

## بررسی آزمایشگاهی ظرفیت باربری پی‌های نواری واقع بر خاک‌های چند لایه مجاور دیوار حائل مسلح شده با ژئوگرید

علیرضا شالچی، وحید رستمی\*

گروه عمران، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۵ شهریور ۱۳۹۵  
بازنگری: ۷ بهمن ۱۳۹۵  
پذیرش: ۲۰ بهمن ۱۳۹۵  
ارائه آنلاین: ۳۰ بهمن ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

خاکریز لایه‌بندی شده  
دیوار حائل انعطاف پذیر  
ژئوگرید  
ظرفیت باربری پی نواری  
تغییر مکان دیوار حائل

**چکیده:** به طور کلی یک جداری قائم یا نزدیک به قائم از خاک، عوارض طبیعی مشرف به جاده‌ها و دامنه‌های غیرطبیعی در حال سکون، در مقابل نیروی موجود وارد بر آن‌ها مقاوم می‌باشند. با قرارگیری سربار تحت بار نواری روی عوارض یاد شده، ضعف عملکرد کششی خاک تحت شرایط مذکور می‌تواند موجب ناپایداری گردد که از مسائل مورد توجه در مهندسی ژئوتکنیک به شمار می‌آید. استفاده از خاک مسلح در طراحی شالوده‌ها و سازه‌های خاکی از قبیل دیوار حائل، یکی از ابداعاتی است که جزو متنوع‌ترین و اقتصادی‌ترین مسائل بهسازی خاک محسوب می‌شود.

علیرغم پژوهش‌های فراوان پیرامون تکنیک خاک مسلح در خصوص تغییر مکان جانبی سطح دیوار حائل و ظرفیت باربری پی نواری قرار گرفته بر روی دیوار حائل تحت شرایط همگنی خاک، مطالعات اندکی بر روی این گونه دیوارها در شرایط خاک لایه‌بندی شده صورت گرفته است. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که در حالت کلی با افزایش تعداد مسلح کننده‌ها با فواصل مناسب در خاکریز چند لایه، تغییر مکان جانبی سطح دیوار کاهش و ظرفیت باربری پی نواری افزایش می‌یابد. همچنین بیشترین ظرفیت باربری پی ناشی از قراردادن ژئوگریدها در نسبت عمق  $0.25 \leq U/B \leq 0.75$  حاصل می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش طول لایه ژئوگرید، ظرفیت باربری افزایش و تغییر مکان کاهش می‌یابد، که ناشی از جلوگیری از توسعه سطح گسیختگی می‌باشد، نسبت طول ژئوگرید  $L/B=4$  به عنوان مقدار بهینه استخراج شده است همچنین در شرایطی که ضخامت لایه‌ها بیشتر از عرض پی می‌شود عملاً ظرفیت باربری تابع لایه اول می‌باشد.

### ۱- مقدمه

با توجه به گسترش روز افزون مناطق شهری و محدودیت استفاده از زمین‌های مسطح، سازه‌های زیادی در کنار شیب‌ها و دیوارها ساخته می‌شوند که باعث ایجاد یک سربار اضافه در خاکریز پشت دیوار می‌شوند. در مواردی که پایدارسازی یک شیب به روش‌های معمول، غیراقتصادی یا غیر ممکن باشد، استفاده از دیوار حائل ضروری است. تغییر مکان افقی دیوار حائل و ناپایداری آن تحت این سربار، به دلیل ضعیف بودن خاک در برابر تنش‌های کششی، از مسائل مهم در مکانیزم اندرکنش دیوار-خاک مسلح تحت بارهای نواری، به شمار می‌آیند. بررسی عملکرد دیوار حائل در شرایط مذکور باعث تغییراتی در روش‌های طراحی مورد استفاده توسط مهندسان ژئوتکنیک در دهه اخیر شده است. تکنیک‌های جدید به آن‌ها اجازه داده تا دیوارهایی با ظرفیت باربری و پایداری بیشتر، طراحی کنند. مسلح سازی قسمت فوقانی دیوار، به عنوان یک تکنیک موفق خاک مسلح، نقش بسزایی در کاهش فشار روی دیوار و افزایش ظرفیت باربری خاک زیر پی، ایفا می‌کند، لذا از این نقطه نظر کاربردهای فراوانی در مهندسی ژئوتکنیک و بهبود خصوصیات

مقاومتی خاک دارد. آزمایش‌های مدل فیزیکی دیوارها و شیب‌های مسلح شده خاکی اغلب به صورت استاتیکی و شبه‌استاتیکی به طور محافظه کارانه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. آزمایش‌های مدل فیزیکی برای اولین بار به صورت استاتیکی روی دیوارهای خاک مسلح در سال ۱۹۶۹ توسط یک مهندس فرانسوی به نام هانری ویدال<sup>۱</sup>، در فرانسه به صورت آزمایش‌های مدل فیزیکی سه بعدی انجام گردید [۲]. به دنبال آن، مطالعات گسترده‌ای توسط دیگر محققین انجام شد و منجر به شناخت فنون نوینی در بحث تسلیح گردید. پائولسن<sup>۲</sup> و روسینگ<sup>۳</sup>، در تحقیقات خود دریافتند که تغییر شکل دیوارهای مسلح شده خاکی به متغیرهای مختلفی از قبیل تراکم خاک، طول و فاصله مسلح کننده‌ها، جنس رویه، مقاومت کششی و اصطکاک بینابینی مسلح کننده‌ها بستگی دارد [۳-۵]. تحقیقاتی نیز درباره‌ی دیوار حائل با سطح صلب و مسلح کننده‌ی غیر متصل به سطح در مدل کوچک آزمایشگاهی انجام و نتایج آن‌ها در قالب کاهش ۴۰ درصدی فشار جانبی وارد به سطح دیوار حائل در هنگام به کارگیری مسلح کننده با طول کم ارائه

1 Vidal,H  
2 Paulsen  
3 Roessing

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Rostami@iauh.ac.ir

بر روی شیب‌های ماسه‌ای مسلح شده با ژئوگرید را به طور آزمایش گاهی مورد بررسی قرار داد. پارامترهای متغیر در آزمایش وی شامل: طول ژئوگرید، تعداد ژئوگریدها، فاصله قائم تسلیحات و عمق اولین لایه ژئوگرید می‌باشد [۲۱]. شینده و ماندال<sup>۱۰</sup>، به بررسی رفتار یک دیوار حائل خاک مسلح که زون خاکی آن محدود می‌باشد پرداختند. طبق مطالعات آنان دیده شد که اگر تسلیحات در درون زون سنگی مهار گردند کارایی آنان خیلی بالاتر می‌رود [۲۲]. یانگ<sup>۱۱</sup>، رفتار یک دیوار حائل مسلح شده ژئوگریدی با نمای بتنی صلب که در راه‌آهن اصلی چین واقع شده بود را مورد مانیتورینگ قرار دادند. مانیتورینگ آنان شامل ثبت و بررسی فشار قائم فونداسیون، فشار جانبی خاک در نمای دیوار، کرنش کششی در مسلح کننده و تغییرشکل افقی نما می‌باشد [۲۳]. علیرغم تحقیقات انجام شده در خصوص بررسی ظرفیت باربری پی نواری و پایداری دیوار حائل مسلح شده، تاکنون پژوهش قابل ملاحظه‌ای با منظور کردن خاکریز چند لایه برای تعیین عملکرد دیوار و پی نواری صورت نگرفته است. لذا به نظر می‌رسد با توجه به قرارگیری سربار بر روی دیوارهای حائل در مناطق شامل پروفیل خاکی ناهمگن، نتایج این تحقیق تأثیر قابل توجهی بر تعیین ظرفیت باربری پی نواری و پایداری دیوار حائل داشته باشد.

## ۲- برنامه آزمایش‌ها

در راستای بررسی عوامل مؤثر بر ظرفیت باربری پی نواری و همچنین پایداری دیوار حائل، تعداد ۹ آزمایش در حالت غیر مسلح و ۲۱۶ آزمایش در حالت مسلح، برنامه‌ریزی و انجام گرفت. تعداد لایه‌ها و طول مسلح کننده‌ها، فاصله مسلح کننده‌ها از هم و عمق مسلح سازی جهت ارزیابی شرایط مسلح سازی، ضخامت لایه‌های خاکریز متشکل از ماسه ریز دانه و درشت دانه جهت ارزیابی شرایط لایه‌بندی خاک و فاصله‌ی لایه‌ی پی از دیوار حائل از جمله متغیرهایی بودند که به منظور بررسی تأثیر بر ظرفیت باربری پی نواری و پایداری دیوار حائل مورد ارزیابی قرار گرفتند. خلاصه برنامه آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه گردیده است.

جدول ۱: خلاصه برنامه آزمایش‌ها

Table 1. Testing program

H/B	U/B	b/B	L/B	N	Test condition
۱/۵, ۰/۵		۱, ۲, ۳			۹
۱/۵, ۰/۵	۰/۷۵, ۰/۵, ۰/۲۵	۱, ۲, ۳	۳, ۴, ۵	۱, ۲	۲۱۶

10 Shinde&mandal  
11 Yang

گردید [۶-۱۱]. بر اساس نتایج بدست آمده، کرنش ایجاد شده در طول مسلح کننده‌ها و تغییر مکان جانبی سطح دیوار بستگی به موقعیت پی نواری داشته و بیشینه‌ی کرنش در لایه‌های بالایی مسلح کننده‌ها درست در زیر پی نواری ایجاد و در لایه‌های پایینی به سمت پشت پی نواری کشیده شده است [۱۲]. بررسی‌هایی نیز پیرامون تحلیل گسیختگی دیوارهای خاک مسلح، انجام گردید. محققان در این بررسی‌ها دریافته‌اند که گسیختگی کلی و ناگهانی خاک در شرایط غیر مسلح به گسیختگی پیش رونده در حالت مسلح در این نوع دیوارها تبدیل می‌شود. میچالوسکی<sup>۱</sup> و زاهو<sup>۲</sup> بر اساس مطالعات آزمایشگاهی و بررسی‌های تئوریک، معیاری برای گسیختگی ماسه مسلح شده ارائه نمودند [۱۳].

به منظور پیشرفت و فهم بهتر اندرکنش خاک-مسلح کننده، آزمایش‌های متفاوت و آنالیزهای تئوری متفاوت در سال‌های اخیر بوجود آمده‌اند [۱۴]. ماهر و گری<sup>۳</sup>، آزمایش‌های گسترده‌ای بر روی نمونه‌های مختلف ماسه که به روش تصادفی با الیاف پروپیلنی مسلح شده بودند، انجام دادند و نشان دادند که افزایش مقاومت متناسب با میزان مسلح کننده‌ها می‌باشد [۱۵]. بنسون و خایر<sup>۴</sup>، با انجام آزمایش‌های برش مستقیم و CBR به مطالعه در مورد تسلیح خاک با استفاده از نوارهای پلی اتیلن پرداختند [۱۶]. آزمایش‌های برش مستقیم و سه محوری توسط سنتونی و وبستر<sup>۵</sup> [۱۷]، همگی حاکی از این نکته بودند که نمونه‌های مسلح شده شکل پذیری بیشتری نسبت به نمونه‌های غیرمسلح دارند و با استفاده از عناصر تسلیح در خاک عملکرد خاک بهبود می‌یابد. ساویکی و لسنیوسکا<sup>۶</sup> بررسی حالت‌های گسیختگی و ظرفیت باربری دیوارهای حائل خاک مسلح پرداختند. آن‌ها ابتدا مدل‌های آزمایش گاهی کوچک مقیاس دیوار حائل را مورد بررسی قرار دادند و سپس تحلیل تئوریک مسئله را بر اساس مدل پلاستیک صلب و تئوری‌های حدی ارائه کردند [۱۸]. پالمیرا و لانز<sup>۷</sup> به بررسی تنش‌ها و تغییرشکل‌ها در دیوارهای مدل مسلح شده ژئوتکستایلی پرداختند. طبق مطالعات آنان دیده شد که آرایش تسلیحات تأثیر قابل توجهی در جابه‌جایی نما و تنش‌ها در پای دیوار می‌گذارد [۱۹]. کارپوراپو و باتورست<sup>۸</sup>، به بررسی عددی رفتار دیوار حائل خاک مسلح ژئوستنتیکی با استفاده از روش المان محدود پرداختند. آنان از مدل رفتاری هیبربولیک که شامل پارامتر اتساع می‌باشد برای مدل کردن رفتار خاکریز ماسه‌ای استفاده کردند و نتایجشان نشان داد که با این روش می‌توان ویژگی‌های عملکردی دیوار در حالت بارگذاری عادی و فروپاشی را به درستی پیش بینی کرد [۲۰]. یوو<sup>۹</sup>، ظرفیت باربری پی‌های نواری مستقر

1 Michalowski  
2 Zhao  
3 Maher&Gary  
4 Benson & Khire  
5 Santtoni&Webster  
6 Sawicki&Lesniewska  
7 Palmeira&Lanz  
8 Karpurapu&bathurst  
9 Yoo

### ۳- مشخصات مدل آزمایشگاهی

برای انجام آزمایش‌ها از دستگاه بارگذاری کوچک مقیاس ابداعی استفاده گردید. قسمت‌های اصلی این دستگاه همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است عبارتند از:



شکل ۱: نمای کلی و مشخصات دستگاه بارگذاری

Fig. 1. Characteristics of loading mechanism

- بدنه اصلی دستگاه
- محفظه فلزی به ابعاد  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$  (طول  $\times$  عرض  $\times$  ارتفاع) که جهت ساخت و آماده سازی نمونه‌ها به کار می‌رود.
- محفظه مورد نظر جهت اجرای برنامه آزمایش‌ها، شامل چهار وجه فلزی (سه وجه جانبی و کف) و یک وجه شیشه‌ای می‌باشد. وجود وجه شیشه‌ای به دلیل مشاهده و عکس‌برداری تغییر شکل‌های بوجود آمده در خاک می‌باشد. در ضمن این محفظه دارای ۴ چرخ بلبرینگی جهت حرکت راحت تر و نقل و انتقال آن می‌باشد.
- جک هیدرولیکی به ظرفیت ۲ تن جهت اعمال نیرو به پی.
- سیستم قرائت نیرو: این سیستم که به وسیله یک پردازش‌گر داخلی کنترل می‌شود و جریان خروجی از حس‌گر اندازه‌گیری بار را دریافت کرده و سپس جریان ورودی در واحد قرائت که به صورت پیوسته بوده را به جریان‌های غیر پیوسته و عددی تبدیل می‌کند. در واقع نیروی قرائت شده توسط لودسل را نشان می‌دهد.
- نیرو سنج (لود سل) با ظرفیت ۲ تن جهت اندازه‌گیری بارگذاری انجام شده از طرف جک هیدرولیکی.
- دو تغییر مکان سنج برای اندازه‌گیری نشست پی نواری و همچنین تغییر مکان جانبی سطح دیوار استفاده شده است. تغییر مکان سنج مورد استفاده برای نشست پی نواری از نوع عقربه‌ای و با

دقت  $0.1 \text{ mm}$  بوده و تغییر مکان سنج مورد استفاده برای اندازه‌گیری تغییر مکان جانبی سطح دیوار از نوع دیجیتال و با دقت  $0.1 \text{ mm}$  بوده است.

- پی شبیه‌سازی شده آهنی به طول ۴۹۹ میلی‌متر و عرض ۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۳۰ میلی‌متر که به زیر جک متصل می‌باشد.
- دیوار حائل انعطاف پذیر از ورق آلومینیمی به ضخامت ۳ میلی‌متر و به عرض ۴۹۹ میلی‌متر و ارتفاع ۴۰۰ میلی‌متر با پی متصل به کف مخزن.

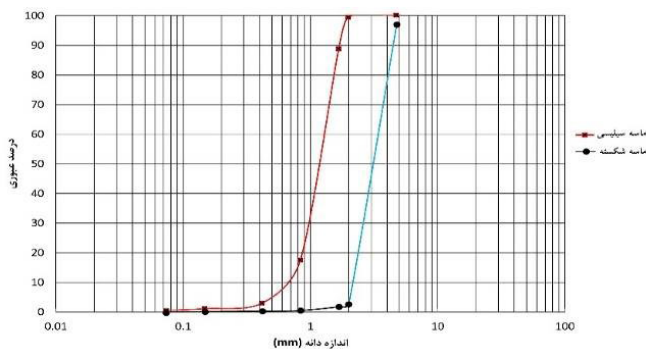
### ۴- مصالح مورد استفاده در آزمایش

برای انجام آزمایش از دو نوع خاک ماسه سلیسی ریز دانه و ماسه شکسته درشت دانه که بر اساس طبقه‌بندی متحد (مورد تأیید استاندارد ASTM)، از نوع بد دانه‌بندی شده (SP) می‌باشد، استفاده شده است که مشخصات آن‌ها با انجام آزمایش‌های دانه‌بندی و برش مستقیم به دست آمده است. مشخصات ماسه استفاده شده در آزمایش‌ها در جدول ۲ و نمودار دانه‌بندی این ماسه در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: مشخصات ماسه ریزدانه و درشت دانه

Table 2. Fine and coarse sands characteristics

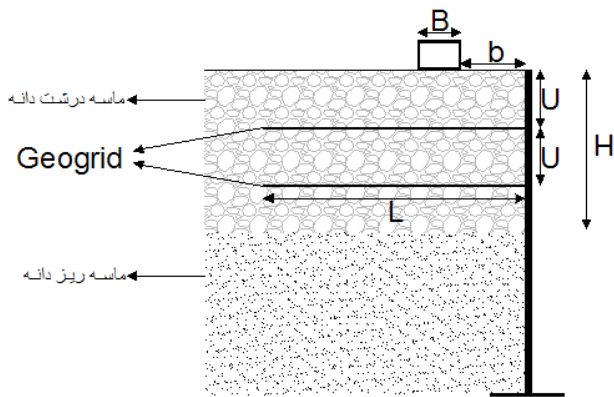
ردیف	نوع خاک	چسبندگی	جرم حجمی	زاویه اصطکاک داخلی
۱	ماسه سلیسی	۰	۱/۳۰	۲۷
۲	ماسه شکسته	۰	۱/۴۴	۳۲



شکل ۲: نمودار دانه‌بندی مصالح مورد استفاده

Fig. 2. Gran size curve for sandy soils

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مسلح‌سازی در رفتار پی نواری و دیوار از لایه‌های ژئوگرید بافته شده ( $20/20 \text{ GP}$ ) دو سویه، شرکت ژئوپارسیان، استفاده گردید که مشخصات آن در جدول ۳ آورده شده است:



شکل ۴: تصویر شماتیک مدل آزمایشگاهی و پارامترهای مربوط

Fig. 4. Schematic image of experimental model and related parameters



شکل ۳: ژئوگرید مورد استفاده در مدل

Fig. 3. Geogrid used in testing model

جدول ۳: مشخصات ژئوگرید استفاده شده در آزمایش‌ها

Table 3. Geogrid characteristics

Mechanical Properties		Physical Properties		Packaging Properties	
Characteristic tensile strength (KN/m)		Elongation at characteristic strength (TOLERANCE $\pm 10\%$ )		Mesh Size ( $\pm \Delta$ mm) (mm)	
MD	CD	۱۱		MD	CD
۲۰	۲۰			Width $\pm \Delta$ cm	Length
		۳۵	۲۵	۵/۲۵	۱۰۰

مخزن استفاده شده است. اصول کلی این روش بر اساس مطالعات انجام شده توسط کول بوزسکیف<sup>۱</sup> (۱۹۴۸)، ابریشمی و همکاران (۱۳۸۸) و محمدی و همکاران (۱۳۹۲)، بنا نهاده شده است. در این راستا با ترکیب آرایش‌های مناسب برای ارتفاع و سرعت بارش، می‌توان به دانسیته‌ی نسبی ماسه‌ی مورد مطالعه دست یافت. نتایج نشان می‌دهد که این روش، توانایی تولید نمونه‌های ماسه برای مدل‌های آزمایشگاهی در دانسیته‌های نسبی ۲۰ تا ۱۰۰ درصد را دارا است و می‌توان ماسه‌ی با شرایط یکنواخت ایجاد نمود. بدین منظور نمونه خاک به صورت بارشی با حرکت خطی و یکنواخت و از ارتفاع معین و با یک سرعت بارش ثابت در تعداد لایه‌های مورد نظر، به منظور تراکم یکسان در کلیه آزمایش‌ها ریخته شد. افزایش ارتفاع بارش ماسه، سبب افزایش تراکم نمونه خواهد شد. همچنین سرعت بارش نیز می‌تواند موجب تغییر دانسیته شود. در نتیجه می‌توان تراکم‌های مختلف را بوسیله تغییر دادن ارتفاع و سرعت بارش ماسه بطور مناسب بدست آورد. در هر مرحله ابتدا خاک ریز دانه با ضخامت مورد نظر تا تراز هر مسلح کننده

## ۵- پارامترهای آزمایش

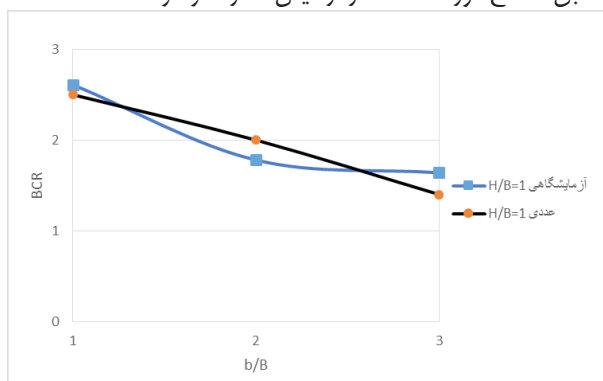
همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، فاصله گوشه پی از دیوار حائل با  $b$ ، فاصله عمق اولین لایه و سایر لایه‌های ژئوگرید از همدیگر با  $U$ ، طول ژئوگرید با  $L$ ، تعداد لایه‌های ژئوگرید  $N$ ، ضخامت لایه‌های خاک  $H$ ، در نظر گرفته شده است.

## ۶- نحوه تهیه و ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش

در این پژوهش به منظور بررسی و مقایسه تأثیر پارامترها، کلیه آزمایش‌ها در حالات خشک انجام شده است. بدین منظور، ابتدا با آزمایش تعیین درصد رطوبت، مجاز بودن رطوبت خاک‌های درشت دانه و ریز دانه بررسی شد. سپس خاک ریز دانه در پایین و درشت دانه در بالا، در ضخامت‌های مورد نظر تا ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر ریخته شد. هنگام استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی، کالیبره شدن دستگاه نمونه‌ساز به منظور تولید دقیق نمونه‌هایی با شرایط دلخواه و دانسیته‌ی نسبی، اهمیت دارد. برای ایجاد یک خاکریز یکنواخت از روش بارش برای ریختن ماسه به درون

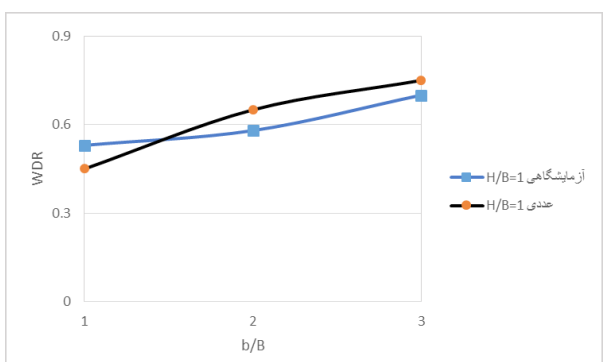


مدل‌سازی عددی، از المان ۱۵ گره‌ای خاک استفاده شده و مقاومت کششی ژئوگرید  $20 \text{ KN/m}$  در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که مشخصات خاک و مسلح کننده در مدل عددی مطابق جداول شماره ۲ و ۳ منطبق مصالح مورد استفاده در آزمایش‌ها در نظر گرفته شده است.



شکل ۵: نمودار BCR-b/B برای مقایسه حالت  $U/B=0.5, L/B=5, N=1$  در مدل عددی و آزمایشگاهی جهت صحت سنجی

Fig. 5. Comparison and verification of numerical and physical test model for WDR-BCR in  $u/B=0.5, L/B=5, N=1$



شکل ۶: نمودار WDR-b/B برای مقایسه حالت  $L/B=5, N=1, U/B=0.25$  در مدل عددی و آزمایشگاهی جهت صحت سنجی

Fig. 6. Comparison and verification of numerical and physical test model for WDR-BCR in  $u/B=0.25, L/B=5, N=1$

شکل ۵ نشان می‌دهد که نسبت افزایش ظرفیت باربری BCR در نتایج آزمایش‌گاهی با نتایج تحلیل عددی تطابق مناسبی دارند همچنین شکل ۶ نشان می‌دهد روند تغییر شکل بالای دیوار در هر دو روش آزمایش‌گاهی و تحلیل عددی مشابه بوده و تطابق مناسبی بین دو روش حاکم است.

### ۹- ارائه نتایج و تفسیر داده‌ها

افزایش در ظرفیت باربری به دلیل مسلح نمودن خاک به صورت پارامتر بدون بعد BCR (نسبت ظرفیت باربری)، بیان می‌شود که برای مقایسه‌ی ظرفیت باربری در حالت مسلح و غیر مسلح با همدیگر استفاده شده است و

ریخته شده و ضمن صاف کردن سطح خاک، مسلح کننده‌ها با طول در نظر گرفته شده در تراز مورد نظر تعبیه گردیدند. لازم به ذکر است برای اتصال مسلح کننده‌ها به دیوار حائل از یک سری قلاب‌ها که با پیچ و مهره بر روی دیوار حائل متصل شده بودند، استفاده گردید. مراحل ذکر شده عیناً برای خاک درشت دانه بر روی خاک ریز دانه تا ارتفاع تمام شده دیوار (۴۰ سانتی متر)، تکرار گردید. در کلیه آزمایش‌ها، خاک داخل مخزن بعد از هر آزمایش تخلیه شده و مجدداً به صورت بارشی تا ارتفاع مورد نظر پر شده است. در ادامه پی‌نواری فلزی که بر روی آن یک پیچ تعبیه گردیده بود (در مرکز پی‌نواری)، به آرامی و توجه به برهم نزدن سطح صاف خاک، به اهرم جک بسته شده و سیستم برای اعمال بار آماده می‌گردید. در مرحله‌ی اعمال بار، در هر گام از آزمایش توسط جک هیدرولیکی تغییر مکان ثابتی به پی‌نواری اعمال و ضمن ثابت نگه داشتن وزن مخصوص خاک، سرعت بارگذاری  $1 \text{ mm/min}$  در نظر گرفته شد. همچنین برای کاهش اصطکاک از طلق شفاف بین دیواره مخزن و ورق آلومینیومی استفاده گردید.

باید توجه داشت که برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های سطحی می‌توان از هر یک از دو معیار گسیختگی برشی در خاک زیر پی و یا نشست پی استفاده نمود. در این پژوهش معیار دوم یعنی نشست پی ملاک عمل قرار گرفته است. بر طبق نظر داس (۱۹۸۴)، بار نهایی در حالت گسیختگی برشی کلی، در نشست در حدود ۴ تا ۱۰ درصد عرض شالوده و در حالت گسیختگی برشی موضعی و سوراخ کننده بار نهایی در نشست در حدود ۱۵ تا ۲۵ درصد عرض شالوده رخ می‌دهد [۲۴]. همچنین با توجه به مطالعات اقدمی و همکاران (۱۳۸۹)، بر روی مدل‌های آزمایش‌گاهی کوچک مقیاس دیوار حائل خاک مسلح، دیده شده که نیرویی که موجب گسیختگی مدل دیوار حائل خاک مسلح می‌گردد در نشست در حدود ۳۰ درصد عرض پی رخ داده است [۲۵]. لذا بارگذاری در این پژوهش نیز تا نشست معادل ۳۰ درصد عرض پی (۱۵mm) ادامه یافته و ظرفیت باربری به دست آمده در نقطه نشست ۱۵mm، به عنوان ظرفیت باربری نهایی در نظر گرفته می‌شود.

### ۷- آنالیز حساسیت

در کلیه آزمایش‌ها که مراحل انجام آن ذکر شده است به منظور مقایسه و بررسی نتایج و نتیجه‌گیری در مورد تأثیر پارامترها بر ظرفیت باربری پی‌نواری و تغییر مکان جانبی دیوار، تغییراتی در این پارامترها به صورت هدف گذاری شده اعمال شده است. همه پارامترها به صورت بدون بعد و نرمال شده به عرض پی (B)، مانند  $H/B, L/B, U/B, b/B$  به کار رفته‌اند.

### ۸- صحت سنجی نتایج

با توجه اینکه تا کنون مطالعات جامعی بر روی دیوارهای حائل در خاک لایه‌ای مسلح شده با ژئوگرید انجام نشده است در این بخش با استفاده از روش‌های عددی و به کمک نرم افزار PLAXIS نتایج آزمایش‌های کوچک مقیاس مورد صحت سنجی قرار گرفته است. به این منظور در

به صورت زیر تعریف می گردد:

$$BCR = \frac{q_r}{q_{un}} \quad (1)$$

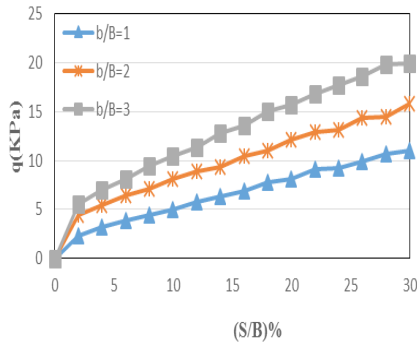
همچنین به جهت مقایسه تغییر مکان‌های جانبی سطح دیوار حائل نیز از پارامتر بدون بعد WDR به صورت زیر استفاده شده است.

$$WDR = \frac{\Delta_r}{\Delta_{un}} \quad (2)$$

در ادامه جهت آنالیز حساسیت تأثیر پارامترهایی همچون فاصله مسلح کننده از تراز پی (عمق مسلح سازی و قرارگیری لایه‌های ژئوگرید)، طول و تعداد لایه‌های ژئوگرید، فاصله‌ی لبه پی از دیوار حائل، عمق لایه‌بندی ماسه، تغییر مکان دیوار حائل و نسبت ظرفیت باربری در حالات مختلف ترسیم و مقایسه شده است. بدین جهت، پارامتری را که قرار است میزان و نحوه تأثیرش در آزمایش مشخص گردد به عنوان پارامتر متغیر و سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شده است. به طور کلی دو دسته نمودار برای این موارد که شامل نمودار نسبت ظرفیت باربری-نشست و تغییر مکان جانبی سطح دیوار-نسبت به نشست، می‌باشد، ترسیم شده است. در نمودارهای BCR و WDR، کلیه نقاط ثبت شده در حین آزمایش از شروع تا پایان نشست مورد نظر، جهت تحلیل و بررسی قابل مشاهده می‌باشد. در واقع نمودارهای فوق با در نظر گرفتن انتهای‌ترین نقطه از نمودارهای تنش-نسبت نشست و تغییر مکان جانبی سطح دیوار-نسبت نشست به بررسی مقاومت نهایی پی نواری و تغییر مکان دیوار می‌پردازد.

۹-۱- تأثیر فاصله پی نواری از لبه ی دیوار بر عملکرد دیوار حائل در شرایط بدون مسلح کننده  
 ۹-۱-۱- تحلیل اثر فاصله پی نواری از دیوار حائل بر ظرفیت باربری پی نواری

با توجه به برنامه‌ریزی آزمایش‌ها که ذکر گردید، پی نواری شبیه‌سازی شده در فاصله‌های  $b/B=3, b/B=2, b/B=1$  بر روی خاکریز ماسه‌ای قرار داده شده است. با توجه به شکل، نمودار دارای یک ناحیه خطی می‌باشد که حاکی از گسیختگی کامل خاک و انتقال کامل تنش به دیوار حائل از طریق خاک زیر پی است. می‌توان اینگونه تحلیل کرد که قسمت غیر خطی، حاکی از رفتار غیرخطی خاک قبل از ایجاد گوه‌ی کامل گسیختگی در زیر پی است که بعد از شکل‌گیری کامل این گوه، بار پی نواری توسط خاک گسیخته شده مستقیماً به دیوار وارد و قسمت خطی نمودار را ایجاد کرده است. همچنین نتایج حاصل نشان می‌دهد که در حالت بدون مسلح کننده با فاصله گرفتن پی نواری از لبه دیوار، ظرفیت باربری پی نواری افزایش یافته است. این امر به دلیل این است که کلیه خطوط گسیختگی با افزایش فاصله پی نواری در دو طرف تشکیل شده و خاک پیرامون پی مشارکت بیشتری در ظرفیت باربری پیدا می‌کند.

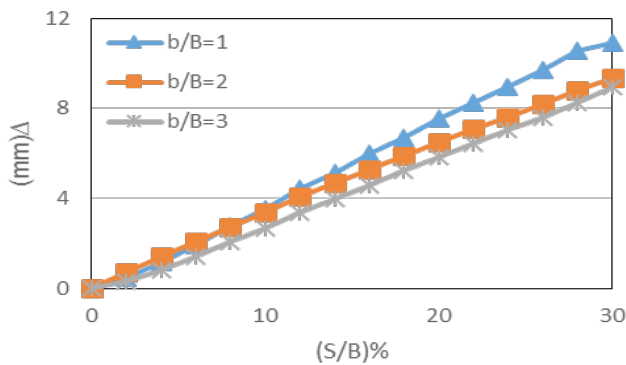


شکل ۷: نمودار تنش-نسبت نشست در حالت غیر مسلح و  $H/B=1$

Fig. 7. Stress-settlement ratio variations in unreinforced state  $H/B=1$

۹-۱-۲- تحلیل اثر فاصله پی نواری از دیوار حائل بر تغییر مکان دیوار حائل

طبق نمودار شکل، تغییر مکان جانبی دیوار حائل، بدون استفاده از مسلح کننده در فواصل  $b/B=3, b/B=2, b/B=1$  ترسیم شده است. به طور مثال دیده می‌شود که در صورت افزایش  $b/B$  از ۱ به ۳ تغییر مکان دیوار حائل ۱۸٪ کاهش یافته است. دلیل این کاهش در شرایط غیرمسلح آن است که، با افزایش فاصله پی نواری از لبه دیوار، یک سطح پلاستیک بزرگ و عمیق در خاک زیر پی شکل می‌گیرد در صورتی که در فواصل نزدیک، یک سطح پلاستیک کوچک و سطحی در خاک زیر پی شکل می‌گیرد. لذا سطح پلاستیک عمیق موجب کاهش تغییر مکان دیوار حائل می‌گردد.



شکل ۸: نمودار تغییر مکان دیوار- نسبت نشست برای خاکریز در حالت بدون مسلح کننده و عمق لایه‌بندی  $H/B=0.5$

Fig. 8. Wall displacement-settlement ratio variations in unreinforced state  $H/B=0.5$

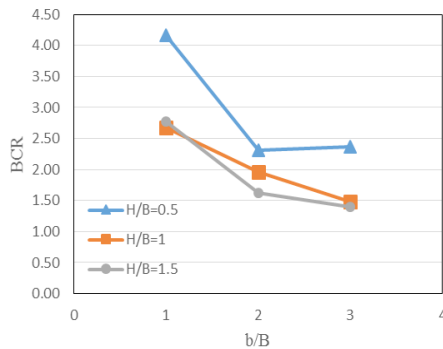
۹-۲- تأثیر فاصله پی نواری از لبه ی دیوار بر عملکرد دیوار حائل در شرایط خاک دو لایه

۹-۲-۱- تحلیل اثر فاصله پی نواری از دیوار حائل بر نسبت ظرفیت باربری پی نواری

با برنامه‌ریزی های به عمل آمده، پی نواری شبیه‌سازی شده در

چنین عمق‌هایی، ژئوگرید بیشترین تأثیر را بر روی افزایش ظرفیت باربری دارد. بنابراین بیشترین مقدار نسبت ظرفیت باربری ضمن منظور کردن فاصله‌ی لبه‌ی پی نواری از دیوار حائل در حالت  $H/B=0.5$  و  $U/B=0.75$  با مقدار  $4/17$  بدست آمده است.

نکته قابل توجه دیگر در تفسیر این نمودارها، افزایش تأثیر استفاده از ژئوگرید در نشست‌های زیاد می باشد. بطوریکه هر چقدر در آزمایش‌ها، نشست اعمال شده افزایش یافته است، فاصله بین نمودارها نیز روند افزایشی دارد. این نیز بدان معنی است که تسلیح خاک توسط مسلح کننده ژئوگرید در نشست‌های کم، تأثیرگذاری کمتری دارد.



شکل ۹: نمودار  $BCR-b/B$  در حالت  $N=1, U/B=0.75, L/B=5$

Fig. 9. Variations of  $BCR-b/B$  for  $L/B=5, u/B=0.75, N=1$

۹-۲-۲- تحلیل اثر فاصله پی نواری از دیوار حائل بر تغییر مکان دیوار حائل

با توجه به اینکه پی نواری در ۳ فاصله مختلف از دیوار یعنی  $b/B=3, b/B=2, b/B=1$  قرار گرفته است؛ جهت ارزیابی اثر آن بر تغییر مکان جانبی دیوار حائل خاک مسلح، نتایج آن به طور مختصر در اینجا ذکر می‌گردد.

در نمودار شکل ۱۰، اثر تغییر فاصله پی نواری از لبه دیوار بر روی تغییر مکان جانبی دیوار حائل مشاهده می‌شود. در این راستا، فاصله پی نواری متغیر بوده و سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شده است.

نمودار شکل ۱۰، تغییر مکان جانبی دیوار حائل را برای حالت تک لایه ژئوگرید که طول و عمق قرارگیری لایه ژئوگرید به ترتیب در آن  $5B$  و  $B$  می‌باشد را نمایش می‌دهد. طبق نتایج حاصله از این نمودار تغییر مکان جانبی دیوار در حالت  $H/B=0.5$  در نسبت فاصله پی نواری ۱ و ۲ و ۳ به ترتیب  $43\%$ ،  $38\%$  و  $25\%$  در حالت  $H/B=1$  در نسبت فاصله پی نواری ۱ و ۲ و ۳ به ترتیب  $47\%$ ،  $27\%$  و  $9\%$  و در نهایت در حالت  $H/B=1.5$  در نسبت فاصله پی نواری ۱ و ۲ و ۳ به ترتیب  $49\%$ ،  $47\%$  و  $32\%$  نسبت به حالت غیر مسلح کاهش یافته است.

با توجه به نمودار، افزایش فاصله پی نواری از لبه‌ی دیوار سبب افزایش تغییر مکان جانبی سطح دیوار گردیده است. یکی از عواملی که موجب این پدیده می‌شود، سختی مهارهای به کار رفته جهت اتصال ورق ژئوگرید به بدنه دیوار حائل می‌باشد. همچنین با افزایش فاصله پی نواری از لبه دیوار

فاصله‌های  $b/B=1, b/B=2, b/B=3$  از لبه‌ی دیوار قرار گرفته است. جهت ارزیابی هر کدام از این حالات به طور مختصر نتایج حاصل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در نمودار شکل ۹، اثر تغییر فاصله پی نواری از لبه دیوار بر روی ظرفیت باربری پی نواری ضمن منظور کردن عمق قرارگیری لایه ژئوگرید نشان داده شده است. در هر مورد فاصله پی نواری متغیر بوده و سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شده است.

نمودار شکل ۹، ظرفیت باربری پی نواری برای حالت تک لایه ژئوگرید که طول ژئوگرید در آن  $5B$  و عمق قرارگیری لایه ژئوگرید  $0.75B$  می‌باشد را نشان می‌دهد. طبق نتایج حاصل از این نمودار ظرفیت باربری پی نواری در حالت  $H/B=0.5$  در نسبت فاصله پی نواری ۱ و ۲ و ۳ به ترتیب  $31\%$ ،  $37\%$ ،  $131\%$  و در حالت  $H/B=1$  در نسبت فاصله پی نواری ۱ و ۲ و ۳ به ترتیب  $168\%$ ،  $96\%$  و  $49\%$  و در نهایت در حالت  $H/B=1.5$  در نسبت فاصله پی نواری ۱ و ۲ و ۳ به ترتیب  $84\%$ ،  $62\%$  و  $40\%$  نسبت به حالت غیر مسلح افزایش یافته است.

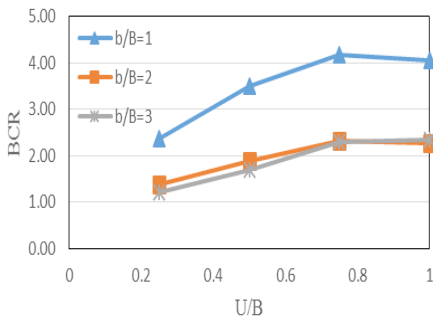
طبق نتایج حاصل شده از آزمایش‌ها، در فاصله‌های نزدیک لبه‌ی پی از دیوار حائل، با در نظر گرفتن عمق لایه‌بندی ماسه، ظرفیت باربری، مقادیر بیشتری را در عمق‌های کمتر لایه‌بندی نشان می‌دهد و با فاصله گرفتن لبه‌ی پی نواری از دیوار و افزایش عمق لایه‌بندی از  $H/B=0.5$  تا  $H/B=1.5$  نسبت ظرفیت باربری کاهش یافته است. در این جا توجه به این نکته ضروری است که در شکل ۷، با اینکه خاک غیر مسلح می‌باشد اما افزایش فاصله لبه‌ی پی نواری از دیوار حائل، افزایش ظرفیت باربری را به دنبال داشت؛ اما در شکل ۹، علیرغم مسلح سازی، افزایش عمق لایه‌بندی باعث کاهش نسبت ظرفیت باربری پی نواری گردیده است. بنابراین هر چقدر عمق لایه‌بندی ماسه بیشتر شود عملکرد مسلح سازی ضمن افزایش فاصله پی نواری از دیوار حائل، در بهبود خاک کاهش می‌یابد.

همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، افزایش عمق قرارگیری لایه مسلح کننده تنها در عمق لایه‌بندی کم ماسه و زمانی که پی نواری در فاصله ای در حدود  $b/B=1$  قرار دارد، سبب افزایش ظرفیت باربری می‌گردد. نقطه ماکزیمم نمودار  $BCR$  در فاصله  $b/B=1$  ملاحظه می شود و می‌توان دریافت که افزایش فاصله پی نواری از دیوار حائل ضمن افزایش عمق لایه‌بندی ماسه و فاصله قرارگیری لایه مسلح از سطح پی، سبب کاهش ظرفیت باربری پی نواری می‌گردد و دلایل آن این است که با فاصله گرفتن بیشتر پی نواری از لبه دیوار، ناحیه کمتری از خاک زیر پی تحت پوشش ورق ژئوگرید قرار می‌گیرد و در نتیجه تأثیر مثبت ژئوگرید کاهش می‌یابد.

با توجه به نتایج فوق، در این پژوهش مقدار  $H/B=0.5$  و  $U/B=0.75$  را می‌توان پهنه‌ترین حالت‌ها در افزایش ظرفیت باربری ضمن منظور کردن فاصله پی نواری از دیوار دانست. طبق نکات ذکر شده در تحلیل نمودارهای نسبت ظرفیت باربری به فاصله‌ی لبه‌ی پی از دیوار حائل می‌توان گفت در

علاوه بر این هرچه قدر عمق لایه بندی ماسه بیشتر شود عملکرد ژئوگرید در بهبود خاک کاهش می یابد؛ برای عمق لایه بندی خاک در  $H/B=0.5$  و فاصله پی نواری در  $b/B=1$  ضمن افزایش فواصل مسلح کننده ها، مقدار ظرفیت باربری پی نواری افزایش یافته است که در این حالت این نسبت، به یک مقدار بیشینه منتهی شده است که این مقدار در نمودار شکل ۱۱، به  $4/17$  رسیده است. دلیل این افزایش را می توان ناشی از تأثیر عملکرد مسلح کننده ها در عمق لایه بندی کمتر و فاصله ی نزدیک تر پی به دیوار حائل دانست. بعد از یک مقدار معین، افزایش در فاصله پی نواری از دیوار حائل، بهبود بیشتر در ظرفیت باربری با افزایش عمق مسلح کننده ها و فاصله پی نواری از دیوار حائل، قابل اغماض می باشد. برای عمق لایه بندی خاک در  $H/B=1$  و  $H/B=1.5$  نیز روند افزایش فواصل مسلح کننده ها ( $U/B$ ) با کاهش  $BCR$  همراه است.

همچنین افزایش فاصله مسلح کننده ها از  $U/B=0.25$  تا  $U/B=0.75$  باعث افزایش در ظرفیت باربری پی نواری می شود. افزایش فاصله مسلح کننده ها در  $U/B=0.75$  منجر به ایجاد یک مقدار بیشینه می شود. با افزایش فواصل مسلح کننده ها ضمن در نظر گرفتن عمق لایه بندی خاک، این نتیجه بدست آمد که افزایش فاصله مسلح کننده ها در حالات  $H/B=1$  و  $H/B=1.5$  باعث کاهش در مقادیر ظرفیت باربری پی نواری خواهد شد.



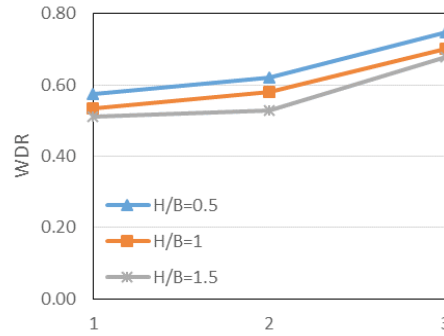
شکل ۱۱: نمودار  $BCR-U/B$  در حالت  $N=1, H/B=0.5, L/B=5$   
 Fig. 11. Variations of  $BCR-u/B$  for  $L/B=5, u/B=0.5, N=1$

۹-۳-۲- تحلیل اثر عمق و فاصله قائم ژئوگریدها بر تغییر مکان دیوار حائل

در این تحقیق  $H/B=0.5$  و  $b/B=1$  و  $U/B=0.75$  را می توان به ترتیب به عنوان عمق لایه بندی، فاصله پی نواری و فاصله مسلح کننده مؤثر پذیرفت؛ زیرا ظرفیت باربری توسط خاک حاوی این مقادیر به میزان محسوسی افزایش یافته است و به دلیل اقتصادی و کند شدن روند افزایش ظرفیت باربری در مقادیر بالاتر، توجیهی برای افزایش بیشتر در مقادیر  $H/B$  و  $b/B$  وجود ندارد.

با توجه به اینکه ورق های مسلح کننده در نسبت عمق و فواصل قائم  $0/25$  و  $0/5$  و  $0/75$  و ۱ درون نمونه ها قرار گرفته است؛ جهت ارزیابی اثر

حائل دیگر کل سطح گسیختگی توسط ورق ژئوگرید پوشش داده نمی شود و در نتیجه با توجه به عدم استفاده حداکثری از ظرفیت بالقوه ژئوگرید جهت توزیع نیروی اعمالی، تغییر مکان جانبی سطح دیوار افزایش می یابد. در این پژوهش با در نظر گرفتن شرایط موجود، نسبت فاصله ۱، به عنوان فاصله بهینه از نقطه نظر تغییر مکان جانبی دیوار حائل پیشنهاد می گردد.



شکل ۱۰: نمودار  $WDR-b/B$  برای حالت  $L/B=5, N=1, u/B=0.25$   
 Fig. 10. Variations of  $WDR-b/B$  for  $L/B=5, u/B=0.25, N=1$

۹-۳-۳- تأثیر عمق و فاصله قائم ژئوگریدها بر عملکرد دیوار حائل در شرایط خاک دو لایه  
 ۹-۳-۱- تحلیل اثر عمق و فاصله قائم ژئوگریدها بر نسبت ظرفیت باربری پی نواری

با توجه به اینکه ژئوگریدها در نسبت عمق و فواصل قائم  $0/25$  و  $0/5$  و  $0/75$  و ۱ درون نمونه ها قرار گرفته است؛ جهت ارزیابی اثر آن، نتایج آن به طور مختصر در اینجا ذکر می گردد.

در نمودار شکل ۱۱، اثر تغییر عمق و فاصله قائم ژئوگریدها در روی نسبت ظرفیت باربری پی نواری ضمن منظور کردن عمق لایه بندی مشاهده می شود. در این راستا، فاصله قائم و عمق ژئوگریدها متغیر بوده و سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شده است.

نمودار شکل ۱۱، نسبت ظرفیت باربری پی نواری برای حالت تک لایه ژئوگرید که عمق لایه بندی خاک در آن  $B/5$  و طول ژئوگرید  $5B$  می باشد را نشان می دهد. طبق نتایج حاصله از این نمودار نسبت ظرفیت باربری پی نواری در حالت  $b/B=1$  در نسبت عمق ژئوگرید  $0/25$  و  $0/5$  و  $0/75$  و ۱ به ترتیب  $13\%$ ،  $24\%$ ،  $31\%$  و  $30\%$  در حالت  $b/B=2$  در نسبت عمق ژئوگرید  $0/25$  و  $0/5$  و  $0/75$  و ۱ به ترتیب  $38\%$ ،  $89\%$ ،  $131\%$  و  $126\%$  و در نهایت در حالت  $b/B=3$  در نسبت عمق ژئوگرید  $0/25$  و  $0/5$  و  $0/75$  و ۱ به ترتیب  $83\%$ ،  $141\%$ ،  $137\%$  و  $134\%$  نسبت به حالت غیر مسلح افزایش یافته است.

در فاصله های نزدیک تر پی به سطح دیوار حائل  $b/B=1$ ، نسبت ظرفیت باربری ها مقادیر بیشتری نسبت به فاصله های دورتر  $b/B=2, b/B=3$  دارد.



نواری ضمن منظور کردن عمق لایه‌بندی خاک نشان داده شده است. در این راستا، طول ژئوگرید متغیر بوده و سایر پارامترها از جمله عمق قرارگیری لایه ژئوگرید، فاصله پی نواری از دیوار حائل و تعداد مسلح کننده‌ها ثابت در نظر گرفته شده است.

نمودار شکل ۱۳، ظرفیت باربری پی نواری برای حالت تک لایه ژئوگرید که عمق لایه‌بندی خاک در آن  $B$  و فاصله لایه پی نواری از دیوار حائل  $B$  می‌باشد را نشان می‌دهد. طبق نتایج حاصل از این نمودار ظرفیت باربری پی نواری در حالت  $U/B=0.25$  در نسبت طول ژئوگرید ۳ و ۴ و ۵ به ترتیب ۳۵۰٪، ۳۳۲٪ و ۳۱۳٪ و در حالت  $U/B=0.5$  در نسبت طول ژئوگرید ۳ و ۴ و ۵ به ترتیب ۱۸۵٪، ۲۱۷٪ و ۲۵۸٪ و در حالت  $U/B=0.75$  در نسبت طول ژئوگرید ۳ و ۴ و ۵ به ترتیب ۸۴٪، ۲۱۲٪ و ۲۶۸٪ و در نهایت در حالت  $U/B=1$  در نسبت طول ژئوگرید ۳ و ۴ و ۵ به ترتیب ۲۰۷٪، ۲۹۵٪ و ۲۸۳٪ نسبت به حالت غیر مسلح افزایش یافته است.

همانطور که در این نمودار مشاهده می‌شود واضح است که عملکرد مسلح کننده با افزایش در طول آن به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد. در مسلح سازی با ژئوگرید، این مسلح کننده به شکل یک دال گسترده عمل می‌کند و به همین دلیل می‌تواند از توسعه سطح گسیختگی جلوگیری کند و بارهای وارده را در یک ناحیه گسترده تر باز توزیع کند. در واقع زمانی که طول ژئوگرید بیشتر از یک حد معین افزایش می‌یابد، می‌تواند همه سطوح گسیختگی بالقوه را قطع کند و از بالادگی خاک اطراف پی، جلوگیری کند. طبق مطالعات انجام شده الگوهای گسیختگی نشان می‌دهد دورترین سطح گسیختگی در فاصله‌ای نزدیک به  $2B$  (دو برابر عرض پی) از خط مرکزی پی در هر طرف ایجاد می‌شود؛ بنابراین هنگامی که لایه ژئوگرید، عرضی در حدود  $4B$  (چهار برابر عرض پی)، داشته باشد به طور کامل ناحیه گسیختگی خاک را در بر می‌گیرد. افزایش طول ژئوگرید بیشتر از این مقدار تنها منجر به کمی بهبود ظرفیت باربری می‌شود که این نیز به علت عوامل ثانویه مانند لنگرهای دو انتهای ژئوگرید است.

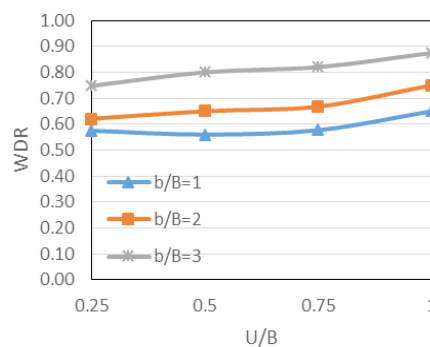
مشاهده روند نمودار نسبت ظرفیت باربری، نشان می‌دهد نرخ افزایش ظرفیت باربری با افزایش طول ژئوگرید از حالت  $L/B=4$  به بعد، کاهش یافته است. ضمناً در بستر مسلح شده توسط ژئوگرید با کمترین طول در این پژوهش یعنی در حالتی که  $L/B=3$  می‌باشد نیز عملکرد قابل توجهی به دست آمده است. افزایش تأثیر استفاده از ژئوگرید در نشست‌های زیاد در نمودارهای نسبت ظرفیت باربری کاملاً مشهود است؛ بطوری که هر چقدر در آزمایش‌ها، نشست اعمال شده افزایش یافته است، فاصله بین نمودارها نیز روند افزایشی دارد.

آن بر تغییر مکان دیوار حائل خاک مسلح، نتایج آن به طور مختصر در اینجا ذکر می‌گردد.

در نمودار شکل ۱۲، اثر تغییر عمق و فاصله قائم ژئوگریدها بر روی تغییر مکان دیوار مشاهده می‌شود. در هر مورد فاصله قائم و عمق ژئوگریدها متغیر بوده و سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شده است.

نمودار شکل ۱۲، تغییر مکان دیوار حائل در عمق‌های مختلف برای حالت تک لایه ژئوگرید که عمق لایه‌بندی و طول ژئوگرید به ترتیب در آن  $B/5$  و  $5B$  می‌باشد را نمایش می‌دهد. طبق نتایج حاصله از این نمودار تغییر مکان در حالت  $b/B=1$  در نسبت عمق ژئوگرید  $0.25$  و  $0.5$  و  $0.75$  و  $1$  به ترتیب ۴۳٪، ۴۶٪، ۴۶٪ و ۴۶٪ در حالت  $b/B=2$  در نسبت عمق ژئوگرید  $0.25$  و  $0.5$  و  $0.75$  و  $1$  به ترتیب ۳۸٪، ۴۴٪، ۳۳٪ و ۲۸٪ و در نهایت در حالت  $b/B=3$  در نسبت عمق ژئوگرید  $0.25$  و  $0.5$  و  $0.75$  و  $1$  به ترتیب ۲۹٪، ۱۹٪، ۲۵٪ و ۱۶٪ نسبت به حالت غیر مسلح کاهش یافته است.

افزایش عمق قرارگیری ژئوگرید درون خاکریز، باعث می‌گردد که این المان مسلح کننده کارایی مطلوبش را از دست داده و تأثیر چندانی در کاهش تغییر مکان جانبی دیوار حائل نداشته باشد. مطابق شکل، روند نمودارها به گونه‌ای است که کمترین مقادیر برای تغییر مکان دیوار حائل در  $U/B=0.25$  اتفاق افتاده است و همگی نمودارها در این نقطه همگرا شده‌اند. با توجه به نکات فوق می‌توان نسبت عمق  $0.25$  را به عنوان مقدار بهینه استخراج کرد.



شکل ۱۲: نمودار  $WDR-U/B$  برای حالت  $H/B=0.5, N=1, L/B=5$

Fig. 12. Variations of WDR-u/B for  $H/B=0.5, L/B=5, N=1$

۹-۴- تأثیر طول ژئوگرید بر عملکرد دیوار حائل در شرایط خاک دو لایه  
 ۹-۴-۱- تحلیل اثر طول ژئوگرید بر نسبت ظرفیت باربری پی نواری  
 با برنامه‌ریزی‌های به عمل آمده، از مسلح کننده‌ها در طول‌های  $L/B=4$  و  $L/B=5$  استفاده گردید. جهت ارزیابی هر کدام از این حالات به طور مختصر نتایج حاصل مورد بررسی قرار می‌گیرد.  
 در نمودار شکل ۱۳، اثر تغییر طول ژئوگرید در روی ظرفیت باربری پی

عمق قرارگیری ژئوگرید گوه گسیختگی زیر پی، در خاک بالای مسلح کننده گسترش می‌یابد که در این حالت تقریباً ژئوگرید هیچ اثر مثبتی بر ظرفیت باربری پی سطحی ندارد. بنابراین برای جلوگیری از وقوع این حالت گسیختگی، باید ژئوگرید را در عمقی مناسب نسبت به کف پی قرار داد. نکته قابل توجه دیگر در تفسیر این نمودارها، افزایش تأثیر استفاده از ژئوگرید در نشست‌های زیاد می‌باشد. بطوریکه هر چقدر در آزمایش‌ها، نشست اعمال شده افزایش یافته است. فاصله بین نمودارها نیز روند افزایشی دارد. این بدان معنی است که تسلیح خاک توسط مسلح کننده ژئوگرید در نشست‌های کم تأثیرگذاری کمتری دارد.

نقطه ماکزیمم نمودار BCR در عمق  $B/25$  ملاحظه می‌شود، که دلیل این امر استفاده حداکثری از ظرفیت بالقوه لایه ژئوگرید در عمق قرارگیری نزدیک به پی است. بنابراین می‌توان این عمق را به عنوان عمق بهینه استفاده از ژئوگرید ضمن منظور کردن طول‌های متفاوت ژئوگرید در خاک ماسه‌ای، در این پژوهش معرفی کرد. طبق نکات ذکر شده در تحلیل نمودارهای فوق می‌توان گفت در چنین عمقی افزایش طول ژئوگرید بیشترین تأثیر را بر روی افزایش ظرفیت باربری دارد. بنابراین بیشترین مقدار BCR در عمق  $U/B=0.25$  به دست آمده است که به عنوان مثال این عدد در شکل ۱۳،  $3/70$  می‌باشد.

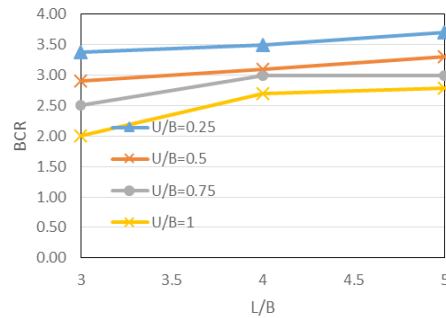
۹-۴-۲- تحلیل اثر طول ژئوگرید بر تغییر مکان دیوار حائل  
با توجه به اینکه ژئوگرید در  $L/B=3$  و  $L/B=4$  و  $L/B=5$  در بستر خاک قرار گرفته است؛ جهت ارزیابی اثر آن بر تغییر مکان جانبی دیوار حائل خاک مسلح، نتایج آن به طور مختصر در اینجا ذکر می‌گردد.

در نمودار شکل ۱۴، اثر تغییر طول ژئوگرید بر روی تغییر مکان دیوار مشاهده می‌شود. در این راستا، طول ژئوگرید متغیر بوده و سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شده است.

نمودار شکل ۱۴، تغییر مکان جانبی دیوار حائل برای حالت تک لایه ژئوگرید که عمق لایه‌بندی و فاصله پی نواری از لبه دیوار حائل به ترتیب در آن  $B/5$  و  $B$  می‌باشد را نمایش می‌دهد. طبق نتایج حاصله از این نمودار تغییر مکان جانبی دیوار در حالت  $U/B=0.25$  در نسبت طول ژئوگرید ۳ و ۴ و ۵ به ترتیب ۵۵٪، ۶۶٪ و ۴۹٪ در حالت  $U/B=0.5$  در نسبت طول ژئوگرید ۳ و ۴ و ۵ به ترتیب ۵۲٪، ۶۰٪ و ۴۷٪ در حالت  $U/B=0.75$  در نسبت طول ژئوگرید ۳ و ۴ و ۵ به ترتیب ۲۷٪، ۴۹٪ و ۵۹٪ در حالت  $U/B=1$  در نسبت طول ژئوگرید ۳ و ۴ و ۵ به ترتیب ۳۴٪، ۵۱٪ و ۵۴٪ نسبت به حالت غیر مسلح کاهش یافته است.

با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که افزایش طول مسلح کننده، موجب کاهش تغییر مکان جانبی دیوار گردیده است.

مشاهده روند نمودار تغییر مکان جانبی سطح دیوار، نشان می‌دهد نرخ کاهش تغییر مکان جانبی دیوار با افزایش طول ژئوگرید از حالت  $L/B=4$

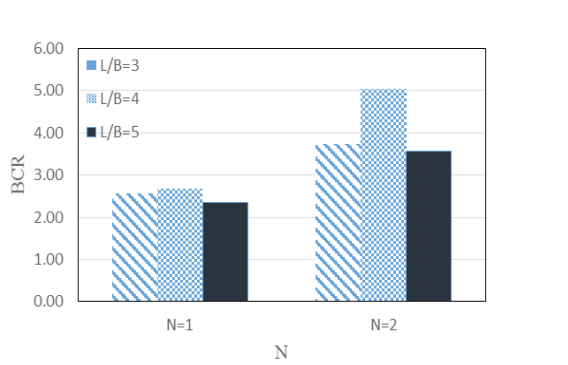


شکل ۱۳: نمودار BCR-L/B در حالت  $N=1, b/B=1, H/B=1$

Fig. 13. Variations of BCR-L/B for  $H/B=1, b/B=1, N=1$

همانطور که در نمودار نسبت ظرفیت باربری نیز مشاهده شد، در تمامی حالات آزمایش با افزایش طول ژئوگرید میزان ظرفیت باربری خاک افزایش یافته است، اگرچه در کمترین عرض استفاده شده ژئوگرید نیز ظرفیت باربری خاک مسلح نسبت به خاک غیر مسلح بهبود یافته است، اما هدف بهینه شدن استفاده از این مسلح کننده در خاک ماسه‌ای می‌باشد. با افزایش طول مسلح کننده‌ها از  $L/B=3$  تا  $L/B=5$  روند افزایش مقادیر BCR، به طور قابل توجهی مشاهده می‌شود. این افزایش در  $L/B=5$  به یک مقدار بیشینه منتهی شده است. در این حالت میزان ظرفیت باربری در حدود ۲ تا ۳ برابر نسبت به حالت‌های پیشین افزایش داشته است. نرخ افزایش ظرفیت باربری با افزایش عرض ژئوگرید از حالت  $L/B=4$  به بعد، کاهش یافته است. با توجه به این نتایج و علل ایجاد آن که توضیح داده شد، در این تحقیق عرض ژئوگرید برابر با  $4B$  را می‌توان به عنوان عرض موثر پذیرفت؛ زیرا ظرفیت باربری توسط خاک حاوی این عرض مسلح کننده به میزان محسوسی افزایش یافته است و به دلیل مسائل اقتصادی و کند شدن روند افزایش ظرفیت باربری در عرض‌های بالاتر، توجیهی برای افزایش بیشتر عرض ژئوسل وجود ندارد. با توجه به نمودار، می‌توان دریافت که بعد از یک مقدار معین در افزایش عمق ماسه با افزایش طول مسلح کننده‌ها، بهبود بیشتر در ظرفیت باربری قابل اغماض می‌باشد و افزایش طول مسلح کننده‌ها ضمن افزایش عمق لایه‌بندی منجر به کمی بهبود در ظرفیت باربری می‌شود. در این تحقیق، عمق لایه‌بندی  $H/B=1$  را به دلیل افزایش ظرفیت باربری در نمودار به میزان  $3/70$ ، را می‌توان بهینه‌ترین مقدار در افزایش ظرفیت باربری دانست. در فاصله‌های نزدیک‌تر به سطح پی، نسبت ظرفیت باربری، مقادیر بیشتری را نسبت به فاصله‌های دورتر از سطح پی دارد. هرچقدر عمق قرارگیری لایه ژئوگرید بیشتر شود، عملکرد ژئوگرید در بهبود خاک کاهش می‌یابد؛ چرا که در این صورت خاک بین پی و لایه ژئوگرید فشرده می‌شود و نشست‌های بزرگتری رخ می‌دهد. همچنین ناحیه خاک روی ژئوگرید تا سطح پی به راحتی می‌تواند گسترش جانبی داشته باشد.

چنانچه عمق قراردادن ژئوگرید خیلی بیشتر شود (بیشتر از  $U/B=1$ )، خاک بالای لایه ژئوگرید دچار گسیختگی برشی خواهد شد، چون با افزایش



شکل ۱۵: نمودار BCR-N در حالت  $H/B=0.5, b/B=1, U/B=0.2$

Fig. 15. Variations of BCR-N for  $u/B=0.2, b/B=1, H/B=0.5$

به وضوح در این نمودارها، افزایش نسبت ظرفیت باربری پی نواری به ازای افزایش تعداد لایه‌های مسلح کننده‌ها دیده می‌شود. چرا که در این حالت وقتی تعداد لایه‌های مسلح کننده‌ها افزایش می‌یابد، اندرکنش بین خاک و مسلح کننده به صورت انتقال ناحیه ی برش خورده به قسمت پایین تر و عمیق تر و افزایش ناحیه‌ی گسیختگی توسط لایه‌های مسلح کننده در عمق، صورت می‌گیرد.

مطابق آنچه که در نمودار نشان داده شده است، در حالتی که عمق لایه ماسه  $B/5$  می‌باشد، نسبت ظرفیت باربری مقادیر بیشتری را در مقایسه با اعماق دیگر  $B$  و  $B/5$ ، نشان می‌دهد. هر چقدر عمق لایه‌بندی ماسه بیشتر شود عملکرد افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید در بهبود خاک کاهش می‌یابد؛ چرا که در این صورت خاک بین لایه پی و لایه ژئوگرید فشرده می‌شود و نشست‌های بزرگ تری رخ می‌دهد.

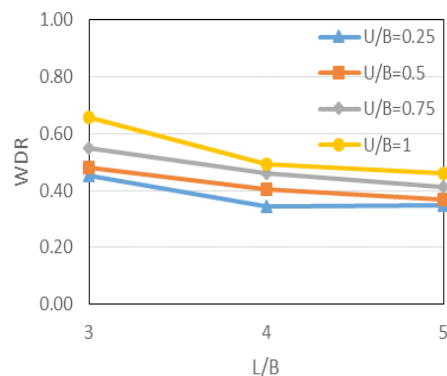
چنانچه عمق لایه‌بندی ماسه بیشتر شود خاک بالای لایه ژئوگرید دچار گسیختگی برشی خواهد شد، چون با افزایش عمق لایه‌بندی گوه گسیختگی زیر پی، در ماسه بالای مسلح کننده گسترش می‌یابد که در این حالت تقریباً ژئوگرید هیچ اثر مثبتی بر نسبت ظرفیت باربری ندارد. بنابراین برای جلوگیری از وقوع این حالت گسیختگی، باید عمق لایه‌بندی و قرارگیری ژئوگرید، در عمقی مناسب اختیار گردد.

نقطه ماکزیمم نمودار فوق در عمق لایه‌بندی  $B/5$  با مقدار  $5/0.5$ ، اتفاق افتاده است. بنابراین این عمق را می‌توان به عنوان عمقی بهینه ضمن منظور کردن افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید در امر مسلح سازی دانست.

با دقت در مقادیر BCR در نمودار فوق می‌توان روند کاهشی این نسبت را در مقادیر بزرگ تر طول مسلح کننده‌ها  $B/5$  مشاهده کرد که ناشی از عدم تأثیر افزایش طول مسلح کننده‌ها در نسبت ظرفیت باربری است. طول  $4B$  را می‌توان یک مقدار بهینه در بین حالت‌های در نظر گرفته شده در این پژوهش از لحاظ عملکرد برای خاک ضمن منظور کردن افزایش در تعداد لایه‌های مسلح کننده، دانست.

دست یافتن به یک مقدار بهینه نیاز به انجام آزمایش‌های بیشتر با تعداد متفاوت از لایه‌های ژئوگرید دارد، با این وجود بر اساس شرایط موجود در

به بعد، کاهش یافته است و به دلیل مسائل اقتصادی و کند شدن روند تغییرات در تغییر مکان دیوار در طول بالاتر، توجیهی برای افزایش بیشتر طول ژئوگرید وجود ندارد. در این پژوهش با در نظر گرفتن شرایط موجود، نسبت طول ۴ به عنوان مقدار بهینه از نقطه نظر تغییر مکان جانبی دیوار حائل پیشنهاد می‌گردد.



شکل ۱۴: نمودار WDR-L/B برای حالت  $b/B=1, N=1, H/B=1.5$

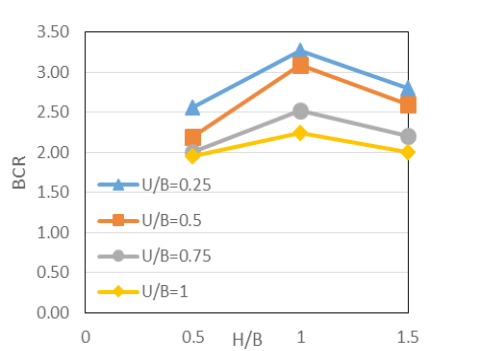
Fig. 14. Variations of WDR-L/B for  $H/B=1.5, b/B=1, N=1$

۹-۵- تأثیر تعداد لایه ژئوگرید بر عملکرد دیوار حائل در شرایط خاک دو لایه

۹-۵-۱- تحلیل اثر تعداد لایه ژئوگرید بر نسبت ظرفیت باربری پی نواری با برنامه‌ریزی‌های به عمل آمده، ژئوگرید به تعداد  $N=1$  و  $N=2$  لایه جهت مسلح سازی، مورد بررسی قرار گرفته است. جهت ارزیابی هر کدام از این حالات به طور مختصر نتایج حاصل مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نمودار شکل ۱۵، اثر تغییر تعداد لایه‌های ژئوگرید بر روی ظرفیت باربری پی نواری ضمن منظور کردن عمق لایه‌بندی ماسه، نشان داده شده است. در این راستا، تعداد لایه‌های ژئوگرید متغیر بوده و سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شده است.

نمودار شکل ۱۵، ظرفیت باربری پی نواری برای حالتی که فاصله پی از لبه دیوار برابر عرض پی، عمق قرار گیری لایه ژئوگرید در آن  $B/2.5$  و عمق لایه‌بندی  $B/5$  می‌باشد را نشان می‌دهد. طبق نتایج حاصل از این نمودار ظرفیت باربری پی نواری در حالت  $L/B=3$  در ۱ و ۲ لایه ژئوگرید به ترتیب  $156\%$  و  $274\%$  و در حالت  $L/B=4$  در ۱ و ۲ لایه ژئوگرید به ترتیب  $167\%$  و  $405\%$  و در نهایت در حالت  $L/B=4$  در ۱ و ۲ لایه ژئوگرید به ترتیب  $84\%$  و  $256\%$  نسبت به حالت غیر مسلح افزایش یافته است.

دانه)، در روی ظرفیت باربری پی نواری مشاهده می‌شود. در این راستا، عمق لایه‌بندی متغیر بوده و سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شده است. نمودار شکل ۱۷، ظرفیت باربری پی نواری برای حالت تک لایه ژئوگرید که فاصله پی نواری از لبه دیوار برابر عرض پی می‌باشد را نشان می‌دهد. طبق نتایج حاصل از این نمودار ظرفیت باربری پی نواری در حالت  $L/B=3$  و  $B=3$  و نسبت عمق ژئوگرید  $0.25$  در نسبت عمق لایه‌بندی  $0.5$  و  $1$  و  $1/5$  به ترتیب  $156$  و  $228$  و  $180$  و نسبت عمق ژئوگرید  $0.5$  در نسبت عمق لایه‌بندی  $0.5$  و  $1$  و  $1/5$  به ترتیب  $200$  و  $108$  و  $217$  و نسبت عمق ژئوگرید  $0.75$  در نسبت عمق لایه‌بندی  $0.5$  و  $1$  و  $1/5$  به ترتیب  $188$  و  $152$  و  $120$  و در نهایت در نسبت عمق ژئوگرید  $1$  در نسبت عمق لایه‌بندی  $0.5$  و  $1$  و  $1/5$  به ترتیب  $157$  و  $124$  و  $150$  نسبت به حالت غیر مسلح افزایش یافته است.



شکل ۱۷: نمودار BCR-H/B در حالت  $L/B=3, b/B=1, N=1$

Fig. 17. Variations of BCR-H/B for  $N=1, b/B=1, L/B=3$

مطابق آنچه در نمودار فوق نشان داده شده است، در تمامی مدل‌های مورد آزمایش در نسبت عمق لایه‌بندی  $1B$ ، نسبت ظرفیت باربری، مقادیر بیشتری را نشان می‌دهد. این بدان معناست که استفاده از لایه ژئوگرید تا عمقی برابر با  $1B$  سبب افزایش حجم گسیختگی خواهد شد و هرچقدر عمق لایه‌بندی از مقدار  $1B$  بیشتر شود، عملکرد ژئوگرید در بهبود خاک کاهش می‌یابد چرا که در این صورت خاک بین پی و لایه ژئوگرید فشرده می‌شود و نشست‌های بزرگ تری رخ می‌دهد. همچنین ناحیه خاک روی ژئوگرید تا سطح پی به راحتی می‌تواند گسترش جانبی داشته باشد.

چنانچه عمق لایه‌بندی بیشتر شود، خاک بالای این لایه دچار گسیختگی برشی خواهد شد، چون با افزایش عمق، گوه گسیختگی زیر پی، در خاک بالای لایه ژئوگرید گسترش می‌یابد که در این حالت عملاً ژئوگرید تأثیر بسزایی بر بهبود عملکرد خاک ندارد. بنابراین برای جلوگیری از وقوع این حالت گسیختگی، در امر مسلح سازی باید عمق لایه‌بندی مساوی با عرض پی نواری در نظر گرفته شود. همانطور که مشاهده می‌شود در عمق لایه‌بندی  $H/B=1$ ، نسبت ظرفیت باربری مقادیر بیشتری را نشان می‌دهد؛ که این مقدار در شکل، به مقدار ماکزیمم  $3/28$  رسیده است. دلیل ایجاد این

این پژوهش تعداد ۲ لایه ژئوگرید به عنوان مقدار بهینه پیشنهاد می‌گردد.

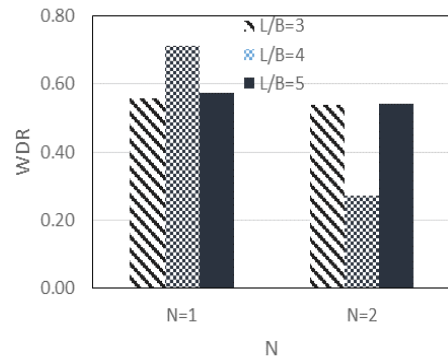
### ۹-۵-۲- تحلیل اثر تعداد لایه ژئوگرید بر تغییر مکان دیوار حائل

با توجه به اینکه ۱ و ۲ لایه ژئوگرید ( $N=1$  و  $N=2$ )، درون نمونه‌ها قرار گرفته است؛ جهت ارزیابی اثر آن بر تغییر مکان جانبی دیوار حائل خاک مسلح، نتایج آن به طور مختصر در اینجا ذکر می‌گردد.

نمودار شکل ۱۶، اثر تغییر تعداد لایه‌های ژئوگرید بر روی تغییر مکان دیوار حائل را نشان می‌دهد. در هر مورد تعداد لایه‌های ژئوگرید متغیر بوده و سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شده است.

نمودار شکل ۱۶، تغییر مکان دیوار حائل را برای حالتی که عمق قرارگیری لایه ژئوگرید  $B/2.5$ ، عمق لایه‌بندی  $B/5$  و فاصله پی از لبه دیوار برابر عرض پی می‌باشد را نمایش می‌دهد. طبق نتایج حاصله از این نمودار تغییر مکان دیوار در حالت  $L/B=3$  در ۱ و ۲ لایه ژئوگرید به ترتیب  $44\%$  و  $46\%$  و در حالت  $L/B=4$  در ۱ و ۲ لایه ژئوگرید به ترتیب  $29\%$  و  $73\%$  و در نهایت در حالت  $L/B=5$  در ۱ و ۲ لایه ژئوگرید به ترتیب  $43\%$  و  $46\%$  نسبت به حالت غیر مسلح کاهش یافته است.

مطابق آنچه که در نمودار نشان داده شده است واضح است که عملکرد مسلح کننده‌ها با افزایش در تعداد آن‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است. افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید در مسلح سازی سبب انتقال ناحیه‌ی گسیختگی به اعماق پایین تر می‌شود. انتقال سطح گسیختگی به سمت عمق به جای انتقال آن به سطح دیوار، سبب کاهش تغییر مکان جانبی سطح دیوار می‌شود.



شکل ۱۶: نمودار WDR-N برای حالت  $b/B=1, H/B=0.5, U/B=0.25$

Fig. 16. Variations of WDR-N for  $u/B=0.25, b/B=1, H/B=0.5$

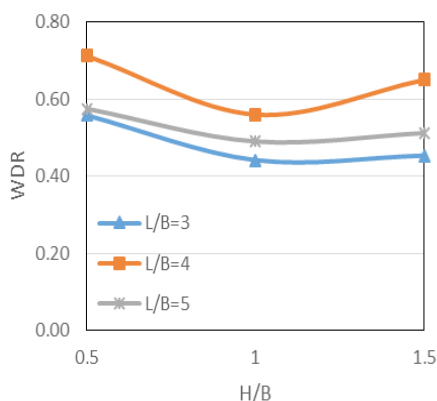
۹-۶- تأثیر عمق لایه‌بندی بر عملکرد دیوار حائل در شرایط خاک دو لایه

۹-۶-۱- تحلیل اثر عمق لایه‌بندی بر نسبت ظرفیت باربری پی نواری با توجه به اینکه خاک درشت دانه در نسبت عمق  $0.5$  و  $1$  و  $1/5$  برنامه‌ریزی گردیده است. جهت ارزیابی اثر آن در ظرفیت باربری پی نواری، نتایج حاصل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در نمودار شکل ۱۷، اثر تغییر عمق لایه‌بندی (ضخامت ماسه درشت



نقطه نظر تغییر مکان جانبی دیوار حائل پیشنهاد می‌گردد.



شکل ۱۸: نمودار WDR-H/B برای حالت  $b/B=1, N=1, u/B=0.25$

Fig. 18. Variations of WDR-H/B for  $N=1, u/B=0.25, b/B=1$

#### ۱۰- محدودیت و اثر مقیاس

بطور کلی با استفاده از مدل‌های کوچک مقیاس در بررسی‌های ژئوتکنیکی، می‌توان پارامترهای متنوع‌تری را مورد مطالعه قرار داد. این تحقیق در یک مدل کوچک شده نسبت به مدل واقعی انجام شده است و با توجه به اینکه مصالح به کار رفته نسبت به مصالح حقیقی رفتار یکسانی از خود نشان نخواهند داد، برای نتایج دقیق، نیاز به انجام آزمایش با اندازه بزرگ و مصالح واقعی است. در این تحقیق رفتار خاک خشک، مسلح کننده و دیوار انعطاف‌پذیر بررسی شده و تغییرات سختی دیوار و مسلح کننده در آن بحث نشده است لذا برای تعمیم نتایج از آزمایش‌های کوچک مقیاس به مقیاس واقعی، ضروری است که بررسی اثر مقیاس صورت گیرد. برای مطالعه اثر مقیاس از مدل‌سازی عددی در نرم افزار اجزا محدود PLAXIS استفاده شده است.

بطور کلی یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیر گذار بر نتایج مدل‌سازی، سختی محوری ژئوگرید در مطالعات بزرگ مقیاس می‌باشد. برای به دست آوردن اثر مقیاس، مدل عددی دیوار حائل با ارتفاع ۱۰ متر و با دو مقاومت کششی مسلح کننده مختلف ( $60 \text{ kN/m}$  و  $80 \text{ kN/m}$ ) در نرم افزار PLAXIS ساخته شده است. مدل‌های بزرگ مقیاس با فرض داشتن شرایط  $U/B=0.25, L/B=4, N=1$  و در  $H/B=0.5, 1, 1.5$  در خاک مورد استفاده در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در جدول شماره نتایج بررسی مدل بزرگ مقیاس با مقاومت کششی گوناگون در کنار مدل آزمایشگاهی کوچک مقیاس با مقاومت کششی  $20 \text{ kN/m}$  آورده شده است.

نقطه ماکزیمم استفاده حداکثری از ظرفیت بالقوه لایه ژئوگرید می‌باشد، بنابراین می‌توان این عمق را به عنوان عمق بهینه لایه‌بندی معرفی کرد. نکته قابل توجه دیگر در تفسیر این نمودارها، ایجاد مقدار ماکزیمم نسبت ظرفیت باربری در نسبت عمق ژئوگرید  $0/25$  می‌باشد. به همین دلیل عمق قرارگیری ژئوگرید برابر با  $B/25$  را می‌توان به عنوان عمق مؤثر پذیرفت زیرا نسبت ظرفیت باربری توسط خاک حاوی این عمق به میزان محسوسی افزایش یافته است و به دلیل مسائل اقتصادی و کاهش نسبت ظرفیت باربری در عمق‌های بیشتر، توجیهی برای افزایش بیشتر عمق قرارگیری وجود ندارد.

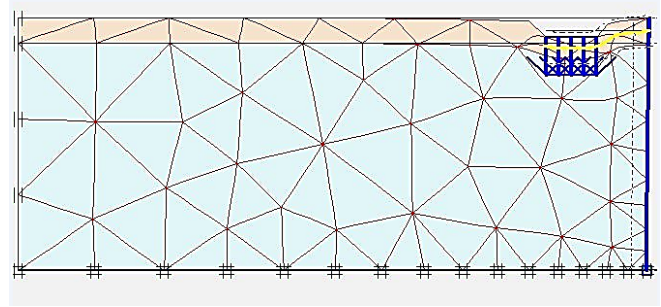
#### ۹-۶-۲- تحلیل اثر عمق لایه‌بندی بر تغییر مکان دیوار حائل

با توجه به اینکه خاک درشت دانه در ضخامت‌های  $H/B=0.5$  و  $H/B=1$  از سطح قرار گرفته است؛ جهت ارزیابی اثر آن بر تغییر مکان جانبی دیوار حائل خاک مسلح، نتایج آن به طور مختصر در اینجا ذکر می‌گردد.

در نمودار شکل ۱۸، اثر تغییر عمق لایه‌بندی بر روی تغییر مکان جانبی دیوار حائل مشاهده می‌شود. در این راستا، عمق لایه‌بندی متغیر بوده و سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شده است.

نمودار شکل ۱۸، تغییر مکان جانبی دیوار حائل را برای حالت تک لایه ژئوگرید که فاصله پی نواری از لبه دیوار و عمق قرارگیری لایه ژئوگرید به ترتیب در آن  $B$  و  $B/25$  می‌باشد را نمایش می‌دهد. طبق نتایج حاصله از این نمودار، تغییر مکان جانبی دیوار در حالت  $L/B=3$  در نسبت عمق لایه‌بندی  $0/5$  و  $1/5$  به ترتیب  $44\%$ ،  $56\%$  و  $55\%$  در حالت  $L/B=4$  در نسبت عمق لایه‌بندی  $0/5$  و  $1/5$  به ترتیب  $29\%$ ،  $57\%$  و  $66\%$  در نهایت در حالت  $L/B=5$  در نسبت عمق لایه‌بندی  $0/5$  و  $1/5$  به ترتیب  $43\%$ ،  $47\%$  و  $49\%$  نسبت به حالت غیر مسلح کاهش یافته است.

مطابق آنچه که نشان داده شده است، در تمامی حالات مورد بررسی در عمق لایه‌بندی کم‌تر ( $H/B=0.5$ )، تغییر مکان‌های دیوار مقادیر بیشتری نسبت به عمق لایه‌بندی بیشتر ( $H/B=1$  و  $H/B=1.5$ ) دارد. دلیل این امر آن است که با افزایش بیشتر در عمق لایه‌بندی، ناحیه‌ی گسیختگی به جای توسعه در عمق به سمت دیوار انتقال می‌یابد و کل سطح گسیختگی توسط ورق ژئوگرید پوشش داده نمی‌شود و در نتیجه عدم استفاده از ظرفیت ژئوگرید جهت توزیع نیروی اعمالی در این حالت، سبب می‌شود که ژئوگرید دیگر هیچ تأثیر مثبتی بر روند کاهش تغییر مکان جانبی دیوار نداشته باشد. هم‌چنین نقطه ماکزیمم تمامی حالات در نسبت عمق لایه‌بندی  $0/5$  ملاحظه می‌شود. با افزایش عمق لایه‌بندی از حالت  $B/5$  به حالت  $B$ ، تغییر مکان جانبی دیوار حائل کاهش یافته است. از این نقطه به بعد افزایش عمق لایه‌بندی نه تنها تأثیر مثبتی بر روند کاهش تغییر مکان دیوار نداشته است، بلکه سبب افزایش در این مقدار شده است. بنابراین در این پژوهش با در نظر گرفتن شرایط موجود، عمق لایه‌بندی  $1B$  به عنوان مقداری بهینه از



شکل ۱۹: مش تغییرشکل یافته در تحلیل عددی

Fig. 19. Deformed mesh in numerical analysis

جدول ۴: مقایسه نتایج تحلیل عددی بزرگ مقیاس و آزمایشگاهی کوچک مقیاس در شرایط (U/B=0.25, L/B=4, b/B=1, N=1)

Table 4. Comparison of numerical large scale results and experimental small scale model test result at N=1, b/B=1, L/B=4, u/B=0.25

مقاومت کششی ژئوگرید	BCR	BCR	BCR
	H/B=۰/۵	H/B=۱	H/B=۱/۵
۲۰	۲/۶۷	۳/۱۴	۳
۶۰	۳/۲	۳/۷	۳/۶
۸۰	۳/۸	۴/۴	۴/۳۲

نتایج بدست آمده در جدول ۴ نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت کششی مسلح کننده، نسبت ظرفیت باربری نهایی پی نواری روند افزایشی دارد، همچنین مشاهده می‌گردد که در عمق لایه‌بندی  $H/B=1$ ، نسبت ظرفیت باربری مقادیر بیشتری را نشان می‌دهد. دلیل ایجاد این نقطه ماکزیمم استفاده حداکثری از ظرفیت بالقوه ژئوگرید است که همان‌طور که از نتایج بر می‌آید می‌توان این عمق را به عنوان عمق لایه‌بندی بهینه از نتایج بزرگ مقیاس نیز استنتاج کرد.

## ۱۱- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک سری مطالعات آزمایشگاهی کوچک مقیاس برای ارزیابی عملکرد یک مدل دیوار حائل خاک مسلح تحت بار استاتیکی قائم در شرایط خاکریز لایه‌بندی شده انجام گرفته است. به جهت انجام آزمایشات تجربی از یک دستگاه بارگذاری ابداعی در آزمایشگاه استفاده گردیده است. از لحاظ تأثیر ابعاد و پارامترهای مربوط به مدل آزمایشگاهی ساخته شده شامل طول ژئوگرید، عمق قرار گیری و تعداد لایه ژئوگرید، فاصله پی نواری از دیوار و عمق لایه‌بندی خاکریز بر نتایج بدست آمده، می‌توان از لحاظ کیفی و رفتاری برای به کارگیری مسلح کننده‌ها در پشت دیوار حائل انعطاف پذیر در شرایط یادشده با کاربرد خاکریز چند لایه، نتایج زیر را بیان کرد.

۱. با قراردادن ژئوگریدها درون خاکریز، ظرفیت باربری پی نواری افزایش قابل توجهی می‌یابد.
۲. با قرار دادن ژئوگریدها درون خاکریز، تغییرمکان دیوار حائل کاهش می‌یابد.
۳. بیشترین منفعت ناشی از قراردادن ژئوگریدها در خاکریز در نسبت عمق  $۰/۲۵ (U/B=0.25)$  حاصل می‌شود. با افزایش بیشتر عمق، کل ظرفیت ژئوگرید مورد استفاده قرار نمی‌گیرد و ظرفیت باربری پی نواری کاهش و تغییرمکان دیوار افزایش می‌یابد.
۴. با افزایش طول ورق‌های ژئوگریدی، ظرفیت باربری افزایش و تغییرمکان کاهش می‌یابد، که ناشی از جلوگیری از توسعه سطح گسیختگی می‌باشد. در این پژوهش نسبت طول ژئوگرید  $L/B=4$  به عنوان مقدار بهینه برگزیده شده است. زیرا با افزایش بیشتر طول، دیگر تغییر قابل توجهی در ظرفیت باربری پی نواری و تغییرمکان دیوار حاصل نشده است.
۵. با افزایش تعداد ژئوگریدها از ۱ به ۲، ظرفیت باربری افزایش قابل توجهی یافت و از تغییرمکان دیوار نیز کاسته شد. هرچند جهت دستیابی به مقدار بهینه در این زمینه نیاز به آزمایش‌های بیشتر با تعداد مسلح کننده‌های متفاوت می‌باشد.
۶. عمق لایه‌بندی خاکریز، نسبت عمق  $H/B=1$  به عنوان مقدار موثر در نظر گرفته شده است.

## مراجع

- [1] R. N. Taylor, Modelling in ground engineering, Chapter 58 in Geotechnical Engineers Reference Book, F. G. Bell, Butterworth, London, (1987).
- [2] H. Vidal, The principle of reinforced earth, Highway Research Record, 282(1969)1-16.
- [3] S. B. Paulsen, A numerical Model for Estimating Siesmic Displacements of Reinforced Steep Slopes, M.S thesis, University of washington, 2002.
- [4] L. N. Roessing, N. Sitar, Centrifuge studies of the seismic Response of Reinforced soil slopes, Third Geotechnical Engineering and soil Dynamic Conference, Geotechnical special publication, 75 (1998). 458-468
- [5] L N. Roessig, N. Sitar, Centrifuge model studies of the seismic response of reinforced soil slopes, Proceeding of the Second Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering. University of California, Berkeley, (1999).
- [6] D.V. Talwar, Behaviour of Reinforced Earth in Retaining Structures and Shallow Foundation, Ph.D. Thesis, University of Roorkee, Roorkee, India, (1981).
- [7] I.N.A. Khan, Study of Reinforced Earth Wall and Retaining Wall With Reinforced Backfl, Ph.D. Thesis, University of Roorkee, Roorkee, India, (1991).

- [17] R. L. Santoni, J. S. Tingle, S. L. Webster, Engineering properties of sandfiber mixtures for road construction, *J. of Geotech. And Geoenviron. Engrg. ASCE*, 127(3) (2001) 258-268.
- [18] A. Sawicki, D. Lesniewska, Failure Modes and Bearing Capacity of Reinforced Soil Retaining Walls, *Geotextiles and Geomembranes*, 5 (1987) 29-44.
- [19] E. Palmeira, D. Lanz, Stresses and Deformations in Geotextile Reinforced Model Walls, *Geotextiles and Geomembranes*, 13 (1994) 331-348.
- [20] R. Karpurapu, R. Bathurst, BEHAVIOUR OF GEOSYNTHETIC REINFORCED SOIL RETAINING WALLS USING THE FINITE ELEMENT METHOD, *Computers and Geotechnics*, 17 (1995) 279-299.
- [21] C. Yoo, Laboratory investigation of bearing capacity behavior of strip footing on geogrid reinforced sand slope, *Geotextiles and Geomembranes*, 19 (2001) 279-298.
- [22] A. Shinde, J. Mandal, Behavior of Reinforced Soil Retaining Wall With Limited Fill Zone, *Geotech Geol Eng*, 25 (2007). 657-672.
- [23] G. Yang, B. Zhang, P. Lv, Q. Zhou, Behaviour of geogrid reinforced soil retaining wall with concrete-rigid facing, *Geotextiles and Geomembranes*, 27 (2009) 350-356.
- [24] B. Das, *Principles of Foundation Engineering*, Boston: Kent publishing company, 1984
- [25] M.A. Aghdami, M. Alilouei Bonab, K. Badv, investigation of geometric parameters of reinforcing materials on bearing capacity and stability of retaining walls, 5th national congress on civil engineering, Mashhad, Iran, 2010, (In Persion)
- [8] S. Saran, K.G. Garg, R.K. Bhandari, Retaining wall with reinforced cohesionless backfill, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 118(12)(1992) 1869-1888 .
- [9] K.G. Garg, S. Saran, Effective placement of reinforcement to reduce lateral earth pressure, *Indian Geotechnical Journal*, 27(4) (1997) 353-376.
- [10] K.G. Garg, C. Ramesh, S. Chandra, Z. Ahmad, Performance of instrumented wall retaining reinforced earth fill, *Indian Geotechnical Journal*, 32(4) (2002) 364-381.
- [11] S. Mittal, K.G. Garg, S. Saran, Analysis and design of retaining wall having reinforced cohesive frictional backfill, *Geotechnical and Geological Engineering*, 24(3) (2006) 499-522.
- [12] A.L. Shinde, J.N. Mandal, Behavior of reinforced soil retaining wall with limited fill zone parameter, *Geotechnical and Geological Engineering*, 25 (2007) 657-672.
- [13] R. L. Michalowski, A. G. Zhao, Failure of fiber-reinforced granular soils. *J.of Geotech. Engrg. ASCE*, 122(3) (1996) 226-234.
- [14] M.I.M. Pinto, Model Studies of Fabric-Reinforced Brick-Faced Earth-Retaining Walls, Ph.D. Thesis, University of Leeds, Leeds, United Kingdom, (1992). 316-317
- [15] M. H. Maher, D. H. Gray, Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers, *Jornal of Geotech Eng. ASCE*, 116(11) (1990) 1661-1677.
- [16] H. C. Benson, M. V. Khire, Reinforced sand with strips of reclaimed highdensity polyethylene, *J.of Geotech. Engrg. ASCE*, 120(5) (1994). 838-855.

Please cite this article using:

A. Shalchi, V. Rostami, Experimental Investigation of Bearing Capacity of Strip Footing Rest on Layered Soils Next to the Geogird Reinforced Retaining Walls, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(1) (2018) 211-226.

DOI: 10.22060/ceej.2017.11883.5099

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



