نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۶، شماره ۱، سال ۱۴۰۳، صفحات ۲۳ تا ۵۰
DOI: 10.22060/ceej.2024.21779.7823

مطالعهٔ دو بعدی آزمایشگاهی و تحلیلی رفتار مسلح‌کننده در خاکریزهای متکی بر شمع

محمد فخریان نژاد[۱]، سید حمید لاجوردی[۱*]، سوزان جی.ام. ون ایکلن[۲]، آرش نیری[۱]

۱- گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران
۲- گروه مهندسی ژئوتکنیک، مؤسسه تحقیقاتی دلتارس، دلفت، هلند.

خلاصه: یکی از روش‌های بهسازی خاک‌نرم استفاده از خاکریز به همراه مسلح‌کننده ژئوسینتتیکی 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 مسلح‌کننده 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 مسلح‌کننده بین شمع‌ها می‌گردد. یکی از اهداف آیین‌نامه‌های طراحی خاکریز متکی بر شمع آن است که مسلح‌کننده 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 مسلح‌کننده بدست آمده از آزمایش‌ها، محاسبه‌های تحلیلی انجام می‌شود. دستگاه آزمایش به گونه‌ای طراحی و ساخته شده‌است که امکان اندازه‌گیری جداگانه مقادیر A و B فراهم شود. بررسی‌ها روی متغییرهای ارتفاع خاکریز و تعداد رشته‌های مسلح‌کننده نشان دادندکه با افزایش ۴ برابری ارتفاع خاکریز به دلیل تشکیل قوس پایدارتر و افزایش تجمع توزیع‌بار در نزدیکی شمع‌ها، مسلح‌کننده قادر است با یک نشست ثابت تا حداکثر ۳/۷ برابر بار بیشتری را به شمع‌ها منتقل کند، در حالی که با سه برابر شدن تعداد رشته‌های مسلح‌کننده، به ازای یک نشست ثابت مسلح‌کننده قادر خواهد بود حداکثر ۱/۷۸ برابر بار منتقل شده به شمع‌ها را افزایش دهد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۷
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۱۴
پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۱۰/۲۹

کلمات کلیدی:
خاکریز متکی برشمع
مسلح‌کننده
ارتفاع خاکریز
توزیع بار
قوس‌زدگی

۱- مقدمه

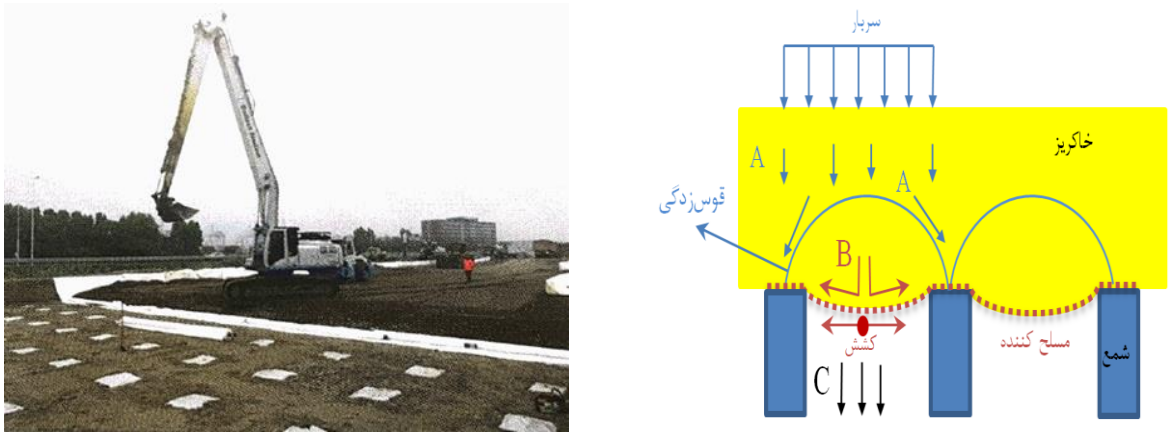
یکی از راهکارهای بهبود خاک نرم، استفاده از یک مسلح کننده ژئوسینتتیکی و خاکریز متکی به شمع است [۱]. این سیستم از شمع‌ها با چیدمان مناسب، سپس قرار دادن مسلح‌کننده روی شمع‌ها و خاکریزی روی مسلح‌کننده اجرا می‌شود (شکلa-۱) که هدف کاهش سربار وارده به خاک نرم بستر توسط انتقال بخش بزرگی از سربار و وزن خاکریز 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 مسلح‌کننده ژئوسینتتیکی و خاکریز متکی بر شمع، وقتی قوس‌زدگی اتفاق می‌افتد که ژئوسینتتیک 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 مسلح‌کننده ژئوسینتتیکی بین شمع‌ها توزیع می‌شود. بخشی از این بار باقی‌مانده، توسط کشش مسلح‌کننده به سمت شمع‌ها منتقل می‌شود. این بخش بار B نامیده می‌شود. اگر زیر مسلح‌کننده، 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 (شکلb-۱).

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 مسلح‌کننده ژئوسینتتیکی و نوع سربار وارد شده می‌توانند در انتقال بار موثر باشند [۱]. افزایش زاویه اصطکاک

1 Soil arching

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Sh.lajevardi@iau.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

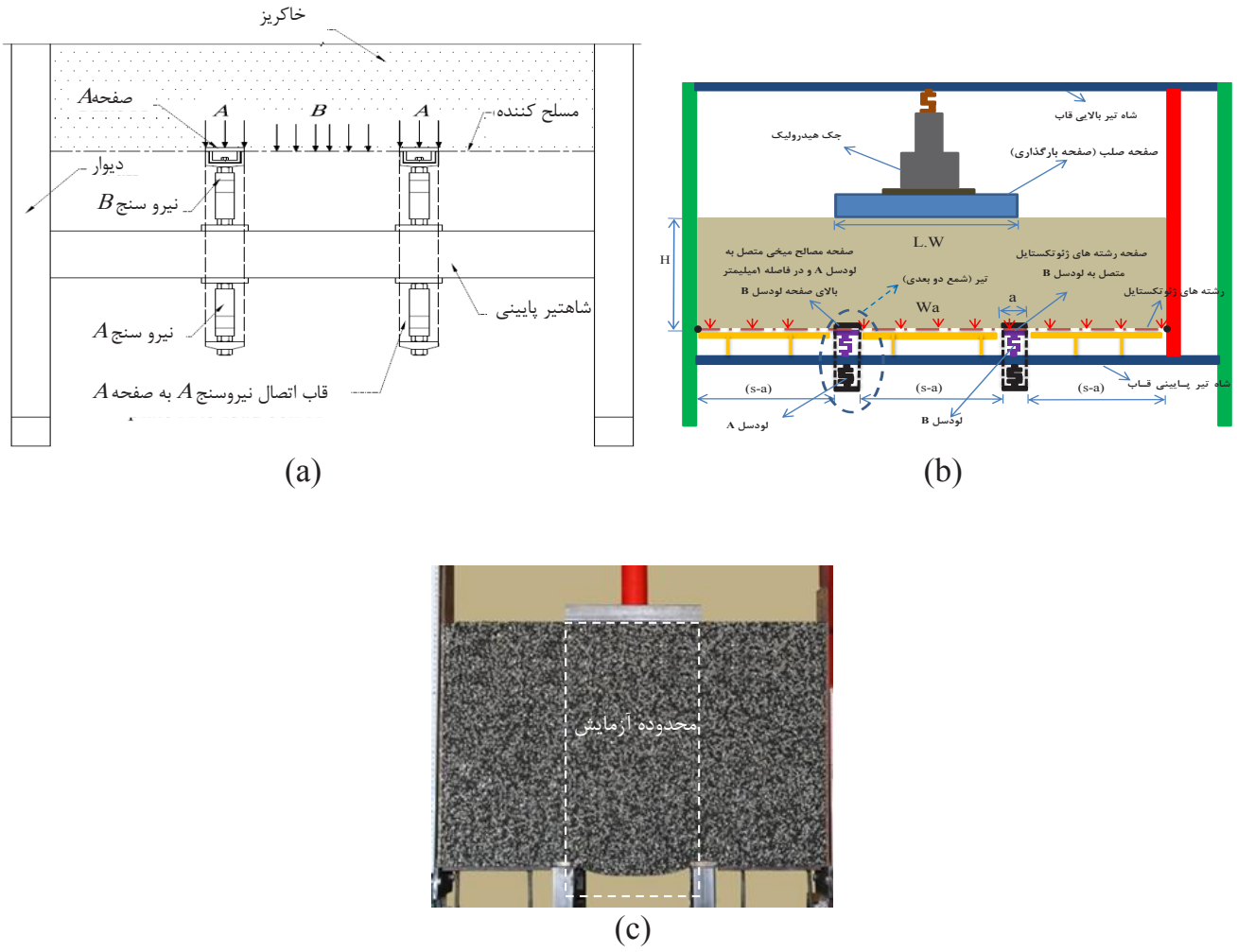


(a) (b)

شکل ۱. خاکریز متکی بر شمع (a) نمونه پروژه در حال اجرا از خاکریز متکی بر شمع (b) توزیع سربار و وزن خاکریز، A: مستقیم به سمت شمع ها (قوس زدگی)، B: به روی خاک

Fig. 1. pile embankment (a) Sample of a pile embankment project under construction (b) Distribution of the surcharge load and soil weight to the piles

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 مسلح‌کننده، سهم بار منتقل شده به شمع $(A+B)$ را افزایش می‌دهد [۸]. همچنین انتقال بار روی شمع‌ها به هندسهٔ مدل همچون ارتفاع خاکریز و بالا بودن نرخ پوشش شمع (مساحت سر شمع به کل مساحت بستر خاک نرم در این مقاله a/s تعریف می‌شود) وابسته است. وجود مسلح‌کننده با سختی مناسب، تمرکز بار روی شمع را افزایش می‌دهد و به همان مقدار از بارِ روی خاک نرم بین دو شمع (بار بخش C) کم می‌شود [۲, ۸–۱۵]. مدل‌سازی‌های عددی نشان دادند که مسلح‌کننده 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 فاصلهٔ شمع‌ها $(s-a)$ باعث کاهش نشست سطحی خاکریز و افزایش سهم بار منتقل شدهٔ ناشی از قوس خاکی می‌شود [۱۸]. با استفاده از مدلی دوبعدی با خاکریزهای تشکیل شده از میله‌های فلزی و همچنین با خاکریز سه‌بعدی 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 مسلح‌کننده به نسبت ارتفاع خاکریز $(H/(s-a))$ و بعد شمع‌ها $(a/(s-a))$ وابسته است [۱۹, ۲۰]. مدل‌سازی دوبعدی آزمایشگاهی با خاکریز تشکیل شده از میله‌های فلزی، یک‌بار همراه مسلح‌کننده و یک‌بار هم بدون مسلح‌کننده آشکار کرد که مسلح‌کننده بر توزیع‌بار 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 جداگانهٔ 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 مسلح‌کنندهٔ ژئوسینتتیکی به شمع‌ها منتقل می‌شود. فرصتی که اندازه‌گیری جداگانهٔ این دو قسمت بار به وجود می‌آورد، آزمایش‌ها را برای انجام اندازه‌گیری‌هایی مناسب می‌سازد که می‌توانند جهت توسعه یا اعتبارسنجی مدل‌های تحلیلی که تأثیر قوس‌زدگی 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 مسلح‌کننده، تحت تأثیر ارتفاع خاکریز و تعداد رشته‌های مسلح‌کنندهٔ ژئوسینتتیکی تمرکز دارند.



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

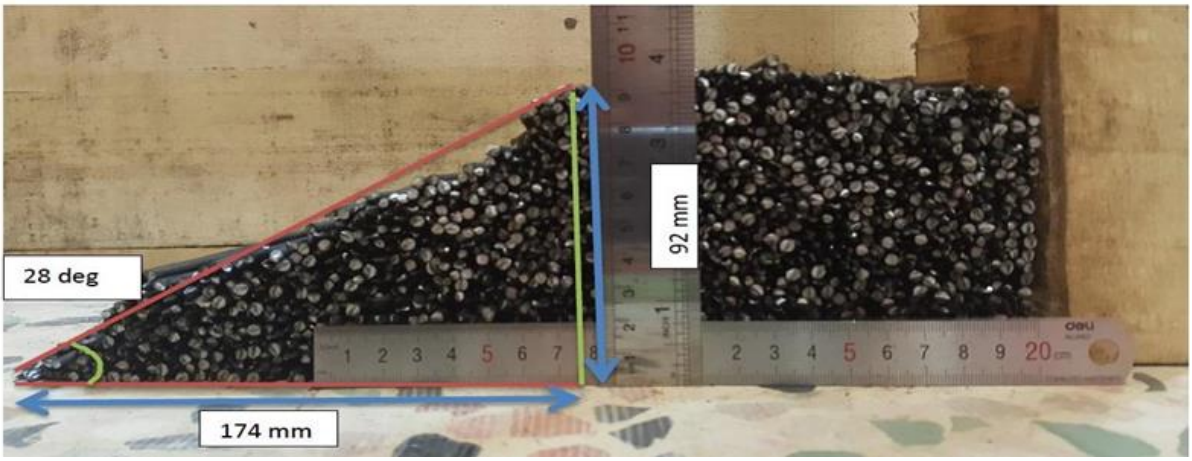
Fig. 2. the test device (a) the placement of A and B load cells in the beam (b) details of the test device (c) test zone

۲- مصالح آزمایش و روش‌شناسی

۲- ۱- 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 مسلح‌کننده به شمع منتقل می‌شود (بخش بار B)، یک دستگاه آزمایش دوبعدی ساخته شده است. ویژگی این دستگاه، اندازه‌گیری جداگانهٔ 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 (۷۰۰mmx ۸۰۰ mm) تشکیل شده است که ظرفیت آزمایش برای خاکریزی تا ارتفاع حداکثر ۴۰۰ mm را به همراه دارد.

اجزای اصلی دستگاه، مطابق شکل۲، شاه‌تیرهای بالایی و پایینی هستند که ثابت‌اند و به دیوارهٔ قاب به صورت صلب متصل شده‌اند. مدل دوبعدی، از دو عدد تیر (شمع دو بعدی) ساخته شده که هر کدام از تیرها به دو عدد نیروسنج متصل‌اند که یکی از نیروسنج‌ها (نیروسنج 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 وسیلهٔ یک صفحه در روی مسلح‌کننده که به فاصلهٔ یک میلی‌متری بالای صفحهٔ نیروسنج B قرار دارد و مصالح خاکریز مستقیما روی آن صفحه قرار



شکل ۳. آزمون زاویهٔ قرار[1] میله‌های فلزی

Fig. 3. Analogical soil in a repose angle test

[1] Repose angle

می‌گیرند و بار رسیده از طریق قوس‌زدگی را اندازه‌گیری می‌کند. سه عدد صفحه‌صلب[1] در فاصله آزاد بین دو شمع مجاور، همچنین شمع‌ها از دیواره، در زیر رشته‌های مسلح کننده قرار دارد تا در زمان ریختن مصالح خاکریز و قبل از انجام اندازه‌گیری‌ها، مسلح کننده تحت کشش قرار نگیرد (شکل ۲). نیروی وارده به سطح خاکریزها توسط یک عدد جک هیدرولیک به ظرفیت ۵ تن که فشار هیدرولیک آن توسط یک موتورالکتریکی تامین می‌شود، بر یک صفحه صلب با طول $L.W$ که در سطح خاکریز قرار می‌گیرد، اعمال می‌گردد.

۲- ۲- مصالح خاکریز دوبعدی[2]

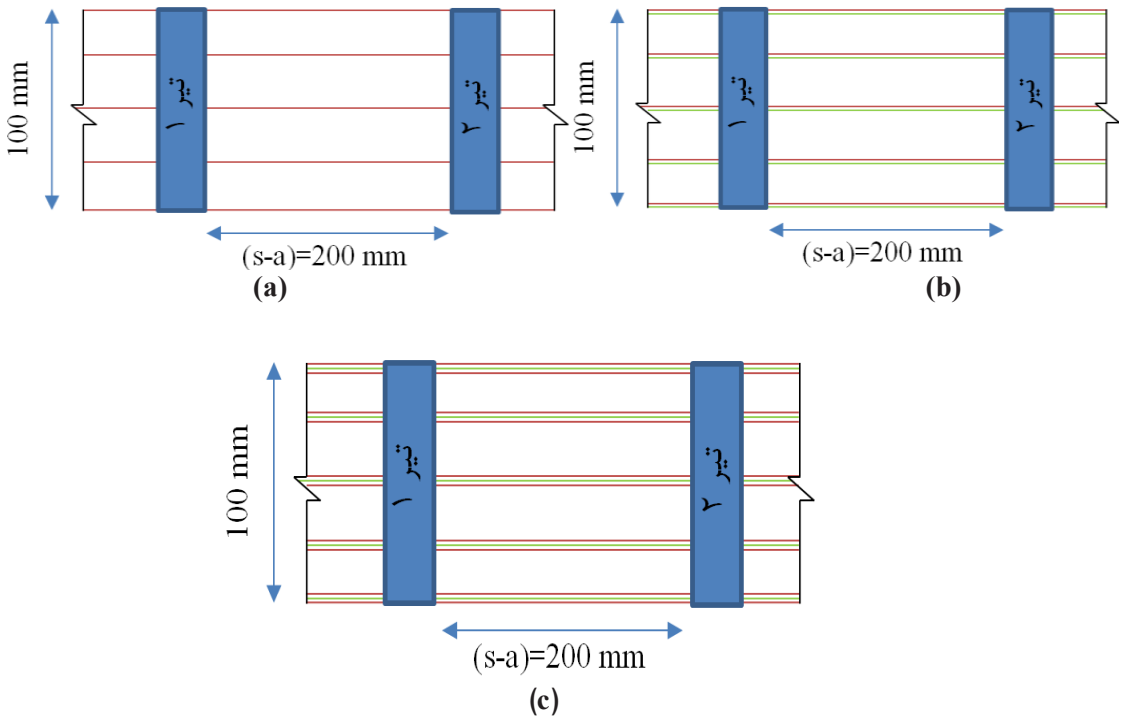
به منظور مطالعهٔ دوبعدی از سه نوع میلهٔ فلزی به عنوان مصالح خاکریزی استفاده شده است. میله‌های فلزی دارای سطح مقطع دایره‌ای شکل، به قطر ۱/۵ mm، ۲/۵ mm، ۴ mm می‌باشند. میله‌های فلزی طول ۱۰۰ mm دارند و با نسبت مساوی ۱:۱:۱ با یکدیگر مخلوط شده‌اند و عمود بر صفحهٔ دو بعدی (x-z) قرار گرفته‌اند. وزن مخصوص خاکریز دو بعدی میخی مخلوط شده ۵۳۲۰ kg/m^3 است. زاویهٔ قرارگیری میله‌های فلزی حدود ۲۸ درجه در آزمایشگاه بدست آمد (شکل ۳). وزن مخصوص خاکریز میخی دوبعدی تقریباً سه برابر یک ماسهٔ معمولی بود و ضریب مقیاس مدل تقریباً ۵ است؛ بنابراین، توزیع تنش در مدل مشابه یک خاکریز متکی بر شمع دانه‌ای متراکم با مدل رفتاری موهر کلمب می‌باشد.

۲- ۳- مسلح‌کننده

مسلح‌کنندهٔ مورد استفاده از رشته‌های یک نوع ژئوتکستایل بافته شده می‌باشد[3]. این رشته‌ها در ردیف‌های پنج‌تایی با عرض ۱۰۰ mm و با طول مساوی بسته شده‌اند. باتوجه به نوع آزمایش، هر ردیف می‌تواند، به صورت تک‌رشته‌ای، دورشته‌ای و سه‌رشته‌ای باشد که به ترتیب مجموعهٔ ۵ و۱۰ و ۱۵رشته‌ای را می‌سازند (شکل ۴).

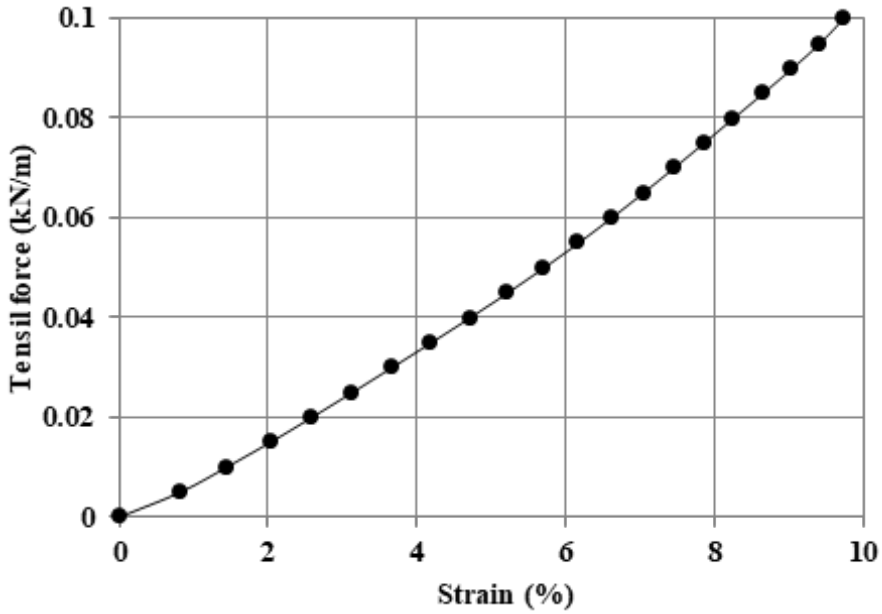
شکل ۵ رفتار کششی یک رشته از مسلح‌کننده با عرض ۱ mm که با سرعت ۳/۷۷ m/sec (کرنش۰/۱۷ درصد بر ثانیه) تحت کشش قرار گرفت را نشان می دهد. از این نمودار می‌توان مشاهده کرد که سختی کششی تک رشته در ۲٪ کرنش، ۰/۷۴ (kN/m) می‌باشد (۰/۷۴= ۰/۰۲ ÷ ۰/۰۱۴۸).

1 Trapdoor
2 Analogical soil
3 Tencate Geolon, 100/100 kN/m



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

Fig. 4. Geotextiles used in the model tests (a)Five 1-filament rows (b)Five 2-filaments rows (c)Five 3-filaments rows



شکل ۵. رفتار نیروی کششی-کرنش یک‌رشته از مسلح‌کننده

Fig. 5. Tensile force-strain behaviour of one geotextile filament

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

Table 1. Strength and stiffness of the geosynthetic reinforcement for a single filament and for a 100mm wide reinforcement strip with 5 filaments, 10 filaments, 15 filaments

سختی کششی کوتاه مدت در کرنش ۲٪ ($J_{2\%}$) (kN/m)	مقاومت کششی کوتاه مدت T_{max} (kN/m*)	تعداد رشته‌های مسلح کننده در ۱۰۰ میلی متر طول تیر (شمع دو بعدی)
۳۷	۵	۵
۷۴	۱۰	۱۰
۱۱۰	۱۵	۱۵

*برای طول یک متر عمود بر صفحهٔ دوبعدی مورد بررسی (x-z)

۲- ۴- مراحل انجام آزمایش

۱) در این مرحله تیرها در فاصلهٔ 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، به‌طوری که فشار حاصل از خاکریزی در هنگام ریختن میله‌های فلزی و قبل از شروع آزمایش باعث ایجاد کشش در رشته‌های ژئوتکستایل و نشست در آن نشود. سپس تا ارتفاع H خاکریزی انجام می‌شود (شکلa-۶).

۳) در این مرحله صفحهٔ تنظیم وسطی را پایین آورده و به خاکریز بین دو تیر اجازه داده می‌شود تا تحت اثر وزن خود نشست کنند (شکلb-۶).

۴) صفحهٔ صلب بارگذاری را در سطح خاکریز متشکل از میله‌های فلزی قرار داده و به وسیلهٔ جک هیدرولیک، بارگذاری روی خاکریز انجام می‌شود (شکلc-۶).

۲- ۵- اندازه‌گیری‌ها

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

در خلال بارگذاری بارهای بخش A و B توسط نیروسنج‌هایی که در هر یک از دو تیر تعبیه شده‌اند، به صورت جداگانه اندازه‌گیری می‌شوند. بار کل (سربار+وزن‌خاکریز) که در تراز مسلح‌کننده 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 مسلح‌کننده 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.

$$W_a = A + B \quad (۱)$$

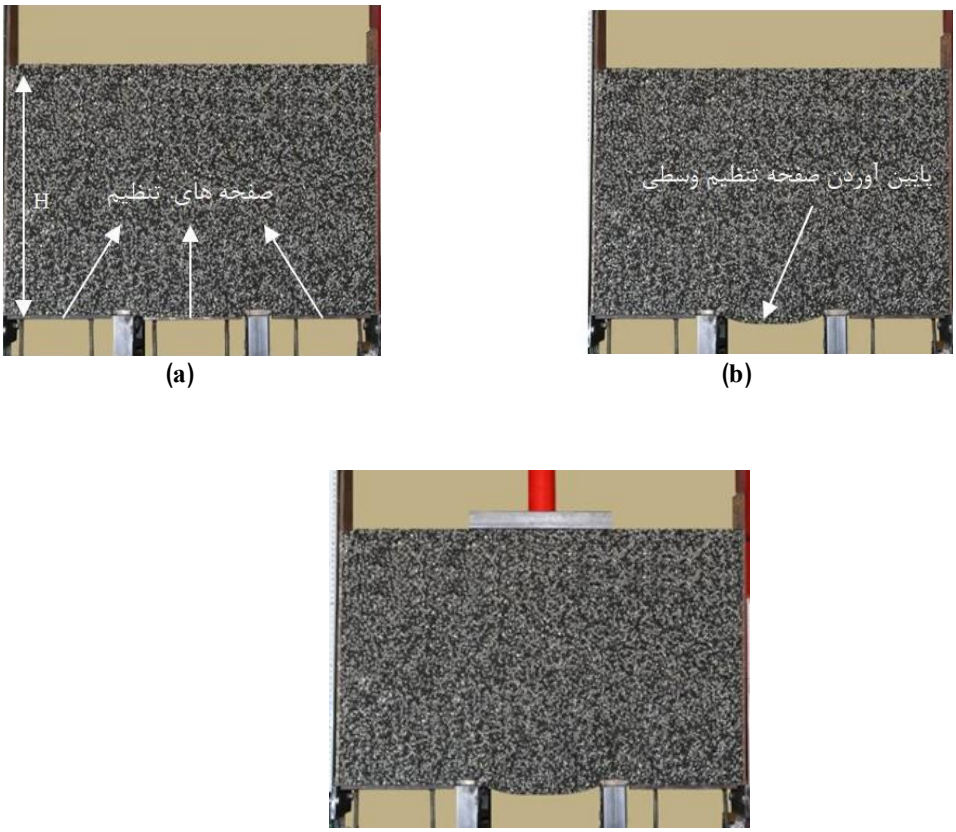
۲- ۵- ۲- اندازه‌گیری تغییر شکل و کرنش متوسط در مسلح‌کننده

یک دوربین عکس‌برداری با وضوح تصویر ۲۴ مگاپیکسل (۶۰۰۰×۴۰۰۰) روی سه پایه در فاصلهٔ تقریباً یک متری در جلوی جعبهٔ آزمایش قرار می‌گیرد(شکل ۶). حرکت مقاطع میله‌های فلزی (به عنوان دانه‌های خاکریز دوبعدی) با استفاده از عکس‌برداری دیجیتال در هر پنج ثانیه توسط نرم‌افزار MATPIV و با تکنیک دیجیتالی سرعت سنجی تصویر ذرات[1] (PIV) ردیابی می‌شود. کرنش متوسط ژئوسینتتیک، از تغییر شکل مسلح‌کننده بین دو شمع که با استفاده از PIV به دست آمده، توسط رابطه ۲ محاسبه می‌شود (شکل ۷).

$$\varepsilon_{ave} = \frac{(L_2 - L_1)}{L_1} \quad (۲)$$

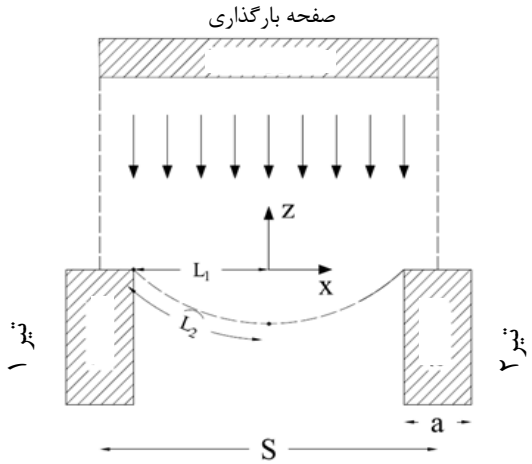
که در آن ε_{ave} کرنش متوسط مسلح‌کننده، L_1 نصف طول اولیهٔ

1 Particle Image Velocimetry



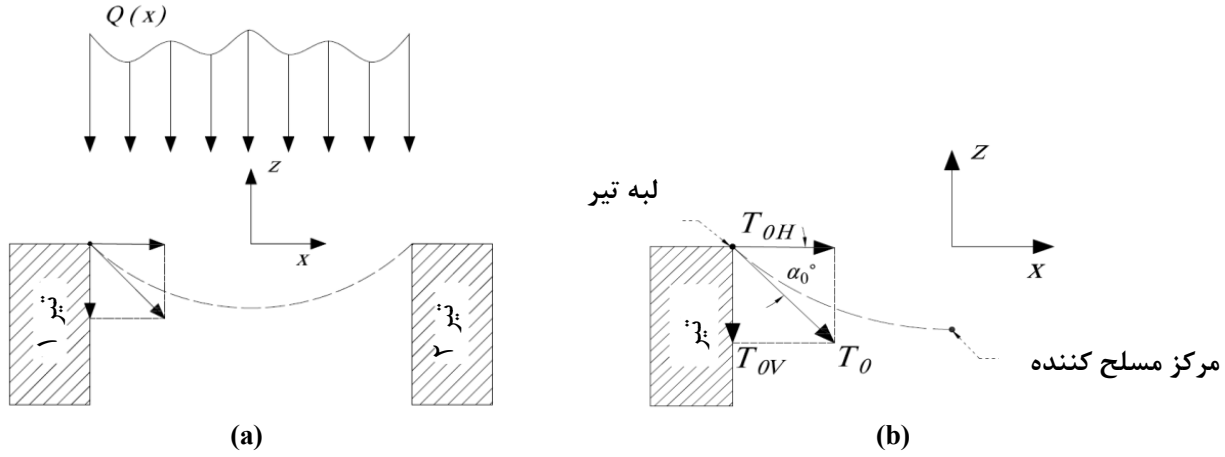
شکل ۶. مراحل آماده‌سازی برای شروع آزمایش (a)قرار دادن صفحه‌های تنظیم برای جلوگیری از نشست مسلح کننده قبل از شروع آزمایش (b)پایین آوردن صفحهٔ تنظیم میانی (c)قرارگرفتن صفحهٔ صلب، اعمال سربار و شروع آزمایش

Fig. 6. Testing process (a)The trapdoors prevent deflection of the reinforcement (b)Lowering the middle trapdoor (c)Placing a rigid plate and applying loads to it



شکل ۷. تغییرشکل مسلح کننده ی ژئوسینتتیکی بین دو تیر که منجر به تغییر شکل مسلح کننده و طول آن شده است

Fig. 7. Changes of the the reinforcement shape and length between two beams



شکل ۸. تغییر شکل مسلح‌کننده بین دوتیر (a)موقعیت تیرها نسبت به دستگاه مختصات (b)موقعیت مرکز و کنار مسلح‌کننده در دستگاه مختصات (x-z)

Fig. 8. Deflection filaments between two beams (a)Position of beams (b)Position the center and the edge (x-z)

مسلح‌کننده قبل از تغییر شکل، L_2 نصف طول ثانویهٔ مسلح‌کننده بعد تغییر شکل می‌باشد.

۲- ۵- ۳- بررسی تحلیلی مدل آزمایشگاهی

با توجه به موقعیت تیرها در دستگاه مختصات دو بعدی (x-z) مطابق شکل ۸، معادلات ۳ تا ۱۰ را می توان ارائه نمود.

$$\frac{d^2z}{dx^2}=\frac{Q(x)}{T_H}\Rightarrow Q(x)=T_H\cdot\left(\frac{d^2z}{dx^2}\right) \quad (۳)$$

که در آن d^2z/dx^2 تغییر شیب نمودار تغییر شکل مسلح‌کننده، $Q(x)$ توزیع بار روی مسلح‌کننده می باشد، T_H مؤلفهٔ افقی نیروی کششی در مسلح‌کننده است.

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

$$\varepsilon_{ave}=\frac{\sum_{i=0}^{n-1}\varepsilon_i}{n-1} \quad (۴)$$

که در آن ε_i کرنش قسمت i ام مسلح‌کننده است.

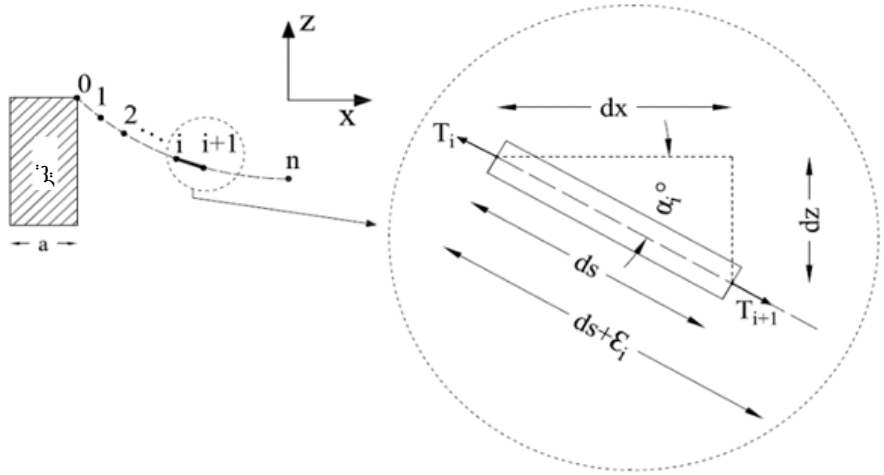
$$T_{ave}=\frac{\sum_{i=0}^{n-1}T_i}{n-1} \quad (۵)$$

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

$$\varepsilon_i=\varepsilon(x_i)=\frac{T_i}{J_i} \quad (۶)$$

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

$$T_i=T(x_i)=\sqrt{T_H^{\,2}+T_{Vi}^{\,2}}=T_H\sqrt{1+(T_{Vi}/T_H)^2}=T_H\sqrt{1+\left(\frac{dz_i}{dx_i}\right)^2} \quad (۷)$$



شکل ۹. جزئیات تغییر شکل مسلح‌کننده

Fig. 9. Details of filament deflection

که در آن T_{vi} و dz/dx به ترتیب مؤلفهٔ قائم نیروی کششی و شیب قسمت iام مسلح‌کننده است.

$$z_i = z(x_i) = z_{i-1} + (\frac{dz_i}{dx_i}) \cdot dx = z_{i-1} + (1+\varepsilon_i) \cdot \sin\alpha_i \cdot ds \quad (۸)$$

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

$$T_V(x_0) = T_{V\,edge} = T_H \cdot \mathrm{Tan}\,\alpha_0 = T_H \cdot \frac{dz_0}{dx_0} \quad (۹)$$

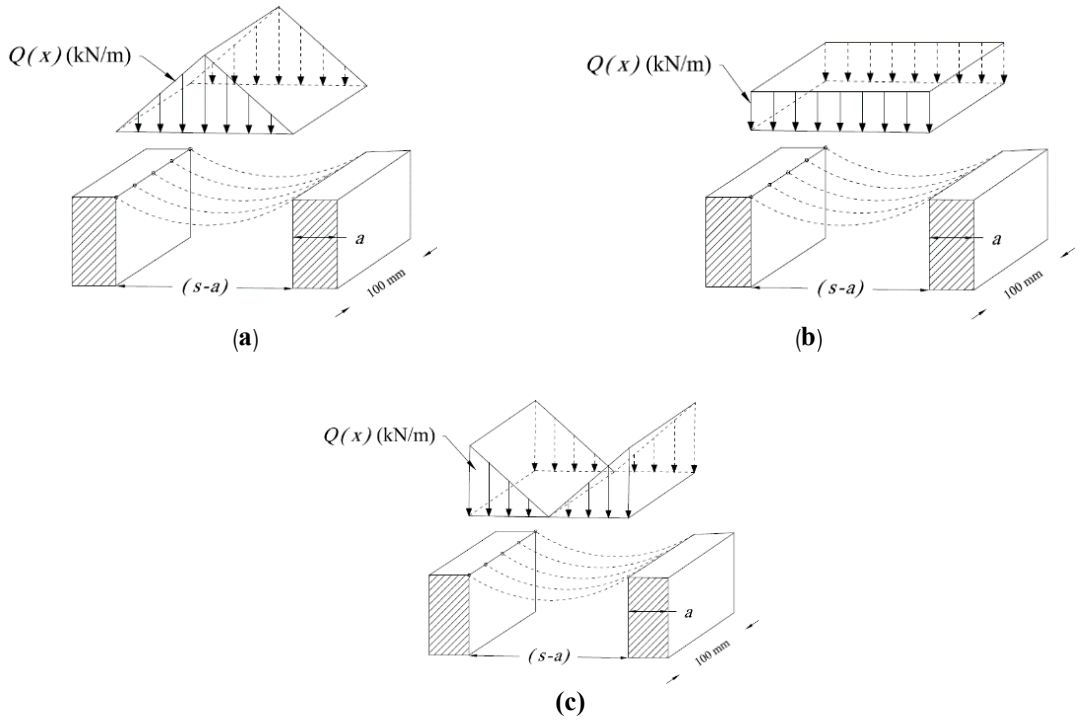
که در آن T_{vedge} مؤلفهٔ قائم نیروی کششی مسلح‌کننده در کنار تیر (نزدیک‌ترین فاصله با تیر)، α_0 زاویه خط مماس بر منحنی تغییر شکل مسلح‌کننده در کنار تیر با راستای افق است.

$$B = T_{V\,edge} = \int_0^{(s-a)/2} Q(x) \cdot dx = T_H \cdot \int_0^{(s-a)/2} (\frac{d^2 z}{dx^2}) \cdot dx \quad (۱۰)$$

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 شناخته‌شده روی مسلح‌کننده عبارت است از توزیع بار مثلثی، توزیع بار مثلث‌وارون و توزیع بار یکنواخت می‌باشد (شکل ۱۰) [۲۳].

۲- ۶- 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 تعبیه شده‌اند، ثبت می‌کنند. دومین نوع، اندازه‌گیری‌های حرکتی (جابجایی) است که توسط تکنیک سرعت سنجی



شکل ۱۰. سه نوع توزیع بار روی مسلح‌کننده (a)توزیع بار مثلثی (b)توزیع بار یکنواخت (بر اساس BS۸۰۰۶) (c)مثلث‌وارون (پیشنهاد شده توسط ون ایکلن ۲۰۱۲) [۲۳]

Fig. 10. Three types of load distribution on the reinforcement (a)Triangle (according to EBGEO 2010) (b) Equally distributed (according to BS8006) (c)Inversed triangle (suggest by Van Eekelen 2012) [19]

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 ۲-۵-۱ و ۲-۵-۲ معرفی شدند، انجام گرفت. بنابراین مقدار پارامتر B توسط تغییر شکل مسلح‌کننده در حین آزمایش با استفاده از رابطه ۱۰ اندازه‌گیری شد.

چنانچه در رابطه ۱۰ مقدار T_H مشخص شود می‌توان به منظور صحت‌سنجی آزمایش‌ها از این رابطه استفاده کرد. مقدار T_H با استفاده ازمعادله ۷ در یک لحظه خاص مثلاً لحظه گسیختگی مسلح‌کننده که مقدار نیروی کششی در محل گسیختگی (کناره تیر) T_{max} می‌باشد، اندازه‌گیری می‌شود. آن آزمایش‌هایی که B بدست آمده از نیروسنج‌ها با B بدست آمده از معادله ۱۰ و تغییرشکل مسلح‌کننده 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 مجذور جمع مربعات مولفه‌هایش بدست می آید (رابطه ۷) و T_H در طول مسلح کننده ثابت است. نیروی کششی در سایر نقاط در طول مسلح کننده را می‌توان از حاصلضرب شیب مسلح کننده در T_H باتوجه 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 مسلح‌کننده (شکل ۵) می‌توان کرنش مسلح‌کننده 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 می شود، برابر باشد.

۳- برنامهٔ آزمایش

در این پژوهش با انجام ۸ آزمایش از سه نوع مسلح کنندهٔ ۵، ۱۰ و ۱۵ رشته‌ای به صورت نواری با عرض ۱۰۰ mm برای نسبت ارتفاع‌های مختلف

جدول ۲. مشخصات آزمایش‌ها

Table 2. Specification of the tests

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

خاکریزی، به بررسی اثر ارتفاع خاکریز و تعداد رشته‌ها بر رفتار مسلح‌کننده در خاکریز متکی بر شمع پرداخته‌می‌شود (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.

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 درون‌یابی مکعبی یا خطی[1]، به صورت یک تابع با ضریب تعیین[2] (R^2)، بیشتر از ۹۵٪ اندازه‌گیری شوند.

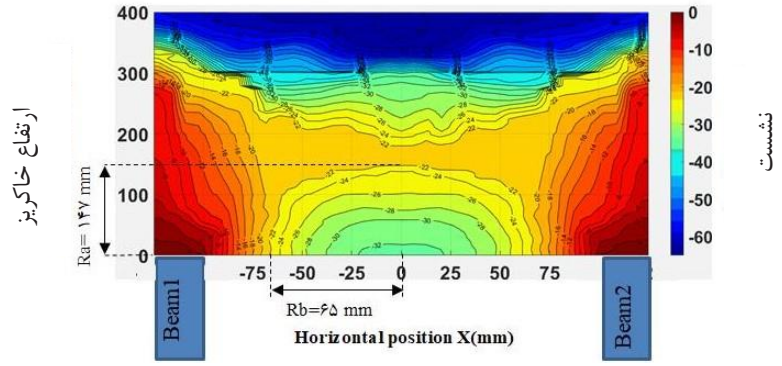
۴- تحلیل نتایج

۴- ۱- 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=0mm). 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 T_θ/T_{max}، مقدار R_b برای تمامی ارتفاع‌های خاکریز کاهش می‌یابد (شکل۱۲-a). میزان این کاهش بستگی به میزان ارتفاع خاکریزی دارد، به طوری که بیشترین کاهش برای R_b در نسبت ارتفاع ۰/۵ در حین افزایش T_θ/T_{max} از ۰/۲۵ تا ۱، از ۶۳ تا ۵ میلی‌متر است ($\Delta=58R_b$ mm). کمترین تغییرات R_b برای $H/(s-a)$ = ۲ رخ می‌دهد، به طوری که در حین افزایش T_θ/T_{max} از ۰/۲۵ تا ۱، از ۹۵ تا ۶۵ میلی‌متر کاهش خواهد یافت ($\Delta=30R_b$ mm). شکل ۱۲-b نشان می‌دهد، مقادیر R_a/R_b برای خاکریزهای با $H/(s-a)$ برابر ۲ و ۱/۵ هنگام افزایش مقدار T_θ/T_{max} افزایش می‌یابد و قوس‌ها شکل بیضی خود را در حین آزمایش حفظ می‌کنند.

به‌طوری که حداقل و حداکثر مقدار R_a/R_b برای مرتفع‌ترین خاکریز ($H/(s-a)$ = ۲)، به ترتیب برابر ۲ و ۲/۲۷ و برای نسبت ارتفاع ۱/۵، به

1 Linear interpolation or cubic interpolation
2 Coefficient of determination



شکل ۱۱. نمایش قوس تشکیل شده با استفاده از تکنیک PIV برای آزمایش شماره ٤ در لحظهٔ نزدیک به گسیختگی مسلح‌کننده

Fig. 11. Arc representation formed using the PIV technique for Test No. 4 at the moment just before rupture of the reinforcement

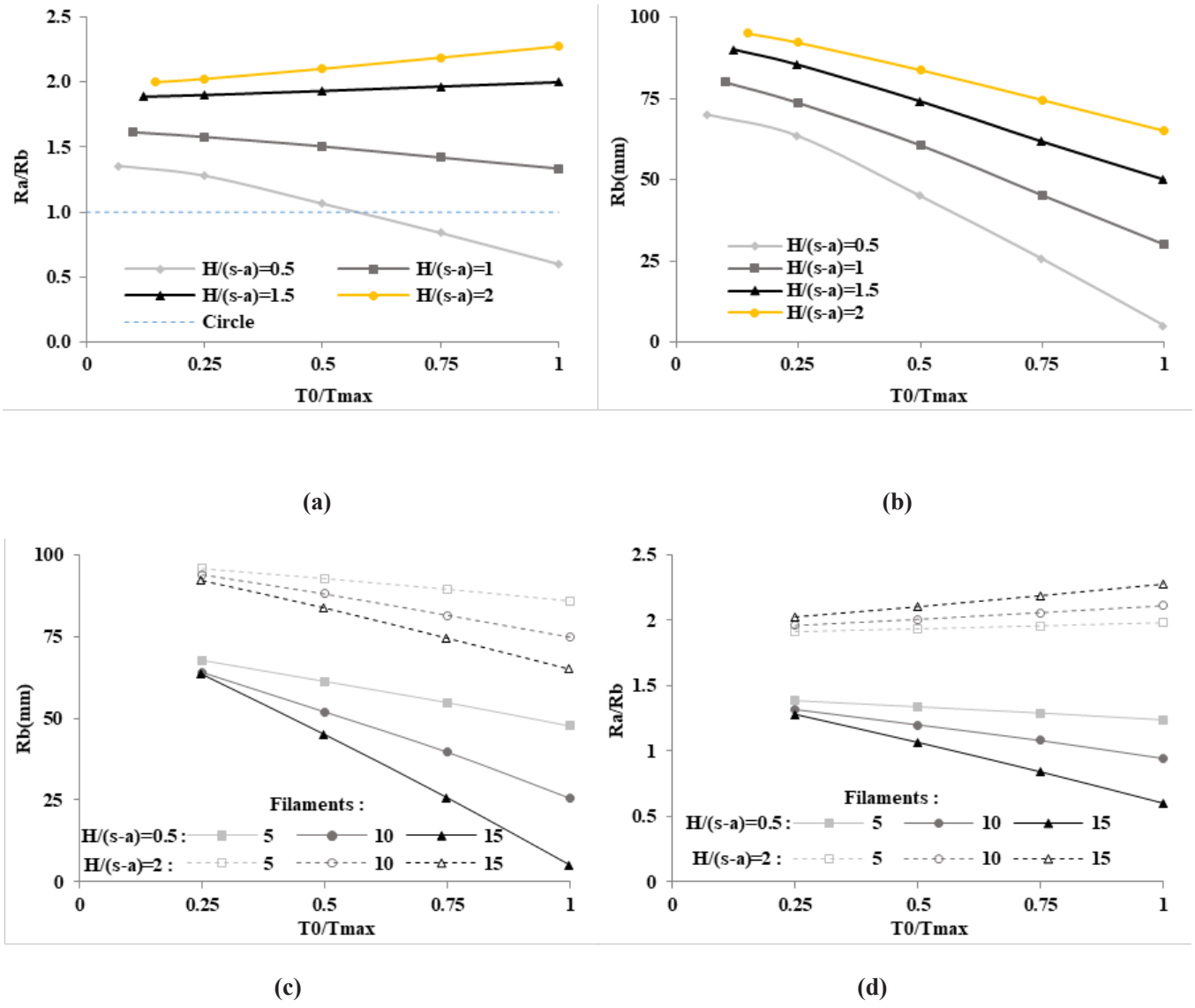
ترتیب ۱/۸ و ۱/۹۹ اندازه‌گیری شد (برای این دو ارتفاع، خاکریزی رشد R_a/R_b را در حین آزمایش نشان می‌دهد)؛ در حالی که با کاهش ارتفاع خاکریز مقدار R_a/R_b با افزایش مقدار T_0/T_{max} نزولی خواهد بود و قوس‌ها تمایل دارند به نیم‌دایره نزدیک شوند. مقدار حداقل و حداکثر نسبت R_a/R_b در ۱ = $H/(s-a)$ به ترتیب ۱/۳۳ و ۱/۶۱ و در ۰/۵ = $H/(s-a)$، به ترتیب ۰/۶ و ۱/۳۵ اندازه‌گیری شدند (که در هر دو نسبت ارتفاع، R_a/R_b روند نزولی را از خود نشان می‌دهد).

شکل۱۲-c نشان می‌دهد، در حین نزدیک شدن مسلح‌کننده به ظرفیت کششی خود (T_0/T_{max}=۱)، با افزایش تعداد رشته‌ها مقدار R_b نیز کاهش بیشتری خواهد یافت. برای ۲ = $H/(s-a)$ در مسلح‌کنندهٔ ۵ و ۱۵ رشته‌ای با افزایش T_0/T_{max} از ۰/۲۵ تا ۱ مقدار R_b، به ترتیب حدود ۹ و ۲۹ درصد کاهش می‌یابد. این کاهش در مقدار R_b برای ۰/۵ = $H/(s-a)$ تشدید خواهد شد، به طوری که برای مسلح‌کنندهٔ ۵ و ۱۵ رشته‌ای با افزایش T_0/T_{max} از ۰/۲۵ به ۱ مقدار R_b، به ترتیب ۱۲ و ۹۲ درصد کاهش می‌یابد. شکل۱۲-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 دارند. برای خاکریزهای مرتفع، افزایش تعداد رشته‌های مسلح‌کننده سبب می‌شود که در حین آزمایش و افزایش T_0/T_{max}، مقدار R_a/R_b افزایش یابد. برای ۲ = $H/(s-a)$ با افزایشT_0/T_{max} از ۰/۲۵ به ۱ مقدار R_a/R_b برای مسلح‌کنندهٔ ۵ و ۱۵ رشته‌ای، به ترتیب حدود ۱ و ۱۳/۵ درصد افزایش می‌یابد. در ۰/۵ = $H/(s-a)$ با افزایش T_0/T_{max} از ۰/۲۵ به ۱ مقدار R_a/R_b برای مسلح‌کنندهٔ ۵ و ۱۵ رشته‌ای، به ترتیب حدود ۱۱ و ۵۳ درصد کاهش می‌یابد.

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

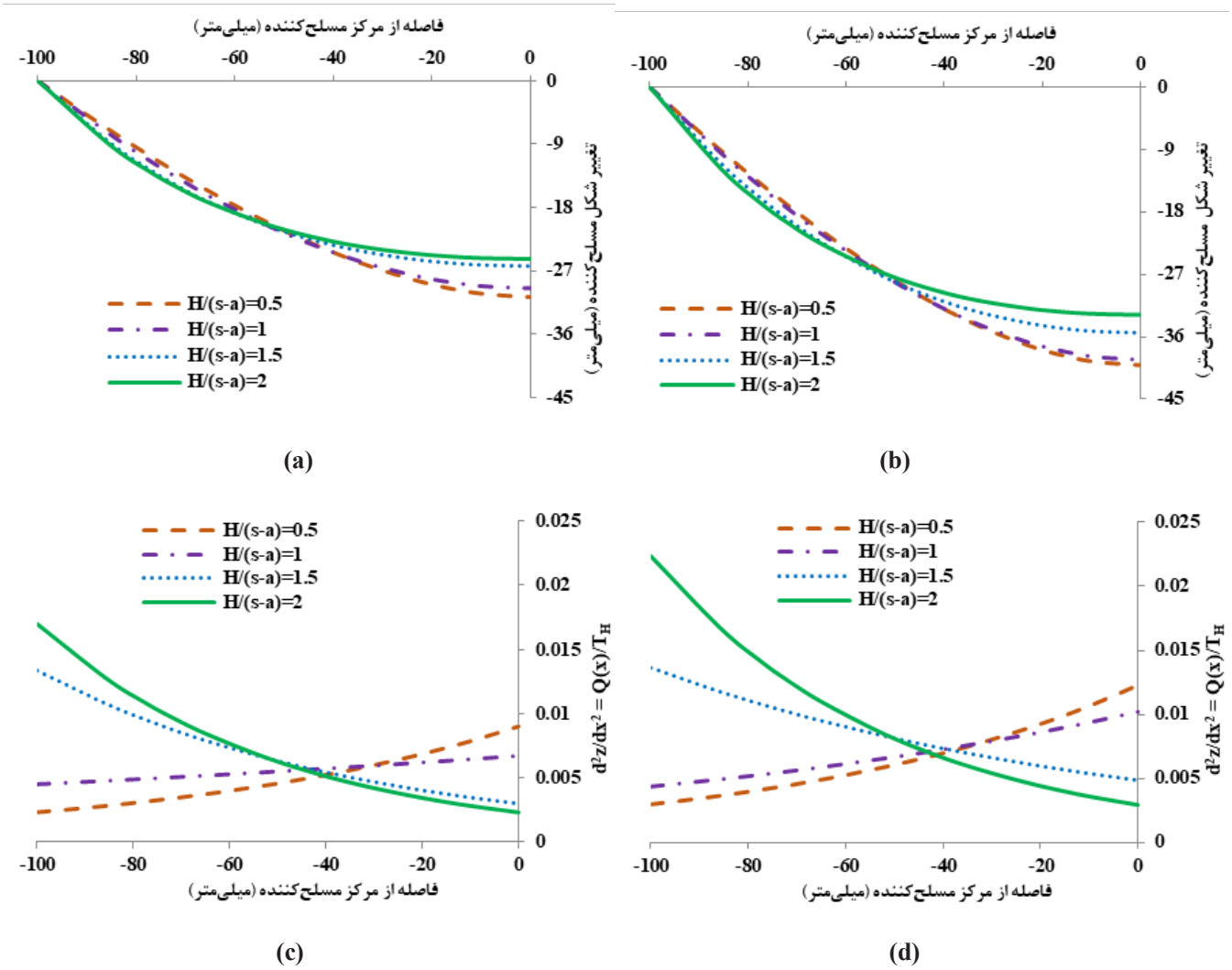
۴- ۲- تغییرات شیب نمودار تغییر شکل مسلح‌کننده

در شکل۱۳ نمودار تغییر شکل مسلح‌کننده و تغییرات شیب مربوط به آن در طول مسلح‌کننده برای T_0/T_{max} برابر ۰/۵ و ۱ (در حالتی که ۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد ظرفیت کششی مسلح کننده فعال شود) نشان داده می‌شود. حداکثر تغییرات شیب مسلح‌کننده برای ۱ و ۰/۵= $H/(s-a)$ در محل مرکز مسلح کننده (X=۰ mm) اتفاق می‌افتد. که برای ۰/۵ =$H/(s-a)$ حداکثر مقدار تغییر شیب ($(d^2z/dx^2)_{max}$) در ۱ و ۰/۵=T_0/T_{max}، به ترتیب از چپ به راست ۰/۰۱۲۳ و ۰/۰۰۸۹ اندازه‌گیری شدند. با افزایش ۵۰ درصدی نسبت ارتفاع از ۰/۵ به ۱ مشاهده می‌شود (شکل ۱۳-c,d) که مقدار حداکثر تغییر شیب در مرکز مسلح کننده کاهش و مقدار حداقل تغییرات شیب در کنار تیر (X=۱۰۰ mm) افزایش می‌یابد. برای ($H/(s-a)$=1) مقدار حداکثر تغییر



شکل ۱۲. تغییرات ((Ra/Rb و (Rb) در حین آزمایش (a)تاثیر نسبت ارتفاع خاکریزی بر Rb (آزمایش‌های ۱- ۴) (b)تأثیر نسبت ارتفاع خاکریزی بر Ra/Rb (آزمایش‌های ۱- ۴) (c)تأثیر تعداد رشته و نسبت ارتفاع بر Rb (آزمایش‌های ۱و۴- ۸) (d)تأثیر تعداد رشته‌ها و نسبت ارتفاع بر Ra/Rb (آزمایش‌های ۱و۴- ۸)

Fig. 12. Changes (Ra/Rb) and (Rb) during test (a)The effect of embankment height ratio on Rb (Tests 1-4) (b)The effect of embankment height ratio on Ra/Rb (Tests 1-4) (c)The effect of number of reinforcement filaments and height ratio on Rb (Tests 1 and 4-8) (d)The effect of number of reinforcement filaments and height ratio on Ra/Rb (Tests 1-4 and 8)

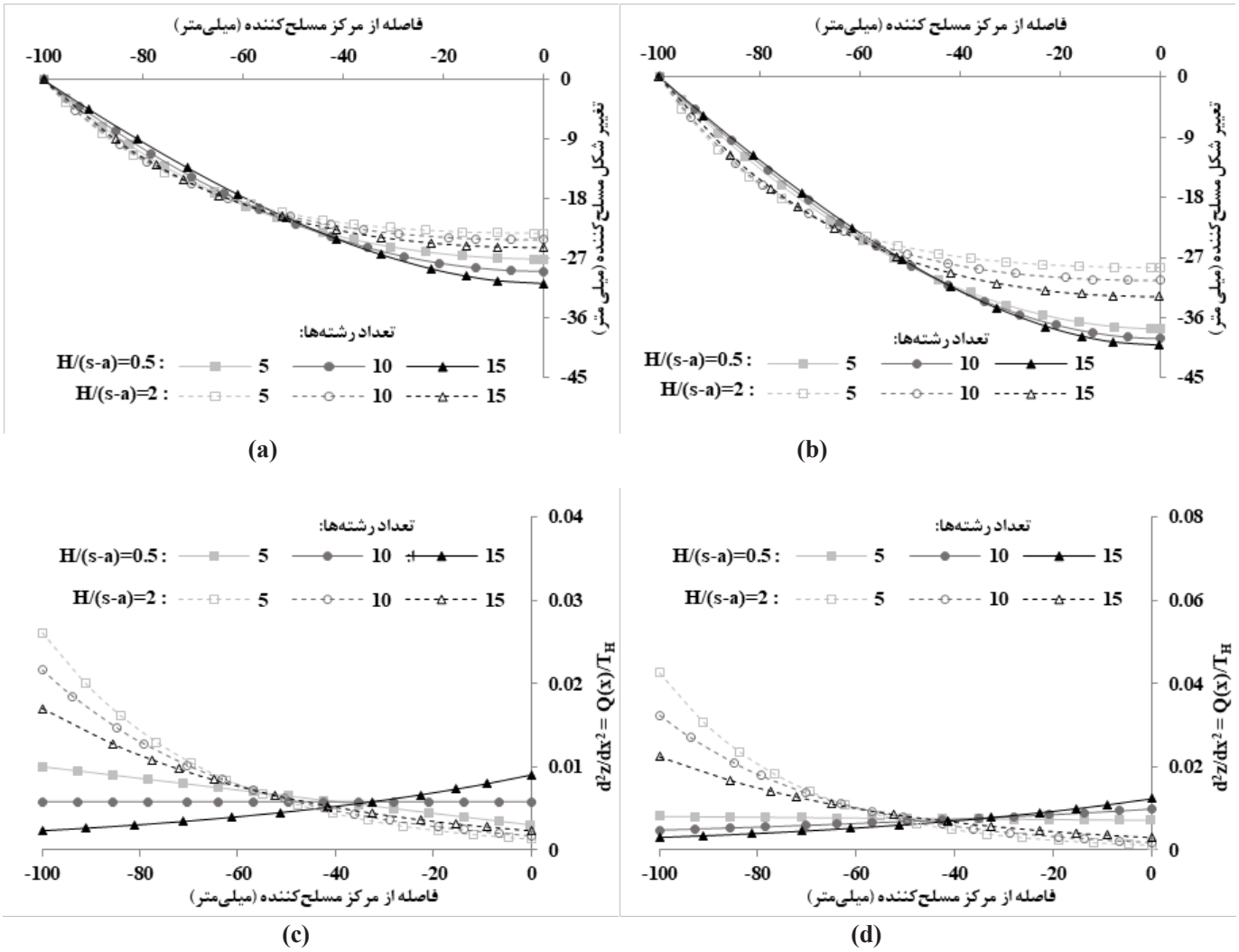


شکل ۱۳. تأثیر نسبت ارتفاع خاکریزی بر تغییر شکل و تغییر شیب مسلح‌کنندهٔ ۱۵ رشته ای (الف)تغییر شکل در $T_0/Tmax=0.5$ (ب)تغییر شکل در $T_0/Tmax=1$ (ج)تغییر شیب در $T_0/Tmax=0.5$ (د)تغییر شیب در $T_0/Tmax=1$ (آزمایش‌های ۱ تا ۴)

Fig. 13. Effect of embankment height ratio on deflection and slope variation of 15-filament reinforcement (a)deflection at $T_0/Tmax=0.5$ (b)deflection at $T_0/Tmax=1$ (c) slope variation at $T_0/Tmax=0.5$ (d) slope variation at $T_0/Tmax=1$ (Tests 1- 4)

شیب در ۱ و T_0/T_{max}=۰/۵، به ترتیب از چپ به راست ۰/۰۱ و ۰/۰۰۶۷ اندازه‌گیری شدند. در خاکریز های مرتفع $(H/(s-a)>1)$، حداکثر تغییرات شیب مسلح کننده به سمت کنار تیر منتقل می‌شود، به طوری که برای $H/(s-a)$ =۱/۵، مقدار حداکثر تغییر شیب در ۱ و T_0/T_{max}=۰/۵، به ترتیب از چپ به راست ۰/۰۱۳۶ و ۰/۰۱۳۳ اندازه‌گیری شدند.

با افزایش $H/(s-a)$ از ۱/۵ به ۲، حداکثر مقدار تغییر شیب در کنار تیر افزایش یافته و برای $H/(s-a)$ =۲در ۱ و T_0/T_{max} =۰/۵، به ترتیب از چپ 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}= ۱) حدود ۷۹ درصد رشد دارد

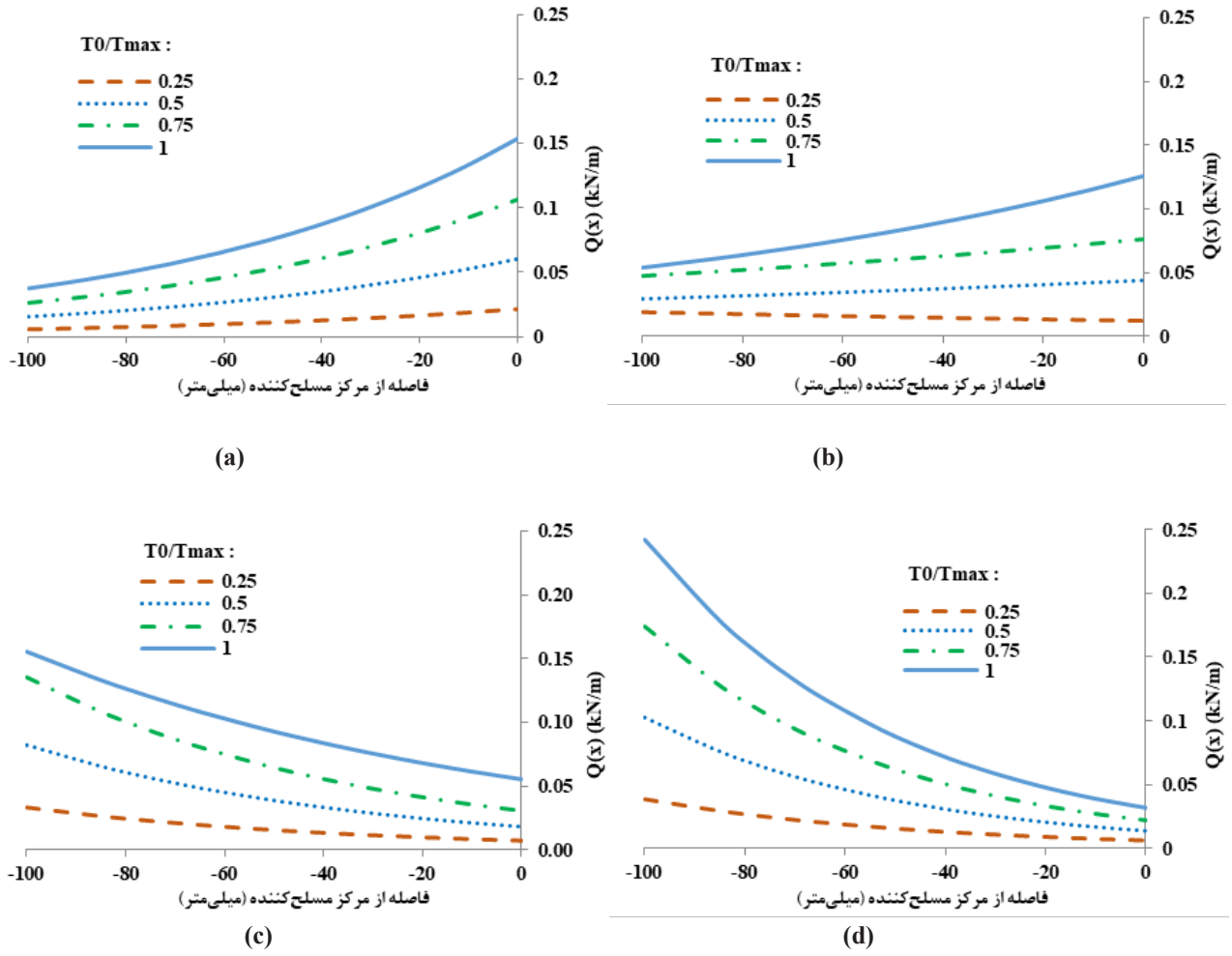


شکل ۱۴.تأثیر نسبت ارتفاع خاکریزی و تعداد رشته‌های مسلح‌کننده بر تغییر شکل و تغییر شیب مسلح‌کننده (الف)تغییر شکل در $T_0/Tmax=0.5$ (ب)تغییر شکل در $T_0/Tmax=1$ (ج)تغییر شیب در $T_0/Tmax=0.5$ (د)تغییر شیب در $T_0/Tmax=1$ (آزمایش‌های ۱و۴ تا ۸)

Fig. 14. Effect of embankment height ratio and number of reinforcement filaments on deflection and slope variation (a)deflection at T0/Tmax=0.5 (b)deflection at T0/Tmax=1 (c)slope variation at T0/Tmax=0.5 (d)slope variation at T0/Tmax=1 (Tests 1 and 4 - 8)

(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 نشان می‌دهد که افزایش تعداد رشته‌های مسلح‌کننده در خاکریزهای با ارتفاع بیشتر نسبت به خاکریزهای با ارتفاع پایین‌تر، تاثیر متفاوتی روی تغییرات شیب مسلح‌کننده دارد. برای خاکریز با ارتفاع کم ($H/(s-a)$ =۰/۵) که حداکثر تغییر شیب مسلح‌کننده در مرکز اتفاق می‌افتد، افزایش تعداد رشته‌های مسلح‌کننده باعث افزایش حداکثر تغییرات شیب مسلح‌کننده در موقعیت مرکز خواهدشد. در $H/(s-a)$ =۰/۵ برای مسلح‌کننده ۵، ۱۰ و ۱۵ رشته‌ای، حداکثر تغییرات شیب در مرکز مسلح‌کننده در لحظه نزدیک به گسیختگی (T_0/T_{max} = ۱)، به ترتیب برابر ۰/۰۰۷۱، ۰/۰۰۹۷ و ۰/۰۱۲ اندازه‌گیری شدند (شکل d-۱۴). افزایش ۶۹ درصدی



شکل ۱۵.توزیع بار روی مسلح‌کننده در حین افزایش نیروی کششی در مسلح‌کنندهٔ ۱۵ رشته‌ای
(a)H/(s-a) =0.5 (b)H/(s-a) =1 (c)H/(s-a) =1.5 (d)H/(s-a) =2)
(آزمایش‌های ۱ – ٤)

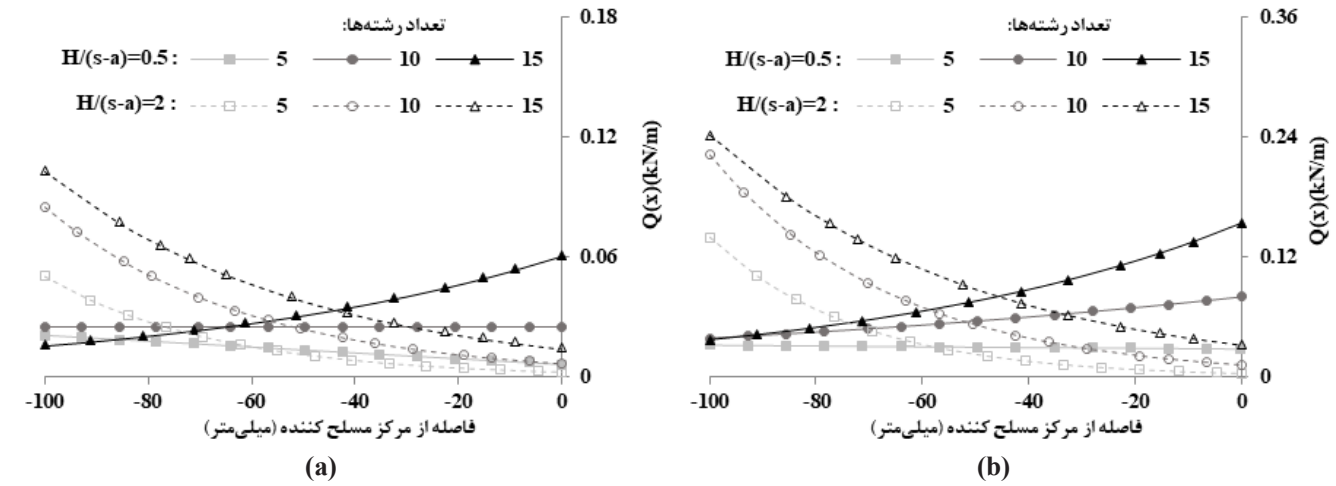
Fig. 15. Load distribution on a 15-filament reinforcement during testing
(a)H/(s-a) =0.5 (b)H/(s-a) =1 (c)H/(s-a) =1.5 (d)H/(s-a) =2
(Tests 1 - 4)

در حداکثر شیب مسلح‌کننده در موقعیت مرکز را با سه برابر شدن تعداد رشته‌های مسلح‌کننده نشان می‌دهد. برای خاکریز های مرتفع (۲= $H/(s-a)$) که حداکثر تغییر شیب مسلح‌کننده در کنار تیر اتفاق می‌افتد، افزایش تعداد رشته‌ها باعث کاهش حداکثر تغییرات شیب مسلح‌کننده خواهد شد. برای ۲= $H/(s-a)$ در مسلح‌کنندهٔ ۵، ۱۰ و ۱۵ رشته‌ای حداکثر تغییرات شیب مسلح‌کننده در لحظه نزدیک به گسیختگی به ترتیب ۰/۰۴۲، ۰/۰۳۲ و ۰/۰۲۲ اندازه‌گیری شدند. کاهش ۴۸ درصدی در حداکثر تغییر شیب مسلح‌کننده در موقعیت کنار تیر را با سه برابر شدن تعداد رشته‌های مسلح‌کننده نشان می‌دهد.

۴- ۳- توزیع بار روی مسلح‌کننده

شکل ۱۵ -c,d 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 مسلح‌کننده از میزان $Q(x)$ کاسته می‌شود تا در نهایت در مرکز مسلح‌کننده به کمترین مقدار خود می‌رسد.

مقدار حداکثر $Q(x)$ در موقعیت کنار تیر برای ۱، ۰/۷۵، ۰/۵، ۰/۲۵ و T_0/T_{max}= در مرتفع‌ترین خاکریز ۲= $H/(s-a)$، به ترتیب از چپ به راست ۰/۲۴، ۰/۱۷، ۰/۱، (kN/m) ۰/۰۳۸ است. کاهش ارتفاع خاکریز ($H/(s-a)<1$) تمرکز توزیع بار را از کنار تیر به سمت موقعیت مرکز (بین

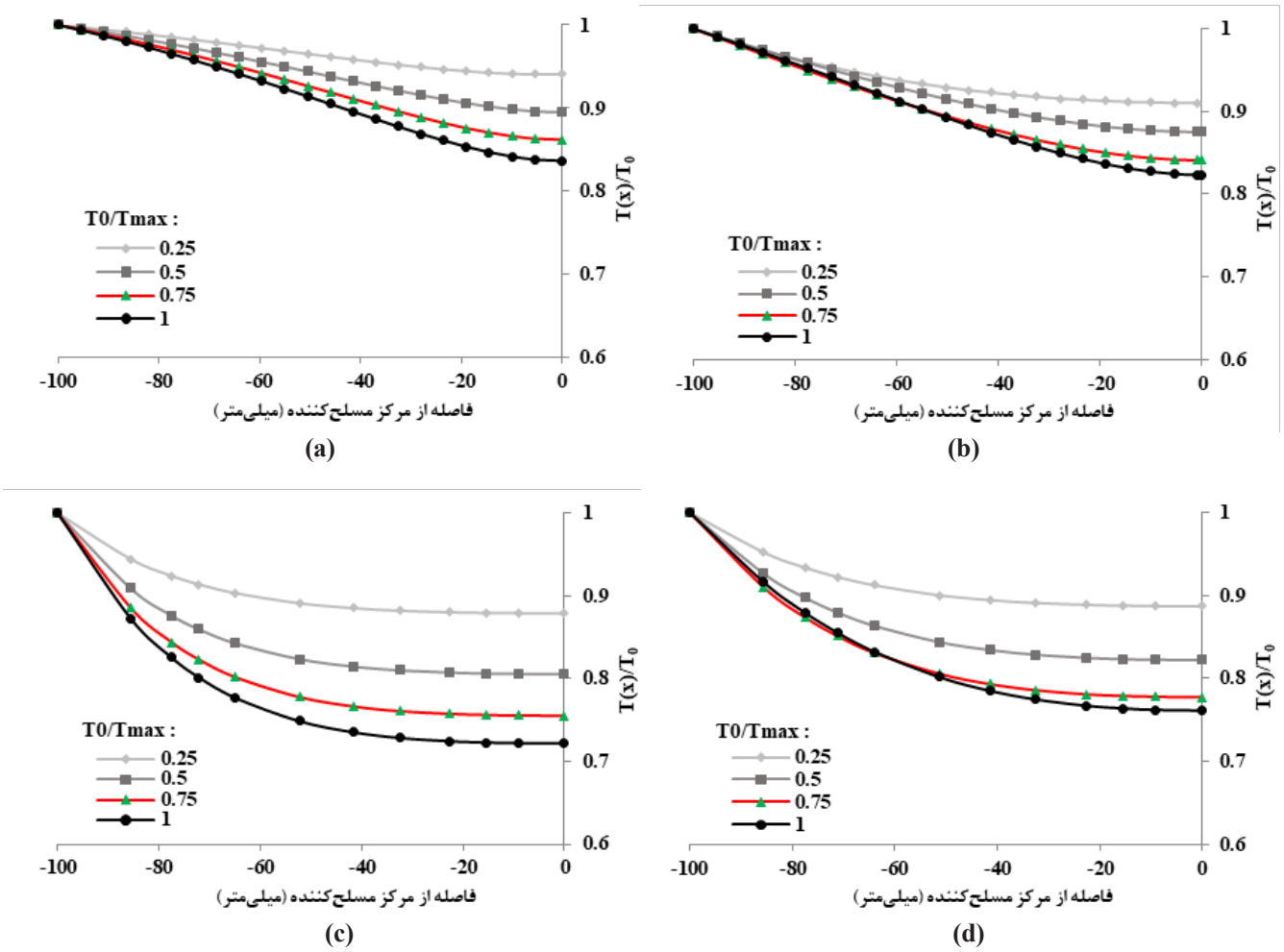


شکل ۱۶. تأثیر تعداد رشته‌های مسلح‌کننده و نسبت ارتفاع خاکریز بر توزیع بار روی مسلح‌کننده (a)T_0/Tmax=0.5 (b) T_0/Tmax=1 (آزمایش‌های ۱ و ٤ – ۸)

Fig. 16. The effect of the number of filaments of reinforcement and embankment height ratio on the load distribution on the reinforcement (a)T_0/Tmax=0.5 (b) T_0/Tmax=1 (Tests 1and 4 – 8)

دو تیر) منتقل می‌کند، به طوری که با حرکت از موقعیت مرکز مسلح‌کننده به سمت تیر، مقدار $Q(x)$ به صورت تدریجی کاهش می‌یابد تا در کنار تیر مقدارش به حداقل می‌رسد (شکل a,d-۱۵). برای کمترین ارتفاع خاکریز $H/(s-a)$=۰/۵، مقدار حداکثر $Q(x)$ در موقعیت مرکز (بیشترین فاصله از کنار تیرها)، با افزایش نیروی کششی در مسلح‌کننده برای $T_0/$=۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ T_{max} به ترتیب از چپ به راست (kN/m) ۰/۱۵، ۰/۱، ۰/۰۶، ۰/۰۲۱ است (شکل a-۱۵). برای حالتی که ارتفاع خاکریز کم است و حداکثر $Q(x)$ در مرکز مسلح‌کننده رخ می‌دهد در مقایسه با حالتی که ارتفاع خاکریزی زیاد است و حداکثر $Q(x)$ در کنار تیر رخ می‌دهد، برای یک کشش ثابت در مسلح‌کننده، حداکثر مقدار $Q(x)$ بیشتر خواهد بود. برای مثال در لحظه نزدیک به گسیختگی مسلح‌کننده (T_0/T_{max}=۱) حداکثر $Q(x)$ برای $H/(s-a)$ ۰/۵ در مقایسه با ۲ از ۰/۱۵ به (kN/m) ۰/۲۴ (حدود ۶۰ درصد) افزایش می‌یابد (شکل a,d-۱۵). شکل ۱۶ نشان می‌دهد افزایش تعداد رشته‌های مسلح‌کننده در حین افزایش نیروی کششی در آن برای خاکریزهای با ارتفاع کم ($H/(s-a)$ =۰/۵)، باعث افزایش تجمع بار در مرکز مسلح‌کننده خواهد شد.

برای مسلح کنندهٔ ۵ رشته‌ای در $H/(s-a)$ = ۰/۵، نمودار $Q(x)$ شباهت بیشتری به حالت الگوی توزیع بار یکنواخت دراد و برای مسلح کنندهٔ ۱۵ رشته‌ای $Q(x)$، شباهت بیشتری به الگوی توزیع بار مثلثی در لحظهٔ نزدیک به گسیختگی مسلح کننده دارد. برای خاکریزهای مرتفع ۲= $H/(s-a)$)، افزایش تعداد رشته‌ها باعث افزایش تجمع بار $Q(x)$ در کنار تیر می‌شود. برای تمامی تعداد رشته‌های 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 رشته‌های مسلح‌کننده باعث افزایش حداکثر $Q(x)$ خواهد شد (شکل ۱۶). در خاکریز با ارتفاع کم ($H/(s-a)$ = ۰/۵)، حداکثر مقدار $Q(x)$ در ۱ = T_0/T_{max} برای مسلح‌کنندهٔ ۵، ۱۰ و ۱۵ رشته‌ای به ترتیب برابر ۰/۰۲۸، ۰/۰۸ و (kN/m) ۰/۱۵ اندازه‌گیری شدند. سه برابر شدن تعداد رشته‌ها حدود ۵/۳ برابر حداکثر مقدار $Q(x)$ را افزایش داد. در خاکریز با ارتفاع زیاد ($H/(s-a)$ = ۲)، مقدار حداکثر $Q(x)$ در ۱= T_0/T_{max} برای مسلح‌کنندهٔ ۵، ۱۰ و ۱۵ به ترتیب ۰/۱۴، ۰/۲۲ و (kN/m) ۰/۲۴ اندازه‌گیری شدند که نشان می دهد با سه برابر شدن تعداد رشته‌ها حدود ۱/۷۲ برابر حداکثر مقدار $Q(x)$ افزایش یافت (شکل b-۱۶).

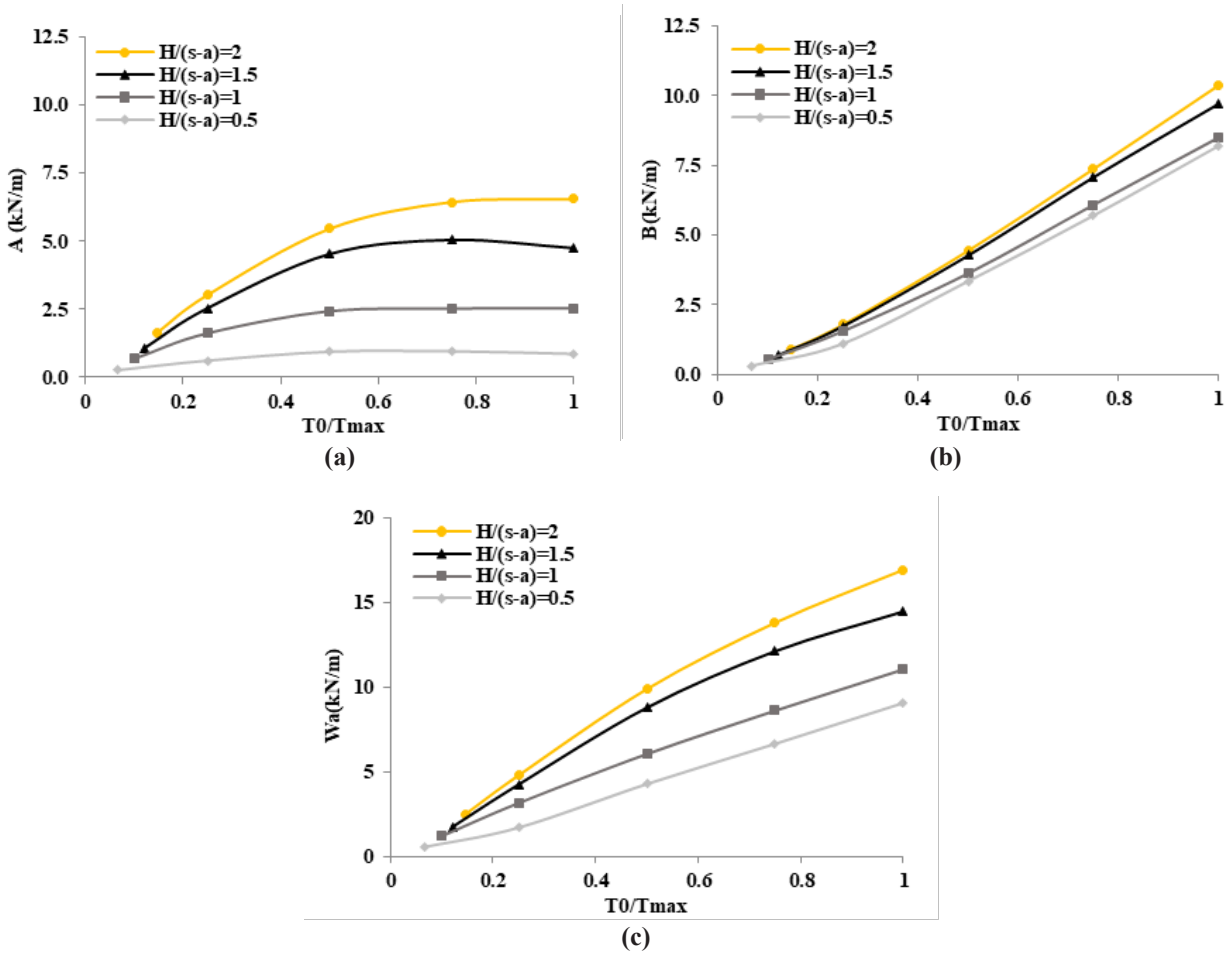


شکل ۱۷.توزیع نیروی کششی در طول مسلح‌کننده در حین افزایش نیروی کششی در مسلح‌کنندهٔ ۱۵ رشته‌ای
a)H/(s-a) =0.5 (b)H/(s-a) =1 (c)H/(s-a) =1.5 (d)H/(s-a) =2)
(آزمایش‌های ۱ - ۴)

Fig. 17. Tensile force distribution on the reinforcement while increasing the tensile force in the 15- filament reinforcement (a)H/(s-a) =0.5 (b)H/(s-a) =1 (c)H/(s-a) =1.5 (d)H/(s-a) =2 (Tests 1 - 4)

۴- ۴- توزیع نیروی کششی در طول مسلح‌کننده

شکل ۱۷ نشان می‌دهد که بیشینهٔ نیروی کششی در مسلح‌کننده در نزدیکی تیر اتفاق می‌افتد ($T(x)/T_0$ =۱). با حرکت در مسلح‌کننده از کنار تیر به سمت موقعیت مرکز، نیروی کششی در مسلح‌کننده کاهش می‌یابد ($T(x)/T_0$ >۱). 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 ۴-۳)، 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 مسلح‌کنندهٔ نزدیک به تیر، افزایش می‌یابد. در خاکریز با ارتفاع کم ($H/(s-a)$ = ۰/۵) برای ۱، ۰/۷۵، ۰/۵، ۰/۲۵ =T_0/ T_{max} کمترین مقدار $T(x)/T_0$ (نسبت نیروی کششی در مسلح کننده به نیروی کششی در مسلح کنار تیر است) که در مرکز مسلح‌کننده اتفاق

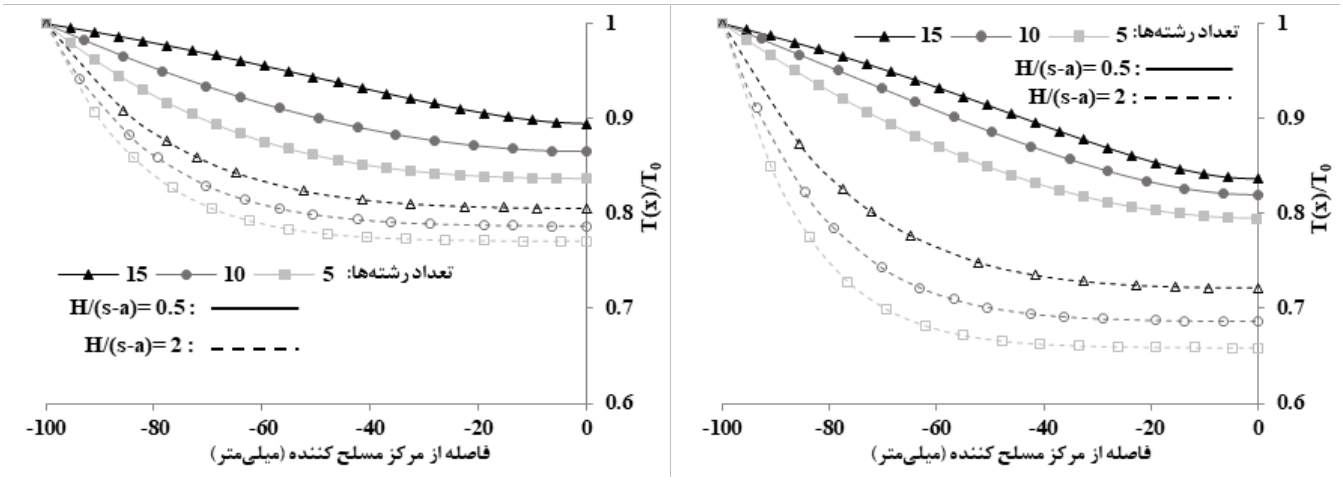


شکل ۱۸.تأثیر نسبت ارتفاع خاکریزی بر A، B و Wa در حین افزایش نیروی کششی در مسلح‌کنندهٔ ۱۵ رشته‌ای (a) تغییرات A (b) تغییرات B (c) تغییرات Wa (آزمایش‌های ۱ - ۴)

Fig. 18. Effect of embankment height ratio on A, B and Wa while increasing tensile force in 15- filament reinforcement (a) Changes A (b) Changes B (c) Changes Wa (Tests 1 - 4)

می‌افتد، به ترتیب از چپ به راست ۰/۸۳، ۰/۸۶، ۰/۸۹، ۰/۹۴ می‌باشد (شکل a-۱۷)؛ در حالی که در خاکریز مرتفع‌تر ($H/(s-a)$ =۲)، برای ۱، ۰/۷۵، ۰/۵، ۰/۲۵ = T_0/T_{max}، کمترین مقدار $T(x)/T_0$ در مرکز مسلح‌کننده به ترتیب از چپ به راست ۰/۷۲، ۰/۷۵، ۰/۸، ۰/۸۹ می باشد (شکلd-۱۷).

شکل a-۱۸ 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 ۵۰ درصد اول ظرفیت کششی مسلح‌کننده (T_0/T_{max} = ۰/۵) با یک شیب صعودی اتفاق می‌افتد، به طوری که هر چقدر ارتفاع خاکریزی بیشتر باشد، این شیب بیشتر خواهد بود؛ اما مرحله بعدی از ۵۰ درصد ظرفیت کششی مسلح‌کننده تا لحظهٔ گسیختگی آن می‌باشد که افزایش مقدار A بسیار کم است (تقریبا ثابت است) و با افزایش نیروی کششی در مسلح‌کننده تغییرات بسیار کمی در افزایش مقدار A اتفاق می‌افتد. شکل b -۱۸ نشان می‌دهد که میزان بار منتقل شده توسط مسلح‌کننده (B) به تیر در یک T_0/T_{max} 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 ۱ = T_0/T_{max}، برای



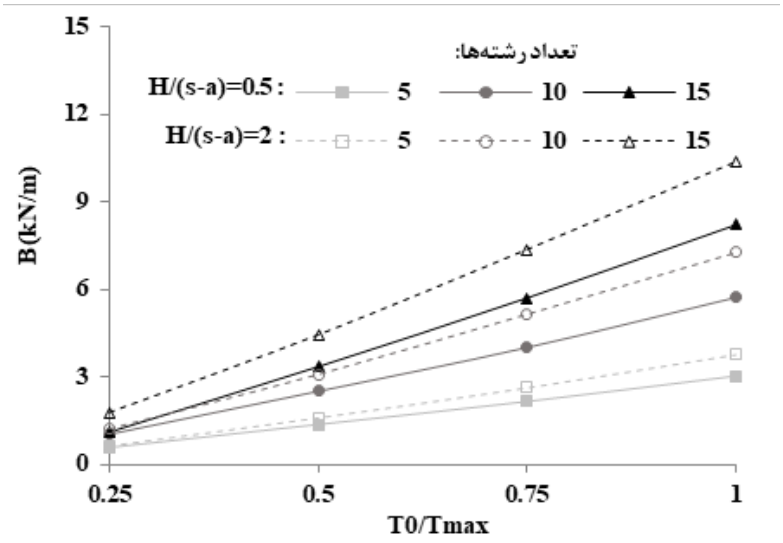
شکل ۱۹. تأثیر تعداد رشته‌های مسلح‌کننده و نسبت ارتفاع خاکریزی بر توزیع نیروی کششی در طول مسلح‌کننده (a) T0/Tmax=0.5, (b) T0/Tmax=1 (آزمایش‌های ۱ و ۴ - ۸)

Fig. 19. The effect of the number of reinforcement filaments and embankment height ratio on the tensile force distribution along the reinforcement (a) T0/Tmax=0.5, (b) T0/Tmax=1 (Tests 1and 4 - 8)

۲، ۱/۵، ۱، ۰/۵ = $H/(s-a)$، به ترتیب از چپ به راست ۱۰/۳، ۹/۷، ۸/۵، ۸/۲ (kN/m) است (افزایش ۲۶ درصدی ظرفیت مسلح‌کنندهٔ ۱۵ رشته‌ای با ۴ برابر شدن ارتفاع خاکریزی). شکل c-۱۸ 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 ۲، ۱/۵، ۱، ۰/۵ = ($H/(s-a)$) به ترتیب از چپ به راست ۹/۹، ۸/۸، ۶، ۴/۲ (kN/m)است (مقدار W_a با ۴ برابر شدن ارتفاع خاکریزی ۲/۳۵ برابر شد). با فعال شدن درصد بیشتری از ظرفیت کششی مسلح‌کننده (به دلیل ثابت ماندن رشد A برای T_0/T_{max} <۰/۵)، تأثیر ارتفاع خاکریز در انتقال W_a به تیر کاهش می‌یابد.

مقدار W_a در T_0/T_{max}= ۱ برای ۲، ۱/۵، ۱، ۰/۵ = $H/(s-a)$، به ترتیب از چپ به راست ۷۱، ۱۴/۵، ۱۱، ۹/۱ (kN/m) می‌باشد (مقدار W_a با ۴ برابر شدن ارتفاع خاکریز ۱/۸۷ 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 و $T(x)/T_0$در موقعیت مرکز به ۱ نزدیکتر شود. شکل b-۱۹ نشان می‌دهد که دو عامل افزایش ارتفاع خاکریز و کاهش تعداد رشته‌های مسلح‌کنند، باعث تمرکز بیشتر توزیع نیروی کششی در نزدیکی تیر می‌شوند (غیر یکنواخت‌تر شدن توزیع نیروی کششی در طول مسلح‌کننده). در حالتی که حداکثر ظرفیت کششی مسلح‌کننده فعال شود (مقدار ظرفیت کششی مسلح‌کننده (T_{max})، برای مسلح‌کنندهٔ ۵ و ۱۵ رشته‌ای با توجه به جدول ۱ به ترتیب ۵ و۱۵(kN/m) است)، برای کمترین ارتفاع خاکریز و بیشترین تعداد رشته مسلح‌کننده (آزمایش۱)، در مقایسه با بیشترین ارتفاع خاکریزی و کمترین تعداد رشته های مسلح‌کننده (آزمایش ۸)، مقدار $T(x)/T_0$ در موقعیت مرکز مسلح‌کننده کاهش بیشتری را تجربه می‌کند. حدود ۲۰ درصد کاهش از ۰/۸۳ به ۰/۶۶ کاهش می‌یابد (شکلb-۱۹). که نشانهٔ غیر یکنواخت‌تر شدن توزیع کشش در طول مسلح‌کننده و تجمع توزیع نیروی کششی مسلح‌کننده در نزدیکی تیر برای آزمایش شماره ۸ می‌باشد.

شکل ۲۰ نشان می‌دهد افزایش تعداد رشته‌های مسلح‌کننده برای درصد ثابتی از ظرفیت کششی مسلح‌کننده (ثابت=T_0/T_{max})، باعث افزایش مقدار بار B می‌شود. برای مثال، در T_0/T_{max} =۰/۵و $H/(s-a)$= ۰/۵ مقدار بار منتقل شده توسط مسلح‌کننده (B) با افزایش تعداد رشته‌ها از ۵ به ۱۵،



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

Fig. 20. The effect of the number of reinforcement filaments and embankment height ratio on "B" while increasing the tensile force (Tests 1 and 4 - 8)

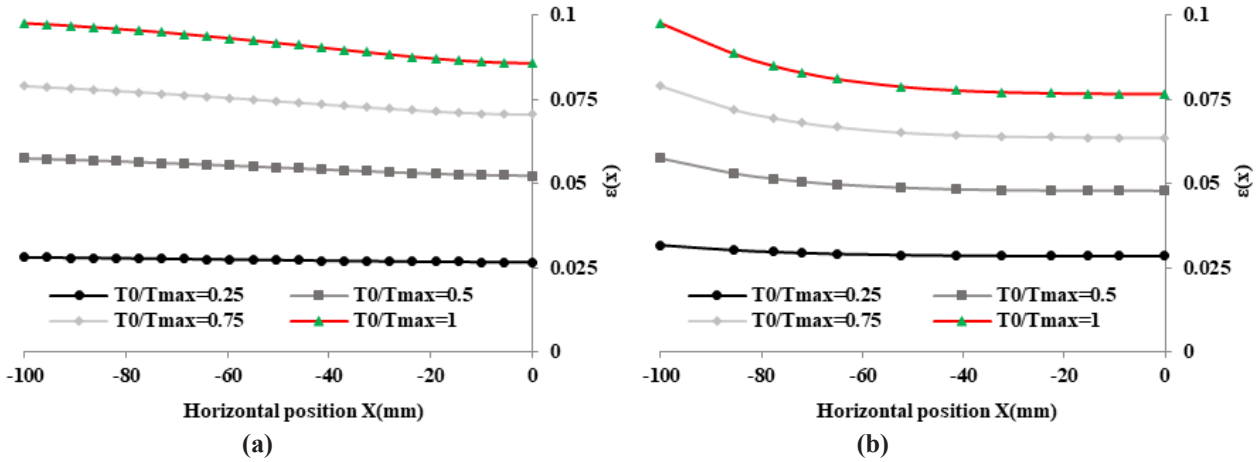
حدود ۱/۵ برابر افزایش می‌یابد. که علت را می‌توان در افزایش مقدار نیروی کششی (T_0) در مسلح‌کنندهٔ ۱۵ رشته‌ای نسبت به ۵ رشته‌ای دانست.

۴- ۵- توزیع کرنش در طول مسلح کننده

شکل ۲۱ نشان می‌دهد که حداکثر کرنش در قسمتی از مسلح‌کننده، نزدیک به تیر اتفاق می‌افتد، همچنین در مقادیر T_0/T_{max} کم نمودار $\varepsilon(x)$ در طول مسلح‌کننده، تغییراتش بسیار کم خواهد بود و با افزایش مقدار T_0/T_{max} مقدار $\varepsilon(x)$ با حرکت از کنار تیر به سمت مرکز مسلح‌کننده کاهش بیشتری می‌یابد، به طوری که در $H/(s-a)=$ ۲ مقدار $\varepsilon(x)$ در $T_0/T_{max}=$ ۰/۲۵ از ۰/۰۳۱ در مسلح‌کنندهٔ کنار تیر به ۰/۰۲۸ در مرکز مسلح‌کننده کاهش می‌یابد (۱۰٪ $=\Delta\varepsilon(x)$). اما در $T_0/T_{max}=$ ۱ مقدارش از ۰/۰۹۷ در قسمتی از مسلح‌کننده کنار تیر به ۰/۰۷۶ در مرکز مسلح‌کننده کاهش می‌یابد (۲۲ ٪$=\Delta\varepsilon(x)$). کمترین مقدار$\varepsilon(x)$ در مرکز مسلح‌کننده برای $T_0/T_{max}=$۱ و ۲، $H/(s-a)=$ ۰/۵ ، به ترتیب از چپ به راست ۰/۰۷۶، ۰/۰۸۶می‌باشد که نشان می‌دهد افزایش ارتفاع خاکریزی، تمرکز توزیع کرنش را در نزدیکی تیر افزایش می‌دهد.

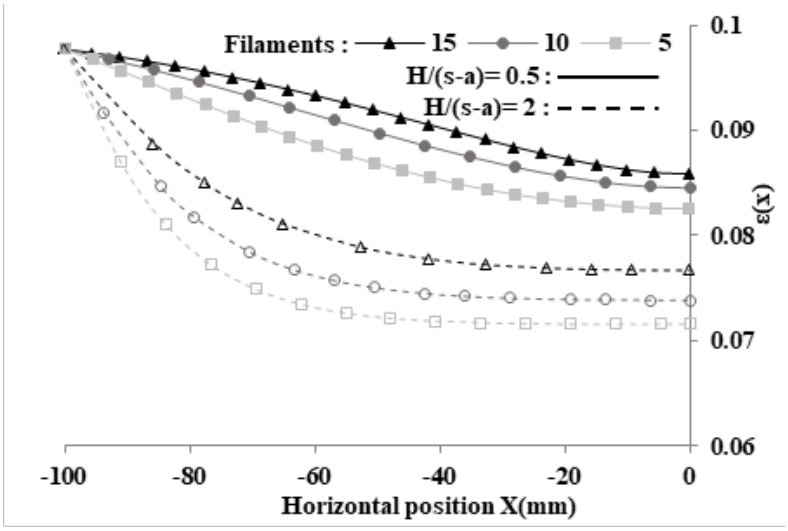
شکل ۲۲ نشان می‌دهد که کاهش ارتفاع خاکریزی و افزایش تعداد رشته‌های مسلح‌کننده در لحظهٔ نزدیک به گسیختگی مسلح‌کننده، علاوه بر افزایش مقدار کرنش در طول مسلح‌کننده، توزیع کرنش در طول مسلح‌کننده را نیز یکنواخت‌تر می‌کند و بیشترین تمرکز کرنش در نزدیکی تیر (توزیع غیر یکنواخت‌تر کرنش)، برای خاکریزهای مرتفع‌تر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

نمودار شکل a -۲۳ 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 ۰/۵ به ۲ مقدار شیب اولیه از ۱۵ به۴۰(kN/m) و شیب ثانویه از ۱۰۰ (kN/m) به ۱۵۰ افزایش می‌یابد که علت را می‌توان در توزیع نیروی کششی در طول مسلح‌کننده (برای تعداد ثابتی از رشته های مسلح‌کننده) دانست. همان‌طور که در بخش ۴-۴ نشان داده شد (شکل ۱۷)، تمرکز نیروی کششی در طول مسلح‌کننده، در موقعیت نزدیک به تیر با افزایش T_0/T_{max} در حین آزمایش و افزایش ارتفاع خاکریز افزایش می‌یابد.



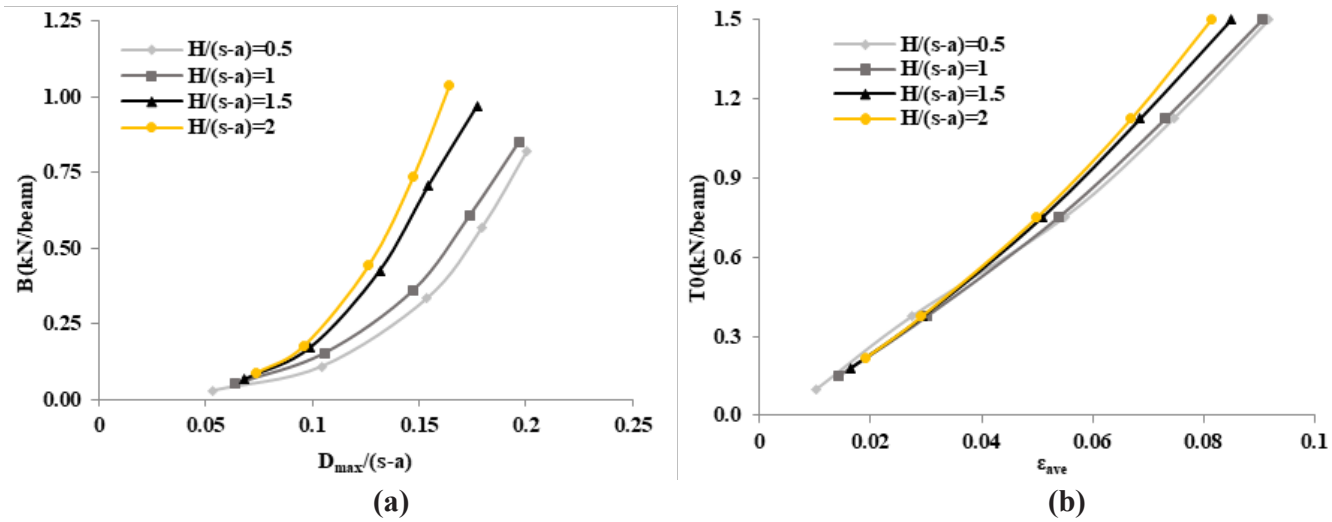
شکل ۲۱. توزیع کرنش در طول مسلح‌کننده در حین افزایش نیروی کششی در مسلح‌کنندهٔ ۱۵ رشته‌ای
(a)H/(s-a) =0.5 (b)H/(s-a) =2)
(آزمایش‌های ۱ - ۴)

Fig. 21. Strain distribution along the reinforcement while increasing the tensile force in a 15- filament reinforcement (a)H/(s-a) =0.5 (b)H/(s-a) =2(Tests 1-4)



شکل ۲۲. تأثیر نسبت ارتفاع خاکریزی و تعداد رشته‌های مسلح‌کننده در توزیع کرنش در طول مسلح‌کننده در لحظهٔ نزدیک به گسیختگی مسلح‌کننده (T_0/Tmax=1)، (آزمایش‌های ۱ و ۴ - ۸)

Fig. 22. The effect of embankment height ratio and number of reinforcement filaments on strain distribution along the reinforcement at the moment just before rupture of the reinforcement (T_0/Tmax=1), (Tests 1 and 4 - 8)

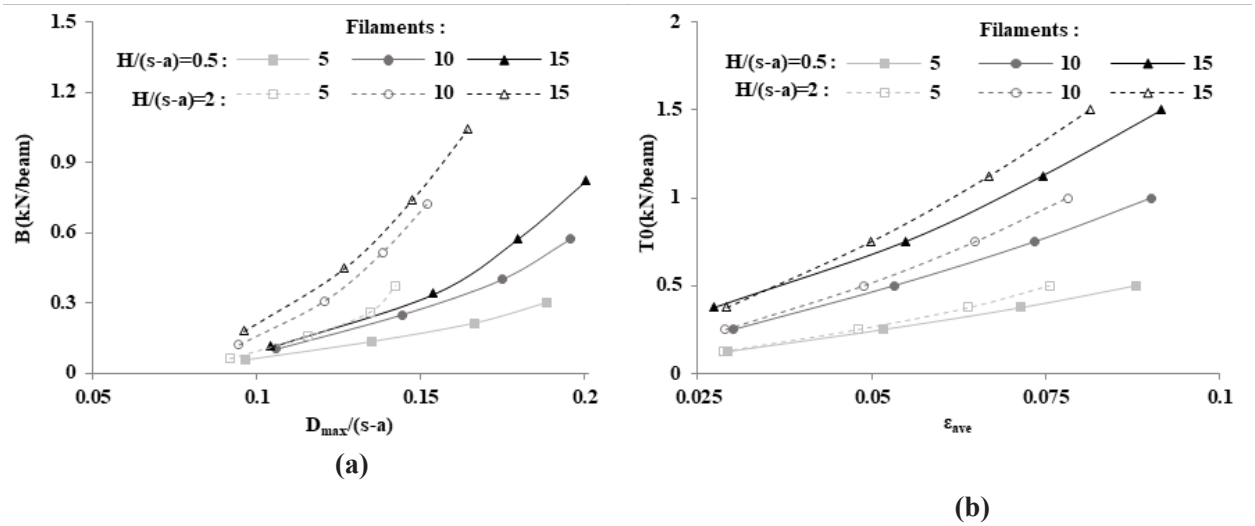


شکل ۲۳. تأثیر نسبت ارتفاع خاکریزی بر ε ave و Dmax/(s-a) در حین آزمایش تا لحظهٔ گسیختگی مسلح‌کنندهٔ ۱۵ رشته‌ای (a) تغییرات B و نسبت نشست ماکزییم مسلح‌کننده (b)تغییرات T۰ و کرنش متوسط مسلح‌کننده (آزمایش‌های ۱- ۴)

Fig. 23. The effect of embankment height ratio on εave and Dmax/(s-a) during the test up to the moment just before rupture of the 15- filament reinforcement (a) Graph B -Dmax/(s-a) (b) Graph T0 -εave (Tests 1 - 4))

که این عدم توزیع یکنواخت نیروی کششی (تجمع نیروی کششی در مجاورت تیر) و به دنبال آن تجمع کرنش ($\varepsilon(x)$) در قسمتی از مسلح‌کنندهٔ نزدیک تیر، سبب می‌شود که مقادیر کرنش متوسط مسلح‌کننده (ε_{ave}) و میزان حداکثر تغییر شکل مسلح‌کننده، کاهش یابد و مسلح‌کننده قادر خواهد بود با نشست کمتر، مقادیر B بیشتری را به تیر منتقل کند (شکل a-۲۳). شکل ۲۳ نشان می‌دهد مقدار حداکثر ε_{ave} و $D_{max}/(s-a)$ که مسلح‌کننده در لحظهٔ نزدیک به گسیختگی تحمل می‌کند با افزایش ارتفاع خاکریزی کاهش می‌یابد. برای ۲، ۱/۵، ۱، ۰/۵ =$H/(s-a)$ مقدار حداکثر کرنش متوسط در لحظهٔ نزدیک گسیختگی مسلح‌کننده، به ترتیب از چپ به راست ۰/۰۸۱، ۰/۰۸۵، ۰/۰۹، ۰/۰۹۲ است (۱۲ درصد کاهش در مقدار کرنش متوسط مسلح‌کننده در لحظهٔ نزدیک به گسیختگی با افزایش ۴ برابری در نسبت ارتفاع خاکریز). برای همین، نسبت‌های ارتفاع مقدار ($D_{max}/(s-a)$)، به ترتیب از چپ به راست ۰/۱۶۴، ۰/۱۷۷، ۰/۱۹۶، ۰/۲ است (۱۸ درصد کاهش در $D_{max}/(s-a)$ در لحظهٔ نزدیک به گسیختگی، با افزایش ۴ برابری در نسبت ارتفاع خاکریز). همچنین می توان مشاهده کرد که به ازای یک نسبت نشست ثابت ۰/۱۶۴، با ۴ برابر شده ارتفاع خاکریز مسلح کننده قادر است حداکثر ۳/۷ برابر بار بیشتر به تیر منتقل کند.

شکل a-۲۴ نشان می‌دهد که افزایش تعداد رشته‌های مسلح‌کننده، ظرفیت مسلح‌کننده را برای انتقال بار به تیر (B_{max}) افزایش می‌دهد. برای ۲، ۰/۵ =$H/(s-a)$ با سه برابر کردن تعداد رشته‌ها، مقدار B_{max} حدود ۲/۷ برابر برای هر دو نسبت ارتفاع خاکریز افزایش یافت. افزایش تعداد رشته‌ها، روند رشد B نسبت به$D_{max}/(s-a)$ افزایش می‌دهد. در ۰/۵ =$H/(s-a)$ برای یک مقدار ثابت $D_{max}/(s-a)$ =۰/۱۲۵ مقدار B، برای مسلح‌کنندهٔ ۵، ۱۰ و ۱۵ رشته‌ای، به ترتیب (kN/m) ۱/۶۸، ۲/۷۶و ۳/۱۴ است (۷۸ درصد افزایش). شکل b-۲۴ نشان می‌دهد که هر دو عامل افزایش ارتفاع خاکریزی و افزایش تعداد رشته‌های مسلح‌کننده، باعث افزایش سختی در مسلح‌کننده می‌شوند. با سه برابر شدن تعداد رشته‌ها از ۵ به ۱۵ در ۲ =$H/(s-a)$ برای ε_{ave} =۰/۰۷۵ مقدار T_0 متناسب با افزایش تعداد رشته‌ها سه برابر خواهد شد. مقدار T_0 در ε_{ave} =۰/۰۷۵ با چهار برابر شدن نسبت ارتفاع خاکریزی، حدود ۱۷/۵ درصد افزایش می‌یابد.



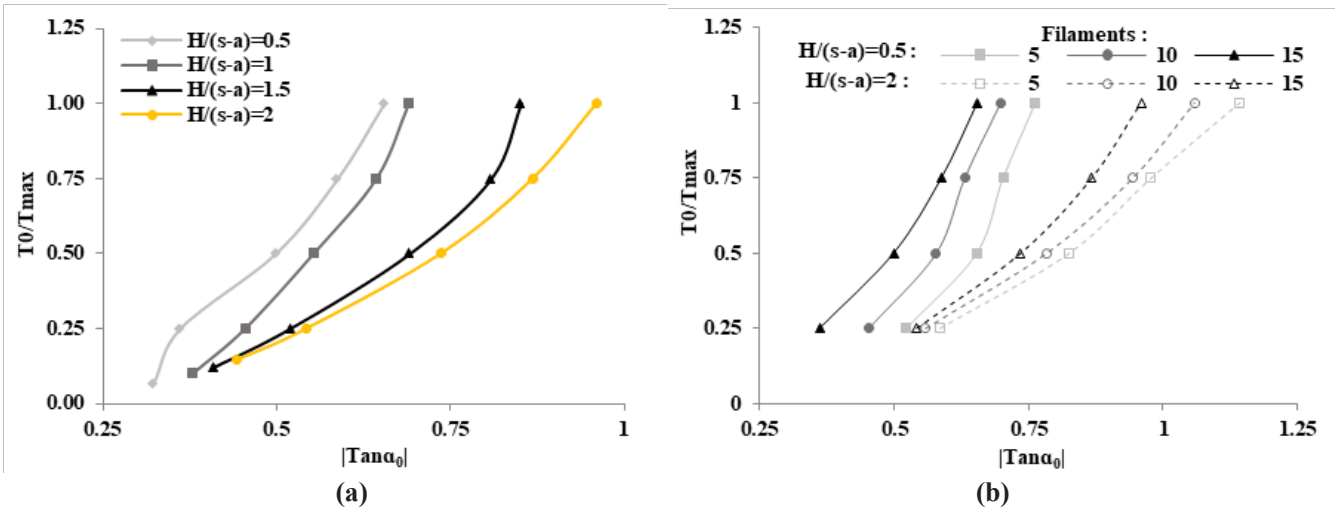
شکل ۲۴. تأثیر نسبت ارتفاع خاکریزی و تعداد رشته‌های مسلح‌کننده بر ε_{ave} و$D_{max}/(s-a)$ در حین آزمایش تا لحظهٔ نزدیک به گسیختگی مسلح‌کننده (a) نمودار $(B-D_{max})/(s-a)$ (b) نمودار T_0-ε_{ave} (آزمایش‌های ۱ و ۴ – ۸)

Fig. 24. The effect of embankment height ratio and the number of reinforcement filaments on εave and Dmax/(s-a) during the test up to the moment just before rupture of the filaments reinforcement (a)Graph B-Dmax/(s-a) (b)Graph T_0-ε_{ave} (Tests 1 and 4 – 8)

۴- ۶- شیب مسلح‌کنندهٔ کنار تیر

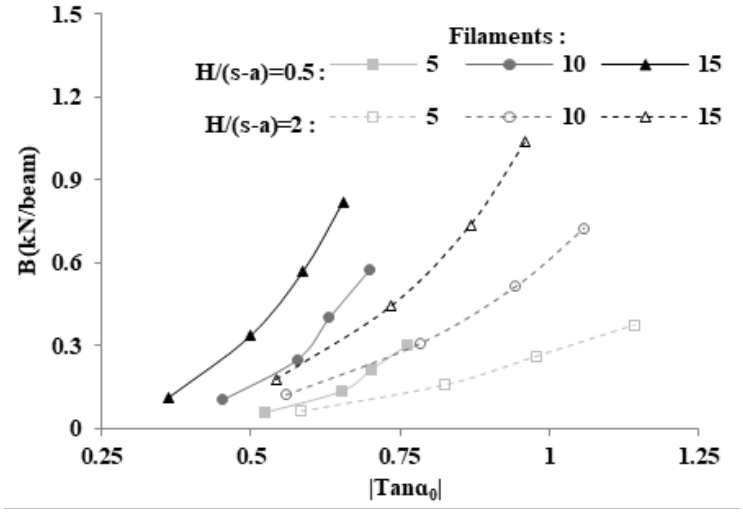
شکل a-۲۵ نشان می‌دهد که در حین آزمایش و با افزایش مقدار نیروی کششی در مسلح‌کننده، شیب نمودار تغییر شکل در کنار تیر افزایش می‌یابد، به طوری که مقدار و محدوده این شیب ($|Tan\alpha_0|$)، با افزایش نسبت ارتفاع خاکریز افزایش می‌یابد. برای کمترین ارتفاع خاکریز $H/(s-a)=$ ۰/۵ تغییرات شیب مسلح‌کننده در کنار تیر، در محدوده ۰/۳۶ تا ۰/۶۵ و برای بیشترین ارتفاع خاکریز $H/(s-a)=$۲ در محدوده ۰/۴۵ تا ۰/۹۵ اندازه‌گیری شدند.

برای مسلح‌کنندهٔ ۱۵ رشته‌ای با افزایش نسبت ارتفاع خاکریز از ۰/۵ به ۲، حداکثر شیب کنار مسلح‌کننده در$T_0/T_{max}=$ ۱ (لحظهٔ نزدیک به گسیختگی) از ۰/۶۵ به ۰/۹۵ افزایش می‌یابد (حدود ۴۶ درصد شیب کنار، در لحظهٔ نزدیک به گسیختگی مسلح‌کننده، افزایش می‌یابد). شکل b-۲۵ نشان می‌دهد که با افزایش تعداد رشته‌های مسلح‌کننده برای درصد مشخصی از ظرفیت کششی مسلح‌کننده شیب کنار منحنی تغییر شکل، کاهش خواهد یافت. این کاهش در $T_0/T_{max}=$ ۰/۲۵ (۲۵ درصد ظرفیت کششی مسلح‌کننده)، با سه برابر شدن تعداد رشته‌های مسلح‌کننده در ۲، $H/(s-a)=$ ۰/۵ ، به ترتیب از چپ به راست ۷ و ۳۱ درصد خواهد بود. همچنین، در لحظهٔ نزدیک به گسیختگی مسلح‌کننده با سه برابر شدن تعداد رشته‌ها در ۲، $H/(s-a)=$ ۰/۵، به ترتیب از چپ به راست ۱۴ و ۱۶ درصد خواهد بود. شکل ۲۶ نشان می‌دهد افزایش تعداد رشته‌های 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 رشته‌ها کاهش یابد. برای $B=$ ۳ (kN/m) مقدار شیب مسلح‌کننده با سه برابر شدن تعداد رشته‌ها برای ۲، $H/(s-a)=$ ۰/۵ به مقدار یکسان و حدود ۳۸ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۲۵. تأثیر نسبت ارتفاع و تعداد رشته‌های مسلح‌کننده بر شیب مسلح‌کنندهٔ کنار تیر در حین آزمایش (a)تأثیر نسبت ارتفاع (آزمایش‌های ۱ – ٤) (b)تأثیر نسبت ارتفاع و تعداد رشته‌های مسلح‌کننده (آزمایش‌های ۱ و ۴ – ۸)

Fig. 25. The effect of embankment height ratio and the number of reinforcement filaments on the reinforcement slope at the edge of the beam during the test (a) The effect of embankment height ratio (Tests 1 - 4) (b) The effect of embankment height ratio and the number of reinforcement filaments (Test 1 and 4 – 8)



شکل ۲۶. تأثیر نسبت ارتفاع خاکریز و تعداد رشته‌های مسلح‌کننده روی B-$|\mathrm{Tan}\alpha_0|$ (آزمایش‌های ۱ و ٤ – ۸)

Fig. 26. The effect of embankment height ratio and the number of reinforcement filaments on B-$|\mathrm{Tan}\alpha_0|$ (Tests 1 and 4 – 8)

۵- نتیجه‌گیری

آزمایش‌های دوبعدی، با استفاده از میله‌های فلزی، به عنوان خاکریز دوبعدی، به منظور بررسی رفتار مسلح‌کنندهٔ ژئوسینتتیکی در خاکریزهای متکی برشمع انجام شد. آزمایش‌ها به طور مخصوصی طراحی شدند تا امکان اندازه‌گیری جداگانهٔ هرکدام از پارامترهای A (تاثیر قوس) و B(اثر مسلح‌کننده) در حین آزمایش امکان‌پذیر باشد. ۸ آزمایش به منظور بررسی تاثیر ارتفاع خاکریزی و تعداد رشته‌های مسلح‌کننده، بر رفتار آن انجام گرفت.

- در خاکریز مرتفع تر قوس‌های تشکیل شده در خاکریز در حین آزمایش هندسه آنها کمتر تغییر می‌کند. و این امر سبب تشکیل قوس‌های پایدار تر در خاکریزهای مرتفع‌تر 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 مسلح‌کنندهٔ 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 تمرکز 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 ۴برابر شدن ارتفاع خاکریز مسلح کننده با یک نشست ثابت قادر خواهد بود حداکثر تا ۳/۷ 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 حداکثر تا ۱/۷۷ برابر بار منتقل شده به شمع را افزایش دهد.

۶- فهرست علائم

A	باری که مستقیما توسط قوسزدگی به شمع منتقل می‌شود، kN/m
a	عرض(بعد) تیر، mm
A_{max}	حداکثر مقدار A که قبل از گسیختگی رشته‌ها به شمع منتقل می‌شود، kN/m
B	باری که غیرمستقیم توسط کشش مسلح‌کننده به شمع منتقل می‌گردد، kN/m
b	طول هر تیر عمود بر صفحه دو بعدی (x-z) آزمایش (b=100 mm)، mm
B_{max}	حداکثر مقدار B که قبل از گسیختگی رشته‌ها به شمع منتقل خواهدشد(ظرفیت B)، kN/m
d^2z/dx^2	تغییرات شیب مسلح‌کننده
D_{max}	حداکثر تغییر شکل (نشست) مسلح‌کننده در موقعیت مرکز آن(X=0mm)، mm
$D_{max}/(s-a)$	نسبت نشست حداکثر مسلح‌کننده در موقعیت مرکز آن(X=0mm)، mm
$Filaments$	تعداد رشته‌های مسلح‌کننده
H	ارتفاع خاکریز روی تیرها، mm
$H/(s-a)$	نسبت ارتفاع خاکریز
J_i	سختی مسلح‌کننده متناظر با نیروی کششی T_i، kN/m
$L.W$	بعد صفحه بارگذاری برای اعمال سربار، mm
$L1$	نصف طول مسلح‌کننده بین دو تیر قبل از تغییر شکل، mm
$L2$	نصف طول مسلح‌کننده بین دو تیر بعد از تغییر شکل، mm
$Q(X)$	توزیع بار قائم روی مسلح‌کننده، kN/m
R_a	بزرگترین نیم قطر قوس‌های تشکیل شده در خاکریز روی مسلح‌کننده در راستای محور Z، mm
R_b	بزرگترین نیم قطر قوس‌های تشکیل شده در خاکریز در راستای محور X، mm
s	فاصله مرکز تا مرکز تیرها، mm
$(s-a)$	فاصله کنار تیر۱ تا کنار تیر۲ مجاورش، mm
T_0	نیروی کششی ایجاد شده در مسلح‌کننده در لبه تیر (T_{edge})، mm
T_0/T_{max}	نسبتی از ظرفیت کششی مسلح‌کنند که حداکثر آن ۱ می‌باشد، mm
T_H	مولفه افقی نیروی کششی ایجاد شده، mm
T_i	نیروی کششی که بر اثر بار قائم در مسلح‌کننده در موقعیت i ایجاد می‌شود، mm
T_{max}	حداکثر مقدار نیروی کششی که رشته‌ها می‌تواند تحمل کند (ظرفیت کششی رشته‌ها)، kN/bm
$T_{V\ edge}$	مولفه قائم نیروی کششی ایجاد شده در لبه تیر، kN/m
T_{vi}	تصویر قائم نیروی کششی مسلح‌کننده در قسمت iام مسلح کننده، kN/m
$T(x)$	نیروی کششی در مختصات x در مسلح‌کننده، kN/m
$T(x)/T_0$	نسبت نیروی کششی در مختصات x به نیروی کششی در مسلح‌کننده (کنار) لبه تیر، kN/m

W_a	کل بار قائم که به شمع می‌رسد ($A+B$)، kN/m
W_{amax}	حداکثر کل بار قائم که تا قبل از گسیختگی رشته‌ها به تیر می‌رسد(ظرفیت W_a)، kN/m
α_0	زاویه مماس بر منحنی تغییر شکل مسلح‌کننده در لبه تیر با افق، °
α_i	زاویه مماس بر منحنی تغییر شکل مسلح‌کننده در نقطه i با راستای افق، °
ε_{ave}	کرنشی که در اثر تغییر شکل رشته‌های مسلح‌کننده اتفاق می‌افتد
ε_i	کرنش یک المان از مسلح‌کننده بعد از تغییر شکل

منابع

[1] S.J.M. van Eekelen, J. Han, Geosynthetic-reinforced pile-supported embankments: state of the art, Geosynthetics International, 27(2) (2020) 112-141.

[2] S.J.M. van Eekelen, Basal reinforced piled embankments, Delft University of Technology, 2015.

[3] S.J.M. van Eekelen and M.H. Brugman, Eds, 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.J.M. 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.M. 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.J.M 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.J.M. 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.M van Eekelen, A. Bezuijen, H. Lodder and A.F. 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.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Fakhrian nejad, S. H. Lajevardi, S. J. M. van Eekelen, A. Nayeri, Two-dimensional experimental and analytical study of reinforcement behavior in piled embankments , Amirkabir J. Civil Eng., 56(1) (2024) 23-50.

DOI: 10.22060/ceej.2024.21779.7823