

ظرفیت باربری پی نواری واقع بر ماسه‌ی سست مقاوم‌شده با لایه‌ی ماسه‌ی مسلح

رضا پورحسینی* (استادیار)

سیدنوید حسینی ناوی (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی هندی‌ عمان، دانشگاه یزد

به کارگیری لایه‌ی ماسه‌ی مسلح‌شده، روشی مناسب برای مقاوم‌سازی پی‌های واقع بر خاک‌های مسئله‌دار مانند ماسه‌های سست است. در این نوشتار، رفتار مدل آزمایشگاهی پی نواری واقع بر ماسه‌ی سست و مقاوم‌سازی‌شده با لایه‌ی ماسه‌ی مسلح ارائه شده است. در تمام آزمایش‌ها، ماسه‌ی بادی عبوری از الک ۴۲۵/۰ میلی‌متری و با زاویه‌ی اصطکاک داخلی 29° به‌عنوان ماسه‌ی سست استفاده شده است. در این بررسی آزمایشگاهی، یک سری آزمایش به منظور بررسی اثر حالت و شکل مسلح‌سازی در ظرفیت باربری پی، به‌عنوان شاخصی از عملکرد آن، انجام پذیرفت. بدین منظور مسلح‌کننده‌ها با شکل‌های هندسی مختلف مانند هذلولی، عمودی، افقی، و ترکیبی مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، استفاده از ترکیب مسلح‌سازی افقی و عمودی و یا مسلح‌سازی به شکل هذلولی معر، ظرفیت باربری پی نواری را در مقایسه با مسلح‌سازی افقی متداول به نسبت بیشتری افزایش می‌دهد.

واژگان کلیدی: هندسه‌ی مسلح‌سازی، ظرفیت باربری، ماسه‌ی سست (ماسه‌ی بادی)، پی نواری.

۱. مقدمه

روش‌های متعددی به منظور اصلاح عملکرد توده‌های خاکی سست تحت اثر بارگذاری توسط مهندسان و پژوهشگران ابداع شده است که خاک مسلح یکی از آنهاست. در نیم قرن گذشته، تحقیقات گسترده‌ی جهت بررسی عملکرد سازه‌های خاکی مسلح‌شده صورت گرفته است. رفتار خاک مسلح، بر پایه‌ی مقاومت کششی مسلح‌کننده، اندرکنش بین خاک و مسلح‌کننده، و نوع تنش‌های وارده استوار است. در ۲۵ سال گذشته، مدل‌های آزمایشگاهی فراوان و تعداد کمی آزمایش میدانی به منظور تعیین ظرفیت باربری پی‌های سطحی واقع بر ماسه‌ی مسلح‌شده با چندین لایه‌ی ژئوگرید گزارش شده است.^[۱-۴] عملکرد آزمایشگاهی مسلح‌سازی صفحه‌ی و ژئوسل توسط برخی محققان در محدوده‌ی نشست‌های کاربردی بررسی شده است.^[۵] مسلح‌سازی افقی به علت نیاز به برداشت خاک مسئله‌دار تا عمق مناسب و جای‌گذاری لایه‌های مسلح‌کننده و به دلیل تداخل با محل پی‌سازی، زمان اجرا را افزایش می‌دهد. با مسلح‌سازی قائم بیرون از محیط شالوده نیز ظرفیت باربری خاک قابل افزایش است، لیکن تحقیقات محدودی در زمینه‌ی امکان استفاده از این روش جهت افزایش ظرفیت باربری ارائه شده است.^[۶-۸] در شرایطی که جایگزینی خاک سست با مصالح مرغوب توجیه‌پذیر نباشد، می‌توان با استفاده از لایه‌ی ماسه‌ی مسلح‌شده، ظرفیت باربری را به‌طور قابل ملاحظه‌ی افزایش داد.^[۹]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۰/۸/۳، اصلاحیه ۱۳۹۱/۱/۲۶، پذیرش ۱۳۹۱/۳/۹

r_porhoseini@yazduni.ac.ir
navid.navi@yahoo.com

نهشته‌های ماسه‌ی بادی در مناطق بیابانی و نیمه بیابانی ایران به وفور یافت می‌شود. این مصالح با اینکه نشست‌پذیری کمی دارند، اما به راحتی رانش می‌یابند. پی‌سازی مستقیم بر روی این ماسه‌ها به دلیل پایین بودن مقاومت برشی و دانه‌بندی یکنواخت سبب بروز خسارت به ابنیه می‌شود. از این رو لازم است برای پی‌سازی در این موارد، نسبت به مقاوم‌سازی و بهبود اندرکنش بین خاک و سازه اقدام شود. این پژوهش به مطالعه‌ی عملکرد مدل‌های آزمایشگاهی پی نواری به منظور بررسی و مقایسه‌ی کارایی هندسه‌ی مسلح‌سازی با الگوهای افقی، عمودی و یا خمیده به منظور افزایش ظرفیت باربری بستر ماسه‌ی سست (بادی) می‌پردازد. در اینجا برای نخستین بار عملکرد مدل‌هایی با روکش ماسه‌ی مسلح‌سازی‌شده به شکل خمیده و نیز به‌صورت ترکیبی از مسلح‌سازی افقی با مسلح‌سازی قائم بر باربری پی بررسی شده است.

۲. دستگاه آزمایشگاهی و مشخصات مصالح

مدل‌سازی رفتار پی نواری به‌صورت کرنش صفحه‌ی در جعبه‌ی با قاب‌سازی از مقطع نبشی فولادی به ابعاد داخلی $15 \times 50 \times 50$ سانتی‌متر صورت گرفت. به منظور کاهش ضریب اصطکاک، وجوه طرفین آن از جنس پلکسی‌گلاس به ضخامت 20 mm است. همچنین برای شبیه‌سازی شرایط کرنش صفحه‌ی و جلوگیری از

جدول ۱. خصوصیات مصالح خاکی استفاده شده در آزمایش‌ها.

طبقه بندی	دانه بندی				مشخصات مکانیکی			مصالح
	D ₅₀	D ₁₀	ضریب خمیدگی	ضریب یکنواختی	نشانه‌ی تورم κ	نشانه‌ی فشردگی λ	C	
متحد خاک	(mm)	(mm)						
SP-SC	۰٫۱۹	۰٫۰۷۵	۰٫۹۲	۳	۰٫۰۰۵	۰٫۰۲	۰	۲۹
SP	۱٫۳	۰٫۰۷	۰٫۸۱	۲٫۲۱	۰٫۰۰۳	۰٫۰۱۲	۰	۴۳

C : پارامتر چسبندگی
 φ : پارامتر اصطکاک داخلی

جدول ۲. مشخصات هندسی و مکانیکی المان‌های مسلح کننده.

ضخامت (mm)	مقاومت کششی نهایی ASTM D۵۰۳۵-۹۵ (kN/m)	نوع مسلح کننده
۰٫۱۴	۰٫۵	ورق آلومینیومی
۰٫۱۰	۰٫۴۱	نوار پلیمری (نوار ویدئو)

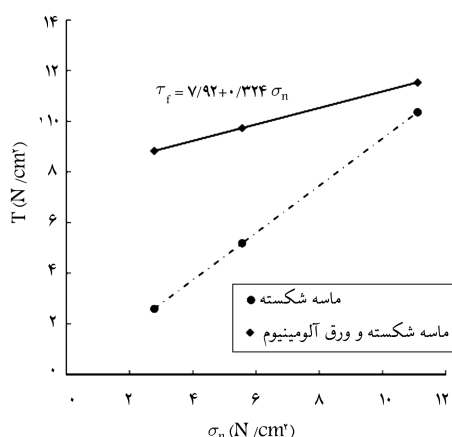
در پارامترهای مسلح سازی در سال ۱۹۹۶ بررسی شده است؛^[۱۰] بر این اساس و آنالیز ابعادی انجام شده، نسبت مقاومتی المان مسلح کننده‌ی نمونه‌ی واقعی به مدل در رابطه‌ی ۱ تعیین شده است.

$$\frac{S_{rp}}{S_{rm}} = N^2 \quad (1)$$

که در آن، S_{rp} و S_{rm} به ترتیب مقاومت مسلح کننده‌ی واقعی و N مقیاس مدل آزمایشگاهی هستند. در آزمایش‌های متعارف، از استاندارد ASTM استفاده شده است.

۳. مدل اندرکنش خاک و مسلح کننده

یکی از عوامل مؤثر در مسلح سازی خاک، اندرکنش بین مسلح کننده و خاک است. به منظور تعیین اثر مسلح کننده در مقاومت برشی خاک، آزمایش برش مستقیم بر روی ماسه‌ی شکسته که در فصل مشترک دو نیمه‌ی قالب برش ورق آلومینیوم قرار گرفته است، انجام شد. شکل ۲، اندرکنش بین ماسه‌ی شکسته و ورق آلومینیومی را نشان می دهد.

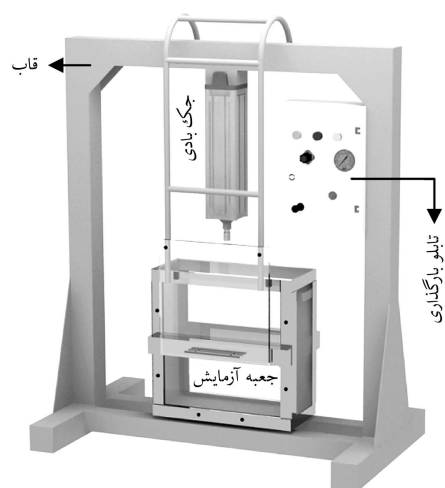


شکل ۲. نمودار اندرکنش ماسه‌ی شکسته با ورق آلومینیومی و مقاومت برشی ماسه‌ی شکسته در دستگاه برش مستقیم.

کاسه‌پی شدن این وجوه، مهار عرضی برای آن تعبیه شده است. شکل ۱، اجزاء دستگاه آزمایشگاهی را نشان می دهد. قاب دستگاه تحمل بارگذاری تا 70 kgf را دارد. بارگذاری از طریق جک بادی و با نمو پله‌یی، به طور قائم توسط گلتک متصل به دسته‌ی بارگذاری بر صفحه‌ی صلب فولادی به عرض 50 mm ، طول 146 mm و ضخامت 20 mm اعمال شده است. ضمناً مرکز این صفحه برای استقرار گلتک گود تراشی شده است. زبری شالوده به کمک چسب آهن و پوشش ماسه‌پی در کف صفحه‌ی فلزی شبیه سازی شد. نشست صفحه‌ی فولادی با نصب دو تغییر مکان سنج مکانیکی (با دقت 0.1 میلی متر) در دو رأس قطری و میانگین گیری اندازه گیری شد. تعیین نیروی اعمالی بر شالوده‌ی فولادی با قرائت فشار هوا از مانومتر و اعمال ضریب کالیبراسیون انجام پذیرفت. مانومتر مورد استفاده با دقت 0.2 bar است، و ساخت دستگاه توسط نویسندگان انجام شده است.

ماسه‌ی سست از نوع ماسه‌ی بادی عبوری از الک نمره‌ی 40 (0.425 mm) به عنوان مصالح پایه است و در مقاوم سازی بستر از ماسه‌ی شکسته‌ی عبوری از الک نمره‌ی 10 (2 mm) استفاده شد. مشخصات این دو مصالح در جدول ۱ آمده است. آزمایش‌های تعیین مشخصات مکانیکی مصالح در حالت خشک انجام شده است. مقادیر λ و κ با رسم نتایج آزمایش ادتومتر در دستگاه مختصات نیمه لگاریتمی $e - \ln p$ در مراحل بارگذاری و باربرداری در محدوده‌ی تنش $2 - 25 \text{ kgf/cm}^2$ تعیین شده است. e و p به ترتیب نسبت تخلخل خاک و فشار اعمالی از طرف اهرم دستگاه هستند.

مسلح کننده‌ها از ورق آلومینیوم نازک و نوارهای پلیمری هستند که مشخصات آن‌ها در جدول ۲ آمده است. استفاده از این دو نوع مسلح کننده به جای ژئوگرید واقعی به منظور اعمال اثر مقیاس در مدل‌های آزمایشگاهی بوده است. اثر مقیاس



شکل ۱. دستگاه تعیین ظرفیت پی نواری.

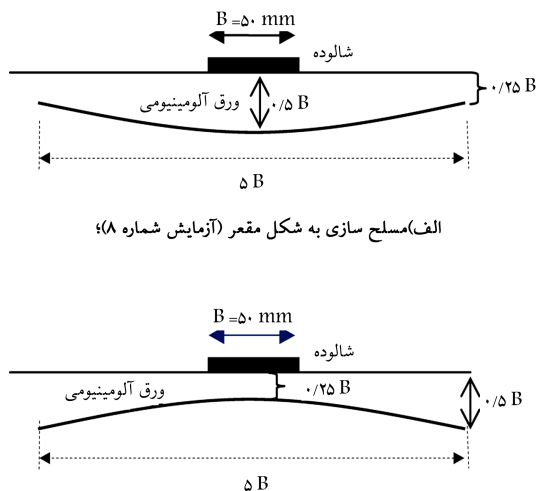
متوسط ۱۰٪ کار گذاشته شده‌اند. شکل ۴ هندسه و موقعیت این مسلح‌کننده‌ها را نسبت به کف شالوده نشان می‌دهد.

۳.۴. مسلح‌سازی قائم

برای این حالت (آزمایش ۱۰)، فقط از ورق آلومینیوم به‌عنوان المان مسلح‌کننده استفاده شده است، که ابعاد بهینه و محل مناسب قرارگیری این مسلح‌کننده‌ها بر پایه نتایج به‌دست‌آمده در سال ۱۹۹۴ تعیین شده است.^[۱۲] شکل ۵، مشخصات هندسی این حالت را نشان می‌دهد.

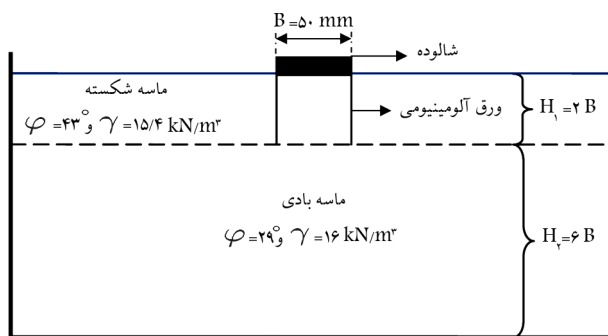
۴.۴. مسلح‌سازی با استفاده از المان‌های افقی و قائم

محققان با پیشنهاد سیستمی جدید، به بررسی مقاوم‌سازی بستر رس نرم به وسیله ترکیبی از لایه‌ی افقی و ستون‌هایی از ماسه‌ی مسلح‌شده با لیاف پرداختند.^[۱۵] در اینجا با استفاده از این ابتکار و الگوبرگشتن از عملکرد ژئوسل‌ها، مسلح‌سازی جدیدی با استفاده از المان‌های افقی و قائم انجام پذیرفت. در این آزمایش‌ها سیستم عمودی، یک بار با یک لایه‌ی مسلح‌کننده‌ی افقی و بار دیگر با دو لایه‌ی مسلح‌کننده‌ی افقی تلفیق شده که جزئیات آن‌ها به ترتیب در شکل ۶ و جدول ۴ آورده شده است (مسلح‌کننده‌های افقی و عمودی در محل برخورد به هم پیوسته نیستند).



شکل ۳. وضعیت لایه‌های خاک و مسلح‌کننده‌های افقی (آزمایش‌های ۱-۷).

شکل ۴. موقعیت و هندسه‌ی مسلح‌کننده‌ی خمیده ($H_1 = 2B$ و $H_2 = 6B$).



شکل ۵. مدل با مسلح‌کننده‌های قائم (آزمایش ۱۰).

۴. ساخت مدل‌های آزمایشگاهی

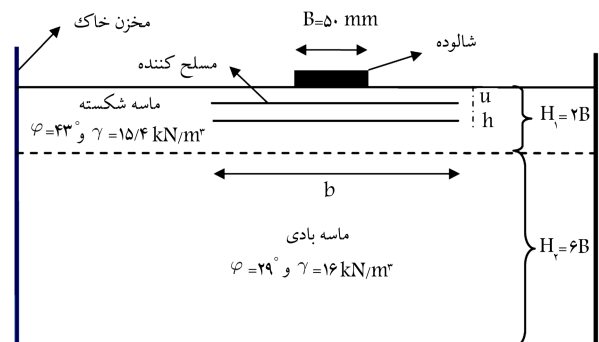
برای ساخت مدل‌ها، ماسه‌ها در لایه‌هایی به ضخامت ۵۰ mm به روش بارشی در جعبه ریخته شد، در این شرایط وزن مخصوص ماسه‌ی بادی و ماسه‌ی شکسته به ترتیب به مقادیر 16 kN/m^3 و 15.4 kN/m^3 رسید.

۱.۴. مسلح‌سازی افقی

در اینجا اثر یک و دو لایه‌ی مسلح‌کننده بررسی شده است. شکل و جزئیات تنظیمی آزمایش‌ها برای این حالت، به ترتیب در شکل ۳ و جدول ۳ آمده است. با توجه به نتایج برخی تحقیقات^[۱۲،۱۱]، نسبت فاصله‌ی بهینه‌ی اولین لایه‌ی مسلح‌کننده از کف پی و نسبت فاصله بین لایه‌ها به عرض شالوده را به ترتیب در محدوده‌ی $0.25 \leq \frac{u}{B} \leq 0.4$ و $0.2 \leq \frac{h}{B} \leq 0.4$ و طول بهینه‌ی مسلح‌کننده را $5B$ تعیین کرده‌اند. همچنین با استفاده از مدل‌های عددی نشان داده شده است که بیشینه‌ی عمق مؤثر در مسلح‌سازی حدوداً $1/5$ برابر عرض پی نواری است.^[۱۳]

۲.۴. مسلح‌سازی خمیده

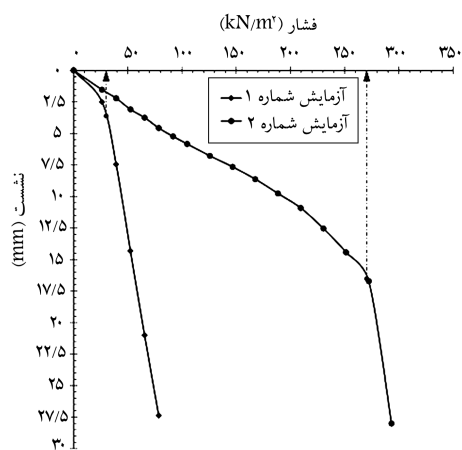
در این مدل‌ها مسلح‌سازی با یک لایه‌ی ورق آلومینیوم، یک بار به حالت هذلولی مقعر (آزمایش ۸) و در مدل دیگر به حالت هذلولی محدب (آزمایش ۹) و با شیب



شکل ۳. جزئیات آزمایش‌ها بر روی ماسه‌ی مسلح‌شده با المان‌های افقی.

شماره‌ی آزمایش	خاک بستر		مسلح‌کننده	تعداد لایه‌ها	$\frac{u}{B}$	$\frac{h}{B}$	$\frac{b}{B}$
	H_2	H_1					
۱	-	*۸B	-	-	-	-	-
۲	۲B	۶B	-	-	-	-	-
۳	۲B	۶B	ورق آلومینیوم	۱	۰/۲۵	-	۵
۴	۲B	۶B	نوار پلیمری	۱	۰/۲۵	-	۵
۵	۲B	۶B	نوار آلومینیوم	۲	۰/۲۵	۰/۲۵	۵
۶	۲B	۶B	نوار پلیمری	۲	۰/۲۵	۰/۲۵	۵
۷	۲B	۶B	ورق آلومینیوم	۱	۰/۵	-	۵

* $B = 50 \text{ mm}$



شکل ۷. نمودار بار - نشست مدل‌های غیرمسلح.

۱.۵. باربری مدل‌های غیرمسلح آزمایش‌های ۱ و ۲

نمودار بار - نشست آزمایش‌های ۱ و ۲ در شکل ۷ آورده شده است. همان‌گونه که در شکل ۷ مشخص شده است، ظرفیت باربری نهایی در آزمایش‌های ۱ و ۲ به ترتیب برابر با 30 KN/m^2 و 270 KN/m^2 است و مکانیزم گسیختگی در این دو آزمایش فروریزشی است.

در منحنی‌های بار - نشست پی، نقطه‌ی گسیختگی مدل‌های مسلح شده به‌طور واضح مشخص نیست، از این رو ظرفیت باربری به این صورت تعیین شده است: مماس‌هایی بر دو شاخه‌ی منحنی بار - نشست پی رسم و از محل برخورد آن‌ها ظرفیت باربری تعیین شد که به روش برخورد دو مماس معروف است.

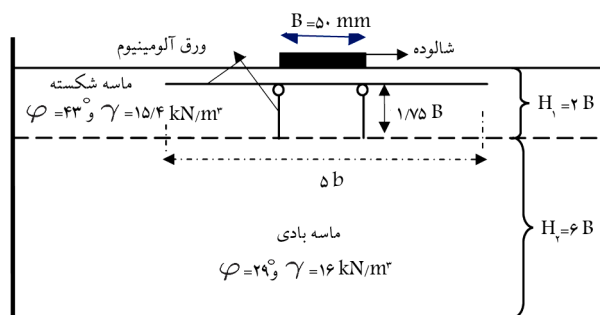
ماسه‌ی بادی در شرایط محصورشدگی، نشست قابل ملاحظه‌ی ندارد، ولی به علت زاویه‌ی اصطکاک کم و دانه‌بندی یکنواخت، به تنهایی دارای ظرفیت باربری کمی است. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، با اجرای لایه‌ی ماسه‌ی شکسته به ضخامت ۲B بر روی ماسه‌ی بادی ظرفیت باربری سیستم به ۹ برابر افزایش می‌یابد.

۲.۵. ظرفیت باربری پی با مسلح‌سازی افقی، آزمایش‌های ۳ الی ۷

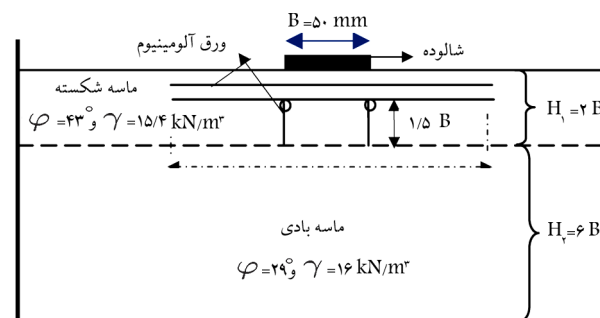
همان‌طور که پیش از این هم بیان شد، لایه‌های مسلح‌کننده از ورق نازک آلومینیومی و ۱۲ نوار پلیمری به عرض $12/5$ میلی‌متر ($12/5 = 12 \times 12/5$) مجاور هم تشکیل یافته‌اند. محل قرارگیری آن‌ها نیز در فاصله‌ی $25B/5$ از کف شالوده، u درون لایه‌ی ماسه‌ی شکسته است. نمودار بار - نشست آزمایش‌های ۳ و ۴ در شکل ۸ ارائه شده است.

با توجه به شکل ۸، کارگذاری المان‌های مسلح‌کننده باعث افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست پذیری می‌شود، همچنین ورق آلومینیومی نسبت به نوار پلیمری، تأثیر بیشتری در افزایش ظرفیت باربری می‌گذارد. مسلح‌سازی با ورق آلومینیومی سبب افزایش $10/4$ برابری ظرفیت باربری در مقایسه با ماسه‌ی بادی شده است. اعداد به‌دست‌آمده برای نسبت افزایش ظرفیت باربری در محدوده‌ی مقادیر بیان‌شده در سال ۱۹۷۵^[۱۶] و در سال ۲۰۰۲^[۱۷] است، که بیانگر عملکرد مناسب مدل آزمایشگاهی و قابلیت اعتماد نتایج آن است.

در آزمایش‌های ۵ و ۶ به بررسی اثر دو لایه‌ی مسلح‌کننده با فاصله‌ی $(h = 25B/5)$ توجه شده است. نتایج آزمایش‌های انجام‌گرفته در این حالت در شکل ۹ آمده است. با مقایسه‌ی شکل‌های ۸ و ۹ ملاحظه می‌شود که با افزایش



الف) آزمایش شماره ۱۱



ب) آزمایش شماره ۱۲

شکل ۶. وضعیت لایه‌های خاک و مسلح‌کننده‌های افقی و قائم.

جدول ۴. جمع‌بندی نتایج آزمایش‌های انجام‌شده.

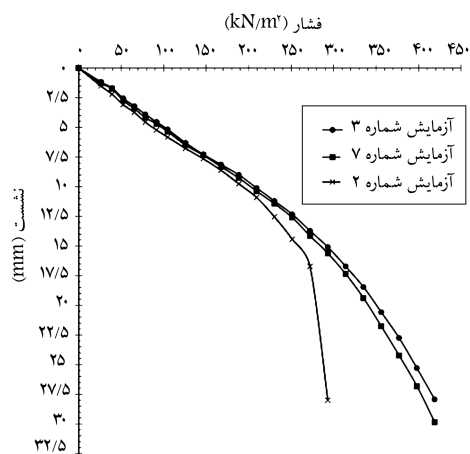
شماره‌ی آزمایش	q_u (KN/m^2)	S_u (mm)	BCR	RIF
۱	۳۰	۳٫۸	۱	-
۲	۲۷۰	۱۶٫۳	۹	۱
۳	۳۱۴	۱۵٫۶	۱۰٫۴	۱٫۲
۴	۲۹۸	۱۵٫۲	۹٫۹	۱٫۱
۵	۴۵۳	۱۴٫۲	۱۵٫۱	۱٫۷
۶	۴۱۱	۱۶٫۸	۱۳٫۷	۱٫۵
۷	۳۰۷	۱۵٫۷	۱۰٫۲	۱٫۱
۸	۳۴۲	۱۵٫۵	۱۱٫۴	۱٫۳
۹	۳۰۴	۱۵٫۷	۱۰٫۱	۱٫۱
۱۰	۲۹۷	۱۵٫۸	۹٫۹	۱٫۱
۱۱	۳۶۸	۱۷٫۱	۱۲٫۲	۱٫۴
۱۲	۵۰۰	۱۴٫۸	۱۶٫۶	۱٫۸

۵. نتایج آزمایش‌های مدل‌ها

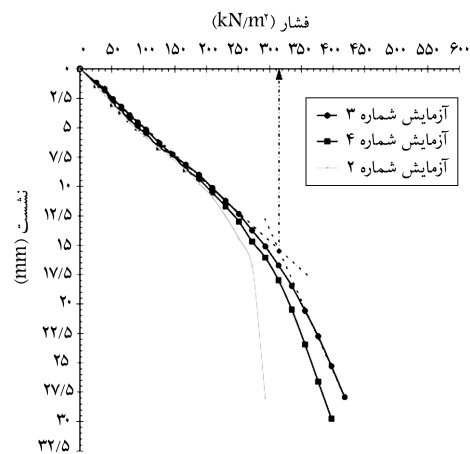
عملکرد مدل‌های مختلف مسلح‌سازی با بارگذاری پله‌ی و ثبت نشست صفحه‌ی فولادی واقع بر روی آن سنجیده می‌شود. بهبود ظرفیت باربری نهایی با کمیت بدون بعد نسبت ظرفیت باربری، BCR^۱، طبق رابطه‌ی ۲ بیان شده است.

$$BCR = \frac{q_u(R)}{q_u} \quad (2)$$

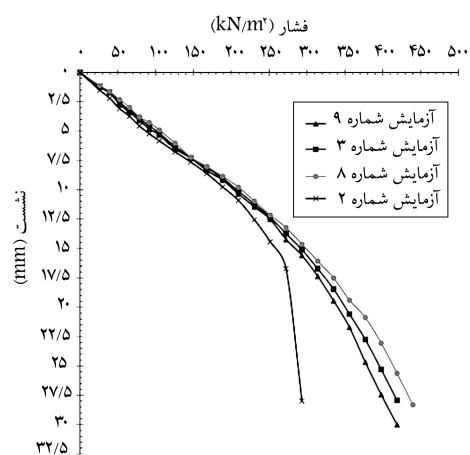
که در آن، q_u و $q_u(R)$ به ترتیب ظرفیت باربری نهایی با و بدون مسلح‌سازی هستند. دقت نتایج آزمایش‌ها با تکرار کنترل شد.



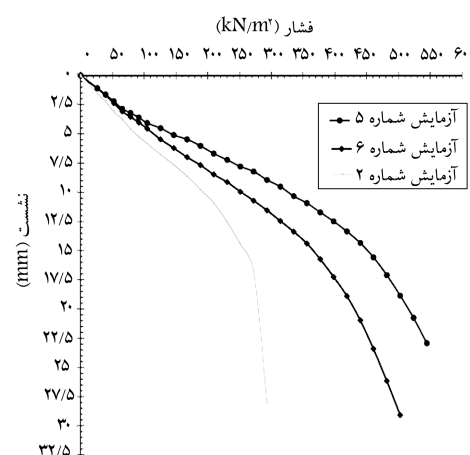
شکل ۱۰. نمودارهای بار - نشست مدل‌های مسلح‌شده با یک لایه‌ی مسلح‌کننده‌ی افقی در عمق ۰٫۲۵B و ۰٫۵B.



شکل ۸. نمودارهای بار - نشست مدل‌های مسلح‌شده با یک لایه‌ی مسلح‌کننده‌ی افقی.



شکل ۱۱. نمودارهای بار - نشست مدل‌های مسلح‌شده با لایه‌های منحنی هندولوی مقعر و محدب.



شکل ۹. نمودارهای بار - نشست مدل‌های مسلح‌شده با دو لایه‌ی مسلح‌کننده‌ی افقی.

۴.۵. ظرفیت باربری در حالت مسلح‌سازی قائم (آزمایش ۱۰)

برای بررسی تأثیر مسلح‌سازی قائم در افزایش ظرفیت باربری، آزمایش ۱۰ انجام شد. نتایج این آزمایش در شکل ۱۲ آورده شده است.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که مسلح‌سازی قائم باعث افزایش ظرفیت باربری می‌شود، ولی این افزایش در مقایسه با مسلح‌سازی افقی ناچیز است. یکی از دلایل مهم تحقیقات گسترده‌تر بر روی مسلح‌سازی افقی می‌تواند مسئله‌ی ذکر شده در بالا باشد.

۵.۵. ظرفیت باربری در سیستم ترکیبی مسلح‌سازی افقی و قائم

(آزمایش‌های ۱۰ و ۱۱)

این آزمایش‌ها در دو حالت شامل یک لایه‌ی مسلح‌کننده افقی به همراه دو ردیف مسلح‌کننده‌ی قائم (آزمایش ۱۱) و دو لایه‌ی مسلح‌کننده‌ی افقی به همراه دو ردیف مسلح‌کننده‌ی قائم (آزمایش ۱۲) صورت گرفته است.

نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۱۳ آمده است. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش مدل‌های ۱۱ و ۱۲، ظرفیت باربری به ترتیب ۱۲٫۲ و ۱۶٫۶ برابر نسبت به

تعداد لایه‌های مسلح‌کننده از یک به دو، بهبود چشمگیری در ظرفیت باربری حاصل می‌شود. با توجه به نتایج آزمایش‌ها در شرایط مشابه، مسلح‌سازی با ورق آلومینیومی به علت مقاومت کششی بیشتر آن نسبت به نوار پلیمری افزایش ظرفیت باربری بیشتری به همراه دارد. آزمایش ۷ به بررسی اثر عمق مسلح‌سازی در عملکرد پی، با استفاده از یک لایه‌ی مسلح‌کننده در عمق ۰٫۵B از کف شالوده می‌پردازد که نتایج آن در شکل ۱۰ آورده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، کارگذاری مسلح‌کننده در عمق ۰٫۵B نسبت به عمق ۰٫۲۵B تأثیر کمتری دارد.

۳.۵. ظرفیت باربری در حالت مسلح‌سازی خمیده، آزمایش‌های ۸ و ۹

نتایج عملکرد شالوده برای این آزمایش‌ها در شکل ۱۱ آمده است. از روی نمودارهای بار - نشست شکل ۱۱ می‌توان دریافت که مسلح‌سازی به حالت خمیده - مقعر، تأثیر بیشتری در افزایش ظرفیت باربری نسبت به حالت محدب و یا مستقیم دارد. مسلح‌سازی مقعرشکل باعث بهبود نسبت ظرفیت باربری به میزان ۱۱٫۴ نسبت به ظرفیت باربری ماسه‌ی بادی (آزمایش ۱) می‌شود. دلیل تأثیر بیشتر این حالت نسبت به حالت افقی را می‌توان ناشی از نیروهای بسیج شده بیشتر در المان مسلح‌کننده دانست.

رابطه‌ی ۳ با تعریف ضریب تأثیر مسلح‌سازی، RIF^۲، کارایی شکل‌های مختلف مسلح‌سازی در افزایش باربری با هم مقایسه می‌شوند.

$$RIF = \frac{q_u(R)}{q_u(S)} \quad (3)$$

که در آن، $q_{u(s)}$ ظرفیت باربری خاک ماسه‌ی سست مقاوم‌شده با لایه‌ی ماسه‌ی شکسته است.

نتایج نشست نهایی، S_u ، ظرفیت باربری نهایی، q_u و نسبت ظرفیت باربری، BCR و RIF برای تمامی آزمایش‌ها در جدول ۴ خلاصه شده است.

۶. نتیجه‌گیری

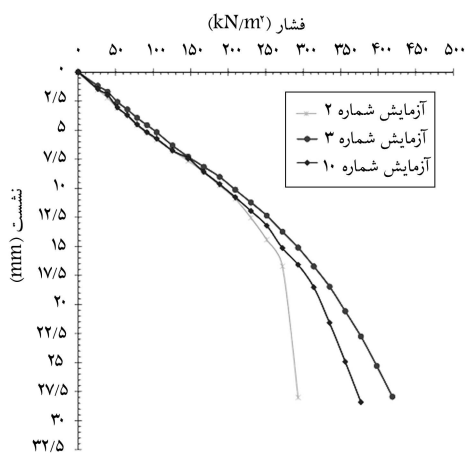
با ساخت مدل‌های آزمایشگاهی در حالت کرنش صفحه‌یی، باربری شالوده‌ی نواری واقع بر ماسه‌ی سست (ماسه‌ی بادی) مقاوم‌شده با روکش ماسه‌یی مسلح‌شده با المان‌هایی در وضعیت افقی، عمودی، و خمیده بررسی و مقایسه شده است. حوزه‌ی تنش پی واقعی در مدل‌های آزمایشگاهی قابل بازسازی نیست (تأثیر مقیاس) و از این رو نتایج این مدل‌ها جهت ارزیابی کیفی است. با توجه به این مشاهدات، اجرای لایه‌ی ماسه‌یی مسلح‌سبب بهبود باربری پی نواری به صورت افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست‌پذیری با جلوگیری از رانش ماسه‌ی سست از زیر پی می‌شود. بر اساس نتایج آزمایش مدل‌ها می‌توان گفت:

۱. مشخصات مکانیکی مسلح‌کننده‌ها و هندسه‌ی مسلح‌سازی بر ظرفیت باربری و نشست‌پذیری پی نواری مؤثر بوده و با افزایش عمق استقرار مسلح‌کننده از کارآمدی آن کاسته می‌شود. مسلح‌سازی قائم نسبت به مسلح‌سازی افقی کارآمدی کمتری دارد.

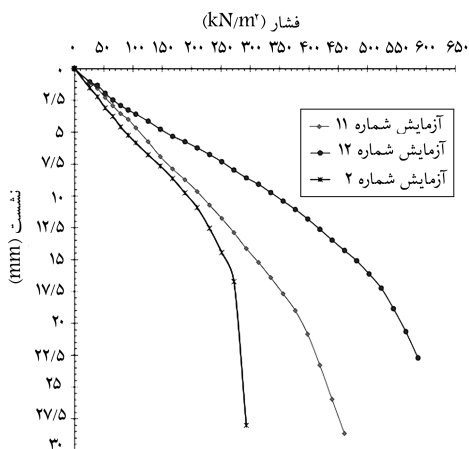
۲. با مسلح‌سازی ماسه‌ی شکسته، عملکرد شکل‌پذیرتر (جذب انرژی بیشتر قبل از گسیختگی) در پی به وجود می‌آید.

۳. مسلح‌سازی خمیده به شکل هذلولی مقعر با شیب متوسط ۱۰٪ نسبت به حالت مسلح‌سازی افقی و یا عمودی در افزایش ظرفیت باربری مؤثرتر است. در حالت مقعر از مقاومت مسلح‌کننده در تأمین پایداری به نحو مطلوب‌تری استفاده می‌شود.

۴. ترکیب مسلح‌سازی افقی بر روی مسلح‌سازی قائم، نقش قابل توجهی بر افزایش ظرفیت باربری دارد، نسبت افزایش ظرفیت باربری برای ترکیبی از مسلح‌کننده‌ی قائم با دو لایه‌ی مسلح‌کننده‌ی افقی ۱۶۶٪ است. فارغ از بعد اقتصادی و اجرایی می‌توان این سیستم مسلح‌سازی را بهترین حالت در بین آزمایش‌های صورت‌گرفته دانست.



شکل ۱۲. نمودار بار-نشست مدل با مسلح‌کننده‌ی قائم.



شکل ۱۳. نمودارهای بار-نشست مدل‌های مسلح‌شده با ترکیب مسلح‌کننده‌ی افقی و قائم.

مدل ۱ افزایش می‌یابد. از بین حالت‌های مختلف آزمایش‌شده، سیستم مسلح‌سازی جدید شامل دو ردیف قائم به همراه دو لایه‌ی افقی (مطابق شکل ۶ب) بیشترین تأثیر در بهبود ظرفیت باربری را دارد، با توجه به اندرکنش دو لایه‌ی خاک ماسه‌ی سست و ماسه‌ی مسلح‌شده این رشد قابل توجه است، بر اثر مسلح‌سازی افقی باربری افزایش می‌یابد و تمایل ماسه‌ی سست به رانش به دلیل این افزایش بارگذاری و حرکت به طرفین سبب فعال شدن مسلح‌کننده‌های قائم به میزان بیشتر می‌شود. طبق

پانویس‌ها

1. bearing capacity ratio
2. reinforcement influence factor

منابع (References)

1. Khing, K.H., Das, B.M., Yen, S.C., Puri, V.K. and Cook, E.E. "The bearing capacity of a strip foundation on

geogrid-reinforced sand", *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, **12**(4), pp. 351-361 (1993).

2. Yetimoglu, T., Wu, J.T.H. and Saglamer, A. "Bearing capacity of rectangular footings on geogrid reinforced sand", *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **120**(12), pp. 2083-2089 (1994).

3. Das, B.M. and Omar, M.T. "The effects of foundation width on model tests for the bearing capacity of sand with geogrid reinforcement", *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, **12**(2), pp. 133-141 (1994).

4. Adams, M.T. and Collin, J.C. "Large model spread footing load tests on geogrid-reinforced soil foundations", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **123**(1), pp. 66-72 (1997).
5. 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", *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, **28**, pp. 72-84 (2010).
6. Basset, R.H. and Last, N.C. "Reinforced earth below footings and embankments", *Proc. Symp. on Earth Reinforcement, ASCE*, pp. 202-231 (1978).
7. Verma, B.P. and Char, A.N.R. "Bearing capacity tests on reinforced sand subgrades", *Journal of Geotech. Eng. Div., ASCE*, **112**, pp. 701-706 (1986).
8. Manjunath, V.R. "Bearing capacity of reinforced sand subgrades", MTech Dissertation, Indian Institute of Technology, Bombay (1989).
9. Huabao, Z. and Xuejun, W. "Model studies on geogrid or geocell reinforced sand cushion on soft soil", *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, **26**(3), pp. 231-238 (2008).
10. Sireesh, S., Sitharam, T.G. and Dash, S.K. "Bearing capacity of circular footing on geocell-sand mattress overlaying clay bed with void", *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, **27**(2), pp. 89-98 (April 2009).
11. Yetimoglu, T., Wu, J.T.H. and Saglamer, A. "Bearing capacity of rectangular footings on geogrid-reinforced sand", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **120**(12), pp. 2083-2099 (1994).
12. Adams, M.T. and Collin, J.G. "Large model spread footing load tests on geosynthetic reinforced soil foundations", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **123**(1), pp. 66-72 (1997).
13. Hossein Alizadeh, A., Mir Mohammad Hosseini, S.M. and Abrishami, S., "Numerical modeling of shallow foundations bearing capacity on geogrid-reinforced sand", *Proceedings of 4th National Congress on Civil Engineering*, Tehran University, Tehran, Iran, (In Persian) (2008).
14. Mandal, J.N. and Manjunath, V.R. "Bearing capacity of strip footing resting on reinforced sand subgrades", *Journal of Construction and Building Materials*, **9**(1), pp. 35-38 (1994).
15. Osman, E.A.M. "New reinforced earth mat foundation over soft clay", *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, **22**(5), pp. 439-453 (2005).
16. Binquet, J. and Lee, K.L. "Bearing capacity tests on reinforced earth slabs", *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **101**(GT12), pp. 1241-1255 (1975).
17. Shin, E.C., Das, B.M., Lee, E.S. and Atalar, C. "Bearing capacity of strip foundation on geogrid-reinforced sand", *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, **20**(2), pp. 169-180 (2002).