

مطالعه دو بعدی آزمایشگاهی و تحلیلی رفتار مسلح کننده در خاکریزهای متکی بر شمع

محمد فخریان نژاد^۱، سید حمید لاجوردی^{۲*}، سوزان جی.ام. ون اکلن^۳، آرش نیری^۴

۱- گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران، m92fakhrian@iau.ac.ir

۲- گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران، Sh.l aj evardi @au.ac.i r

۳- گروه مهندسی زئوتکنیک، مؤسسه تحقیقاتی دلتارس، دلفت، هلند، Suzanne.vanEekelen@Deltares.nl

۴- گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران، Arash.nayeri@gmail.com

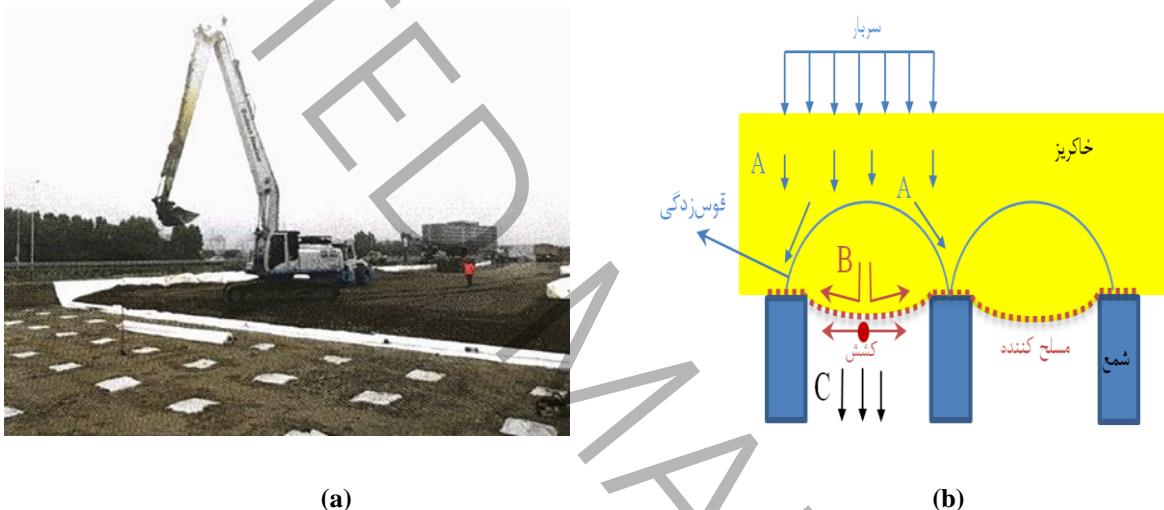
چکیده

یکی از روش‌های بهسازی خاکنرم استفاده از خاکریز به همراه مسلح کننده ژئوسینتیکی که بر روی شمع‌ها اجرا می‌شوند، می‌باشد. این سیستم خاکریز متکی بر شمع نام دارد. هدف از طراحی این سیستم انتقال بار بیشتر به شمع‌ها از طریق خاکریز و مسلح کننده می‌باشد. به دلیل تشکیل پدیده قوس‌زدگی در خاکریز، قسمتی از سربار(A) به طور مستقیم به سمت شمع‌ها منتقل می‌شود که باعث کاهش قسمت سربار باقی مانده(B) اعمال شده بر روی مسلح کننده بین شمع‌ها می‌گردد. یکی از اهداف آیین‌نامه‌های طراحی خاکریز متکی بر شمع آن است که مسلح کننده با نشست کمتر بتواند بار بیشتری را به شمع‌ها منتقل کند. در این مقاله ابتدا آزمایش‌های دوبعدی با استفاده از میله‌های صلب فلزی به عنوان خاکریز با رفتار دو بعدی، انجام می‌شود. سپس برای تغییر شکل مسلح کننده بدست آمده از آزمایش‌ها، محاسبه‌های تحلیلی انجام می‌شود. دستگاه آزمایش به گونه‌ای طراحی و ساخته شده است که امکان اندازه‌گیری جدگانه مقادیر A و B را فراهم شود. بررسی‌ها روی متغیرهای ارتفاع خاکریز و تعداد رشته‌های مسلح کننده نشان دادنکه با افزایش ۴ برابری ارتفاع خاکریز به دلیل تشکیل قوس پایدارتر و افزایش تجمع توزیع بار در نزدیکی شمع‌ها، مسلح کننده قادر است با یک نشست ثابت تا حد اکثر ۳/۷ برابر بار بیشتری را به شمع‌ها منتقل کند، در حالی که با سه برابر شدن تعداد رشته‌های مسلح کننده، به ازای یک نشست ثابت مسلح کننده قادر خواهد بود حد اکثر ۱/۷۸ برابر بار منتقل شده به شمع‌ها را افزایش دهد.

کلمات کلیدی

خاکریز متکی بر شمع، مسلح کننده، ارتفاع خاکریز، توزیع بار، قوس‌زدگی

یکی از راهکارهای بهبود خاک نرم، استفاده از یک مسلح کننده ژئوسینتیکی و خاکریز متکی به شمع است [۱]. این سیستم از شمع‌ها با چیدمان مناسب، سپس قرار دادن مسلح کننده روی شمع‌ها و خاکریزی روی مسلح کننده اجرا می‌شود (شکل-a) که هدف کاهش سربار وارد به خاک نرم بستر توسط انتقال بخش بزرگی از سربار و وزن خاکریز به شمع‌ها است. انتقال بار به سمت شمع‌ها به دلیل تشکیل پدیده قوس‌زدگی^۱، افزایش می‌یابد. پدیده قوس‌زدگی وقتی اتفاق می‌افتد که اختلاف نشست در خاکریز رخ دهد. در مسلح کننده ژئوسینتیکی و خاکریز متکی بر شمع، وقتی قوس‌زدگی اتفاق می‌افتد که ژئوسینتیک در محدوده بین شمع‌ها تغییر شکل دهد؛ به دلیل تشکیل پدیده قوس‌زدگی بخش بزرگی از بار، به طور مستقیم به طرف شمع‌ها منتقل می‌شود. این بخش، بار A نامیده می‌شود [۲]. سهم بار باقی‌مانده روی مسلح کننده ژئوسینتیکی بین شمع‌ها توزیع می‌شود. بخشی از این بار باقی‌مانده، توسط کشش مسلح کننده به سمت شمع‌ها منتقل می‌شود. اگر زیر مسلح کننده، بستر خاکی وجود داشته باشد، قسمتی از مقدار B را حمل کند. این قسمت، بار C نامیده می‌شود؛ با این حال، این مقاله وضعیتی را ارائه می‌دهد که خاک بستر آنقدر نرم است که می‌توان از سهم بار بخش C صرفه‌نظر کرد (شکل-b).



شکل ۱. خاکریز متکی بر شمع (a) نمونه پروژه در حال اجرا از خاکریز متکی بر شمع (b) توزیع سربار و وزن خاک به شمع‌ها [۳, ۲]

قوس‌زدگی، در خاکریز، عامل اصلی توزیع بار در تراز سطح شمع می‌باشد. اختلاف جابجایی در خاکریز بین و بالای شمع‌ها، نیروی برشی در خاکریز فعال می‌کند که در مقابل حرکت خاکریز مقاومت می‌کند و این فرآیند تشکیل قوس در خاک و تمرکز بار روی شمع‌ها را افزایش می‌دهد [۱, ۴]. عوامل مختلفی بر تشکیل قوس‌زدگی و توزیع سربار به قسمت‌های A,B,(C) تاثیرگذار است. عواملی شامل هندسه و کیفیت خاکریز، تثبیت بستر خاکی، سختی و تعداد لایه‌های مسلح کننده ژئوسینتیکی و نوع سربار وارد شده می‌توانند در انتقال بار موثر باشند [۱]. افزایش زاویه اصطکاک داخلی انتقال بار توسط قوس‌زدگی را افزایش می‌دهد [۵-۷]. پژوهش‌های صورت گرفته بر مبنای مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی سه‌بعدی، نشان دادند که افزایش سختی مسلح کننده، سهم بار منتقل شده به شمع (A+B) را افزایش می‌دهد [۸]. همچنین انتقال بار روی شمع‌ها به هندسه مدل همچون ارتفاع خاکریز و بالا بودن نرخ پوشش شمع (A+B) را افزایش می‌دهد [۸]. مساحت سر شمع به کل مساحت بستر خاک نرم در این مقاله a/s تعریف می‌شود) وابسته است. وجود مسلح کننده با سختی مناسب، تمرکز بار روی شمع را افزایش می‌دهد و به همان مقدار از بار روی خاک نرم بین دو شمع (بار بخش C) کم می‌شود [۲, ۸-۱۵]. مدل سازی‌های عددی نشان دادند که مسلح کننده باعث افزایش انتقال بار به شمع و پایدار ماندن قوس در خاکریز می‌شود [۱۵-۱۷]. پژوهش‌های انجام شده با مدل آزمایشگاهی گریز از مرکز نشان دادند که کاهش فاصله شمع‌ها ($s-a$) باعث کاهش نشست سطحی

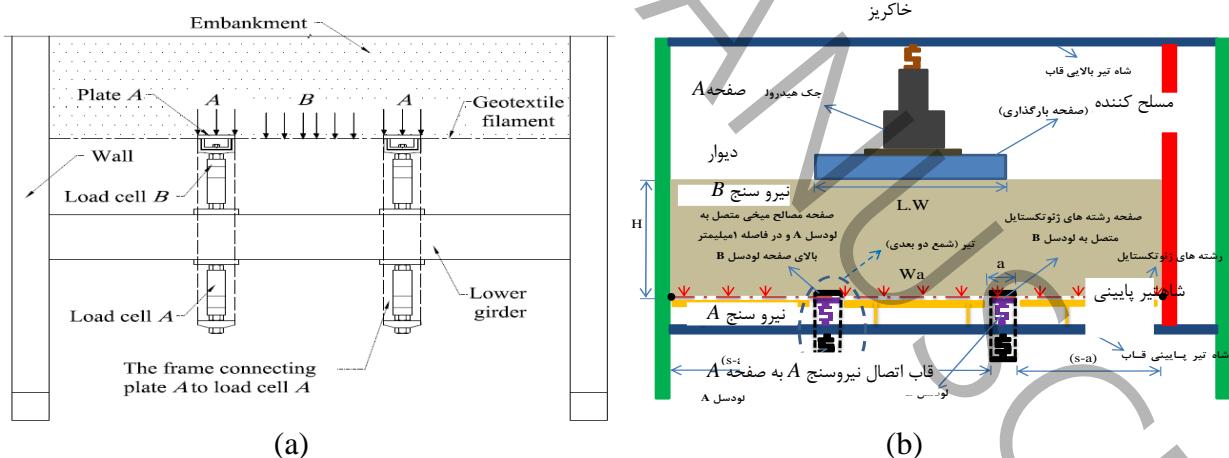
¹ Soil arching

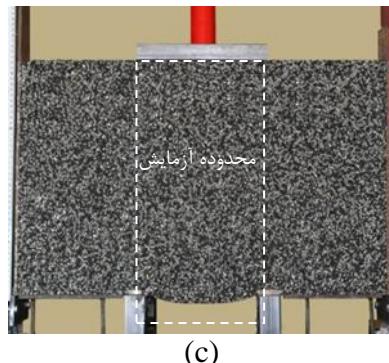
خاکریز و افزایش سهم بار منتقل شده ناشی از قوس خاکی می‌شود [۱۸]. با استفاده از مدلی دو بعدی با خاکریزهای تشکیل شده از میله‌های فلزی و همچنین با خاکریز سه بعدی و بررسی توزیع وزن خاکریز بین شمع‌ها و روی فوم نرم که در میان آن‌ها قرار داشت نشان داده شد که توزیع بار روی شمع و مسلح کننده به نسبت ارتفاع خاکریز ($H/(s-a)$) و بعد شمع‌ها ($(s-a)/a$) وابسته است [۱۹، ۲۰]. مدل‌سازی دو بعدی آزمایشگاهی با خاکریز تشکیل شده از میله‌های فلزی، یکبار همراه مسلح کننده و یکبار هم بدون مسلح کننده آشکار کرد که مسلح کننده بر توزیع بار روی شمع‌ها موثر است [۲۱]. با توجه به موارد ذکر شده، یکی از ویژگی‌های این پژوهش آن است که دستگاه آزمایش‌ها به گونه‌ای طراحی شده که برای اندازه‌گیری جداگانه دو قسمت بار (A و B) که تاثیر قوس‌زدگی را توصیف می‌کند، مناسب است. قسمت اول، بار A است که به طور مستقیم توسط قوس به شمع‌ها منتقل می‌شود؛ قسمت دوم، بار B که از طریق مسلح کننده ژئوسینتیکی به شمع‌ها منتقل می‌شود. فرستی که اندازه‌گیری جداگانه این دو قسمت بار به وجود می‌آورد، آزمایش‌ها را برای انجام اندازه‌گیری‌های مناسب می‌سازد که می‌توانند جهت توسعه یا اعتبارسنجی مدل‌های تحلیلی که تأثیر قوس زدگی را توصیف می‌کنند، استفاده شوند؛ مانند مدل‌های پیشنهادی آقای زائسک [۱۵]، مصوب در استاندارد طراحی آلمانی [۲۲] یا مدل پیشنهادی خانم ون اکلن [۲۳]، مصوب در استاندارد طراحی هلندی [۲۴]. این مقاله نتایج ۸ آزمایش را ارائه می‌دهد که به بررسی رفتار مسلح کننده، تحت تأثیر ارتفاع خاکریز و تعداد رشتهداری مسلح کننده ژئوسینتیکی تمرکز دارد.

۲- مصالح آزمایش و روش‌شناسی

۱-۲- شرح دستگاه آزمایش و فرآیند انجام آزمایش

برای بررسی آن بخش از بار که به شمع توسط قوس‌زدگی منتقل می‌شود (بخش بار A) و بخش باری که توسط مسلح کننده به شمع منتقل می‌شود (بخش بار B)، یک دستگاه آزمایش دو بعدی ساخته شده است. ویژگی این دستگاه، اندازه‌گیری جدایگانه بار بخش A و B است. این ویژگی، آزمایش‌های انجام گرفته توسط این دستگاه را از مشابه آنچه که جینک (۲۰۰۵) [۲۰] و رویی‌رویی (۲۰۱۹) [۲۱] انجام دادند، متفاوت می‌سازد. این دستگاه از یک قاب فولادی صلب (۷۰۰ mm x ۸۰۰ mm) تشکیل شده است که ظرفیت آزمایش برای خاکریزی تا ارتفاع حداقل ۴۰۰ mm را به همراه دارد.





شکل ۲ . دستگاه آزمایش(a) محل قرارگیری نیرو سنج ها (b)جزئیات دستگاه آزمایش (c)محدوده آزمایش

اجزای اصلی دستگاه، مطابق شکل ۲، شاهتیرهای بالایی و پایینی هستند که ثابت‌اند و به دیواره قاب به صورت صلب متصل شده‌اند. مدل دو بعدی، از دو عدد تیر (شمع دو بعدی) ساخته شده که هر کدام از تیرها به دو عدد نیروسنج متصل‌اند که یکی از نیروسنج‌ها (B) به بالای شاهتیر پایینی قاب متصل است و رشته‌های مسلح‌کننده به طور مستقیم روی آن قرار می‌گیرند. بار رسیده از طریق مسلح‌کننده به شمع را اندازه‌گیری می‌کنند و نیروسنج A که به زیر شاهتیر پایینی قاب متصل است و به وسیله یک صفحه در روی مسلح‌کننده که به فاصله یک میلی‌متری بالای صفحه نیروسنج B قرار دارد و مصالح خاکریز مستقیماً روی آن صفحه قرار می‌گیرند و بار رسیده از طریق قوس‌زدگی را اندازه‌گیری می‌کند. سه عدد صفحه‌صلب^۱ در فاصله آزاد بین دو شمع مجاور، همچنین شمع ها از دیواره، در زیر رشته‌های مسلح‌کننده قرار دارد تا در زمان ریختن مصالح خاکریز و قبل از انجام اندازه‌گیری‌ها، مسلح‌کننده تحت قرار نگیرد (شکل ۲). نیروی وارده به سطح خاکریزها توسط یک عدد جک هیدرولیک به ظرفیت ۵ تن که فشار هیدرولیک آن توسط یک موتور الکتریکی تأمین می‌شود، بر یک صفحه صلب با طول $L \cdot W$ که در سطح خاکریز قرار می‌گیرد، اعمال می‌گردد.

۲-۲- مصالح خاکریز دو بعدی^۲

به منظور مطالعه دو بعدی از سه نوع میله فلزی به عنوان مصالح خاکریزی استفاده شده است. میله‌های فلزی دارای سطح مقطع دایره‌ای شکل، به قطر $1/5\text{mm}$ ، $2/5\text{mm}$ ، 4mm می‌باشند. میله‌های فلزی طول 100 mm دارند و با نسبت مساوی $1:1:1$ با یکدیگر مخلوط شده‌اند و عمود بر صفحه دو بعدی (x-z) قرار گرفته‌اند. وزن مخصوص خاکریز دو بعدی میخی مخلوط شده 5320 kg/m^3 است. زاویه قرارگیری میله‌های فلزی حدود 28° درجه در آزمایشگاه بدست آمد (شکل ۳)، وزن مخصوص خاکریز میخی دو بعدی تقریباً سه برابر یک ماسه معمولی بود و ضریب مقیاس مدل تقریباً 5 است؛ بنابراین، توزیع تنیش در مدل مشابه یک خاکریز متکی بر شمع دانه‌ای متراکم با مدل رفتاری موهر کلمب می‌باشد.



شکل ۳ . آزمون زاویه قرار^۳ میله‌های فلزی

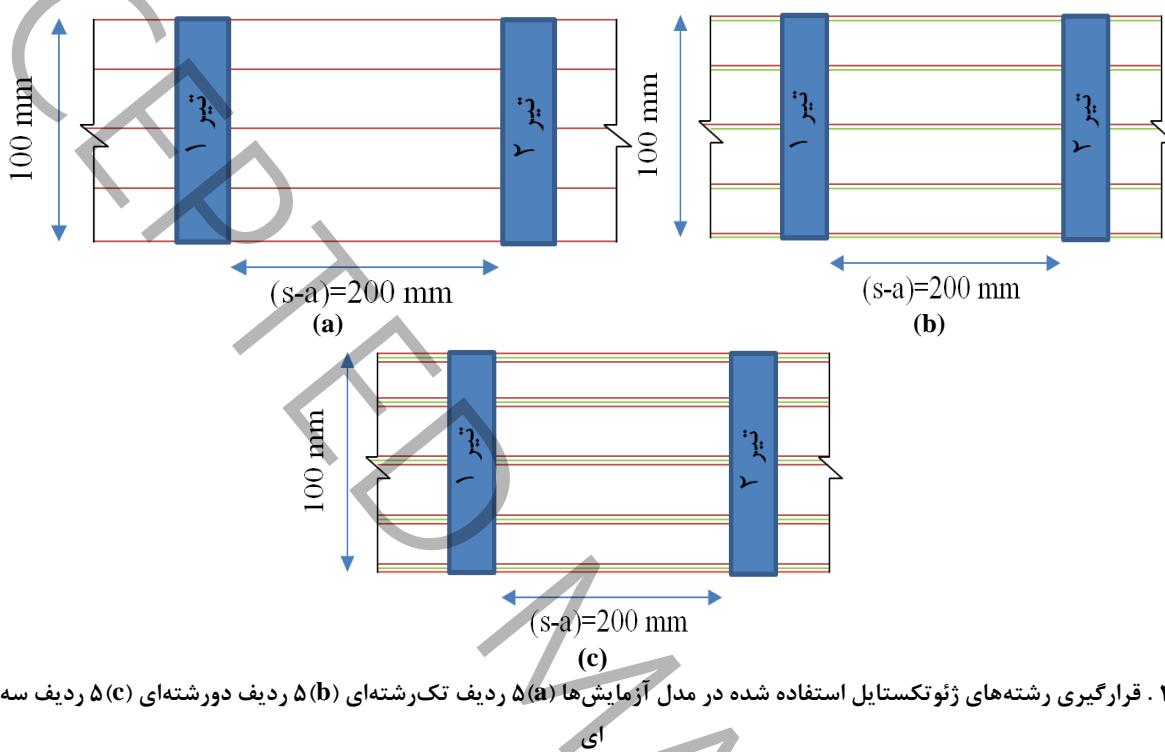
¹ Trapdoor

² Analogical soil

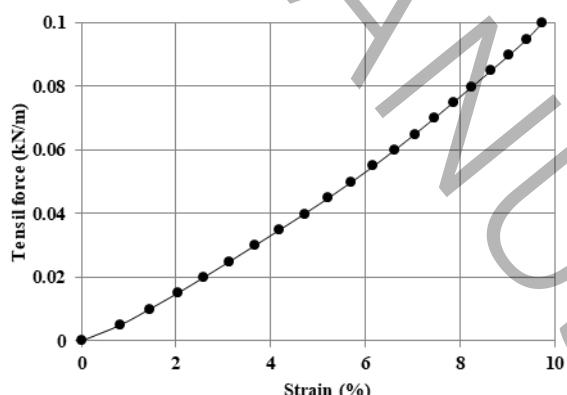
³ Repose angle

۳-۲- مسلح‌کننده

مسلح‌کننده مورد استفاده از رشته‌های یک نوع ژئوتکستایل بافته شده می‌باشد.^۱ این رشته‌ها در ردیف‌های پنج تایی با عرض ۱۰۰ mm و با طول مساوی بسته شده‌اند. با توجه به نوع آزمایش، هر ردیف می‌تواند، به صورت تک‌رشته‌ای، دور‌رشته‌ای و سه‌رشته‌ای باشد که به ترتیب مجموعه ۵ و ۱۰ و ۱۵ رشته‌ای را می‌سازند (شکل ۴).



شکل ۴ . قرارگیری رشته‌های ژئوتکستایل استفاده شده در مدل آزمایش‌ها (a) ۵ ردیف تک‌رشته‌ای (b) ۵ ردیف دور‌رشته‌ای (c) ۵ ردیف سه‌رشته‌ای



شکل ۵ . رفتار نیروی کششی-کرنش یک‌رشته از مسلح‌کننده

شکل ۵ رفتار کششی یک رشته از مسلح‌کننده با عرض ۱ mm که با سرعت ۳/۷۷ m/sec (کرنش ۰/۱۷ m/sec) تحت کشش قرار گرفت را نشان می‌دهد. از این نمودار می‌توان مشاهده کرد که سختی کششی تک رشته در ۰/۷۴ kN/m، کرنش ۰/۱۴۸ m/sec باشد.

¹ Tencate Geolon, 100/100 kN/m

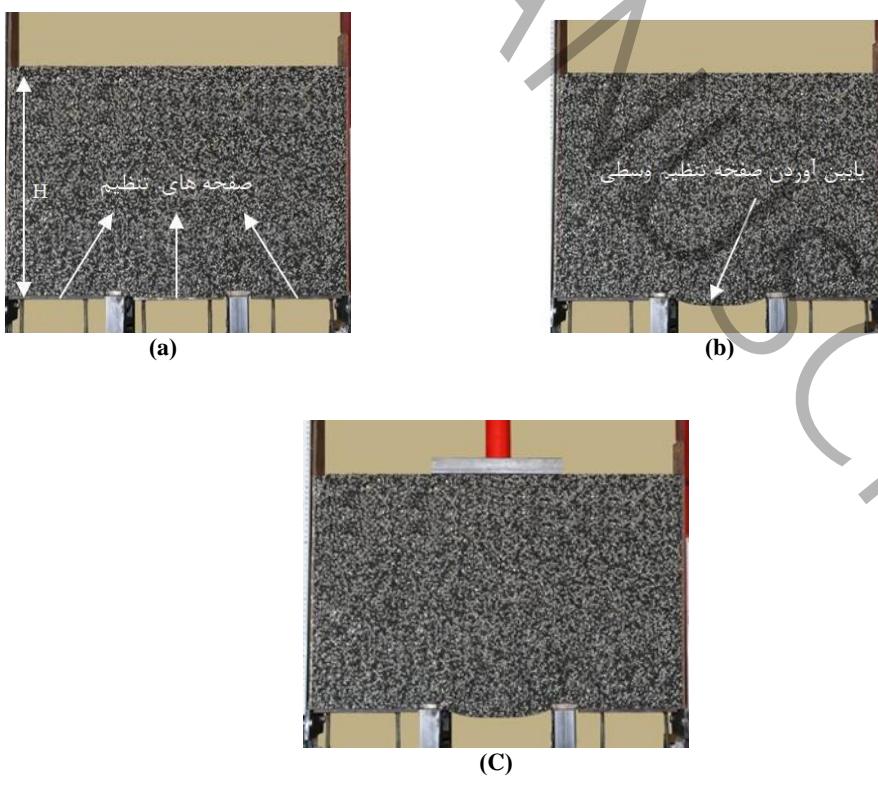
جدول ۱. مقاومت و سختی مسلح‌کننده ژئوسینتیکی برای یک رشته و برای یک نوار مسلح‌کننده به عرض ۱۰۰ میلی‌متر با ۵ رشته، ۱۰ رشته، ۱۵ رشته

تعداد رشته‌های مسلح‌کننده در ۱۰۰ میلی‌متر طول تیر (شمع دو بعدی)	مقاومت کششی کوتاه مدت T_{max} (kN/m*)	سختی کششی کوتاه مدت در کرنش ۰.۲% ($J_{2\%}$) (kN/m)
۵	۵	۳۷
۱۰	۱۰	۷۴
۱۵	۱۵	۱۱۰

*برای طول یک متر عمود بر صفحه دو بعدی مورد بررسی (Z-X)

۴-۲- مراحل انجام آزمایش

- ۱) در این مرحله تیرها در فاصله مناسب از یکدیگر و دیواره قرار می‌گیرند. رشته‌های مسلح‌کننده در محل مناسب خود قرار گرفته و به دیواره و روی هر تیر متصل و ثابت می‌شوند.
- ۲) صفحه‌های تنظیم را زیر رشته‌های ژئوتکستایل در فواصل میان تیرها و تیرها از دیواره، در ارتفاع مناسب قرار داده می‌شوند، به طوری که فشار حاصل از خاکریزی در هنگام ریختن میله‌های فلزی و قبیل از شروع آزمایش باعث ایجاد کشش در رشته‌های ژئوتکستایل و نشست در آن نشود. سپس تا ارتفاع H خاکریزی انجام می‌شود (شکل-a).
- ۳) در این مرحله صفحه تنظیم وسطی را پایین آورده و به خاکریز بین دو تیر اجازه داده می‌شود تا تحت اثر وزن خود نشست کنند (شکل-b).
- ۴) صفحه صلب بارگذاری را در سطح خاکریز متشکل از میله‌های فلزی قرار داده و به وسیله جک هیدرولیک، بارگذاری روی خاکریز انجام می‌شود (شکل-c).



شکل ۶ . مراحل آمادهسازی برای شروع آزمایش (a) قرار دادن صفحه‌های تنظیم برای جلوگیری از نشست مسلح کننده قبل از شروع آزمایش (b) پایین آوردن صفحه تنظیم میانی (c) قرار گرفتن صفحه صلب، اعمال سربار و شروع آزمایش

۵-۲- اندازه‌گیری‌ها

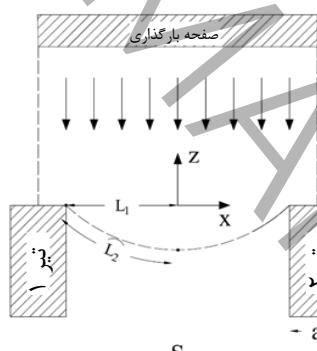
۲-۱-۵- اندازه‌گیری توزیع بار بخش A و B

در خلال بارگذاری بارهای بخش A و B توسط نیروسنج‌هایی که در هر یک از دو تیر تعییه شده‌اند، به صورت جداگانه اندازه‌گیری می‌شوند. بار کل (سربار+وزن خاکریز) که در تراز مسلح کننده به تیرها منتقل می‌شوند (W_a , kN/m)، از میانگین بار اندازه‌گیری شده توسط چهار نیروسنج (A+B) متصل به شاه‌تیر پایینی دستگاه آزمایش اندازه‌گیری می‌شوند (شکل ۲). همچنین در این پژوهش به دلیل اینکه خاک نرم، زیر مسلح کننده و بین شمع‌ها وجود ندارد، مجموع بار A و B برابر کل بار منتقل شده به شمع است که با W_a نمایش داده می‌شود.

$$W_a = A + B \quad (1)$$

۲-۵-۳- اندازه‌گیری تغییر شکل و کرنش متوسط در مسلح کننده

یک دوربین عکسبرداری با وضوح تصویر ۲۴ مگاپیکسل (4000×6000) روی سه پایه در فاصله تقریباً یک متری در جلوی جعبه آزمایش قرار می‌گیرد (شکل ۶). حرکت مقاطع میله‌های فلزی (به عنوان دانه‌های خاکریز دو بعدی) با استفاده از عکسبرداری دیجیتال در هر پنج ثانیه توسط نرم‌افزار MATPIV و با تکنیک دیجیتالی سرعت سنجی تصویر ذرات^۱ (PIV) ریدیابی می‌شود. کرنش متوسط ژئوسیننتیک، از تغییر شکل مسلح کننده بین دو شمع که با استفاده از PIV به دست آمده، توسط رابطه ۲ محاسبه می‌شود (شکل ۷).



شکل ۷ . تغییر شکل و طول مسلح کننده بین دو تیر

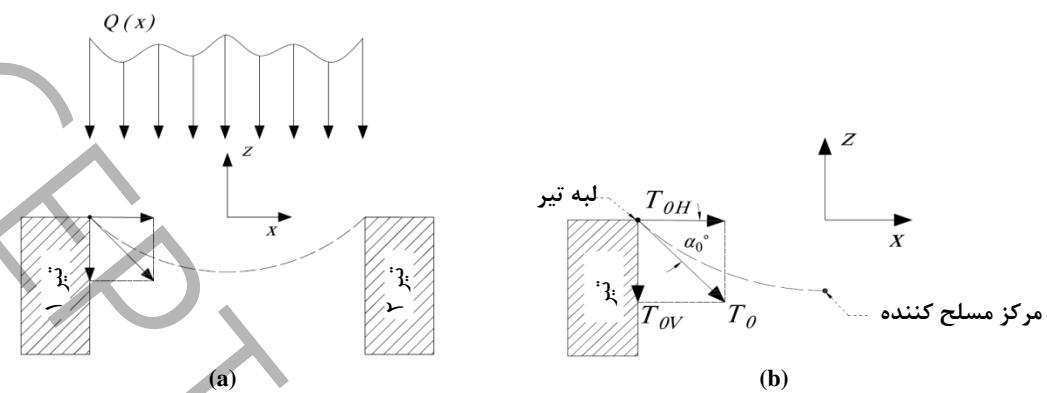
$$\varepsilon_{ave} = \frac{(L_2 - L_1)}{L_1} \quad (2)$$

که در آن ε_{ave} کرنش متوسط مسلح کننده، L_1 نصف طول اولیه مسلح کننده قبل از تغییر شکل، L_2 نصف طول ثانویه مسلح کننده بعد تغییر شکل می‌باشد.

¹ Particle Image Velocimetry

۳-۵-۲- بررسی تحلیلی مدل آزمایشگاهی

با توجه به موقعیت تیرها در دستگاه مختصات دو بعدی (X-Z) مطابق شکل ۸، معادلات ۳ تا ۱۰ را می‌توان ارائه نمود.



شکل ۸. تغییر شکل مسلح کننده بین دو تیر (a) موقعیت تیرها نسبت به دستگاه مختصات (b) موقعیت مرکز و کنار مسلح کننده در دستگاه مختصات (x-z)

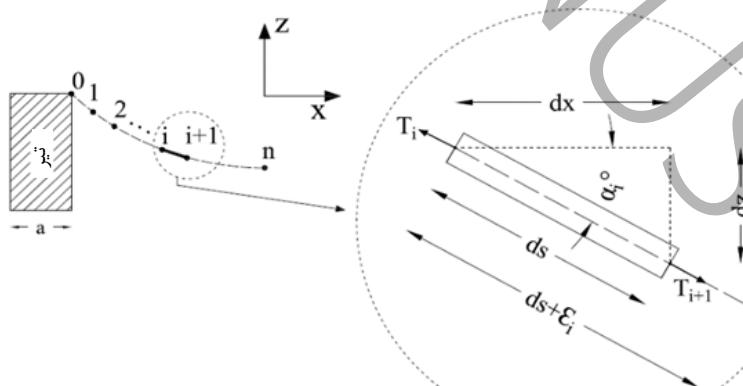
$$\frac{d^2z}{dx^2} = \frac{Q(x)}{T_H} \Rightarrow Q(x) = T_H \cdot \left(\frac{d^2z}{dx^2} \right) \quad (3)$$

که در آن d^2z/dx^2 تغییر شیب نمودار تغییر شکل مسلح کننده، $Q(x)$ توزیع بار روی مسلح کننده می‌باشد، T_H مؤلفه افقی نیروی کششی در مسلح کننده است.

اگر فاصله بین کنار مسلح کننده و مرکز را به n قسمت مساوی تقسیم کنیم (شکل ۹)، خواهیم داشت که:

$$\varepsilon_{ave} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \varepsilon_i}{n-1} \quad (4)$$

که در آن ε_i کرنش قسمت i ام مسلح کننده است.



شکل ۹. جزئیات تغییر شکل مسلح کننده

$$T_{ave} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} T_i}{n-1} \quad (5)$$

که در آن T_{ave} میانگین نیروی کششی در طول مسلح‌کننده، T_i نیروی کششی در قسمت i ام مسلح‌کننده است.

$$\varepsilon_i = \varepsilon(x_i) = \frac{T_i}{J_i} \quad (6)$$

که در آن J_i سختی مسلح‌کننده متناظر با کشش T_i در مسلح‌کننده است.

$$T_i = T(x_i) = \sqrt{T_H^2 + T_{Vi}^2} = T_H \sqrt{1 + (T_{Vi}/T_H)^2} = T_H \sqrt{1 + (\frac{dz_i}{dx_i})^2} \quad (7)$$

که در آن T_{Vi} و dz/dx به ترتیب مؤلفه قائم نیروی کششی و شیب قسمت i ام مسلح‌کننده است.

$$z_i = z(x_i) = z_{i-1} + (\frac{dz_i}{dx_i}) \cdot dx = z_{i-1} + (1 + \varepsilon_i) \cdot \sin \alpha_i \cdot ds \quad (8)$$

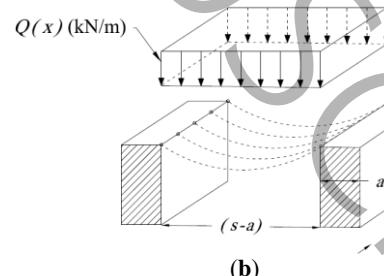
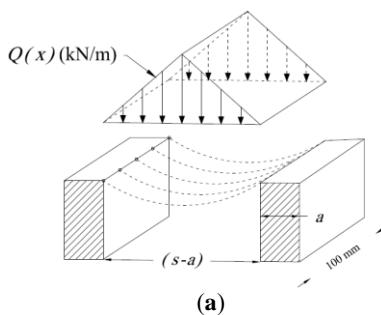
که در آن α_i زاویه قسمت i ام مسلح‌کننده با راستای افق (محور x) است.

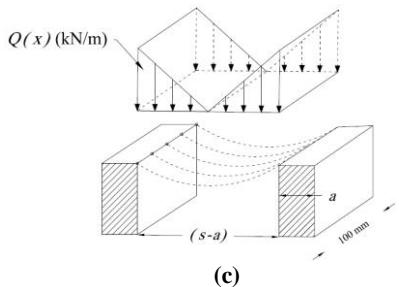
$$T_V(x_0) = T_{Vedge} = T_H \cdot \tan \alpha_0 = T_H \cdot \frac{dz_0}{dx_0} \quad (9)$$

که در آن T_{Vedge} مؤلفه قائم نیروی کششی مسلح‌کننده در کنار تیر (زندیک‌ترین فاصله با تیر)، a_0 زاویه خط مماس بر منحنی تغییر شکل مسلح‌کننده در کنار تیر با راستای افق است.

$$B = T_{Vedge} = \int_0^{(s-a)/2} Q(x) \cdot dx = T_H \cdot \int_0^{(s-a)/2} (\frac{d^2 z}{dx^2}) \cdot dx \quad (10)$$

با توجه به معادلات تحلیلی فوق می‌توان توزیع بار روی مسلح‌کننده و توزیع کشش و کرنش در مسلح‌کننده را با توجه به تغییر شکل آن ترسیم نمود. لازم به ذکر است که سه نوع توزیع بار شناخته شده روی مسلح‌کننده عبارت است از توزیع بار مثلثی، توزیع بار مثلثی وارون و توزیع بار یکنواخت می‌باشد (شکل ۱۰) [۲۳].





شکل ۱۰ . سه نوع توزیع بار روی مسلح کننده (a) توزیع بار مثلثی (b) توزیع بار یکنواخت (c) مثلثوارون (پیشنهاد شده توسط ون اکلن ۲۰۱۲) [۲۳]

۶-۲- صحت سنجی

همانطور که در بخش‌های قبلی ذکر شد دو نوع اندازه‌گیری در این پژوهش در حین هر آزمایش انجام می‌گیرد. اولین نوع، اندازه‌گیری‌ها نیرویی هستند که بخش بارهای A و B را به صورت جداگانه توسط دو نیروسنجی که در هریک از دو شمع تعییه شده‌اند، ثبت می‌کنند. دومین نوع، اندازه‌گیری‌های حرکتی (جابجایی) است که توسط تکنیک سرعت سنجی تصویر ذرات خاکریز انجام می‌گیرد. در این تحقیق از دو روش صحت سنجی آزمایش‌ها انجام شد.

اولین نوع صحت سنجی براساس ارتباط بین دو نوع داده بدست آمده از آزمایش‌ها، داده‌های نیرویی و حرکتی که در بخش‌های ۵-۱ و ۵-۲ معرفی شدند، انجام گرفت. بنابراین مقدار پارامتر B توسط تغییر شکل مسلح کننده در حین آزمایش با استفاده از رابطه ۱۰ اندازه‌گیری شد.

چنانچه در رابطه ۱۰ مقدار T_H مشخص شود می‌توان به منظور صحت سنجی آزمایش‌ها از این رابطه استفاده کرد. مقدار T_H با استفاده از معادله ۷ در یک لحظه خاص مثلاً لحظه گسیختگی مسلح کننده که مقدار نیروی کششی در محل گسیختگی (کناره تیر) می‌باشد، اندازه‌گیری می‌شود. آن آزمایش‌هایی که B بدست آمده از نیروسنجها با B بدست آمده از معادله ۱۰ و تغییرشکل مسلح کننده برابر باشند، نتایج آنها مورد بررسی قرار گرفت.

علاوه بر این روی آزمایش‌هایی که در صحت سنجی فوق مورد تایید بودند دومین نوع صحت سنجی انجام شد. روش کار به این صورت بود که با مشخص بودن T_H ، با توجه به اینکه نیروی گسیختگی مسلح کننده در هر نقطه از محدوده جمع مربعات مولفه‌هایش بدست می‌آید (رابطه ۷) و T_H در طول مسلح کننده ثابت است. نیروی کششی در سایر نقاط در طول مسلح کننده را می‌توان از حاصل ضرب شیب مسلح کننده در T_H با توجه به رابطه ۷ در نقطه مدنظر محاسبه کرد. در ادامه با توجه به نیروی کششی در هر جزء و با استفاده از نمودار تنش کرنش رشته‌های مسلح کننده (شکل ۵) می‌توان کرنش مسلح کننده را در هر جزء با استفاده از رابطه ۶ محاسبه نمود. به منظور صحت سنجی آزمایش‌ها باید مقدار کرنش متوسط محاسبه شده از PIV که در رابطه ۲ معرفی شده با میانگین تمام جزء کرنش‌های بدست آمده از نمودار تنش کرنش در فاصله کنار تا مرکز مسلح کننده که از رابطه ۴ محاسبه می‌شود، برابر باشد.

۳- برنامه آزمایش

در این پژوهش با انجام ۸ آزمایش از سه نوع مسلح کننده ۵، ۱۰ و ۱۵ رشته‌ای به صورت نواری با عرض ۱۰۰ mm ارتفاع‌های مختلف خاکریزی، به بررسی اثر ارتفاع خاکریز و تعداد رشته‌ها بر رفتار مسلح کننده در خاکریز متکی بر شمع پرداخته‌می

شود (جدول ۲). این کار با استفاده از تکنیک سرعت‌سنجی ذرات تصویر (PIV) و بررسی تغییر شکل مسلح‌کننده بین دو تیر در حین افزایش بار تا لحظه گسیختگی مسلح‌کننده انجام می‌شود.

جدول ۲ . مشخصات آزمایش‌ها

شماره آزمایش	تعداد رشته های مسلح کننده (Filaments)	H (mm)	$H/(s-a)$
۱	۱۵	۱۰۰	۰/۵
۲	۱۵	۲۰۰	۱
۳	۱۵	۳۰۰	۱/۵
۴	۱۵	۴۰۰	۲
۵	۱۰	۱۰۰	۰/۵
۶	۱۰	۴۰۰	۲
۷	۵	۱۰۰	۰/۵
۸	۵	۴۰۰	۲

H : ارتفاع خاکریز، $H/(s-a)$: نسبت ارتفاع خاکریزی

در تمامی آزمایش‌ها مقادیر فاصله مرکز به مرکز تیرها (S) ۲۵۰ میلی‌متر، بعد (عرض) تیرها (a) ۵۰ میلی‌متر، نسبت بعد تیر ($a/(s-a)$) ۰/۲۵ و عرض صفحه بارگذاری ۲۵۰ میلی‌متر می‌باشد. نتایج هر آزمایش با استفاده از محاسبه‌های تحلیلی، رفتار مسلح‌کننده را مشخص می‌کند. هر آزمایش حداقل سه بار تکرار شده تا داده‌های آنها توسط درون‌بایی مکعبی یا خطی^۱، به صورت یک تابع با ضریب تعیین^۲ (R^2)، بیشتر از ۹۵٪ اندازه‌گیری شوند.

۴- تحلیل نتایج

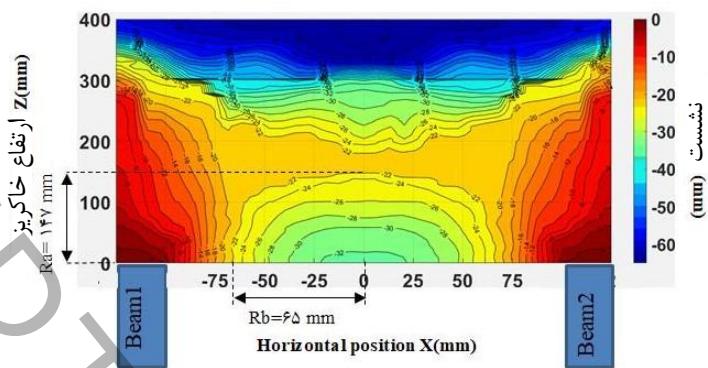
۱-۴- هندسه قوسزدگی

همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، قوس‌های تشکیل شده به شکل نیم‌بیضی‌های هم‌مرکزی هستند که مرکز آنها در تراز مسلح‌کننده و فاصله بین دو تیر است ($X,Z=0\text{mm}$). در اکثر آزمایش‌ها بزرگترین نیم‌قطر بزرگ این بیضی‌ها (R_a ، در راستای محور Z و بزرگترین نیم‌قطر کوچک آنها (R_b ، در راستای محور X قرار می‌گیرند. در حین افزایش نیروی کششی در مسلح‌کننده، مقادیر R_a و R_b تغییر می‌کنند. میزان این تغییرها با توجه به ارتفاع خاکریزی متفاوت است. در حین افزایش R_b برای تمامی ارتفاع‌های خاکریز کاهش می‌یابد (شکل a-۱۲). میزان این کاهش بستگی به میزان ارتفاع خاکریزی دارد، به طوری که بیشترین کاهش برای R_b در نسبت ارتفاع $5/۰$ در حین افزایش T_0/T_{max} از $۰/۲۵$ تا ۱ ، از ۶۳ تا ۵ میلی‌متر است ($\Delta R_b=58\text{mm}$). کمترین تغییرات برای R_b در نسبت ارتفاع $۰/۵$ در حین افزایش T_0/T_{max} از $۰/۲۵$ تا ۱ ، از ۹۵ تا ۶۵ میلی‌متر کاهش خواهد یافت.

^۱ Linear interpolation or cubic interpolation

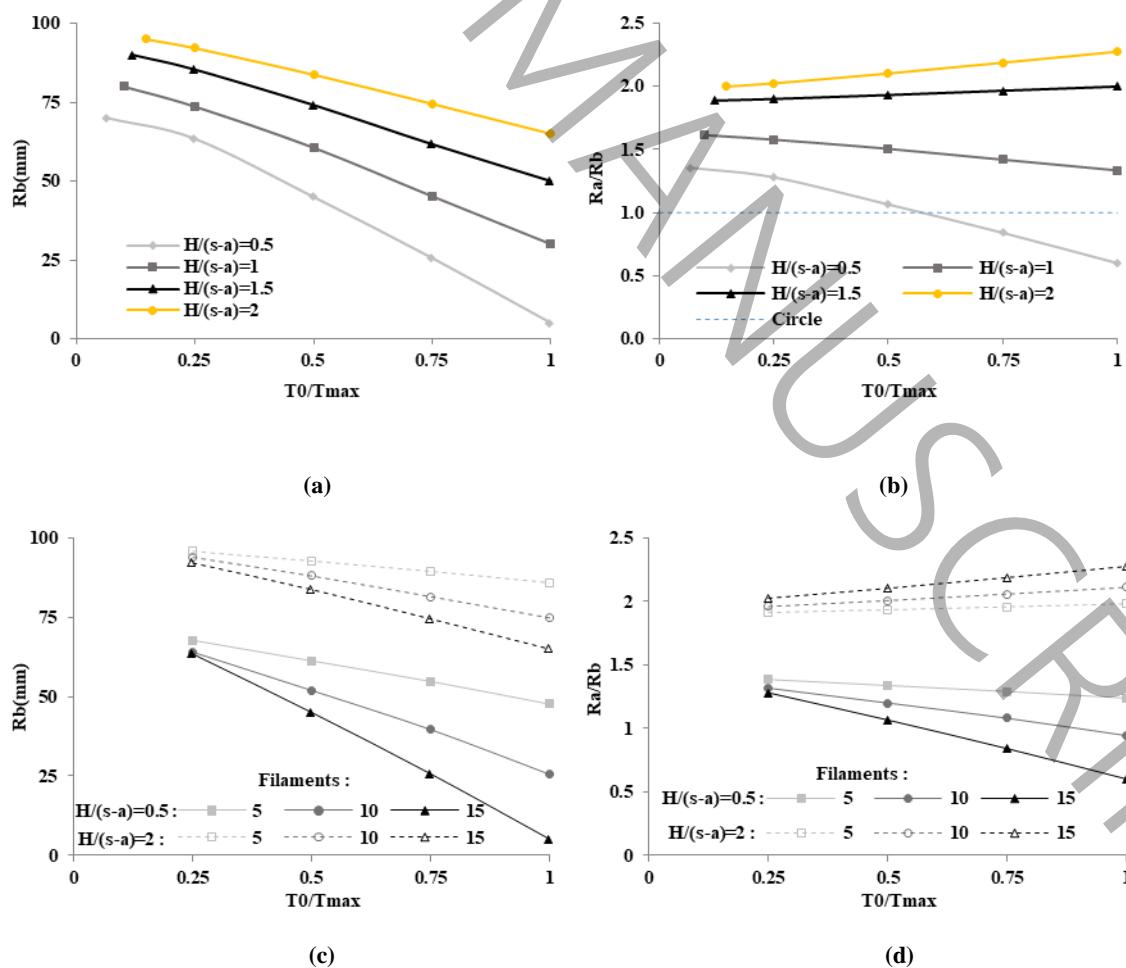
^۲ Coefficient of determination

شکل ۱۲-۶ نشان می‌دهد، مقادیر R_a/R_b برای خاکریزهای با $H/(s-a) = 2$ و $1/5$ هنگام افزایش مقدار T_0/T_{max} افزایش می‌یابد و قوس‌ها شکل بیضی خود را در حین آزمایش حفظ می‌کنند.



شکل ۱۱ . نمایش قوس تشکیل شده با استفاده از تکنیک PIV برای آزمایش شماره ۴ در لحظه نزدیک به گسیختگی مسلح کننده

به طوری که حداقل و حداقلتر مقدار R_a/R_b برای مرتفع‌ترین خاکریز ($H/(s-a)=2$)، به ترتیب برابر $2/27$ و $2/22$ و برای نسبت ارتفاع $1/5$ ، به ترتیب $1/8$ و $1/99$ اندازه‌گیری شد (برای این دو ارتفاع، خاکریزی رشد R_a/R_b را در حین آزمایش نشان می‌دهد)؛ در حالی که با کاهش ارتفاع خاکریز مقدار R_a/R_b با افزایش مقدار T_0/T_{max} نزولی خواهد بود و قوس‌ها تمایل دارند به نیم‌دایره نزدیک شوند. مقدار حداقل و حداقلتر نسبت R_a/R_b در $H/(s-a)=1/33$ و $1/61$ و در $H/(s-a)=0/5$ و در $H/(s-a)=1/35$ به ترتیب $0/6$ و $1/35$ گیری شدند (که در هر دو نسبت ارتفاع، R_a/R_b روند نزولی را از خود نشان می‌دهد).



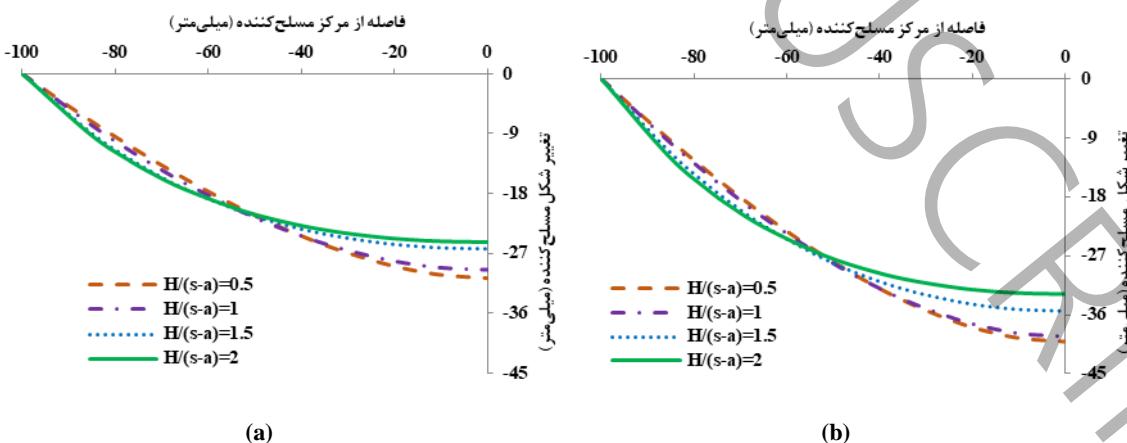
شکل ۱۲ . تغییرات (R_a/R_b) و (R_b) در حین آزمایش (a) تأثیر نسبت ارتفاع خاکریزی بر R_b (آزمایش‌های ۱-۴) (b) تأثیر نسبت ارتفاع خاکریزی بر R_a/R_b (آزمایش‌های ۱-۴) (c) تأثیر تعداد رشته و نسبت ارتفاع بر R_b (آزمایش‌های ۱و-۴-۸) (d) تأثیر تعداد رشته‌ها و نسبت ارتفاع بر R_a/R_b (آزمایش‌های ۱و-۴-۸)

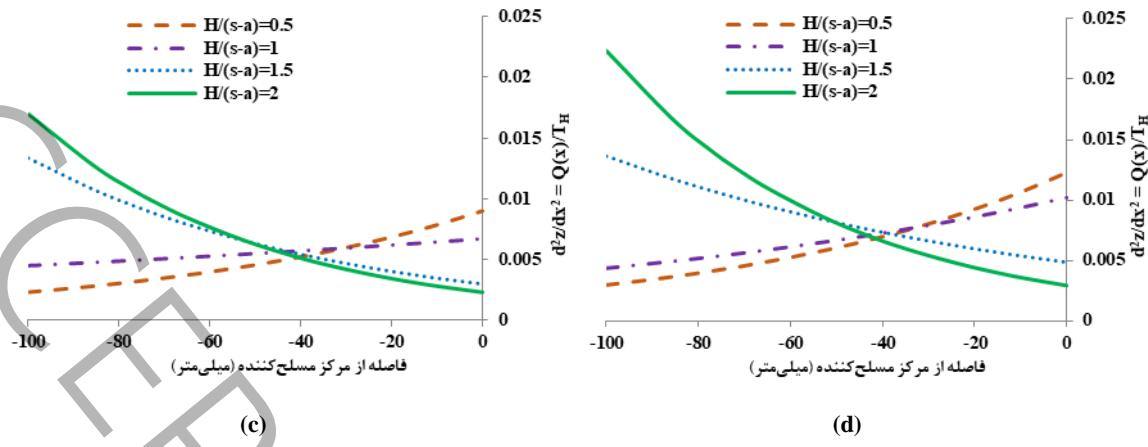
شکل ۱۲-c نشان می‌دهد، در حین نزدیک شدن مسلح‌کننده به ظرفیت کششی خود ($T_0/T_{max}=1$)، با افزایش تعداد رشته‌ها مقدار R_b نیز کاهش بیشتری خواهد یافت. برای $H/(s-a)=2$ در مسلح‌کننده ۵ و ۱۵ رشته‌ای با افزایش T_0/T_{max} از $0/25$ تا ۱ مقدار R_b به ترتیب حدود ۹ و ۲۹ درصد کاهش می‌یابد. این کاهش در مقدار R_b برای $H/(s-a)=0/5$ تشديد خواهد شد، به طوری که برای مسلح‌کننده ۵ و ۱۵ رشته‌ای با افزایش T_0/T_{max} از $0/25$ به ۱ مقدار R_b به ترتیب ۱۲ و ۹۲ درصد کاهش می‌یابد. شکل ۱۲-d نشان می‌دهد که افزایش رشته‌های مسلح‌کننده برای خاکریزهای با ارتفاع بالا نسبت به خاکریزهای با ارتفاع پایین، تأثیر متفاوتی روی R_a/R_b دارد. برای خاکریزهای مرتفع، افزایش تعداد رشته‌های مسلح‌کننده سبب می‌شود که در حین آزمایش و افزایش R_a/R_b افزایش یابد. برای $H/(s-a)=2$ با افزایش T_0/T_{max} از $0/25$ به ۱ مقدار R_a/R_b برای مسلح‌کننده ۵ و ۱۵ رشته‌ای، به ترتیب حدود ۱ و $13/5$ درصد افزایش می‌یابد. در $H/(s-a)=0/5$ با افزایش T_0/T_{max} از $0/25$ به ۱ مقدار R_a/R_b برای مسلح‌کننده ۵ و ۱۵ رشته‌ای، به ترتیب حدود ۱۱ و $53/5$ درصد کاهش می‌یابد.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در خاکریزهای مرتفع علاوه بر اینکه شاع قوس‌های متعدد مرکز در حین آزمایش کاهش کمتری خواهند داشت بلکه قوس‌ها به صورت بیضی‌های استاده با شاع بزرگ در راستای محور Z و شاع کوچک در راستای محور X خواهند بود و با افزایش بارگذاری در خاکریزهای مرتفع قوس‌ها می‌توانند شکل خود را حفظ کنند و قوس‌های پایدارتری تشکیل خواهد شد.

۴-۲- تغییرات شب نمودار تغییر شکل مسلح‌کننده

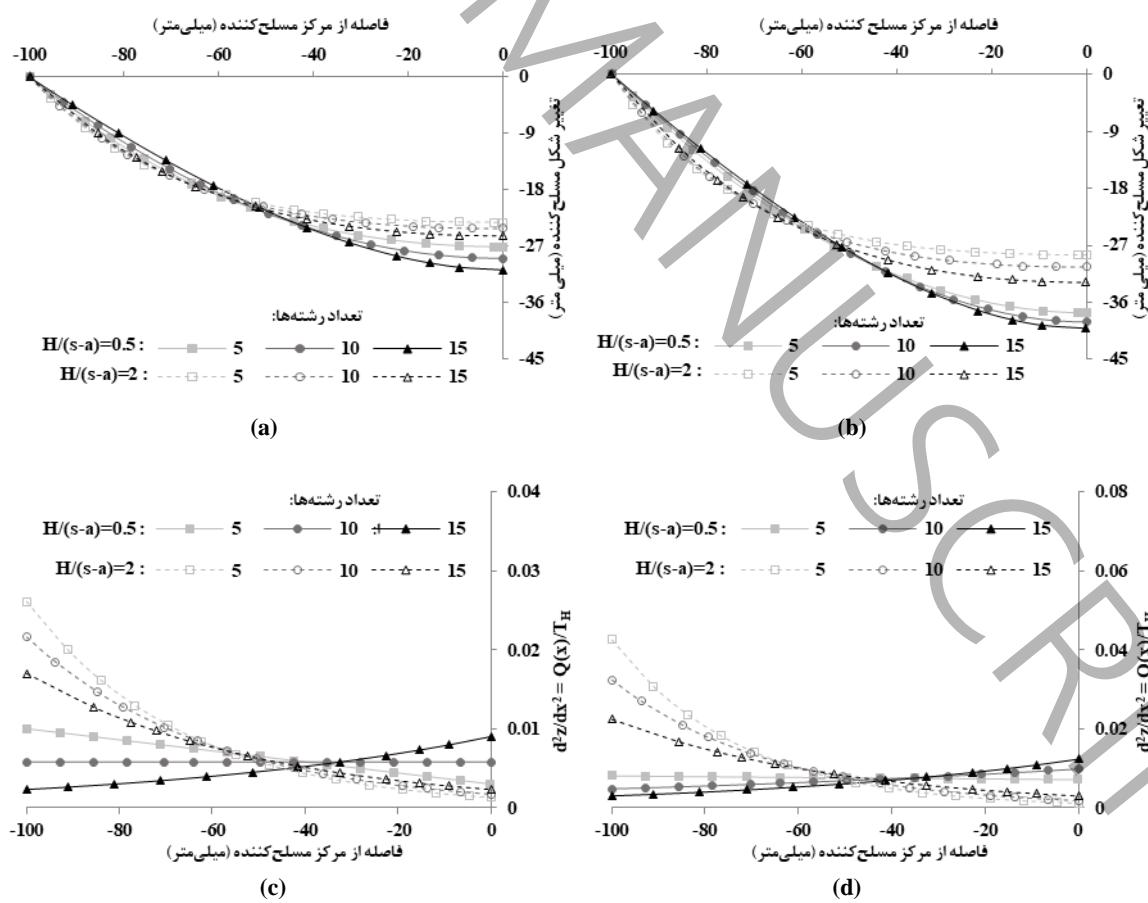
در شکل ۱۳ نمودار تغییر شکل مسلح‌کننده و تغییرات شب مربوط به آن در طول مسلح‌کننده برای T_0/T_{max} برابر $0/5$ و ۱ (در حالی که $50/5$ درصد و $100/0$ درصد ظرفیت کششی مسلح‌کننده فعل شود) نشان داده می‌شود. حداقل تغییرات شب مسلح‌کننده برای $1/05$ و $H/(s-a)=0/5$ در محل مرکز مسلح‌کننده ($X=0\text{ mm}$) اتفاق می‌افتد. که برای $H/(s-a)=0/5$ حداقل مقدار تغییر شب $(d^2z/dx^2)_{max}$ در $1/05$ و $T_0/T_{max}=0/5$ به ترتیب از چپ به راست $0/0123$ و $0/0089$ اندازه‌گیری شدند. با افزایش $50/0$ درصدی نسبت ارتفاع از $5/0$ به ۱ مشاهده می‌شود (شکل ۱۳-c,d) که مقدار حداقل تغییر شب در مرکز مسلح‌کننده کاهش و مقدار حداقل تغییرات شب در کنار تیر ($X=100\text{ mm}$) افزایش می‌یابد. برای $H/(s-a)=1$ مقدار حداقل تغییر شب در ۱ و $1/05$ ، به ترتیب از چپ به راست $0/01$ و $0/0067$ اندازه‌گیری شدند. در خاکریزهای مرتفع ($H/(s-a)>1$), حداقل تغییرات شب مسلح‌کننده به سمت کنار تیر منتقل می‌شود، به طوری که برای $H/(s-a)=1/5$ مقدار حداقل تغییر شب در ۱ و $1/05$ ، به ترتیب از چپ به راست $0/0136$ و $0/0133$ اندازه‌گیری شدند.





شکل ۱۳. تأثیر نسبت ارتفاع خاکریزی بر تغییر شکل و تغییر شیب مسلح‌کننده ۱۵ رشتہ‌ای (a) تغییر شکل در $T_0/T_{max}=0.5$ (b) تغییر شکل در $T_0/T_{max}=1$ (c) تغییر شیب در $T_0/T_{max}=0.5$ (d) تغییر شیب در $T_0/T_{max}=1$ (آزمایش‌های ۱ تا ۴)

با افزایش $H/(s-a)$ از ۱/۵ به ۲، حداکثر مقدار تغییر شیب در کنار تیر افزایش یافته و برای $H/(s-a)=2$ در $T_0/T_{max}=0.5$ به راست ۰/۰۲۲ و ۰/۰۱۶۹ اندازه‌گیری شدند. حداکثر تغییر شیب مسلح‌کننده در حالتی که در کنار تیر اتفاق می‌افتد، در مقایسه با حالتی که در مرکز اتفاق می‌افتد، بیشتر خواهد بود. مقدار حداکثر تغییر شیب مسلح‌کننده برای نسبت ارتفاع ۰/۵ در مقایسه با ۲ در حالتی که ۱۰۰ درصد ظرفیت کششی مسلح‌کننده فعال شود ($T_0/T_{max}=1$) حدود ۷۹ درصد رشد دارد (از ۰/۰۱۲۳ به ۰/۰۲۲ افزایش می‌یابد). با افزایش مقدار نیروی کششی در مسلح‌کننده، در یک نسبت ارتفاع ثابت، بدون تغییر در موقعیت حداکثر تغییر شیب، مقدار آن افزایش می‌یابد.

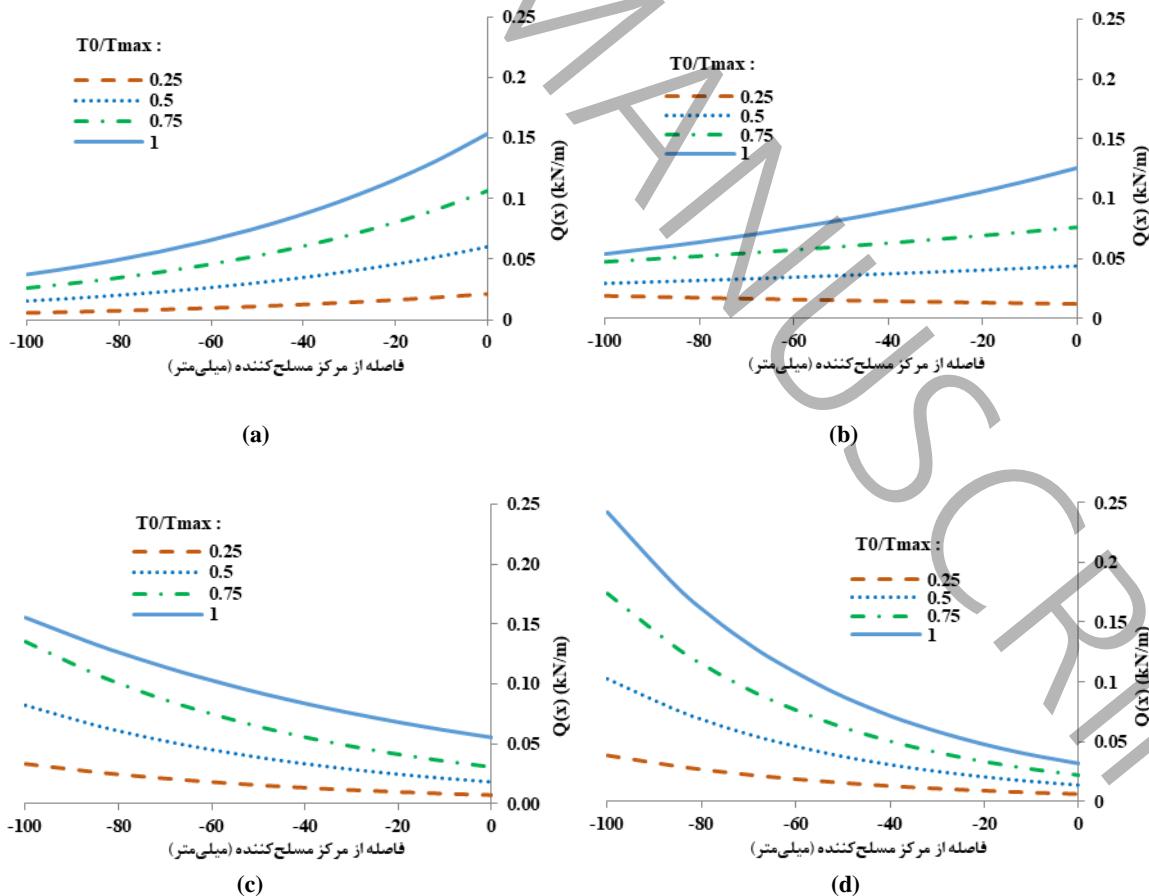


شکل ۱۴ . تأثیر نسبت ارتفاع خاکریزی و تعداد رشته‌های مسلح کننده بر تغییر شکل و تغییر شیب مسلح کننده (a) تغییر شکل در $T_0/T_{max}=0/5$ (b) تغییر شکل در $T_0/T_{max}=1$ (c) تغییر شیب در $T_0/T_{max}=0/5$ (d) تغییر شیب در $T_0/T_{max}=1$ (آزمایش‌های ۱ و ۴ تا ۸)

شکل ۱۴ نشان می‌دهد که افزایش تعداد رشته‌های مسلح کننده در خاکریزهای با ارتفاع پایین‌تر، تاثیر متفاوتی روی تغییرات شیب مسلح کننده دارد. برای خاکریز با ارتفاع کم ($H/(s-a)=0/5$) که حداقل تغییر شیب مسلح کننده در مرکز اتفاق می‌افتد، افزایش تعداد رشته‌های مسلح کننده باعث افزایش حداقل تغییرات شیب مسلح کننده در موقعیت مرکز خواهد شد. در $H/(s-a)=0/5$ برای مسلح کننده ۵، ۱۰ و ۱۵ رشته‌ای، حداقل تغییرات شیب در مرکز مسلح کننده در لحظه نزدیک به گسیختگی ($T_0/T_{max}=1$ ، به ترتیب برابر ۰/۰۰۷۱، ۰/۰۰۹۷ و ۰/۰۱۲)، افزایش ۶۹ درصدی در حداقل شیب ($H/(s-a)=2$) برای مسلح کننده نشان می‌دهد. برای خاکریزهای مرتفع ($H/(s-a)=2$)، تغییر شیب مسلح کننده در مرکز را با سه برابر شدن تعداد رشته‌های مسلح کننده نشان می‌دهد. برای خاکریزهای مرتفع ($H/(s-a)=2$) که حداقل تغییر شیب مسلح کننده در کنار تیر اتفاق می‌افتد، افزایش تعداد رشته‌ها باعث کاهش حداقل تغییرات شیب مسلح کننده در خواهد شد. برای $H/(s-a)=2$ در مسلح کننده ۵، ۱۰ و ۱۵ رشته‌ای حداقل تغییرات شیب مسلح کننده در لحظه نزدیک به گسیختگی به ترتیب ۰/۰۴۲، ۰/۰۳۲ و ۰/۰۲۲ اندازه‌گیری شدند. کاهش ۴۸ درصدی در حداقل تغییر شیب مسلح کننده در موقعیت مرکز تیر را با سه برابر شدن تعداد رشته‌های مسلح کننده نشان می‌دهد.

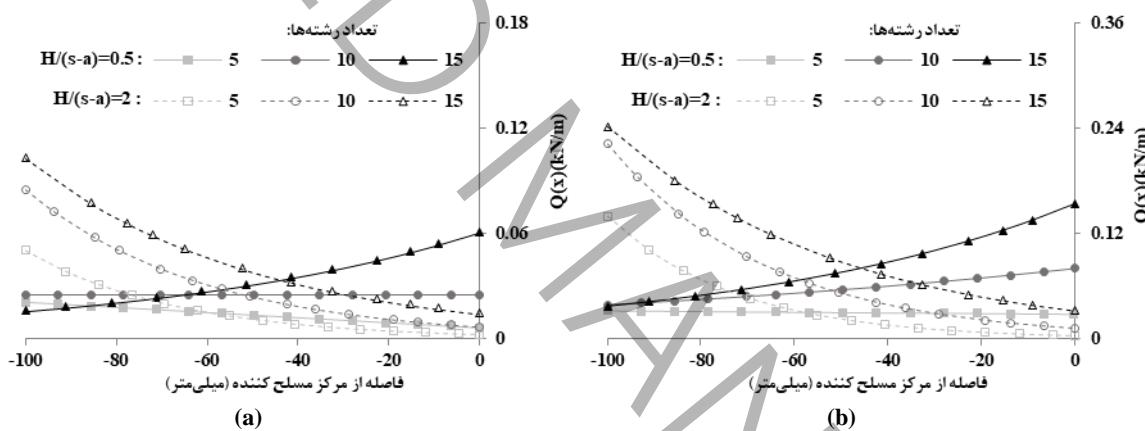
۳-۴- توزیع بار روی مسلح کننده

شکل ۱۵ نشان می‌دهد که برای خاکریز مرتفع ($H/(s-a)>1$ ، تمرکز توزیع بار ($Q(x)$ در نزدیکی تیر می‌باشد. با حرکت به سمت موقعیت مرکز مسلح کننده از میزان ($Q(x)$ کاسته می‌شود تا در نهایت در مرکز مسلح کننده به کمترین مقدار خود مرسد.



شکل ۱۵ . توزیع بار روی مسلح‌کننده در حین افزایش نیروی کششی در مسلح‌کننده ۱۵ رشتہ‌ای (a) $H/(s-a)=0.5$ (b) $H/(s-a)=2$ (c) آزمایش‌های ۱ و ۴ (d) $H/(s-a)=1$

مقدار حداکثر ($Q(x)$) در موقعیت کنار تیر برای ۱، ۰/۷۵، ۰/۵، ۰/۱۷، ۰/۳۸، ۰/۲۴، ۰/۲۵، ۰/۵ در مرتفع‌ترین خاکریز ($H/(s-a)=2$)، به ترتیب از چپ به راست ۰/۲۵، ۰/۱۵، ۰/۱۷، ۰/۳۸، ۰/۲۴، ۰/۵ است. کاهش ارتفاع خاکریز ($H/(s-a)<1$) تمرکز توزیع بار را از کنار تیر به سمت تدریجی کاهش می‌یابد تا در کنار تیر مقدارش به حداقل می‌رسد (شکل ۱۵-a,d). برای کمترین ارتفاع خاکریز ($H/(s-a)=0.5$ ، مقدار حداکثر ($Q(x)$) در موقعیت مرکز ($H/(s-a)=0.5$) در مسلح‌کننده رخ می‌دهد در مقایسه با حالتی که ارتفاع (شکل ۱۵-a) برای حالتی که ارتفاع خاکریز کم است و خداکثر ($Q(x)$) در مرکز مسلح‌کننده رخ می‌دهد در مقایسه با حالتی که ارتفاع خاکریزی زیاد است و خداکثر ($Q(x)$) در کنار تیر رخ می‌دهد، برای یک کشش ثابت در مسلح‌کننده، خداکثر مقدار $Q(x)$ بیشتر خواهد بود. برای مثال در لحظه نزدیک به گسیختگی مسلح‌کننده ($T_0/T_{max}=1$) خداکثر ($Q(x)$) برای $H/(s-a)=0.5$ در مقایسه با ۰/۱۵ به ۰/۲۴ (حدود ۶۰ درصد) افزایش می‌یابد (شکل ۱۵-a,d). شکل ۱۶ نشان می‌دهد افزایش تعداد رشتہ‌های مسلح‌کننده در حین افزایش نیروی کششی در آن برای خاکریزهای با ارتفاع کم ($H/(s-a)=0.5$)، باعث افزایش تجمع بار در مرکز مسلح‌کننده خواهد شد.

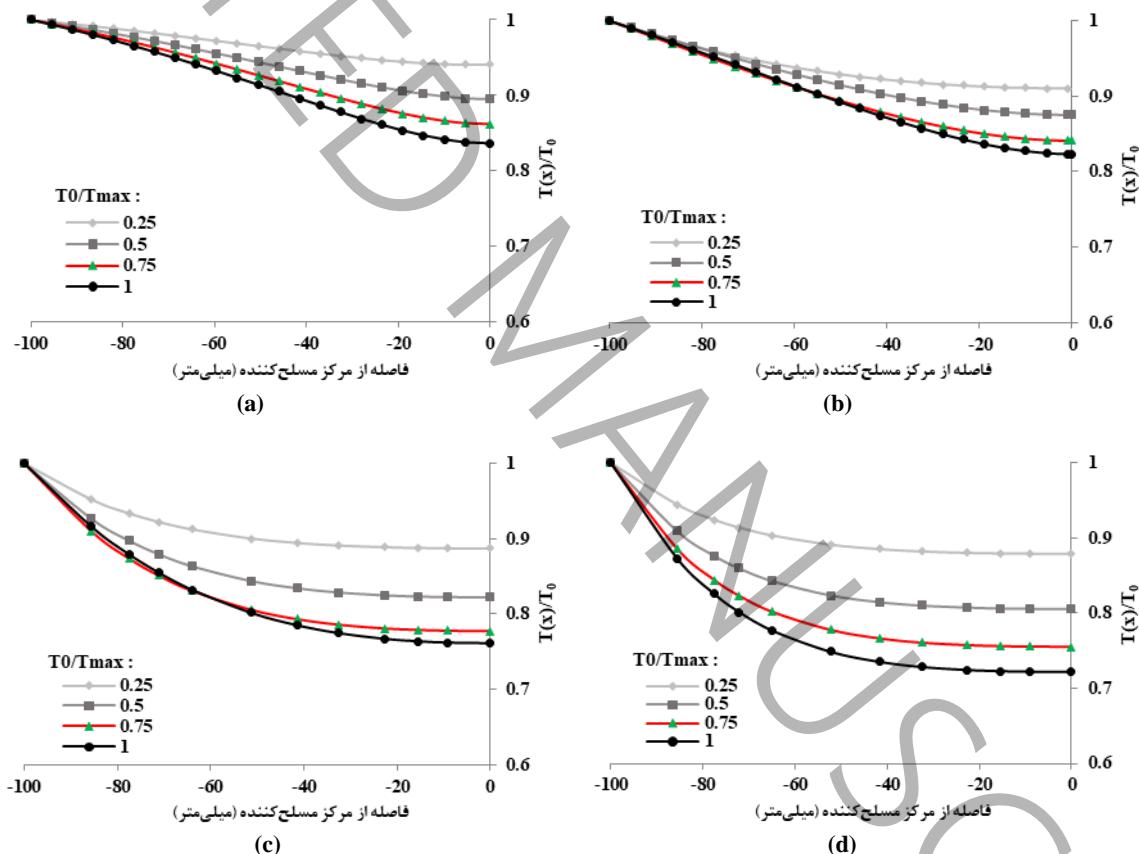


شکل ۱۶ . تأثیر تعداد رشتہ‌های مسلح‌کننده و نسبت ارتفاع خاکریز بر توزیع بار روی مسلح‌کننده (a) $T_0/T_{max}=1$ (b) $T_0/T_{max}=0.5$ (آزمایش‌های ۱ و ۴)

برای مسلح‌کننده ۵ رشتہ‌ای در $H/(s-a)=0.5$ نمودار ($Q(x)$) شباهت بیشتری به حالت الگوی توزیع بار یکنواخت دراد و برای مسلح‌کننده ۱۵ رشتہ‌ای ($Q(x)$)، شباهت بیشتری به الگوی توزیع بار مثلثی در لحظه نزدیک به گسیختگی مسلح‌کننده دارد. برای خاکریزهای مرتفع ($H/(s-a)=2$)، افزایش تعداد رشتہ‌ها باعث افزایش تجمع بار ($Q(x)$) در کنار تیر می‌شود. برای تمامی تعداد رشتہ‌های مسلح‌کننده در حین افزایش نیروی کششی در مسلح‌کننده در حالتی که خاکریز مرتفع است، توزیع بار روی مسلح‌کننده شباهت بیشتری به توزیع بار مثلثوارون دارد. افزایش تعداد رشتہ‌های مسلح‌کننده باعث افزایش خداکثر ($Q(x)$) خواهد شد (شکل ۱۶). در خاکریز با ارتفاع کم ($H/(s-a)=0.5$)، خداکثر مقدار ($Q(x)$) در $T_0/T_{max}=1$ برای مسلح‌کننده ۵، ۱۰ و ۱۵ رشتہ‌ای به ترتیب برابر $Q(x)$ را افزایش داد. در خاکریز با ارتفاع زیاد ($H/(s-a)=2$)، مقدار خداکثر ($Q(x)$) در $T_0/T_{max}=1$ برای مسلح‌کننده ۵، ۱۰ و ۱۵ به ترتیب ۰/۱۴، ۰/۲۲ و ۰/۲۴ (kN/m) اندازه‌گیری شدند. سه برابر شدن تعداد رشتہ‌ها حدود ۵/۳ برابر خداکثر مقدار ($Q(x)$) را افزایش داد. در خاکریز با ارتفاع زیاد ($H/(s-a)=2$)، مقدار خداکثر ($Q(x)$) در $T_0/T_{max}=0.5$ برای مسلح‌کننده ۵، ۱۰ و ۱۵ به ترتیب ۰/۰۸، ۰/۱۵ و ۰/۰۱۰ (kN/m) اندازه‌گیری شدند که نشان می‌دهد با سه برابر شدن تعداد رشتہ‌ها حدود ۱/۷۲ برابر خداکثر مقدار ($Q(x)$) افزایش یافت (شکل ۱۶-b).

۴-۴- توزیع نیروی کششی در طول مسلح‌کننده

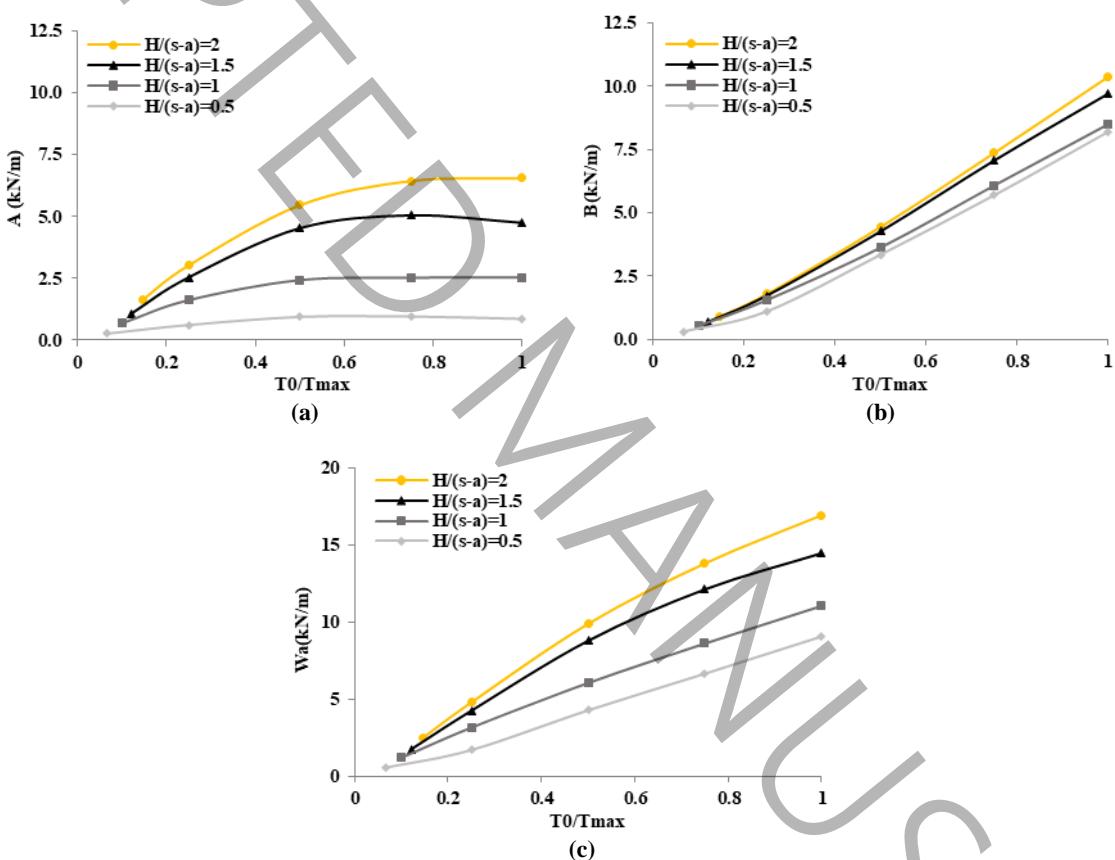
شکل ۱۷ نشان می‌دهد که بیشینه نیروی کششی در مسلح‌کننده در نزدیکی تیر اتفاق می‌افتد ($T(x)/T_0=1$). با حرکت در مسلح‌کننده از کنار تیر به سمت موقعیت مرکز، نیروی کششی در مسلح‌کننده کاهش می‌یابد ($T(x)/T_0<1$). بیشترین مقدار کاهش نیروی کششی در مسلح‌کننده، در مرکز مسلح‌کننده اتفاق می‌افتد. برای تعداد ثابتی از رشته‌های مسلح‌کننده، هر چقدر تمرکز توزیع بار در نزدیکی تیر افزایش یابد (بخش ۳-۴)، نیروی کششی کاهش بیشتری را در طول مسلح‌کننده تجربه می‌کند. افزایش ارتفاع خاکریزی سبب می‌شود که توزیع نیروی کششی در طول مسلح‌کننده به گونه‌ای باشد که در موقعیت مرکز نسبت به کنار تیر، نیروی کششی در مسلح‌کننده کاهش بیشتری را تجربه کند. در تمامی آزمایش‌ها در حین افزایش نیروی کششی در مسلح‌کننده (T_0/T_{max})، تمرکز توزیع نیروی کششی برای قسمتی از مسلح‌کننده نزدیک به تیر، افزایش می‌یابد. در خاکریز با ارتفاع کم ($H/(s-a)=0/5$) برای $0/75$ ، $0/25$ ، $0/05$ ، $0/00$ کمترین مقدار $T(x)/T_0$ (نسبت نیروی کششی در مسلح‌کننده به نیروی کششی در مسلح‌کننده تیر است) که در مرکز مسلح‌کننده اتفاق می‌افتد، به ترتیب از چپ به راست $0/89$ ، $0/86$ ، $0/83$ ، $0/80$ می‌باشد (شکل ۱۷-a)؛ در حالی که در خاکریز مرتفع‌تر ($H/(s-a)=2$)، برای $0/75$ ، $0/25$ ، $0/05$ ، $0/00$ کمترین مقدار $T(x)/T_0$ در مرکز مسلح‌کننده به ترتیب از چپ به راست $0/89$ ، $0/86$ ، $0/83$ ، $0/80$ می‌باشد (شکل ۱۷-d).



شکل ۱۷ . توزیع نیروی کششی در طول مسلح‌کننده در حین افزایش نیروی کششی در مسلح‌کننده ۱۵ رشته‌ای (a) $H/(s-a)=0/5$ (آزمایش‌های ۱-۴) (b) $H/(s-a)=1/5$ (c) $H/(s-a)=1$ (d) $H/(s-a)=2$

شکل ۱۸-a نشان می‌دهد، افزایش ارتفاع خاکریزی (برای تعداد ثابت رشته‌های مسلح‌کننده) سبب افزایش بار منتقل شده توسط اثر قوس (A) به تیر در حین افزایش نیروی کششی در مسلح‌کننده می‌شود. این افزایش در دو مرحله انجام می‌شود: مرحله اول از ابتدای آزمایش تا 50° درصد اول ظرفیت کششی مسلح‌کننده ($T_0/T_{max}=0/5$) با یک شیب صعودی اتفاق می‌افتد، به طوری که هر چقدر ارتفاع خاکریزی بیشتر باشد، این شیب بیشتر خواهد بود؛ اما مرحله بعدی از 50° درصد ظرفیت کششی مسلح‌کننده تا لحظه گسیختگی آن می‌باشد که افزایش مقدار A بسیار کم است (تقریباً ثابت است) و با افزایش نیروی کششی در مسلح‌کننده تغییرات

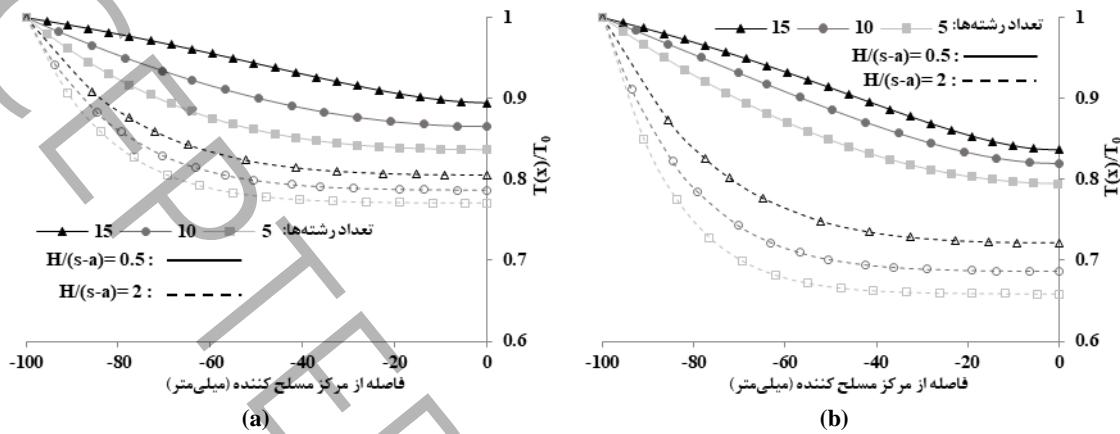
بسیار کمی در افزایش مقدار A اتفاق می‌افتد. شکل ۱۸-**b** نشان می‌دهد که میزان بار منتقل شده توسط مسلح‌کننده (B) به تیر در یک ثابت با افزایش نیروی کششی در مسلح‌کننده افزایش می‌یابد. افزایش ارتفاع خاکریز، میزان بار منتقل شده به تیر را توسط مسلح‌کننده افزایش می‌دهد. حداکثر بار منتقل شده توسط مسلح‌کننده (B_{max}) در $T_0/T_{max}=1$ ، برای $H/(s-a)=0.5$ به ترتیب از چپ به راست $10/3$ ، $8/5$ ، $9/7$ ، $8/2$ است (افزایش ۲۶ درصدی ظرفیت مسلح‌کننده افزایش می‌یابد). شکل ۱۸-**c** نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع خاکریزی، میزان کل بار منتقل شده به تیر (W_a) در حین افزایش نیروی کششی در مسلح‌کننده افزایش می‌یابد، به طوری که در کششی معادل ۵۰ درصد ظرفیت کششی مسلح‌کننده مقدار W_a برای $H/(s-a)=0.5$ به ترتیب از چپ به راست $4/2$ ، $6/8$ ، $9/9$ است (مقدار W_a با 4 برابر شدن ارتفاع خاکریزی $5/35$ برابر شد). با فعال شدن درصد بیشتری از ظرفیت کششی مسلح‌کننده (به دلیل ثابت ماندن W_a برای $T_0/T_{max}>0.5$ ، تأثیر ارتفاع خاکریز در انتقال W_a به تیر کاهش می‌یابد).



شکل ۱۸. تأثیر نسبت ارتفاع خاکریزی بر A و B و W_a در حین افزایش نیروی کششی در مسلح‌کننده 15 رشته‌ای (a) تغییرات A (b) تغییرات B (c) تغییرات W_a (آزمایش‌های 1 - 4)

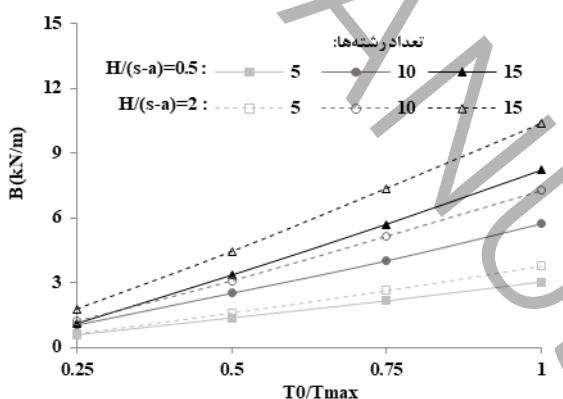
مقدار W_a در $T_0/T_{max}=1$ برای $H/(s-a)=0.5$ ، 1 ، 1.5 ، 2 ، $5/1$ ، 11 ، $14/5$ ، 71 ، $9/1$ (kN/m) می‌باشد (مقدار W_a با 4 برابر شدن ارتفاع خاکریز $1/87$ برابر شد). شکل ۱۹ نشان می‌دهد که برای تمامی تعداد رشته‌های مسلح‌کننده، حداکثر نیروی کششی در کنار تیر ایجاد می‌شود و حرکت به سمت موقعیت مرکز مسلح‌کننده مقدار نیروی کششی در مسلح‌کننده کاهش می‌یابد. افزایش تعداد رشته‌ها سبب می‌شود که توزیع نیروی کششی در طول مسلح‌کننده (برای مقادیر T_0/T_{max} یکسان) یکنواخت‌تر باشد. افزایش تعداد رشته‌ها نزدیکتر شود. شکل ۱۹-**b** نشان می‌دهد که دو عامل افزایش ارتفاع خاکریز و کاهش تعداد رشته‌های مسلح‌کننده، باعث تمرکز بیشتر توزیع نیروی کششی در نزدیکی تیر می‌شوند (غیر یکنواخت‌تر شدن توزیع نیروی کششی در طول مسلح‌کننده). در حالی که حداکثر ظرفیت کششی مسلح‌کننده فعل شود (مقدار ظرفیت کششی مسلح‌کننده (T_{max})، برای

مسلح کننده ۵ و ۱۵ رشته‌ای با توجه به جدول ۱ به ترتیب ۵ و ۱۵ (kN/m) است، برای کمترین ارتفاع خاکریز و بیشترین تعداد رشته مسلح کننده (آزمایش ۱)، در مقایسه با بیشترین ارتفاع خاکریزی و کمترین تعداد رشته‌های مسلح کننده (آزمایش ۸)، مقدار $T(x)/T_0$ در موقعیت مرکز مسلح کننده کاهش بیشتری را تجربه می‌کند. حدود ۲۰ درصد کاهش از ۰/۸۳ به ۰/۶۶ کاهش می‌یابد (شکل ۱۹-ب). که نشانهٔ غیر یکنواخت‌تر شدن توزیع کشش در طول مسلح کننده و تجمع توزیع نیروی کششی مسلح کننده در نزدیکی تیر برای آزمایش شماره ۸ می‌باشد.



شکل ۱۹. تأثیر تعداد رشته‌های مسلح کننده و نسبت ارتفاع خاکریزی بر توزیع نیروی کششی در طول مسلح کننده (a) $T_0/T_{max}=1/5$ (آزمایش‌های ۱ و ۴) (b) $T_0/T_{max}=1/8$ (آزمایش‌های ۱ و ۸)

شکل ۲۰ نشان می‌دهد افزایش تعداد رشته‌های مسلح کننده برای درصد ثابتی از ظرفیت کششی مسلح کننده (ثابت $T_0/T_{max}=1$)، باعث افزایش مقدار بار B می‌شود. برای مثال، در $H/(s-a)=0.5$ و $T_0/T_{max}=1/5$ مقدار بار منتقل شده توسط مسلح کننده (B) با افزایش تعداد رشته‌ها از ۵ به ۱۵، حدود ۱/۵ برابر افزایش می‌یابد. که علت را می‌توان در افزایش مقدار نیروی کششی (T_0) در مسلح کننده ۱۵ رشته‌ای نسبت به ۵ رشته‌ای دانست.

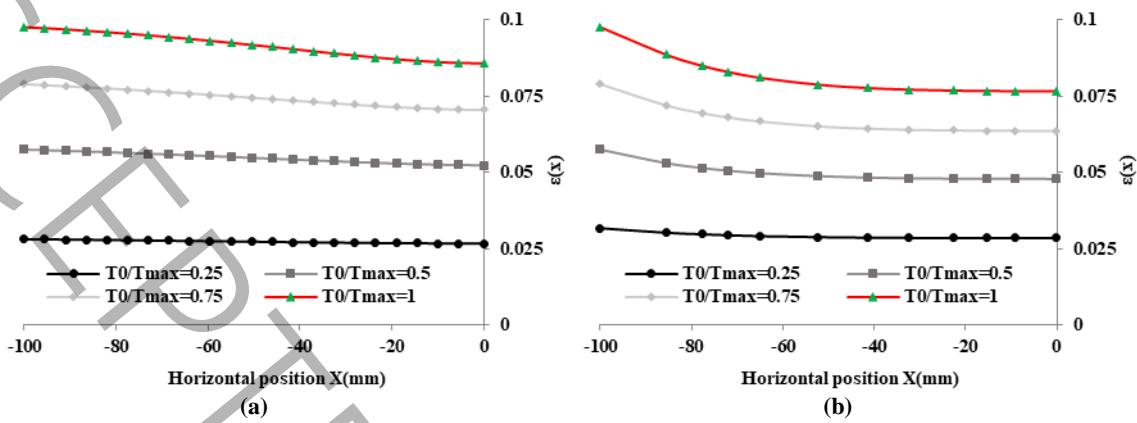


شکل ۲۰. تأثیر تعداد رشته‌های مسلح کننده و نسبت ارتفاع خاکریزی بر B در حین افزایش نیروی کششی در مسلح کننده (آزمایش‌های ۱ و ۴ - ۸)

۴-۵-۴- توزیع کرنش در طول مسلح کننده

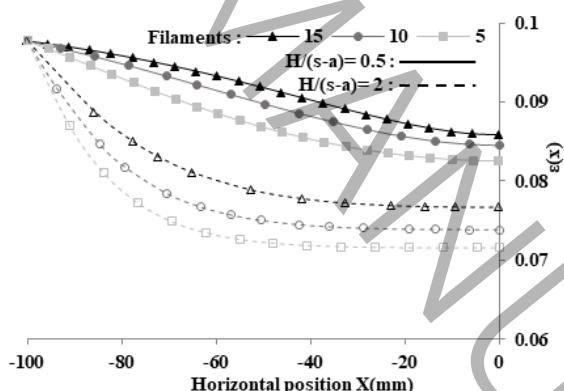
شکل ۲۱ نشان می‌دهد که حداقل کرنش در قسمتی از مسلح کننده، نزدیک به تیر اتفاق می‌افتد، همچنین در مقادیر T_0/T_{max} کم نمودار ($\varepsilon(x)$) در طول مسلح کننده، تغییراتش بسیار کم خواهد بود و با افزایش مقدار T_0/T_{max} مقدار $\varepsilon(x)$ با حرکت از کنار تیر به سمت مرکز مسلح کننده کاهش بیشتری می‌یابد، به طوری که در $H/(s-a)=2$ مقدار $\varepsilon(x)$ در $T_0/T_{max}=0/25$ از $T_0/T_{max}=0/31$ در مسلح کننده کنار تیر به $0/028$ در مرکز مسلح کننده کاهش می‌یابد ($\Delta\varepsilon(x)=10\%$). اما در $T_0/T_{max}=1$ مقدارش از $0/097$ در قسمتی از

مسلح کننده کنار تیر به $0/0.76$ در مرکز مسلح کننده کاهش می‌یابد ($\Delta\varepsilon(x) = -0.22\%$). کمترین مقدار (x) در مرکز مسلح کننده برای $T_0/T_{max} = 1$ و $H/(s-a) = 0/5$ به ترتیب از چپ به راست $0/0.86$ و $0/0.76$ می‌باشد که نشان می‌دهد افزایش ارتفاع خاکریزی، تمرکز توزیع کرنش را در نزدیکی تیر افزایش می‌دهد.



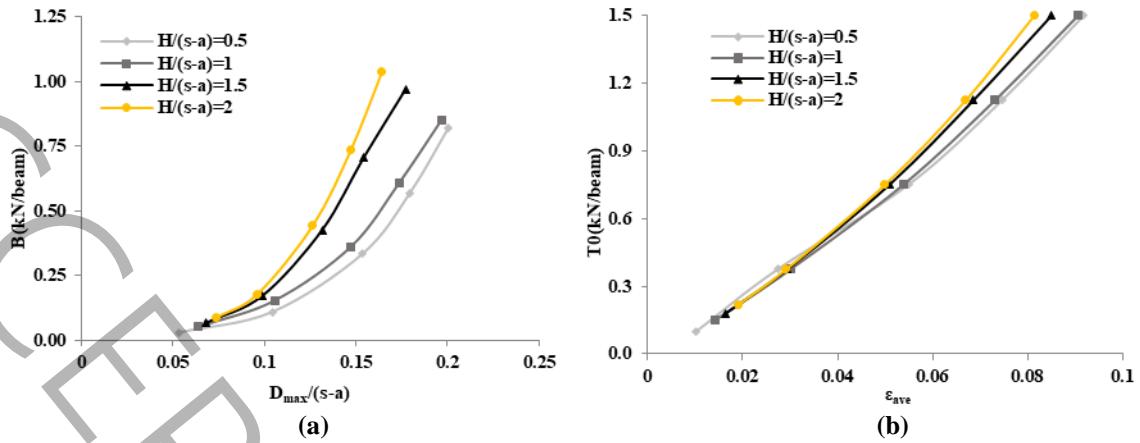
شکل ۲۱ . توزیع کرنش در طول مسلح کننده در حین افزایش نیروی کششی در مسلح کننده ۱۵ شته‌ای (a) $H/(s-a) = 2$ (b) $H/(s-a) = 0/5$ (آزمایش‌های ۱ - ۴)

شکل ۲۲ نشان می‌دهد که کاهش ارتفاع خاکریزی و افزایش تعداد رشته‌های مسلح کننده در لحظه نزدیک به گسیختگی مسلح کننده، علاوه بر افزایش مقدار کرنش در طول مسلح کننده، توزیع کرنش در طول مسلح کننده را نیز یکنواخت‌تر می‌کند و بیشترین تمرکز کرنش در نزدیکی تیر (توزیع غیر یکنواخت‌تر کرنش)، برای خاکریزهای مرتفع‌تر و تعداد رشته‌های اتفاقاً اتفاق می‌افتد (آزمایش ۸).



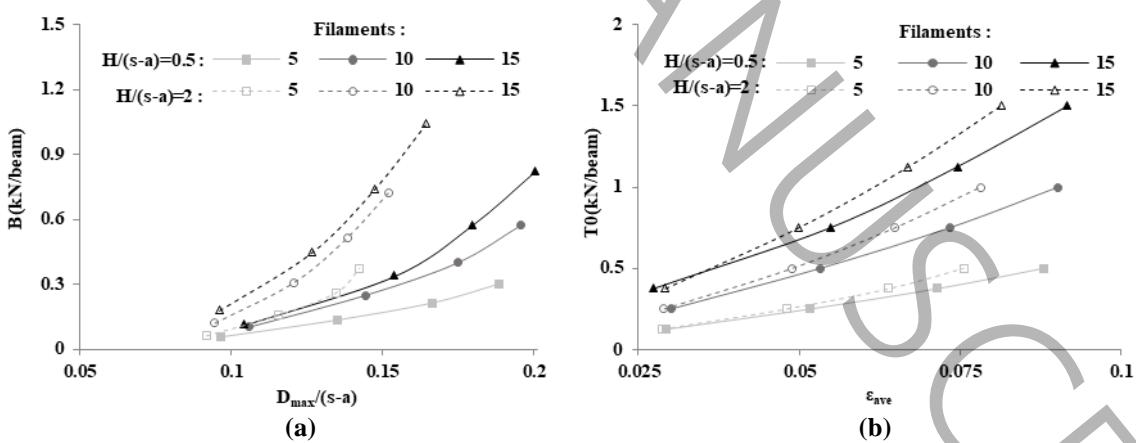
شکل ۲۲ . تأثیر نسبت ارتفاع خاکریزی و تعداد رشته‌های مسلح کننده در توزیع کرنش در طول مسلح کننده در لحظه نزدیک به گسیختگی مسلح کننده ($T_0/T_{max} = 1$), (آزمایش‌های ۱ و ۴ - ۸)

نمودار شکل ۲۳-a دارای دو شیب اولیه و ثانویه است که با افزایش ارتفاع خاکریزی، هر دو شیب اولیه و ثانویه افزایش می‌یابد. افزایش $H/(s-a)$ از $0/5$ به 2 مقدار شیب اولیه از 15 به 40 (kN/m) و شیب ثانویه از 100 به 150 (kN/m) افزایش می‌یابد که علت را می‌توان در توزیع نیروی کششی در طول مسلح کننده (برای تعداد ثابتی از رشته‌های مسلح کننده) دانست. همان‌طور که در بخش ۴-۴ نشان داده شد (شکل ۱۷)، تمرکز نیروی کششی در طول مسلح کننده، در موقعیت نزدیک به تیر با افزایش T_0/T_{max} در حین آزمایش و افزایش ارتفاع خاکریز افزایش می‌یابد.



شکل ۲۳ . تأثیر نسبت ارتفاع خاکریزی بر ϵ_{ave} و $D_{max}/(s-a)$ در حین آزمایش تا لحظه گسیختگی مسلح کننده ۱۵ رشته‌ای (a) تغییرات B و نسبت نشست ماکریبم مسلح کننده (b) تغییرات T_0 و کرنش متوسط مسلح کننده (آزمایش‌های ۴-۱)

که این عدم توزیع یکنواخت نیروی کششی (تجمع نیروی کششی در مجاورت تیر) و به دنبال آن تجمع کرنش (χ) در قسمتی از مسلح کننده نزدیک تیر، سبب می‌شود که مقادیر کرنش متوسط مسلح کننده (ϵ_{ave}) و میزان حداکثر تغییر شکل مسلح کننده، کاهش یابد و مسلح کننده قادر خواهد بود با نشست کمتر، مقادیر B بیشتری را به تیر منتقل کند (شکل ۲۳-a). شکل ۲۳ نشان می‌دهد مقادار حداکثر $D_{max}/(s-a)$ و ϵ_{ave} که مسلح کننده در لحظه نزدیک به گسیختگی تحمل می‌کند با افزایش ارتفاع خاکریزی کاهش می‌یابد. برای $2/5, 1, 1/5, 0/5 = H/(s-a)$ مقدار حداکثر کرنش متوسط در لحظه نزدیک گسیختگی مسلح کننده، به ترتیب از چپ به راست $0/081, 0/085, 0/092, 0/096$ است (۱۲ درصد کاهش در مقادار کرنش متوسط مسلح کننده در لحظه نزدیک به گسیختگی با افزایش 4 برابری در نسبت ارتفاع خاکریز). برای همین، نسبت‌های ارتفاع مقادار $D_{max}/(s-a)$ به ترتیب از چپ به راست $0/164, 0/177, 0/196, 0/2$ است (۱۸ درصد کاهش در $D_{max}/(s-a)$ در لحظه نزدیک به گسیختگی، با افزایش 4 برابری در نسبت ارتفاع خاکریز). همچنین می‌توان مشاهده کرد که به ازای یک نسبت نشست ثابت $0/164$ ، با 4 برابر شده ارتفاع خاکریز مسلح کننده قادر است حداکثر $3/7$ برابر بار بیشتر به تیر منتقل کند.



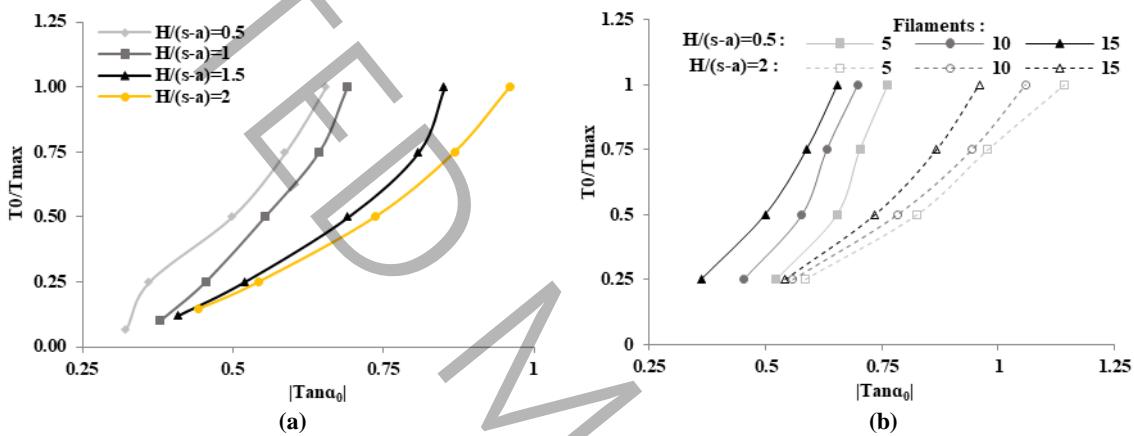
شکل ۲۴ . تأثیر نسبت ارتفاع خاکریزی و تعداد رشته‌های مسلح کننده بر ϵ_{ave} و $D_{max}/(s-a)$ در حین آزمایش تا لحظه نزدیک به گسیختگی مسلح کننده (a) نمودار B - $D_{max}/(s-a)$ (b) T_0 - ϵ_{ave} (آزمایش‌های ۱ و ۴ - ۸)

شکل ۲۴-a نشان می‌دهد که افزایش تعداد رشته‌های مسلح کننده، ظرفیت مسلح کننده را برای انتقال بار به تیر (B_{max}) افزایش می‌دهد. برای $2/5 = H/(s-a)$ با سه برابر کردن تعداد رشته‌ها، مقدار B_{max} حدود $2/7$ برابر برای هر دو نسبت ارتفاع خاکریز افزایش یافت. افزایش تعداد رشته‌ها، روند رشد B نسبت به $D_{max}/(s-a)$ افزایش می‌دهد. در $H/(s-a) = 0/5$ برای یک مقدار ثابت $D_{max}/(s-a) = 0/125$ مقدار B برای مسلح کننده $5, 10$ و 15 رشته‌ای، به ترتیب $1/68, 2/76$ و $3/14$ (kN/m) است (۷۸ درصد

افزایش). شکل ۲۴-۶ نشان می‌دهد که هر دو عامل افزایش ارتفاع خاکریزی و افزایش تعداد رشتلهای مسلح‌کننده، باعث افزایش سختی در مسلح‌کننده می‌شوند. با سه برابر شدن تعداد رشتلهای از ۵ به ۱۵ در $H/(s-a)=2$ برای $\varepsilon_{ave}=0.075$ مقدار T_0 متضاد با افزایش تعداد رشتلهای سه برابر خواهد شد. مقدار T_0 در $H/(s-a)=0.075$ با چهار برابر شدن نسبت ارتفاع خاکریزی، حدود ۱۷/۵ درصد افزایش می‌یابد.

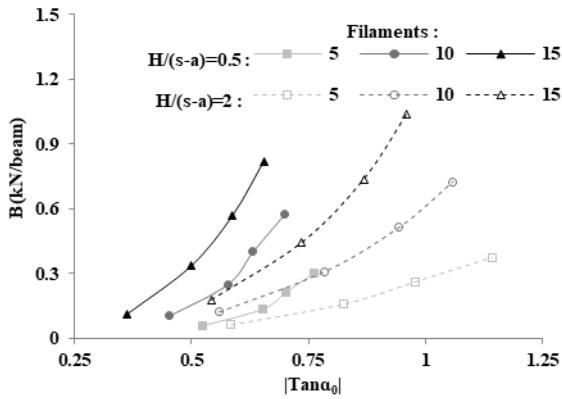
۶-۴- شیب مسلح‌کننده کنار تیر

شکل ۲۵-۶ نشان می‌دهد که در حین آزمایش و با افزایش مقدار نیروی کششی در مسلح‌کننده، شیب نمودار تغییر شکل در کنار تیر افزایش می‌یابد، به طوری که مقدار و محدوده این شیب ($|T \alpha_0|$)، با افزایش نسبت ارتفاع خاکریز افزایش می‌یابد. برای کمترین ارتفاع خاکریز $H/(s-a)=0.05$ تغییرات شیب مسلح‌کننده در کنار تیر، در محدوده $0.36/0.65$ تا $0.95/0.45$ و برای بیشترین ارتفاع خاکریز $H/(s-a)=2$ در محدوده $0.45/0.95$ تا $0.95/0.45$ اندازه‌گیری شدند.



شکل ۲۵ . تأثیر نسبت ارتفاع و تعداد رشتلهای مسلح‌کننده بر شیب مسلح‌کننده کنار تیر در حین آزمایش (a) تأثیر نسبت ارتفاع (آزمایش‌های ۱ - ۴) (b) تأثیر نسبت ارتفاع و تعداد رشتلهای مسلح‌کننده (آزمایش‌های ۱ و ۴ - ۸)

برای مسلح‌کننده ۱۵ رشتلهای با افزایش نسبت ارتفاع خاکریز از $0.05/0.95$ به $0.05/0.45$ ، حداقل شیب کنار مسلح‌کننده در 1 (لحظه نزدیک به گسیختگی) از $0.65/0.95$ به $0.45/0.95$ افزایش می‌یابد (حدود ۴۶ درصد شیب کنار، در لحظه نزدیک به گسیختگی مسلح‌کننده، افزایش می‌یابد). شکل ۲۵-۶ نشان می‌دهد که با افزایش تعداد رشتلهای مسلح‌کننده برای درصد مشخصی از ظرفیت کششی مسلح‌کننده شیب کنار منحنی تغییر شکل، کاهش خواهد یافت. این کاهش در $H/(s-a)=0.25$ درصد ظرفیت کششی مسلح‌کننده، با سه برابر شدن تعداد رشتلهای مسلح‌کننده در $2/0.05=0.05/0.45$ به ترتیب از چپ به راست ۷ و ۳۱ درصد خواهد بود. همچنین، در لحظه نزدیک به گسیختگی مسلح‌کننده با سه برابر شدن تعداد رشتلهای در $2/0.05=0.05/0.45$ به ترتیب از چپ به راست ۱۴ و ۱۶ درصد خواهد بود. شکل ۲۶ نشان می‌دهد افزایش تعداد رشتلهای مسلح‌کننده، سبب می‌شود که روند رشد B در مقابل افزایش شیب کنار تیر افزایش یابد. این امر سبب می‌شود برای یک B ثابت، مقدار شیب تغییر شکل مسلح‌کننده در کنار تیر، با افزایش تعداد رشتلهای کاهش یابد. برای $B=3$ مقدار شیب مسلح‌کننده با سه برابر شدن تعداد رشتلهای برای $2/0.05=0.05/0.45$ به مقدار یکسان و حدود ۳۸ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۲۶ . تأثیر نسبت ارتفاع خاکریز و تعداد رشته‌های مسلح‌کننده روی B - $|Tana_0|$ (آزمایش‌های ۱ و ۴ - ۸)

۵- نتیجه‌گیری

آزمایش‌های دو بعدی، با استفاده از میله‌های فلزی، به عنوان خاکریز دو بعدی، به منظور بررسی رفتار مسلح‌کننده ژئوسینتیکی در خاکریزهای متکی بر شمع انجام شد. آزمایش‌ها به طور مخصوصی طراحی شدند تا امکان اندازه‌گیری جدایانه هر کدام از پارامترهای A (تأثیر قوس) و B (اثر مسلح‌کننده) در حین آزمایش امکان‌پذیر باشد. آزمایش به منظور بررسی تأثیر ارتفاع خاکریزی و تعداد رشته‌های مسلح‌کننده، بر رفتار آن انجام گرفت.

- در خاکریز مرتفع تر قوس‌های تشکیل شده در خاکریزهای مرتفع تر می‌گردد.
- برای خاکریزهای مرتفع ($H/(s-a) > 1$), تجمع توزیع سربار قائم و بیشینه تغییرات شیب مسلح‌کننده، در حین افزایش نیروی کششی در قسمتی از مسلح‌کننده کنار تیر اتفاق می‌افتد. برای خاکریزهای با ارتفاع کم ($H/(s-a) < 1$), در حین افزایش نیروی کششی در مسلح‌کننده، بیشینه تغییرات شیب مسلح‌کننده و مرکز توزیع بار، در موقعیت مرکز مسلح‌کننده اتفاق می‌افتد.
- برای تعداد رشته‌های مسلح‌کننده ثابت، در حالتی که تجمع نیروی کششی در قسمتی از مسلح‌کننده نزدیک به تیر بیشتر باشد (خاکریزهای مرتفع)، با یک T_0 ثابت، مسلح‌کننده قادر خواهد بود علاوه بر کاهش کرنش متوسط (ϵ_{ave})، کاهش نشست ($D_{max}/(s-a)$) و افزایش در شیب منحنی تغییر شکل در کنار تیر، بار (B) بیشتری را به تیر (شمع دو بعدی) منتقل کند. با 4 برابر شدن ارتفاع خاکریز مسلح‌کننده با یک نشست ثابت قادر خواهد بود حداقل تا $3/7$ برابر بار منتقل شده به شمع را افزایش دهد.
- با افزایش تعداد رشته‌های مسلح‌کننده به دلیل افزایش سختی آن، مسلح‌کننده می‌تواند علاوه بر کاهش نشست، بار (B) بیشتری را به شمع منتقل کند. با سه برابر شدن تعداد رشته‌ها، مسلح‌کننده با یک نشست ثابت قادر خواهد بود حداقل تا $1/77$ برابر بار منتقل شده به شمع را افزایش دهد.

۶- فهرست علائم

باری که مستقیماً توسط قوسزدگی به شمع منتقل می‌شود، بار	kN/m	A
عرض(بعد) تیر، mm		a
حداکثر مقدار A که قبل از گسیختگی رشته‌ها به شمع منتقل می‌شود، kN/m		A_{max}
باری که غیرمستقیم توسط کشش مسلح‌کننده به شمع منتقل می‌گردد، kN/m		B
طول هر تیر عمود بر صفحه دو بعدی ($z-x$) آزمایش ($b=100$ mm)	mm	b
حداکثر مقدار B که قبل از گسیختگی رشته‌ها به شمع منتقل خواهد شد(ظرفیت B)، kN/m		B_{max}
تغییرات شیب مسلح‌کننده	d^2z/dx^2	
حداکثر تغییر شکل (نشست) مسلح‌کننده در موقعیت مرکز آن ($X=0$ mm)		D_{max}

نسبت نشت حداکثر مسلح‌کننده در موقعیت مرکز آن ($X=0\text{mm}$), mm	$D_{max}/(s-a)$
تعداد رشته‌های مسلح‌کننده	<i>Filaments</i>
ارتفاع خاکریز روی تیرها, mm	<i>H</i>
نسبت ارتفاع خاکریز	$H/(s-a)$
سختی مسلح‌کننده متناظر با نیروی کششی T_i kN/m	J_i
بعد صفحه بارگذاری برای اعمال سربار, mm	$L.W$
نصف طول مسلح‌کننده بین دو تیر قبل از تغییر شکل, mm	$L1$
نصف طول مسلح‌کننده بین دو تیر بعد از تغییر شکل, mm	$L2$
توزيع بار قائم روی مسلح‌کننده, kN/m	$Q(X)$
بزرگترین نیم قطر قوس‌های تشکیل شده در خاکریز روی مسلح‌کننده در راستای محور Z mm	R_a
بزرگترین نیم قطر قوس‌های تشکیل شده در خاکریز در راستای محور X mm	R_b
فاصله مرکز تا مرکز تیرها, mm	s
فاصله کار تیر ۱ تا کنار تیر ۲ مجاورش, mm	$(s-a)$
نیروی کششی ایجاد شده در مسلح‌کننده در لبه تیر (T _{edge}) mm	T_0
نسبتی از ظرفیت کششی مسلح‌کننده که حداکثر آن ۱ می‌باشد, mm	To/T_{max}
مولفه افقی نیروی کششی ایجاد شده, mm	T_H
نیروی کششی که بر اثر بار قائم در مسلح‌کننده در موقعیت A ایجاد می‌شود, mm	T_i
حداکثر مقدار نیروی کششی که رشته‌ها می‌توانند تحمل کند (ظرفیت کششی رشته‌ها), kN/bm	T_{max}
مولفه قائم نیروی کششی ایجاد شده در لبه تیر, kN/m	T_{Vedge}
تصویر قائم نیروی کششی مسلح‌کننده در قسمت آام مسلح‌کننده, kN/m	T_{Vi}
نیروی کششی در مختصات X در مسلح‌کننده, kN/m	$T(x)$
نسبت نیروی کششی در مختصات X به نیروی کششی در مسلح‌کننده (کار) لبه تیر, m	$T(x)/T_0$
کل بار قائم که به شمع می‌رسد ($A+B$), kN/m	W_a
حداکثر کل بار قائم که تا قبل از گسیختگی رشته‌ها به تیر می‌رسد (ظرفیت W_a), kN/m	W_{amax}
زاویه مماس بر منحنی تغییر شکل مسلح‌کننده در لبه تیر با افق, °	α_0
زاویه مماس بر منحنی تغییر شکل مسلح‌کننده در نقطه A با راستای افق, °	α_i
کرنشی که در اثر تغییر شکل رشته‌های مسلح‌کننده انفاق می‌افتد	ε_{ave}
کرنش یک المان از مسلح‌کننده بعد از تغییر شکل	ε_i

۷- منابع و مراجع

- [1] S. Van Eekelen, J. Han, Geosynthetic-reinforced pile-supported embankments: state of the art, *Geosynthetics International*, 27(2) (2020) 112-141.
- [2] S.J. Eekelen, Basal reinforced piled embankments, Delft University of Technology, 2015.
- [3] S.J. Eekelen, M.H. Brugman, Design guideline basal reinforced piled embankments, (2016).
- [4] K. Terzaghi, Stress distribution in dry and in saturated sand above a yielding trap-door, (1936).
- [5] S.-J. Feng, S.-G. Ai, H. Chen, Estimation of arching effect in geosynthetic-reinforced structures, *Computers and Geotechnics*, 87 (2017) 188-197.
- [6] W. Liu, S. Qu, H. Zhang, Z. Nie, An integrated method for analyzing load transfer in geosynthetic-reinforced and pile-supported embankment, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21 (2017) 687-702.
- [7] T. Van der Peet, S. Van Eekelen, 3D numerical analysis of basal reinforced piled embankments, in: Proceedings of the 10th International Conference on Geosynthetics, Berlin, Germany, 2014, pp. 21-25.
- [8] B. Le Hello, P. Villard, Embankments reinforced by piles and geosynthetics—Numerical and experimental studies dealing with the transfer of load on the soil embankment, *Engineering geology*, 106(1-2) (2009) 78-91.

- [9] B.S. Albusoda, S.H. Hussein, D.A. Al-Hamdani, Numerical Analysis of Geogrid and Deep Mixing Column Supported Embankment, in: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2020, pp. 012005.
- [10] M. Fakhrian Nejad, S.H. Lajevardi, S.J. van Eekelen, A. Nayeri, Two-Dimensional Experimental and Analytical Investigations of Load Distribution on Piled Embankments, International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 8(6) (2022) 72.
- [11] O. Jenck, D. Dias, R. Kastner, Discrete element modelling of a granular platform supported by piles in soft soil-Validation on a small scale model test and comparison to a numerical analysis in a continuum, Computers and Geotechnics, 36(6) (2009) 917-927.
- [12] R. Rui, Y.-q. Ye, J. Han, Y.-x. Zhai, Y. Wan, C. Chen, L. Zhang, Two-dimensional soil arching evolution in geosynthetic-reinforced pile-supported embankments over voids, Geotextiles and Geomembranes, 50(1) (2022) 82-98.
- [13] S.v. Van Eekelen, A. Bezuijen, A. Van Tol, Analysis and modification of the British Standard BS8006 for the design of piled embankments, Geotextiles and Geomembranes, 29(3) (2011) 345-359.
- [14] C. Yun-Min, C. Wei-Ping, C. Ren-Peng, An experimental investigation of soil arching within basal reinforced and unreinforced piled embankments, Geotextiles and Geomembranes, 26(2) (2008) 164-174.
- [15] D. Zaeske, Zur Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über pfahlartigen Gründungselementen, Fachgebiet u. Versuchsanst. Geotechnik, Univ. Gh Kassel, 2001.
- [16] L. Briançon, B. Simon, Performance of pile-supported embankment over soft soil: full-scale experiment, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138(4) (2012) 551-561.
- [17] H.-J. Lai, J.-J. Zheng, J. Zhang, R.-J. Zhang, L. Cui, DEM analysis of “soil” -arching within geogrid-reinforced and unreinforced pile-supported embankments, Computers and Geotechnics, 61 (2014) 13-23.
- [18] D.F. Fagundes, M.S. Almeida, L. Thorel, M. Blanc, Load transfer mechanism and deformation of reinforced piled embankments, Geotextiles and Geomembranes, 45(2) (2017) 1-10.
- [19] L. Briançon, A. Abdelouhab, A laboratory device to analyze the behavior of pile supported embankment reinforced by geosynthetics, Proceedings of 11th ICG, (2018) 16-21.
- [20] O. Jenck, D. Dias, R. Kastner, Soft ground improvement by vertical rigid piles two-dimensional physical modelling and comparison with current design methods, Soils and Foundations, 45(6) (2005) 15-30.
- [21] R. Rui, J. Han, S. Van Eekelen, Y. Wan, Experimental investigation of soil-arching development in unreinforced and geosynthetic-reinforced pile-supported embankments, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 145(1) (2019) 04018103.
- [22] E. für den Entwurf, die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen-EBGEO, Herausgegeben von der deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.,(2. Auflage), Berlin: Ernst & Sohn, (2010).
- [23] S.J. Van Eekelen, A. Bezuijen, H. Lodder, e.A. van Tol, Model experiments on piled embankments. Part I, Geotextiles and Geomembranes, 32 (2012) 69-81.
- [24] S.J. Van Eekelen, The 2016-update of the dutch design guideline for basal reinforced piled embankments, Procedia engineering, 143 (2016) 582-589.