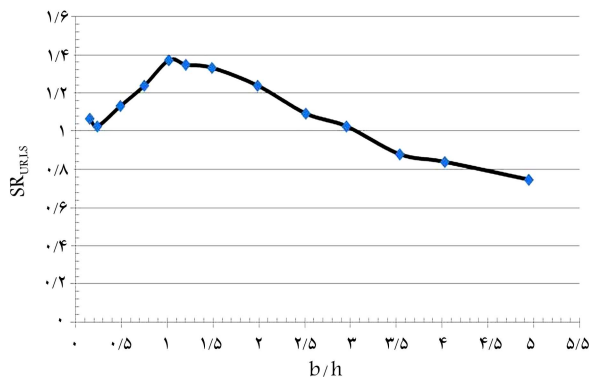
که در آن، عبارت مخرج تفاوت تنش در لحظه‌ی گسیختگی است، که براساس معیار گسیختگی موهر - کولمب از طریق رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$(\sigma_1 - \sigma_r)_f = \sigma_r \left( \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} - 1 \right) - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}} \quad (3)$$

مقادیر پارامترهای  $K$ ،  $n$ ،  $R_f$  و  $\phi$  براساس نتایج آزمایش‌های سه‌محوری انجام‌شده روی مصالح دانه‌بی مورد استفاده در مدل آزمایشگاهی موجود در دو حالت متراکم و سست محاسبه و در جدول ۱ بیان شده است.



شکل ۴. تغییرات نسبت ظرفیت باربری نهایی خاک لایه‌بی غیرمسلح (BCR<sub>UR.L.S.</sub>) در مقابل نسبت عمق لایه‌ی بهسازی شده به عرض پی (h/B).



شکل ۵. تغییرات نسبت نشست نهایی خاک لایه‌بی غیرمسلح (SR<sub>UR.L.S.</sub>) در مقابل نسبت عمق لایه‌ی بهسازی شده به عرض پی (h/B).

بعد نسبت ظرفیت باربری نهایی (BCR) و نسبت نشست نهایی (SR) مطابق با روابط ۶ و ۷ استفاده شده است:

$$BCR_{UR.L.S.} = \frac{q_{u,unreinforced\ layered\ soil}}{q_{u,loose\ sand}} \quad (6)$$

$$SR_{UR.L.S.} = \frac{S_{u,unreinforced\ layered\ soil}}{S_{u,loose\ sand}} \quad (7)$$

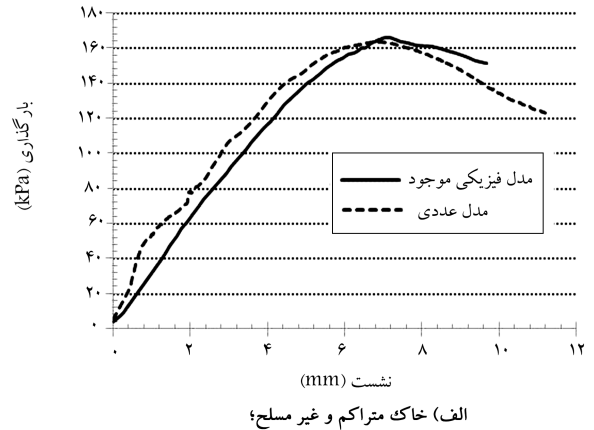
در روابط ذکرشده، اندیس UR.L.S.<sup>۷</sup> به معنای خاک لایه‌بی غیرمسلح است. شکل ۴، تغییرات BCR<sub>UR.L.S.</sub> در مقابل افزایش نسبت عمق لایه‌ی بهسازی شده به عرض پی نواری (h/B) را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش عمق لایه‌ی بهسازی شده، ظرفیت باربری خاک نیز افزایش یافته است و پس از h/B معادل ۲/۵، افزایش ظرفیت باربری مشاهده نمی‌شود. افزایش ضخامت لایه‌ی بهسازی شده از این حد به بعد، فقط منجر به کاهش نشست نهایی خاک خواهد شد.

تغییرات نسبت نشست نهایی خاک لایه‌بی غیرمسلح (SR<sub>UR.L.S.</sub>) در شکل ۵ بیان شده است. روند کلی نمودار به این صورت است که با افزایش h/B، ابتدا افزایش نشست و پس از عمق بهسازی معین (h/B = ۱/۵)، کاهش نشست را خواهیم داشت. با افزایش اندک لایه‌ی متراکم، سختی خاک لایه‌بی تغییر چندانی نخواهد کرد، و لذا با افزایش ظرفیت باربری، افزایش نشست را خواهیم داشت. ولی پس از عمق h/B = ۱/۵، به تدریج افزایش سختی خاک زیر شالوده محسوس است و کاهش نشست را خواهیم داشت.

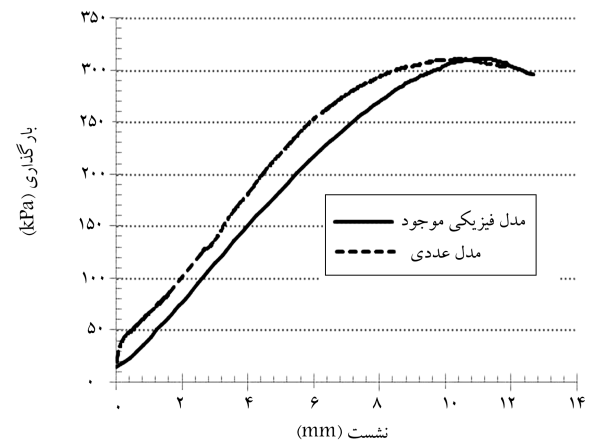
برای بررسی اثر مسلح کردن خاک لایه‌بی مشابه تحلیل‌های قبل ضخامت خاک

جدول ۲. مشخصات مدل عددی ژئوگرید.

$S_{bond}$ (N/m)	$K_{bond}$ (N/m <sup>2</sup> )	$S_{friction}$	ضریب ارتجاعی (N/m <sup>2</sup> )	مقاومت کششی گسیختگی (N/m)
۰	۱۰ <sup>۹</sup>	۳۰	۳۶۳۶۳	۲۱۶۰



الف) خاک متراکم و غیر مسلح؛



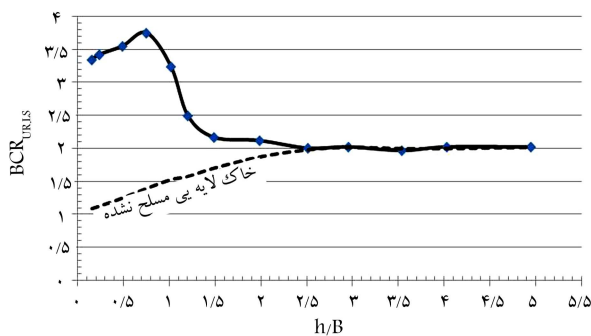
ب) خاک متراکم مسلح به یک لایه‌ی ژئوگرید با شرایط یکسان.

شکل ۳. مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی عددی با مدل‌سازی فیزیکی موجود.

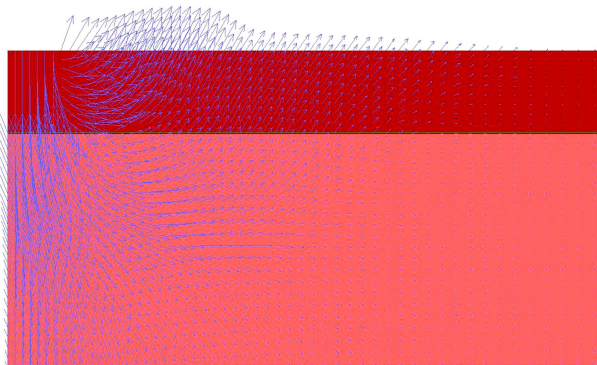
شرایط یکسان انجام شده است. شکل ۳، تغییرات تنش زیر پی در مقابل نشست را در دو حالت مسلح و غیرمسلح نشان می‌دهد. سازگاری خوب نمودار ظرفیت باربری مدل عددی با مدل فیزیکی موجود، نشان‌دهنده‌ی صحت مدل عددی است.

### ۳. نتایج تحلیل عددی و آنالیز پارامتری

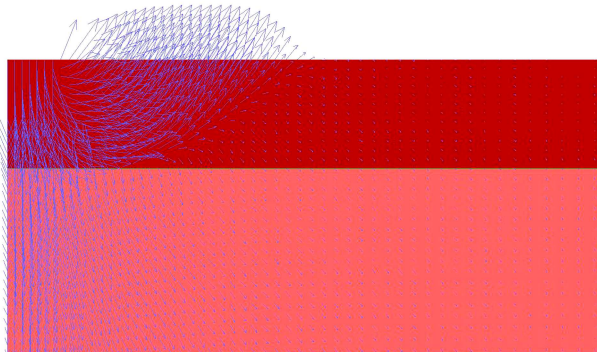
به منظور بررسی تأثیر لایه‌ی خاک متراکم جایگزین در ظرفیت باربری، ابتدا خاک سست بدون هیچ‌گونه بهسازی، مدل‌سازی و ظرفیت باربری نهایی آن معادل ۵۵ kPa با نشست نهایی حدود ۷/۵ mm به دست آمده است. سپس با جایگزینی لایه‌بی از خاک سست با عمق مشخص (۱۶ B تا ۵ B) با خاک متراکم، ظرفیت باربری نهایی ( $q_u$ ) و نشست نهایی (نشست متناظر با ظرفیت باربری نهایی) ( $S_u$ ) محاسبه شده است. به منظور بررسی بهتر تحلیل‌های انجام شده، از پارامترهای بدون



شکل ۶. تغییرات نسبت ظرفیت باربری نهایی خاک لایه‌ی مسلح (BCR<sub>R.L.S.</sub>) با  $b/B = 15$  در مقابل نسبت عمق لایه‌ی بهسازی شده به عرض پی (h/B).

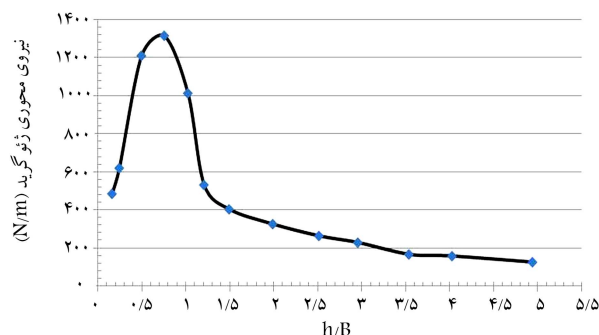


الف)  $h/B=0.75$



ب)  $h/B=1$

شکل ۷. بردار جابجایی ذرات خاک زیر پی خاک مسلح لایه‌ی بی (b/B = 15) با عمق بهسازی.



شکل ۸. تغییرات نیروی محوری ژئوگرید در مقابل عمق قرارگیری آن در خاک لایه‌ی مسلح (برای  $b/B = 15$ ).

متراکم را از  $B/16$  تا  $B/5$  انتخاب و یک لایه‌ی ژئوگرید در مرز دو لایه قرار داده‌ام. عرض ژئوگرید (b) معادل 15 برابر عرض شالوده (B) مدل شده است، تا از ایجاد بیشینه‌ی درگیری خاک و ژئوگرید اطمینان حاصل شود. برای بررسی نتایج از این پارامترهای بدون بُعد استفاده شده است (روابط ۸ و ۹):

$$BCR_{R.L.S.} = \frac{q_{u, reinforced layered soil}}{q_{u, loose sand}} \quad (8)$$

$$SR_{R.L.S.} = \frac{S_{u, reinforced layered soil}}{S_{u, loose sand}} \quad (9)$$

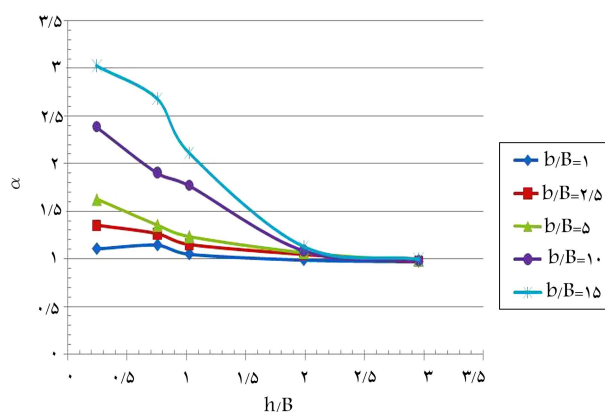
که در آن‌ها، اندیس R.L.S.<sup>۸</sup> به معنای خاک لایه‌ی مسلح است. نمودار تغییرات نسبت ظرفیت باربری نهایی خاک لایه‌ی مسلح (BCR<sub>R.L.S.</sub>) در مقابل افزایش عمق بهسازی (لایه‌ی متراکم به همراه ژئوگرید) در شکل ۶ ترسیم شده است. ملاحظه می‌شود که مشابه حالت غیرمسلح، پس از  $h/B = 2/5$ ، مقدار ظرفیت باربری ثابت باقی مانده است. علت کم‌تر بودن ظرفیت باربری در  $h/B < 0.75$ ، وجود سربار کم روی ژئوگرید است، که منجر به بیرون کشیدگی المان ژئوگرید درون خاک و بسیج‌نشدن کامل ظرفیت ژئوگرید شده است. پس از  $h/B = 0.75$ ، اندرکنش خاک و مسلح‌کننده متفاوت شده و به تدریج گوه‌ی گسیختگی بالای مسلح‌کننده تشکیل و لایه‌ی مسلح‌کننده همانند یک مرز صلب به افزایش ظرفیت باربری کمک کرده است (شکل ۷).

نمودار تغییرات نیروی محوری ژئوگرید در مقابل h/B (شکل ۸)، روندی مشابه نمودار نسبت ظرفیت باربری نهایی دارد و مشاهده می‌شود که در  $h/B = 0.75$ ، بیشترین نیروی محوری درون المان ژئوگرید بسیج شده است. این مطلب نشان‌دهنده‌ی درگیری مناسب المان ژئوگرید و خاک در عمق قرارگیری 0.75 برابر عرض پی به همراه خاک متراکم روی آن است. به منظور درک بهتر رفتار المان مسلح‌کننده در عمق بیشتر از  $B/16$  کانتورهای کرنش برشی خاک زیر شالوده در شکل ۹، برای چند حالت ترسیم شده است. ملاحظه می‌شود که برای  $h/B = 1/0$ ، المان ژئوگرید همانند مرز صلب از گسترش گوه‌ی گسیختگی جلوگیری کرده است. با فاصله‌گرفتن بیشتر این المان مسلح‌کننده از کف پی اثر مرز صلب کاهش یافته و پس از  $h/B = 2$ ، گوه‌ی گسیختگی به طور کامل در بالای ژئوگرید تشکیل می‌شود.

با وجود عدم تأثیر وجود المان مسلح‌کننده در عمق بیش از ۲ برابر عرض شالوده روی ظرفیت باربری با توجه به تشکیل گوه‌ی گسیختگی در بالای آن، اثر آن در سختی خاک مشهود است. نمودار تغییرات نسبت نشست نهایی خاک لایه‌ی مسلح (SR<sub>R.L.S.</sub>) در مقابل h/B، چنین افزایش سختی را به خوبی نشان می‌دهد (شکل ۱۰).

برای دیگر حالات عرض مسلح‌کننده ( $b/B = 1/0$  تا  $b/B = 15$ ) نیز تحلیل‌های مشابه انجام و نتایج آن به صورت نمودار نسبت ظرفیت باربری خاک لایه‌ی مسلح در مقابل h/B، برای عرض‌های متفاوت ژئوگرید ترسیم شده است (شکل ۱۱). به طور کلی ملاحظه می‌شود که با افزایش b/B، افزایش ظرفیت باربری را خواهیم داشت. ولی برای h/B بزرگ‌تر از ۲ تا 2/5، مقدار b/B تأثیری در ظرفیت باربری خاک نخواهد گذاشت. علت این موضوع مربوط به تشکیل گوه‌ی گسیختگی بالای لایه‌ی ژئوگرید در عمق بیش از 2/5 برابر عرض شالوده است.

با دقت در شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود که برای  $b/B < 5$ ، روند کلی نمودار مشابه حالت غیرمسلح است و با افزایش h/B، افزایش ظرفیت باربری را خواهیم داشت. همچنین مشاهده می‌شود که تمام نسبت‌های ظرفیت باربری در این حالت



شکل ۱۲. تغییرات نسبت ظرفیت باری نهایی خاک لایه‌یی مسلح به غیرمسلح ( $\alpha$ ) برای  $b/B$  های مختلف در مقابل  $h/B$ .

کمتر از ۲ یا به عبارتی، کمتر از مقدار نسبت ظرفیت باربری بیشینه در حالت غیرمسلح هستند. اثر اضافه‌شدن یک لایه‌ی مسلح‌کننده در مرز دو لایه‌ی خاک متراکم و سست با استفاده از پارامتر بدون بعد  $\alpha$  بیان می‌شود (رابطه‌ی ۱۰):

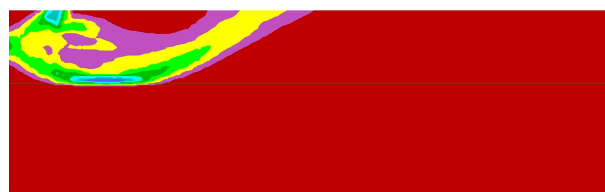
$$\alpha = \frac{q_{u, \text{reinforced layered soil}}}{q_{u, \text{unreinforced layered soil}}} \quad (10)$$

نمودار تغییرات پارامتر اثر مسلح‌سازی خاک لایه‌یی ( $\alpha$ ) در مقابل  $h/B$  برای حالات مختلف  $b/B$  در شکل ۱۲ ترسیم شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش  $h/B$ ، کاهش پارامتر اثر مسلح‌سازی را خواهیم داشت. به عبارت دیگر، با افزایش ضخامت لایه‌ی جایگزین اثر استفاده از یک لایه‌ی ژئوگرید در مرز دو لایه کاهش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش  $b/B$ ، اثر مسلح‌سازی نیز افزایش یافته است و به عبارت دیگر، در صورت تصمیم به استفاده از ژئوگرید در مرز دو لایه‌ی متراکم و سست با توجه به مقتضیات طرح، افزایش عرض ژئوگرید مناسب‌تر خواهد بود. البته این تذکر لازم است که برای حالت نسبت عمق بهسازی بیشتر از ۲ تا ۲٫۵، افزایش عرض مسلح‌کننده بدون اثر و غیراقتصادی خواهد بود.

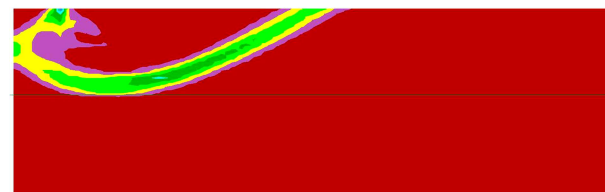
#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با توجه به تحلیل‌های انجام شده بر روی ظرفیت باربری و رفتار خاک لایه‌یی غیرمسلح و مسلح به یک لایه‌ی ژئوگرید در مرز دو لایه‌ی متراکم و سست، مجموعه‌یی از نکات علمی و کاربردی در جهت بهسازی خاک دانه‌یی سست زیر پی‌های نواری بدین شرح ارائه شده است:

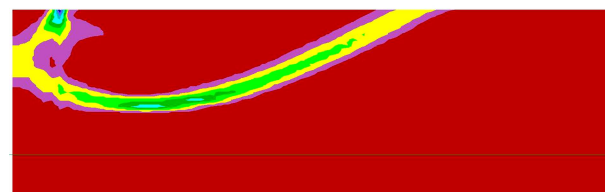
۱. بهسازی خاک سست با جایگزینی عمقی مشخص از خاک متراکم زیر پی، باعث افزایش ظرفیت باربری (تا ۲ برابر) خواهد شد.
۲. افزایش عمق لایه‌ی متراکم بیشتر از ۲٫۵ برابر عرض پی، تأثیری در افزایش ظرفیت باربری نهایی پی نواری نخواهد داشت و فقط منجر به کاهش نشست خواهد شد.
۳. استفاده از یک لایه‌ی مسلح‌کننده در مرز دو لایه‌ی متراکم و سست برای عمق بهسازی کمتر از ۲٫۵ برابر عرض شالوده، منجر به بهبود شرایط خاک و افزایش ظرفیت باربری نهایی پی نواری (بیش از ۳٫۵ برابر) خواهد شد.



الف)  $h/B=1$

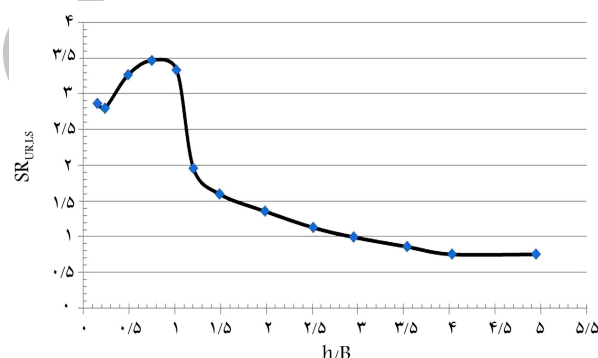


ب)  $h/B=1/2$

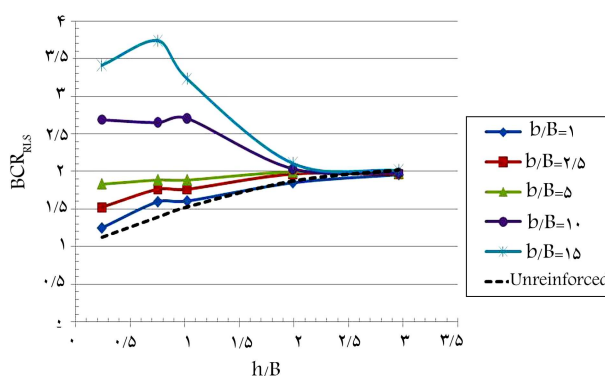


ج)  $h/B=2$

شکل ۹. کانتورهای کرنش برشی خاک لایه‌یی مسلح به ژئوگرید با  $b/B = 15$  و عمق قرارگیری.



شکل ۱۰. تغییرات نسبت نشست نهایی خاک لایه‌یی مسلح ( $SR_{R.L.S.}$ ) با  $b/B = 15$  در مقابل نسبت عمق لایه‌ی بهسازی شده به عرض پی ( $h/B$ ).



شکل ۱۱. تغییرات نسبت ظرفیت باربری نهایی خاک لایه‌یی مسلح ( $BCR_{R.L.S.}$ ) با  $b/B$  متفاوت در مقابل نسبت عمق لایه‌ی بهسازی شده به عرض پی ( $h/B$ ).

۷. استفاده از لایه‌ی مسلح‌کننده با عرض کمتر از ۵ برابر عرض پی پیشنهاد نمی‌شود، مگر در شرایطی که محدودیت ابعادی برای اجرای مسلح‌کننده داشته باشیم.
۸. در شرایطی که با توجه به محدودیت‌های ابعادی و اقتصادی ملزم به استفاده از مسلح‌کننده با عرض کمتر از ۵ برابر عرض پی باشیم و محدودیتی برای عمق لایه‌ی متراکم وجود نداشته باشد، بهسازی خاک سست با جایگزینی لایه‌ی متراکم با عمق بیش از ۲ برابر عرض شالوده‌ی بدون مسلح‌کننده، مناسب‌تر از بهسازی خاک با عمق‌های کمتر و استفاده از ژئوگرید در مرز دو لایه است.
۴. بهینه‌ترین بهسازی برای خاک سست با شیوه‌ی جایگزینی لایه‌ی خاک متراکم، استفاده از مسلح‌کننده‌ی ژئوگرید با عرضی معادل ۱۵ برابر عرض پی در مرز دو لایه و عمق بهسازی حدود ۰/۷۵ عرض پی است.
۵. اثر مسلح‌سازی خاک لایه‌یی، با افزایش عمق بهسازی کاهش می‌یابد.
۶. با افزایش عرض مسلح‌کننده، ظرفیت باربری افزایش پیدا خواهد کرد. لیکن در عمق بهسازی حدود ۲ تا ۲/۵ برابر عرض پی این اثر کاهش و نزدیک صفر است. به طوری که برای این عمق بهسازی، استفاده از مسلح‌کننده غیراقتصادی خواهد بود.

### پانوشت‌ها

1. Geogrid
2. Geosynthetics
3. Geotextile
4. modulus number
5. exponent number
6. failure ratio
7. unreinforced layered soil
8. reinforced layered soil

### منابع (References)

1. Akinmusuru, J.O. and Akinbolade, J.A. "Stability of loaded footings on reinforced soil", *J. Geot. Engnr. Div., ASCE*, **107**(6), pp. 819-827 (1981).
2. Guido, V.A., Biesiadecki, G.L. and Sullivan, M.J. "Bearing capacity of a geotextile reinforced foundation", *Proc. XI Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., San Francisco*, **3**, pp. 1777-1780 (1985).
3. Huang, C.C. and Tatsuoka, F. "Bearing capacity of reinforced horizontal sandy ground", *Geotextiles and Geomembranes*, **9**(1), pp. 51-82 (1990).
4. Khing, K.H., Das, B.M., Puri, V.K., Cook, E.E. and Yen, S.C. "The bearing capacity of a strip foundation on geogrid-reinforced sand", *Geotextiles & Geomembranes*, **12**(4), pp. 351-361 (1993).
5. Shin, E.C. and Das, B.M. "Bearing capacity of strip foundation on geogrid-reinforced sand", *Proc. of the 11th Asian Regional Conf. on Soil Mechanics and Geotech. Eng.*, pp. 189-192 (1999).
6. Dash, S.K., Kroshnaswamy, N.R. and Rajagopal, K. "Bearing capacity of strip footings supported on geocell-reinforced sand", *Geotextiles and Geomembranes*, **19**(4), pp. 235-256 (2001).
7. Boushehrian, J.H. and Hataf, N. "Experimental and numerical investigation of the bearing capacity of model circular and ring footings on reinforced sand", *Geotextiles and Geomembranes*, **21**(4), pp. 241-256 (2003).
8. Chen, Q. "An experimental study on characteristics and behavior of reinforced soil foundation", Ph.D. Thesis of Louisiana State University, 367 pp. (2007).
9. Basudhar, P.K., Dixit, P.M., Gharpure, A. and Deb, K. "Finite element analysis of geotextile-reinforced sand-bed subjected to strip loading", *Geotextiles and Geomembranes*, **26**(1), pp. 91-99 (2008).
10. Latha, G.M. and Somwanshi, A. "Bearing capacity of square footings on geosynthetic reinforced sand", *Geotextiles and Geomembranes*, **27**(4), pp. 281-294 (2009).
11. Moghaddas Tafreshi, S.N. and Dawson, A.R. "Comparison of bearing capacity of a strip footing on sand with geocell and with planar forms of geotextile reinforcement", *Geotextiles and Geomembranes*, **28**(1), pp. 72-84 (2010).
12. Love, J.P., Burd, H.J., Milligan, G.W.E. and Houlby, G.T. "Analytical and model studies of reinforcement of a layer of granular fill on a soft clay subgrade", *Canadian Geotech. J.*, **24**(4), pp. 611-622 (1987).
13. Lee, K.M., Manjunath, V.R. and Dewaiker, D.M. "Numerical and model studies of strip footing supported by a reinforced granular fill-soft soil system", *Canadian Geotech. J.*, **36**(5), pp. 793-806 (1999).
14. Alawaji, H.A. "Settlement and bearing capacity of geogrid reinforced sand over collapsible soil", *Geotextiles and Geomembranes*, **19**(2), pp. 75-88 (2001).
15. Deb, K., Sivakugan, N., Chandra, S. and Basudhar, P.K. "Numerical analysis of multi layer geosynthetic-reinforced granular bed over soft fill", *Geotech. and Geological Eng.*, **25**(6), pp. 639-646 (2007).
16. Zhou, H. and Wen, X. "Model studies on geogrid- or geocell-reinforced sand cushion on soft soil", *Geotextiles and Geomembranes*, **26**(3), pp. 231-238 (2008).
17. Kumar, A., Ohri, M.L. and Bansal, R.K. "Bearing capacity tests of strip footings on reinforced layered soil", *Geotech. and Geological Eng.*, **25**(2), pp. 139-150 (2007).
18. Abrishami, S. "The study of cyclic bearing capacity of dry sands reinforced by geogrid using a physical model", PhD Thesis, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran (2010).