



Two-dimensional experimental and analytical study of reinforcement behavior in piled embankments

M. Fakhrian nejad¹, S. H. Lajevardi^{1*}, S. J. M. van Eekelen², A. Nayeri¹

¹ Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.

² Department of Geo-engineering, Deltares Institute, Delft, Netherlands.

ABSTRACT: A method to improve soft soil is to use embankments along with geo-synthetic reinforcement on piles. This embankment system is called a piled embankment. The objective of this system is to transfer a large part of the load to the piles through the embankment and the reinforcement. Due to the soil arching in the embankment, part of the surcharge load (A) was directly transferred to the piles, reducing the remaining surcharge load (B) applied to the reinforcement between the piles, and if applicable: (C) the subsoil between the piles. One of the objectives of piled embankment design regulations is that the reinforcement can transfer higher load to the piles with less settlement. In this article, 2D tests were performed using rigid steel rods as embankments with 2D behavior. Then, analytical calculations were performed, using the deflection of the reinforcement measured in the tests. The test device was designed and made in such a way that can measure the values of A and B separately. The effect of varying the embankment height and the number of reinforcing strands was studied. It was shown increasing the height of the embankment by a factor four, resulted in the formation of a more stable arch and an increased load accumulation near the piles, allowing the reinforcement to transfer higher loads to the piles, up to 3.7 times a fixed settlement. Similarly, tripling the number of reinforcing strands, while maintain a fixed settlement of the reinforcement, led to a 1.78 times increase in the maximum load transferred to the piles.

Review History:

Received: Sep. 18, 2022

Revised: Dec. 05, 2023

Accepted: Jan. 06, 2024

Available Online: Jan. 19, 2024

Keywords:

Piled embankment
reinforcement
embankment height
distributed load
soil arching

1- Introduction

One of the methods of improving soft soil is using a geosynthetic-reinforced pile-supported embankment [1]. This system consists of piles with a suitable arrangement, and then placing a geosynthetic reinforcement on the piles, followed by an embankment on the reinforcement. The purpose is to reduce the load on the soft subsoil by transferring a large part of the surcharge load and the soil weight to the piles. The transfer of load towards the piles is relatively efficient due to soil arching. Soil arching occurs when differential movement develops. In geosynthetic-reinforced pile-supported embankments, soil arching takes place when the geosynthetic deflects in the area between the piles. Due to the soil arching, a relatively large part of the load is transferred towards the piles directly. This load part is called load part A (Figure 1) [2]. The residual load part is exerted on the geosynthetic reinforcement between the piles. Part of this residual load is transferred via tension in the geosynthetic reinforcement towards the piles, with this second load part being B. If subsoil is present underneath the reinforcement, this may carry a third part of the load, which is part C.

Also, the load transfer to the piles depends on the geometry of the model; higher embankments and higher coverage rate of the piles result in more effective arching.

This effect has been widely studied. Applying a sufficiently stiff reinforcement improves the soil arching, and in addition, it helps transferring vertical load towards the piles. This reduces the load exerted on the subsurface between the piles [3-7].

2- Methodology

A two-dimensional test device was developed to investigate which part of the load is transferred directly to the piles by soil arching and which part of the load is transferred to the piles via the reinforcement (Figure 2). The fact that A and B can be measured separately makes the test device different from several similar test set-ups such as those presented by Jenck et al [8] and Rui et al [9].

For the two-dimensional experimental study, a mixture of three types of steel rods was used as analogical soil. The steel rods in the current test set-up had circular cross-sections with diameters of 1.5 mm, 2.5 mm, and 4.0 mm. The rods had a length of 100 mm and were mixed in an equal weight ratio of 1: 1: 1 and placed perpendicular to the two-dimensional plate.

A camera with a resolution of 24 megapixels (6000 x 4000) was positioned on a tripod approximately 1 m in front of the test box. The movement of the soil and SPW was tracked using one digital photograph every five seconds

*Corresponding author's email: Sh.lajevardi@iau.ac.ir



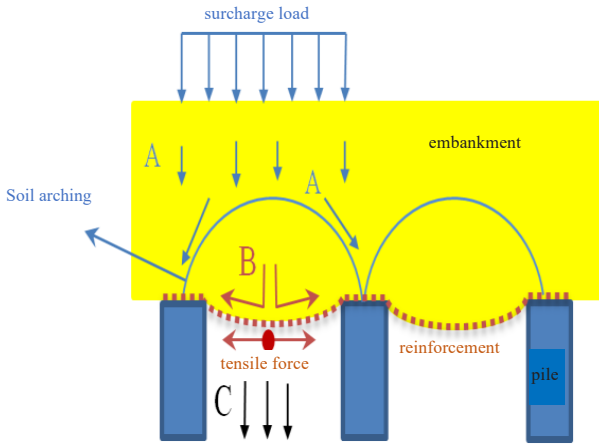


Fig. 1. Distribution of the surcharge load and soil weight to the piles [2]

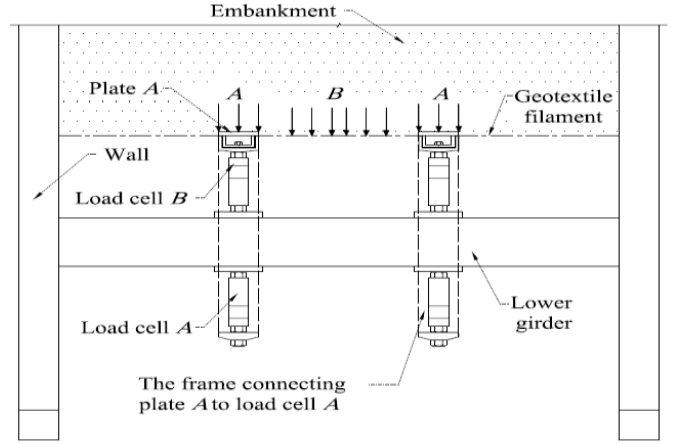


Fig. 2. Details of the test device

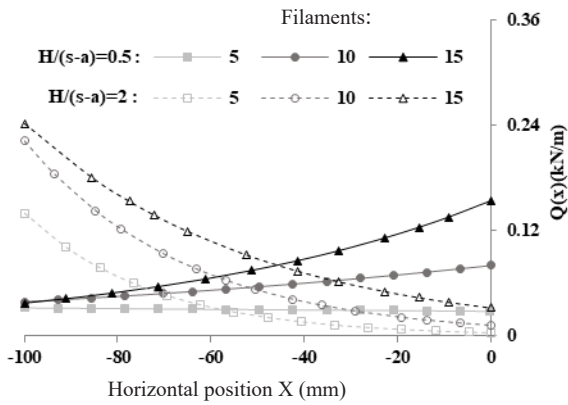


Fig. 3. Distribution of the surcharge load and soil weight on the reinforcement

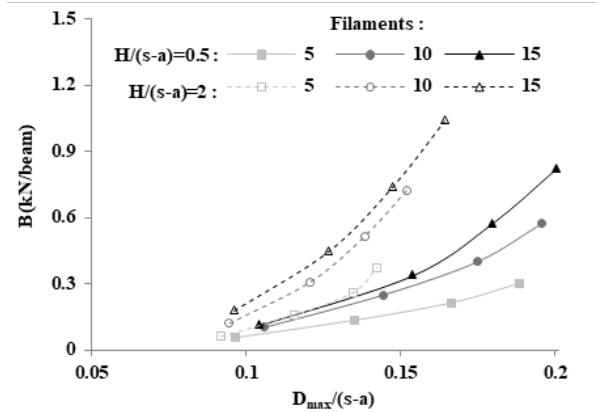


Fig. 4. The effect of embankment height ratio and the number of reinforcement filaments on $D_{max}/(s-a)$

and the digital Particle Image Velocimetry (PIV) technique. The geometric strain of the geosynthetic reinforcement was obtained from the reinforcement deformation between two piles which was obtained using PIV.

3- Results and Discussion

In the higher embankment, the geometry of the arches formed in the embankment changes less during the test. And this causes the formation of more stable arches in higher embankments. For high embankments ($H/(s-a) > 1$), the concentration of the surcharge load distribution and the maximum changes of the reinforcement slope occur during the increase of the tensile force in a part of the reinforcement next to the beam. For embankments with low height ($H/(s-a) < 1$), during the increase of tensile force in the reinforcement, the maximum changes of the slope of the reinforcement and the concentration of load distribution occur at the position of the center of the reinforcement (Figure 3).

In the case where the concentration of tensile force is higher in the part of the reinforcement near the pile (high soil), with constant tensile strength, the reinforcement will be able to reduce the average strain, decrease the settlement (Figure 4) and increase in the slope of the deformation curve next to the pile (Figure 5) will transfer more load (B) directly to the pile.

4- Conclusions

By increasing the height of the embankment by 4 times, the reinforcement can transfer higher load up to 3.7 times to the piles with a fixed settlement. While by tripling the number of reinforcing strands, for a fixed settlement of the reinforcement, it can increase the maximum load transferred to the piles by 1.78 times.

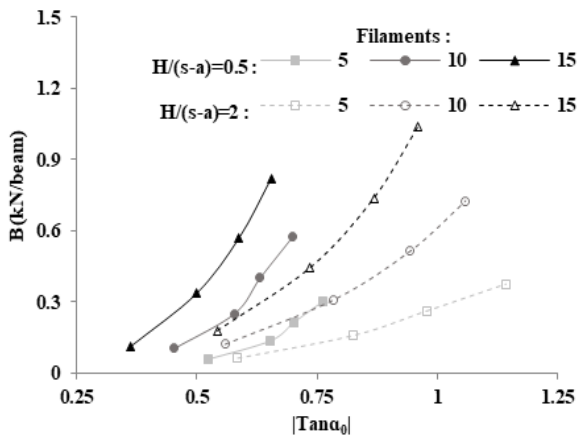


Fig. 5. The effect of embankment height ratio and the number of reinforcement filaments on the reinforcement slope at the edge of the pile

References

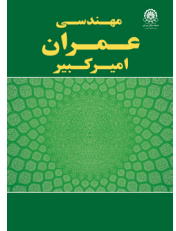
- [1] S.J.M. van Eekelen, J. Han, Geosynthetic-reinforced pile-supported embankments: state of the art, *Geosynthetics International*, 27(2) (2020) 112-141.
- [2] S.J.M. van Eekelen and M.H. Brugman, Eds, *Design guideline basal reinforced piled embankments*, (2016).
- [3] M. Fakhrian Nejad, S.H. Lajevardi, 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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

HOW TO CITE THIS ARTICLE

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) 7-10.

DOI: 10.22060/ceej.2024.21779.7823





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 ایکلن^۱، آرش نبیری^۱

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

تاریخچه داوری:

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

کلمات کلیدی:

خاکریز متکی بر شمع
مسلح کننده
ارتفاع خاکریز
توزیع بار
قوس زدگی

خلاصه: یکی از روش‌های بهسازی خاک نرم 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 قوس زدگی 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، محاسبات تحلیلی انجام می‌شود. دستگاه آزمایش به گونه‌ای طراحی و ساخته شده است که امکان اندازه‌گیری جداگانه مقادیر A و B فراهم شود. بررسی‌ها روی متغیرهای ارتفاع خاکریز و تعداد رشته‌های مسلح کننده نشان دادند که 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 حداکثر 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 حداکثر ۱/۷۸ برابر بار منتقل شده به شمع‌ها را افزایش دهد.

۱- مقدمه

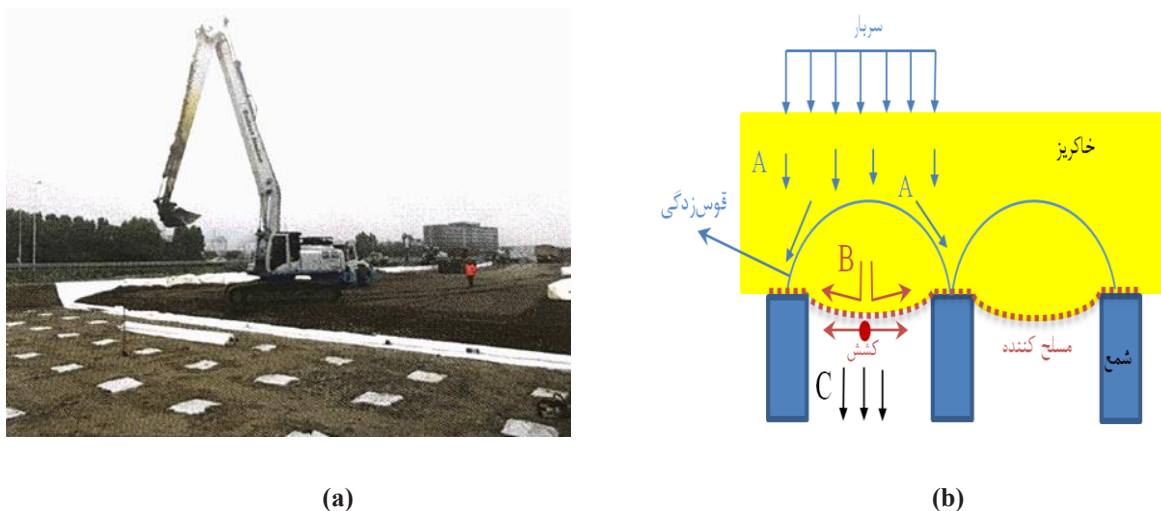
یکی از راهکارهای بهبود خاک نرم، استفاده از یک مسلح کننده ژئوسینتیکی و خاکریز متکی به شمع است [۱]. این سیستم از شمع‌ها با چیدمان مناسب، سپس قرار دادن مسلح کننده روی شمع‌ها و خاکریزی روی مسلح کننده اجرا می‌شود (شکل ۱-a) که هدف کاهش سربار وارده به خاک نرم بستر توسط انتقال بخش بزرگی از سربار و وزن خاکریز به شمع‌ها است. انتقال بار به سمت شمع‌ها به دلیل تشکیل پدیده قوس زدگی، افزایش می‌یابد. پدیده قوس زدگی وقتی اتفاق می‌افتد که اختلاف نشست در خاکریز رخ دهد. در مسلح کننده ژئوسینتیکی و خاکریز متکی بر شمع، وقتی قوس زدگی اتفاق می‌افتد که ژئوسینتیک در محدوده بین شمع‌ها تغییر شکل دهد؛ به دلیل تشکیل پدیده قوس زدگی بخش بزرگی از بار، به طور مستقیم به طرف شمع‌ها منتقل می‌شود. این بخش، بار A نامیده می‌شود [۲]. سهم

بار باقی مانده روی مسلح کننده ژئوسینتیکی بین شمع‌ها توزیع می‌شود. بخشی از این بار باقی مانده، توسط کشش مسلح کننده به سمت شمع‌ها منتقل می‌شود. این بخش بار B نامیده 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 آندکتر نرم است که می‌توان از سهم بار بخش C صرفه نظر کرد (شکل ۱-b). قوس زدگی، 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 [۳، ۴]. عوامل مختلفی بر تشکیل قوس زدگی 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

Soil arching 1

* نویسنده عهده دار مکاتبات: Sh.lajvardi@iau.ac.ir



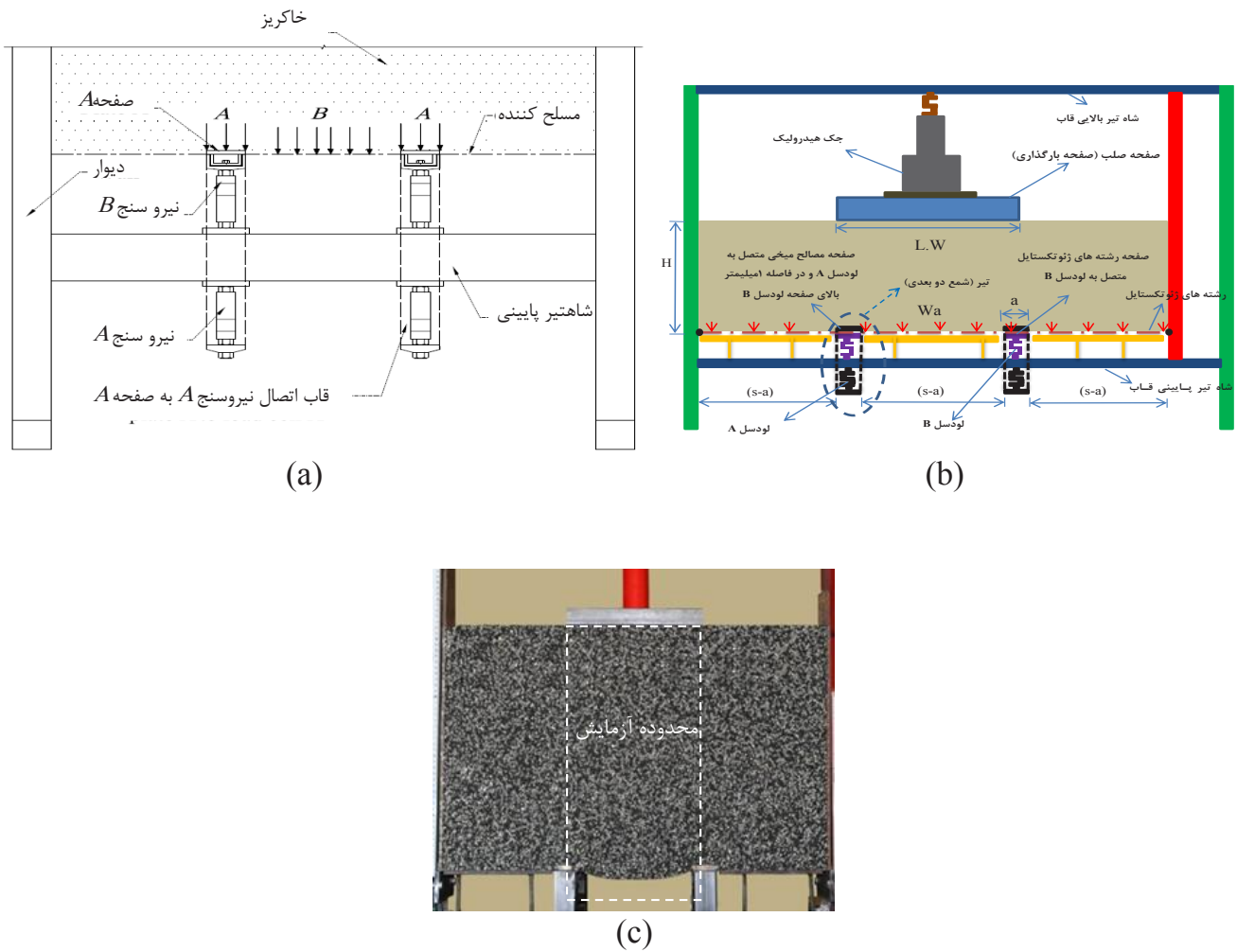


شکل ۱. خاکریز متکی بر شمع (a) نمونه پروژه در حال اجرا از خاکریز متکی بر شمع (b) توزیع سربار و وزن خاکریز، A: مستقیم به سمت شمع ها (قوس زدگی)، B: به روی خاک

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

است [۱۹، ۲۰]. مدل سازی دوبعدی آزمایشگاهی با خاکریز تشکیل شده از میله های فلزی، یک بار همراه مسلح کننده و یک بار هم بدون مسلح کننده آشکار کرد که مسلح کننده بر توزیع بار روی شمع ها موثر است [۲۱]. با توجه به موارد ذکر شده، یکی از ویژگی های این پژوهش آن است که دستگاه آزمایش ها به گونه ای طراحی شده که برای اندازه گیری جداگانه دو قسمت بار (A و B) که تاثیر قوس زدگی را توصیف می کند، مناسب است. قسمت اول، بار A است که به طور مستقیم توسط قوس به شمع ها منتقل می شود؛ قسمت دوم، بار B که از طریق مسلح کننده ژئوسینتیکی به شمع ها منتقل می شود. فرصتی که اندازه گیری جداگانه این دو قسمت بار به وجود می آورد، آزمایش ها را برای انجام اندازه گیری هایی مناسب می سازد که می توانند جهت توسعه یا اعتبارسنجی مدل های تحلیلی که تاثیر قوس زدگی را توصیف می کنند، استفاده شوند؛ مانند مدل های پیشنهادی آقای زاتسک [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 می دهد که به بررسی رفتار مسلح کننده، تحت تاثیر ارتفاع خاکریز و تعداد رشته های مسلح کننده ژئوسینتیکی تمرکز دارند.

داخلی انتقال بار توسط قوس زدگی را افزایش می دهد [۵-۷]. پژوهش های صورت گرفته بر مبنای مدل سازی عددی و آزمایشگاهی سه بعدی، نشان دادند که افزایش سختی مسلح کننده، سهم بار منتقل شده به شمع (A+B) را افزایش می دهد [۸]. همچنین انتقال بار روی شمع ها به هندسه 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 می شود) وابسته است. وجود مسلح کننده با سختی مناسب، تمرکز بار روی شمع را افزایش می دهد و به همان مقدار از بار روی خاک نرم بین دو شمع (بار بخش C) کم می شود [۲، ۸-۱۵]. مدل سازی های عددی نشان دادند که مسلح کننده باعث افزایش انتقال بار به شمع و پایدار ماندن قوس در خاکریز می شود [۱۵-۱۷]. پژوهش های انجام شده با مدل آزمایشگاهی گریز از مرکز نشان دادند که کاهش فاصله شمع ها ($s-a$) باعث کاهش نشست سطحی خاکریز و افزایش سهم بار منتقل شده ناشی از قوس خاکی می شود [۱۸]. با استفاده از مدلی دوبعدی با خاکریزهای تشکیل شده از میله های فلزی و همچنین با خاکریز سه بعدی و بررسی توزیع وزن خاکریز بین شمع ها و روی فوم نرم که در میان آن ها قرار داشت نشان داده شد که توزیع بار روی شمع و مسلح کننده به نسبت ارتفاع خاکریز ($H/(s-a)$) و بعد شمع ها ($a/(s-a)$) وابسته



شکل ۲. دستگاه آزمایش (a) محل قرارگیری نیروسنج‌ها (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

همراه دارد.

اجزای اصلی دستگاه، مطابق شکل ۲، شاه‌تیرهای بالایی و پایینی هستند که ثابت‌اند و به دیواره 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 می‌کند 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

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 جداگانه بار بخش A و B است. این ویژگی، آزمایش‌های انجام گرفته توسط این دستگاه را از مشابه آنچه که جینک (۲۰۰۵) [۲۰] و روی‌روی (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 حداکثر ۴۰۰ mm را به



شکل ۳. آزمون زاویه قرار^۱ میله‌های فلزی

Fig. 3. Analogical soil in a repose angle test

^۱ Repose angle

حدود ۲۸ درجه در آزمایشگاه بدست آمد (شکل ۳). وزن مخصوص خاکریز میخی دوبعدی تقریباً سه برابر یک ماسه 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

مسلح‌کننده مورد استفاده از رشته‌های یک نوع ژئوتکستایل بافته شده می‌باشد^۳. 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 مجموعه ۵ و ۱۰ و ۱۵ رشته‌ای را می‌سازند (شکل ۴).

شکل ۵ رفتار کششی یک رشته از مسلح‌کننده با عرض ۱ mm که با سرعت $3/77 \text{ m/sec}$ (کرنش $0/17$ درصد بر ثانیه) تحت کشش قرار گرفت را نشان می‌دهد. از این نمودار می‌توان مشاهده کرد که سختی کششی تک رشته در 2% کرنش، $0/74 \text{ (kN/m)}$ می‌باشد ($0/74 = 0/02 \div 0/148$).

می‌گیرند و بار رسیده از طریق قوس‌زدگی را اندازه‌گیری می‌کند. سه عدد صفحه‌صلب^۱ در فاصله آزاد بین دو شمع مجاور، همچنین شمع‌ها از دیواره، در زیر رشته‌های مسلح‌کننده قرار دارد تا در زمان ریختن مصالح خاکریز و قبل از انجام اندازه‌گیری‌ها، مسلح‌کننده 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.

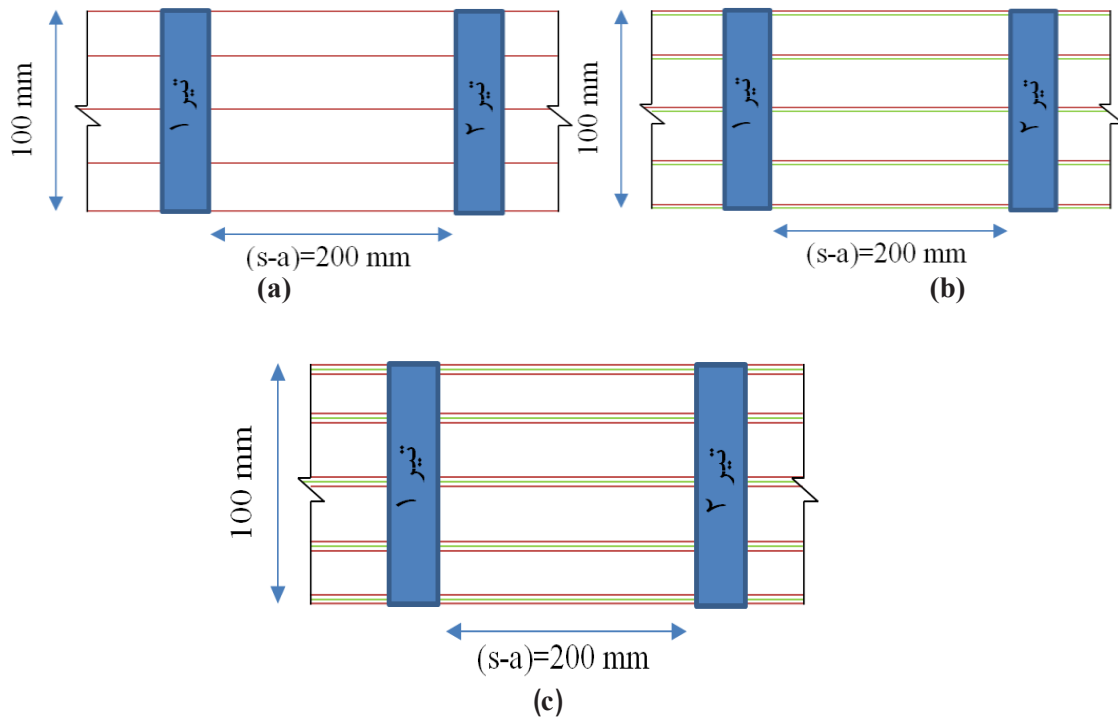
۲-۲- مصالح خاکریز دوبعدی^۲

به منظور مطالعه دوبعدی از سه نوع میله فلزی به عنوان مصالح خاکریزی استفاده شده است. میله‌های فلزی دارای سطح مقطع دایره‌ای شکل، به قطر $1/5 \text{ mm}$ ، $2/5 \text{ mm}$ ، 4 mm 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

1 Trapdoor

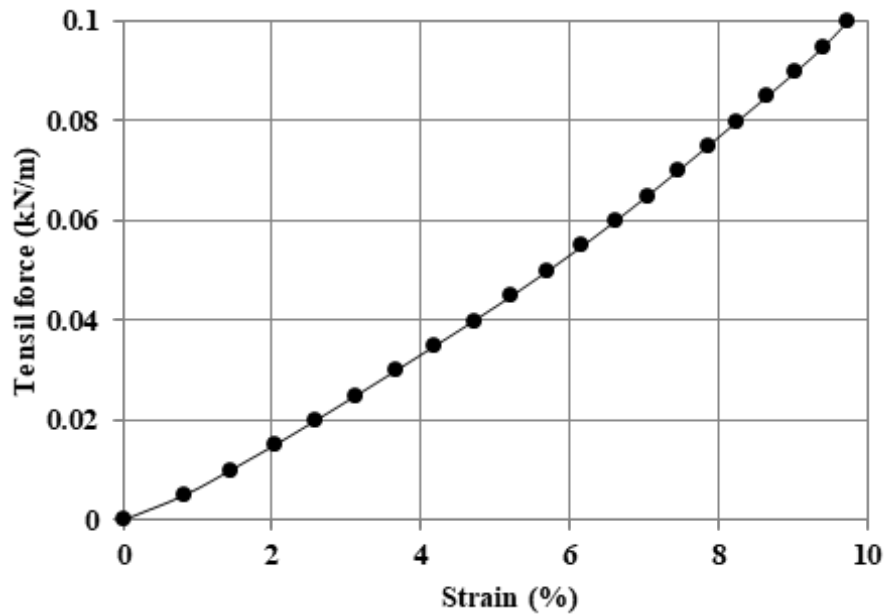
2 Analogical soil

3 Tencate Geolon, 100/100 kN/m



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

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 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 ($X-Z$)

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.

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

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 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 (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).

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

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

۲-۴- 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 قبل از شروع آزمایش باعث ایجاد کشش در رشته‌های ژئوتکستایل و نشست در آن نشود. سپس تا ارتفاع H خاکریزی انجام می‌شود (شکل ۶-a).

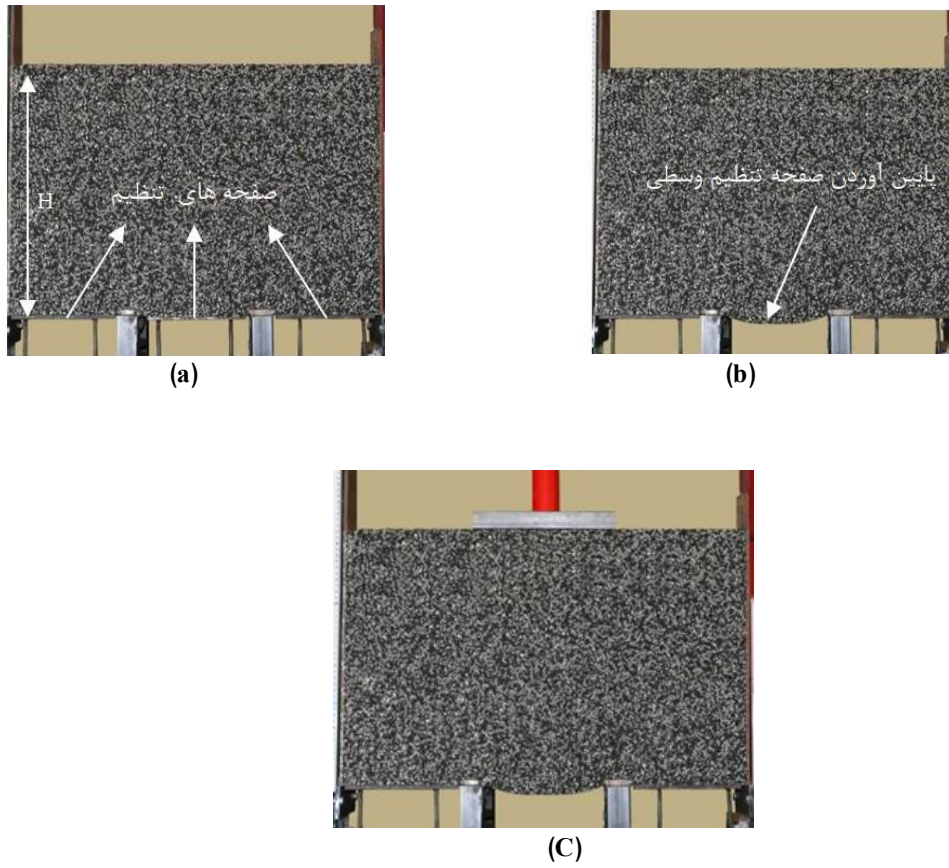
(۳) در این مرحله صفحه تنظیم وسطی را پایین آورده و به خاکریز بین دو تیر اجازه داده می‌شود تا تحت اثر وزن خود نشست کنند (شکل ۶-b).

(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 ۶-c).

۲-۵- اندازه‌گیری‌ها

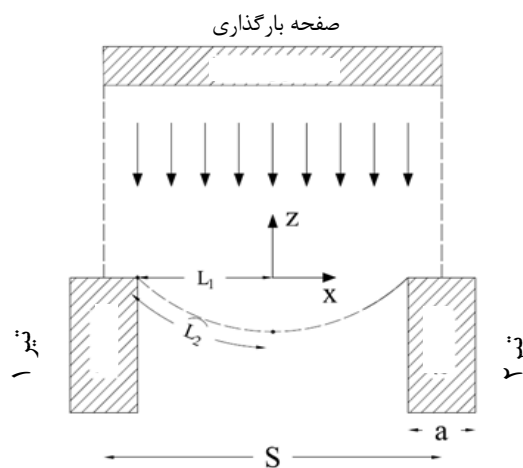
۲-۵-۱- اندازه‌گیری توزیع بار بخش A و B

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+وزن خاکریز) که در تراز مسلح‌کننده به تیرها منتقل می‌شوند ($W_{a,r}$) از میانگین بار اندازه‌گیری شده توسط چهار نیروسنج ($A+B$)



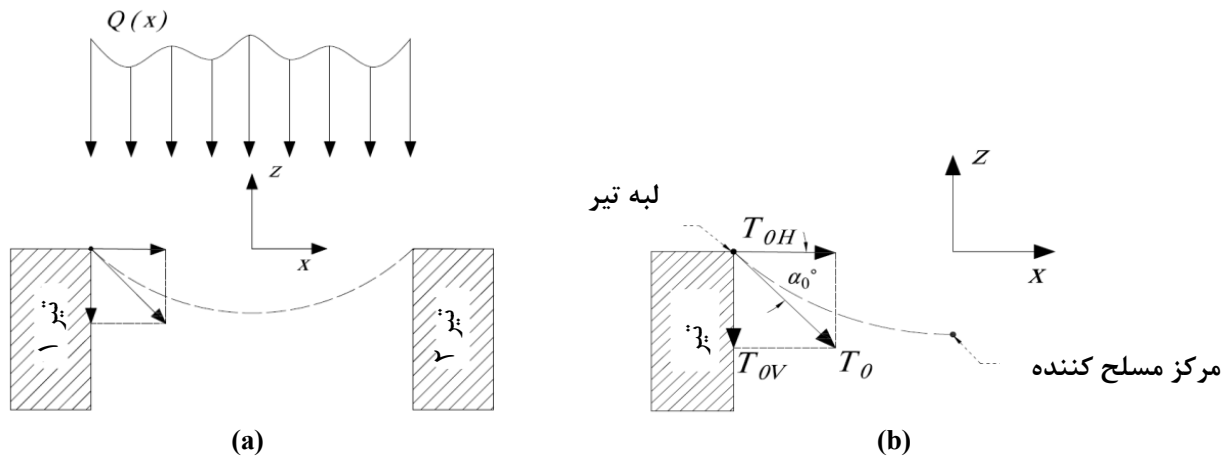
شکل ۶. مراحل آماده سازی برای شروع آزمایش (a) قرار دادن صفحه های تنظیم برای جلوگیری از نشست مسلح کننده قبل از شروع آزمایش (b) پایین آوردن صفحه تنظیم میانی (c) قرار گرفتن صفحه صلب، اعمال سربار و شروع آزمایش

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. تغییر شکل مسلح کننده ی ژئوسینتیکی 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 مسلح کننده بین دو تیر (a) موقعیت تیرها نسبت به دستگاه مختصات (b) موقعیت مرکز و کنار مسلح کننده 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)

که در آن کرنش قسمت i ام مسلح کننده است.

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

که در آن میانگین نیروی کششی در طول مسلح کننده، T_i نیروی کششی در قسمت i ام مسلح کننده است.

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

که در آن J_i سختی مسلح کننده متناظر با کشش T_i در مسلح کننده است.

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

مسلح کننده قبل از تغییر شکل، L_r نصف طول ثانویه مسلح کننده بعد تغییر شکل می باشد.

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.

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

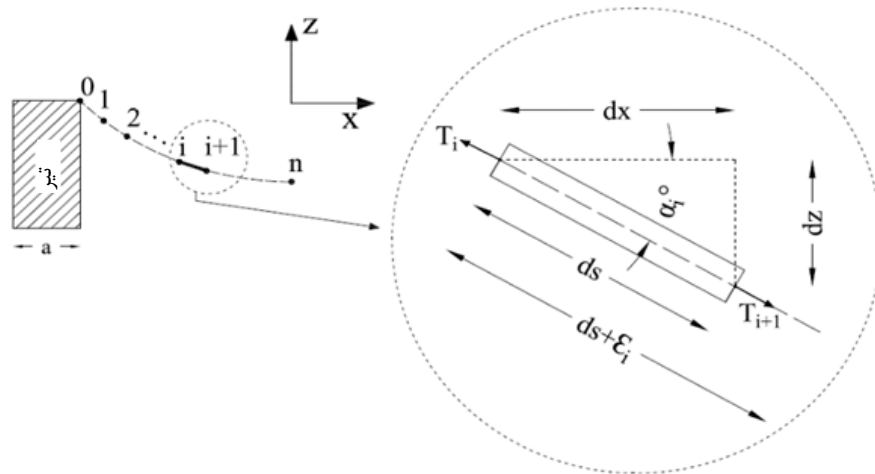
که در آن d^2z/dx^2 تغییر شیب نمودار تغییر شکل مسلح کننده، $Q(x)$

توزیع بار روی مسلح کننده می باشد، 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:

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



شکل ۹. جزئیات تغییر شکل مسلح کننده

Fig. 9. Details of filament deflection

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

با توجه به معادلات تحلیلی فوق می‌توان توزیع بار روی مسلح کننده و توزیع کشش و کرنش در مسلح کننده را با توجه به تغییر شکل آن ترسیم نمود. لازم به ذکر است که سه نوع توزیع بار شناخته شده روی مسلح کننده عبارت است از توزیع بار مثلثی، توزیع بار مثلث وارون 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

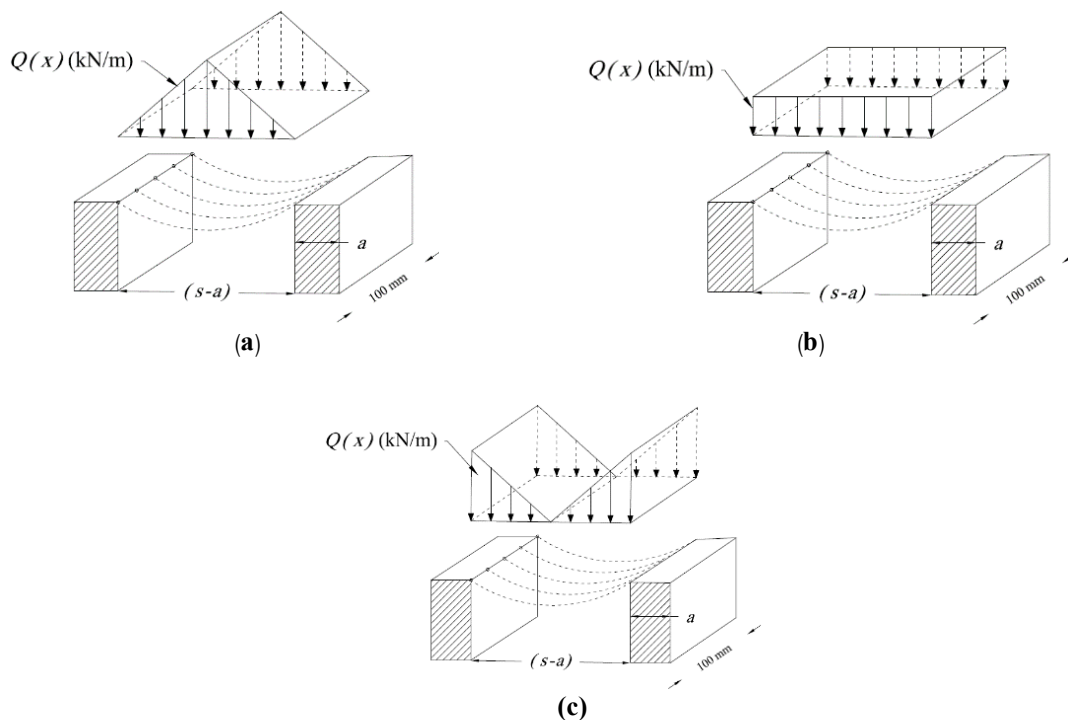
که در آن T_{vi} و dz/dx به ترتیب مؤلفه قائم نیروی کششی و شیب قسمت i ام مسلح کننده است.

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

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

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

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



شکل ۱۰. سه نوع توزیع بار روی مسلح کننده (a) توزیع بار مثلثی (b) توزیع بار یکنواخت (بر اساس BS۸۰۰۶) (c) مثلث وارون (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 (suggested by Van Eekelen 2012) [19]

با مشخص بودن T_H ، با توجه به اینکه نیروی گسیختگی مسلح کننده در هر نقطه از مجذور 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 حاصلضرب 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 برای نسبت ارتفاع‌های مختلف

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 ۲-۵-۲ و ۲-۵-۲ 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) T_{max} می‌باشد، اندازه‌گیری می‌شود. آن آزمایش‌هایی که B بدست آمده از نیروسنج‌ها با B بدست آمده از معادله ۱۰ و تغییر شکل 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

جدول ۲. مشخصات آزمایش‌ها

Table 2. Specification of the tests

شماره آزمایش	تعداد رشته‌های 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

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 T_0/T_{max} ، مقدار 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 ۰/۵ در حین افزایش T_0/T_{max} از ۰/۲۵ تا ۱، از ۶۳ تا ۵ میلی‌متر است ($\Delta=58R_b$ mm). کمترین تغییرات R_b برای $H/\lambda = 2$ از ۹۵ تا ۶۵ میلی‌متر کاهش خواهد یافت ($\Delta=30R_b$ mm). شکل b-۱۲ نشان می‌دهد، مقادیر R_a/R_b برای خاکریزهای با $H/(s-a)$ برابر ۲ و ۱/۵ هنگام افزایش مقدار T_0/T_{max} افزایش می‌یابد و قوس‌ها شکل بیضی خود را در حین آزمایش حفظ می‌کنند.

به طوری که حداقل و حداکثر مقدار R_a/R_b برای مرتفع‌ترین خاکریز ($H/(s-a) = 2$)، به ترتیب برابر ۲ و ۲/۲۷ و برای نسبت ارتفاع ۱/۵، به

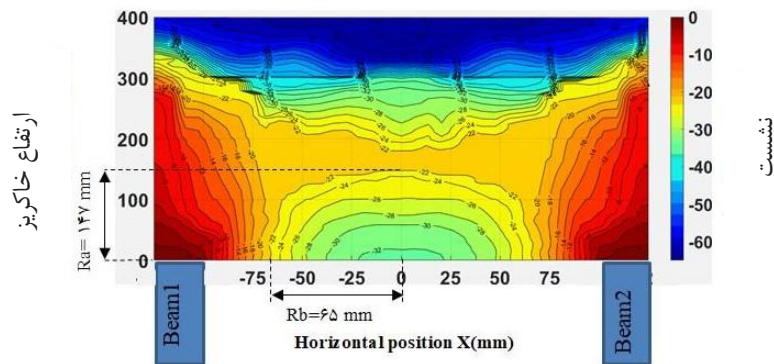
خاکریزی، به بررسی اثر ارتفاع خاکریز و تعداد رشته‌ها بر رفتار مسلح‌کننده در خاکریز متکی بر شمع پرداخته می‌شود (جدول ۲). این کار با استفاده از تکنیک سرعت‌سنجی ذرات تصویر (PIV) و بررسی تغییر شکل مسلح‌کننده بین دو تیر در حین افزایش بار تا لحظه گسیختگی مسلح‌کننده انجام می‌شود. در تمامی آزمایش‌ها مقادیر فاصله 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^۱، به صورت یک تابع با ضریب تعیین^۲ (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

- 1 Linear interpolation or cubic interpolation
- 2 Coefficient of determination



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

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

می‌یابد. در $H/(s-a) = 0.5$ با افزایش T_0/T_{max} از 0.25 به 1 مقدار R_a/R_b برای مسلح کننده 5 و 15 رشته‌ای، به ترتیب حدود 11 و 53 درصد کاهش می‌یابد.

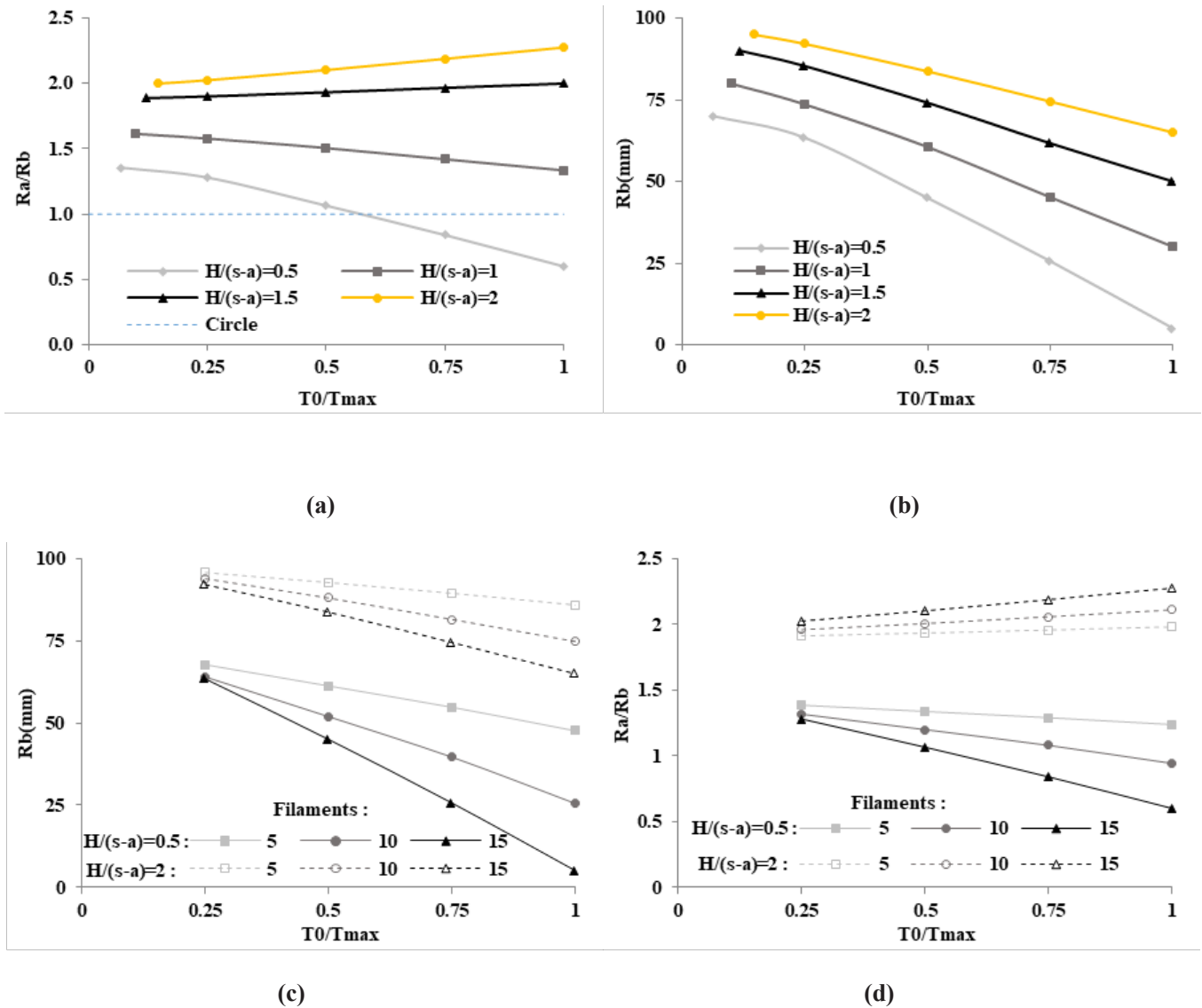
بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در خاگریزهای مرتفع علاوه بر اینکه شعاع قوس‌های متحدالمرکز در حین آزمایش کاهش کمتری خواهند داشت بلکه قوس‌ها به صورت بیضی‌های ایستاده با شعاع بزرگ در راستای محور Z و شعاع کوچک در راستای محور X خواهند بود و با افزایش بارگذاری در خاگریزهای مرتفع قوس‌ها می‌توانند شکل خود را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

۴-۲- تغییرات شیب نمودار تغییر شکل مسلح کننده

در شکل ۱۳ نمودار تغییر شکل مسلح کننده و تغییرات شیب مربوط به آن در طول مسلح کننده برای T_0/T_{max} برابر 0.5 و 1 (در حالتی که 50 درصد و 100 درصد ظرفیت کششی مسلح کننده فعال شود) نشان داده می‌شود. حداکثر تغییرات شیب مسلح کننده برای 1 و $H/(s-a) = 0.5$ در محل مرکز مسلح کننده ($X=0$ mm) اتفاق می‌افتد. که برای $H/(s-a) = 0.5$ حداکثر مقدار تغییر شیب $((d^2z/dx^2)_{max})$ در 1 و $T_0/T_{max} = 0.5$ ، به ترتیب از چپ به راست 0.123 و 0.089 اندازه‌گیری شدند. با افزایش 50 درصدی نسبت ارتفاع از 0.5 به 1 مشاهده می‌شود (شکل ۱۳-c,d) که مقدار حداکثر تغییر شیب در مرکز مسلح کننده کاهش و مقدار حداقل تغییرات شیب در کنار تیر ($X=100$ mm) افزایش می‌یابد. برای $H/(s-a)=1$ مقدار حداکثر تغییر

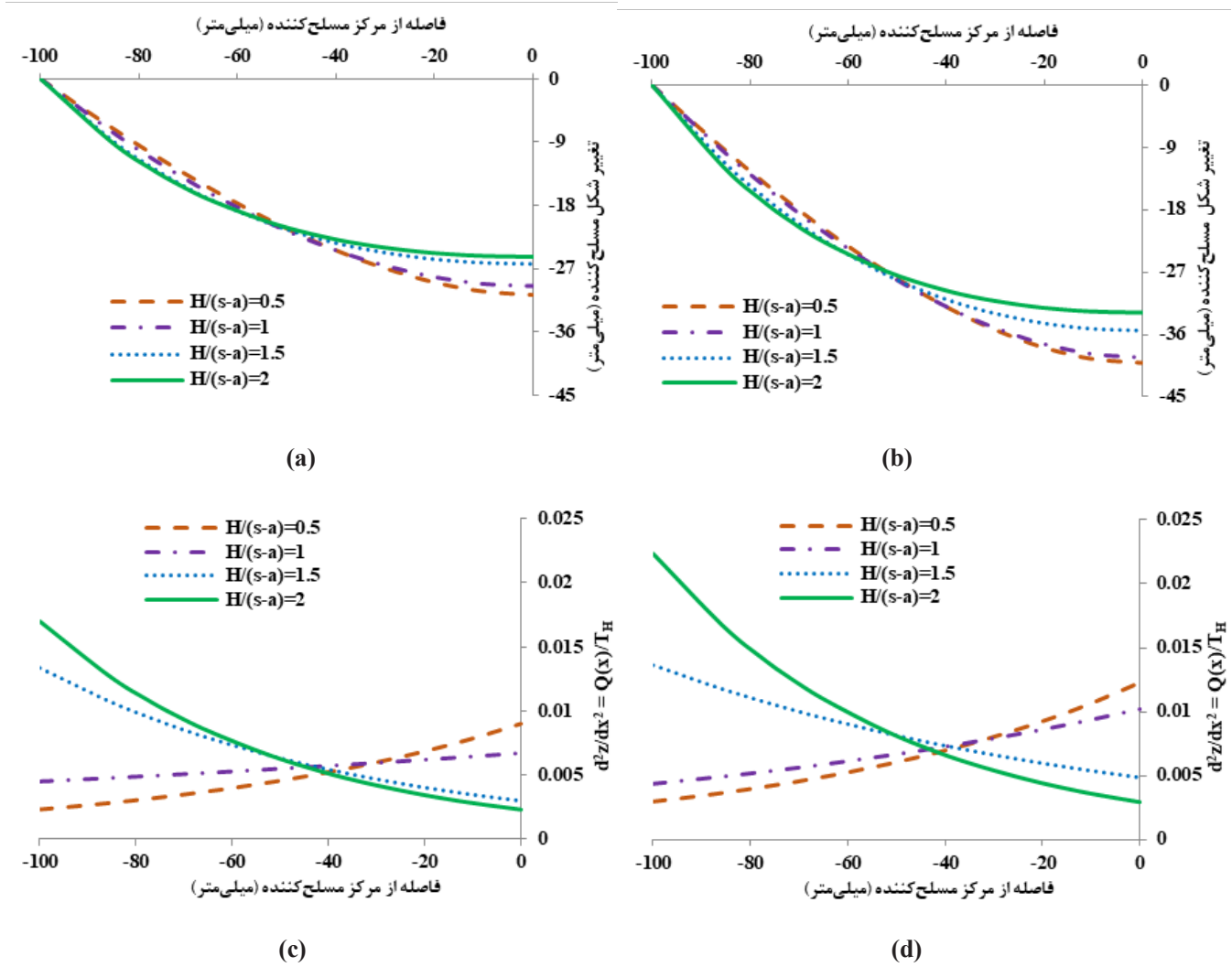
ترتیب $1/8$ و $1/99$ اندازه‌گیری شد (برای این دو ارتفاع، خاگریزی رشد R_a/R_b را در حین آزمایش نشان می‌دهد)؛ در حالی که با کاهش ارتفاع خاگریز مقدار R_a/R_b با افزایش مقدار T_0/T_{max} نزولی خواهد بود و قوس‌ها تمایل دارند به نیم‌دایره نزدیک شوند. مقدار حداقل و حداکثر نسبت R_a/R_b در 1 $H/(s-a) = 0.5$ به ترتیب $1/33$ و $1/61$ و در $H/(s-a) = 0.5$ به ترتیب $1/35$ و $1/6$ اندازه‌گیری شدند (که در هر دو نسبت ارتفاع، R_a/R_b روند نزولی را از خود نشان می‌دهد).

شکل ۱۲-c نشان می‌دهد، در حین نزدیک شدن مسلح کننده 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 مسلح کننده 5 و 15 رشته‌ای با افزایش T_0/T_{max} از 0.25 تا 1 مقدار R_b ، به ترتیب حدود 9 و 29 درصد کاهش می‌یابد. این کاهش در مقدار R_b برای $H/(s-a) = 0.5$ تشدید خواهد شد، به طوری که برای مسلح کننده 5 و 15 رشته‌ای با افزایش T_0/T_{max} از 0.25 به 1 مقدار R_b ، به ترتیب 12 و 92 درصد کاهش می‌یابد. شکل ۱۲-d نشان می‌دهد که افزایش رشته‌های مسلح کننده برای خاگریزهای با ارتفاع بالا نسبت به خاگریزهای با ارتفاع پایین، تأثیر متفاوتی روی R_a/R_b دارند. برای خاگریزهای مرتفع، افزایش تعداد رشته‌های مسلح کننده سبب می‌شود که در حین آزمایش و افزایش T_0/T_{max} ، مقدار R_a/R_b افزایش یابد. برای $H/(s-a) = 2$ با افزایش T_0/T_{max} از 0.25 به 1 مقدار R_a/R_b برای مسلح کننده 5 و 15 رشته‌ای، به ترتیب حدود 1 و $13/5$ درصد افزایش



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

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)

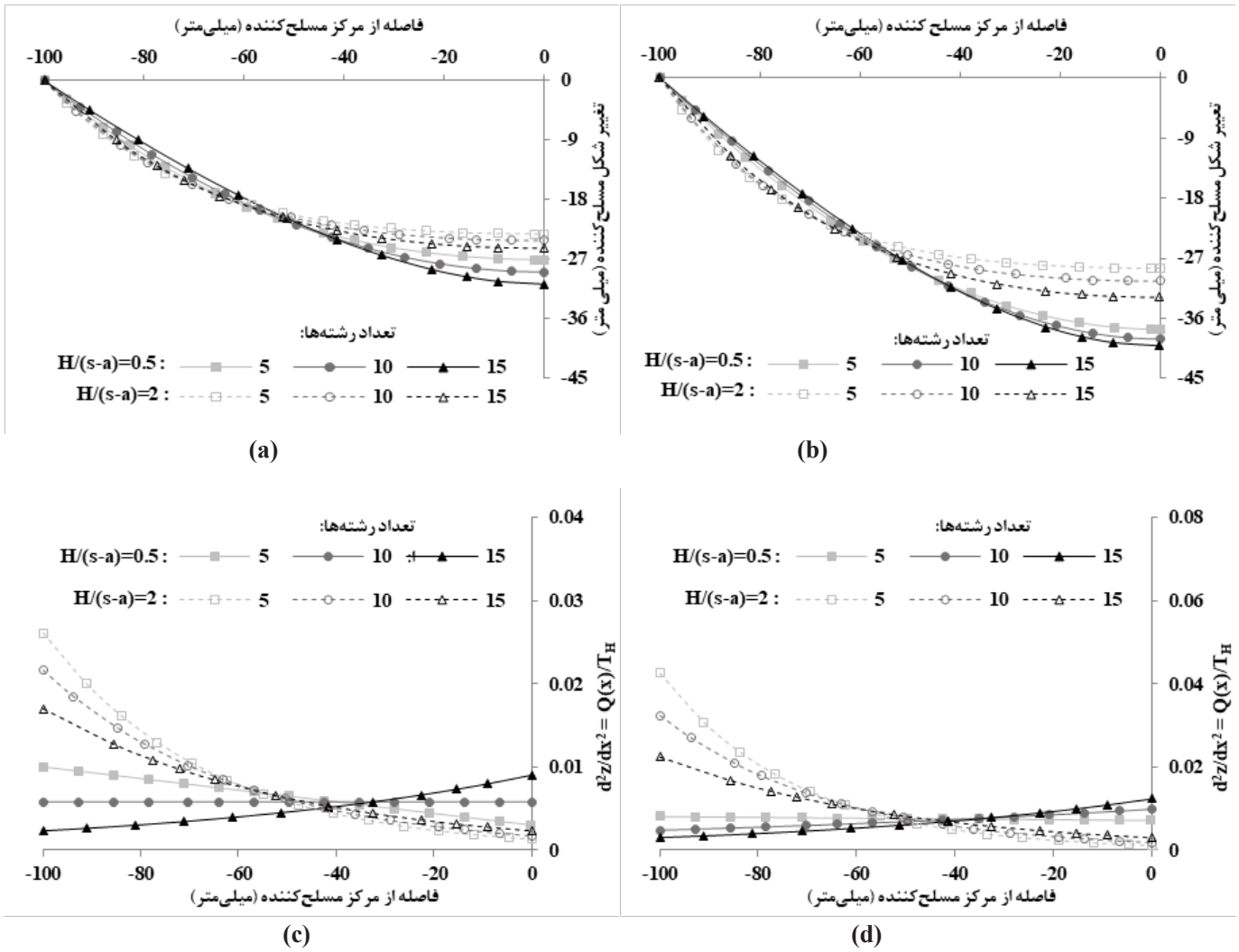


شکل ۱۳. تأثیر نسبت ارتفاع خاکریزی بر تغییر شکل و تغییر شیب مسلح کننده ۱۵ رشته ای (الف) تغییر شکل در $T_0/T_{max}=0.5$ (ب) تغییر شکل در $T_0/T_{max}=1$ (ج) تغییر شیب در $T_0/T_{max}=0.5$ (د) تغییر شیب در $T_0/T_{max}=1$ (آزمایش‌های ۱ تا ۴)

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

افزایش یافته و برای $H/(s-a) = 2$ در 1 و 0.5 T_0/T_{max} ، به ترتیب از چپ به راست 0.22 و 0.169 اندازه‌گیری شدند. حداکثر تغییر شیب مسلح کننده در حالتی که در کنار تیر اتفاق می‌افتد، در مقایسه با حالتی که در مرکز اتفاق می‌افتد، بیشتر خواهد بود. مقدار حداکثر تغییر شیب مسلح کننده برای نسبت ارتفاع 0.5 در مقایسه با 2 در حالتی که 100 درصد ظرفیت کششی مسلح کننده فعال شود ($T_0/T_{max} = 1$) حدود 79 درصد رشد دارد

شیب در 1 و 0.5 T_0/T_{max} ، به ترتیب از چپ به راست 0.1 و 0.067 اندازه‌گیری شدند. در خاکریزهای مرتفع ($H/(s-a) > 1$)، حداکثر تغییرات شیب مسلح کننده به سمت کنار تیر منتقل می‌شود، به طوری که برای $H/(s-a) = 1.5$ ، مقدار حداکثر تغییر شیب در 1 و 0.5 T_0/T_{max} ، به ترتیب از چپ به راست 0.136 و 0.133 اندازه‌گیری شدند. با افزایش $H/(s-a)$ از 1.5 به 2 ، حداکثر مقدار تغییر شیب در کنار تیر



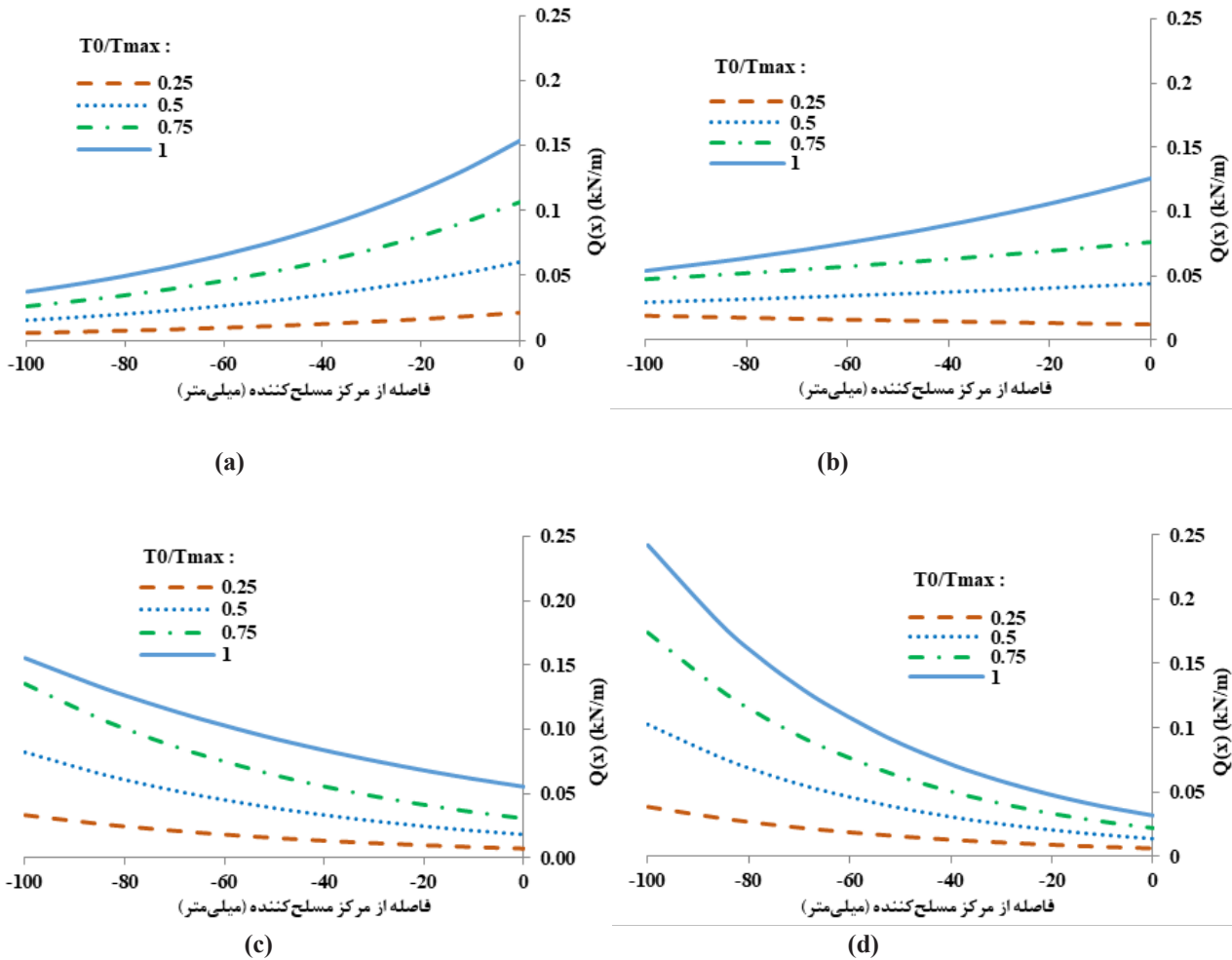
شکل ۱۴. تأثیر نسبت ارتفاع خاکریزی و تعداد رشته‌های مسلح کننده بر تغییر شکل و تغییر شیب مسلح کننده (الف) تغییر شکل در $T_0/T_{max}=0.5$ (ب) تغییر شکل در $T_0/T_{max}=1$ (ج) تغییر شیب در $T_0/T_{max}=0.5$ (د) تغییر شیب در $T_0/T_{max}=1$ (آزمایش‌های ۱ تا ۸)

Fig. 14. Effect of embankment height ratio and number of reinforcement filaments on deflection and slope variation (a) deflection at $T_0/T_{max}=0.5$ (b) deflection at $T_0/T_{max}=1$ (c) slope variation at $T_0/T_{max}=0.5$ (d) slope variation at $T_0/T_{max}=1$ (Tests 1 and 4 - 8)

($H/(s-a) = 0.5$) که حداکثر تغییر شیب مسلح کننده در مرکز اتفاق می‌افتد، افزایش تعداد رشته‌های مسلح کننده باعث افزایش حداکثر تغییرات شیب مسلح کننده در موقعیت مرکز خواهد شد. در $H/(s-a) = 0.5$ برای مسلح کننده ۵، ۱۰ و ۱۵ رشته‌ای، حداکثر تغییرات شیب در مرکز مسلح کننده در لحظه نزدیک به گسیختگی ($T_0/T_{max} = 1$)، به ترتیب برابر 0.0071 ، 0.0097 و 0.012 اندازه‌گیری شدند (شکل d-۱۴). افزایش ۶۹ درصدی

(از 0.0071 به 0.012 افزایش می‌یابد). با افزایش مقدار نیروی کششی در مسلح کننده، در یک نسبت ارتفاع ثابت، بدون تغییر در موقعیت حداکثر تغییر شیب، مقدار آن افزایش می‌یابد.

شکل ۱۴ نشان می‌دهد که افزایش تعداد رشته‌های مسلح کننده در خاکریزهای با ارتفاع بیشتر نسبت به خاکریزهای با ارتفاع پایین‌تر، تأثیر متفاوتی روی تغییرات شیب مسلح کننده دارد. برای خاکریز با ارتفاع کم

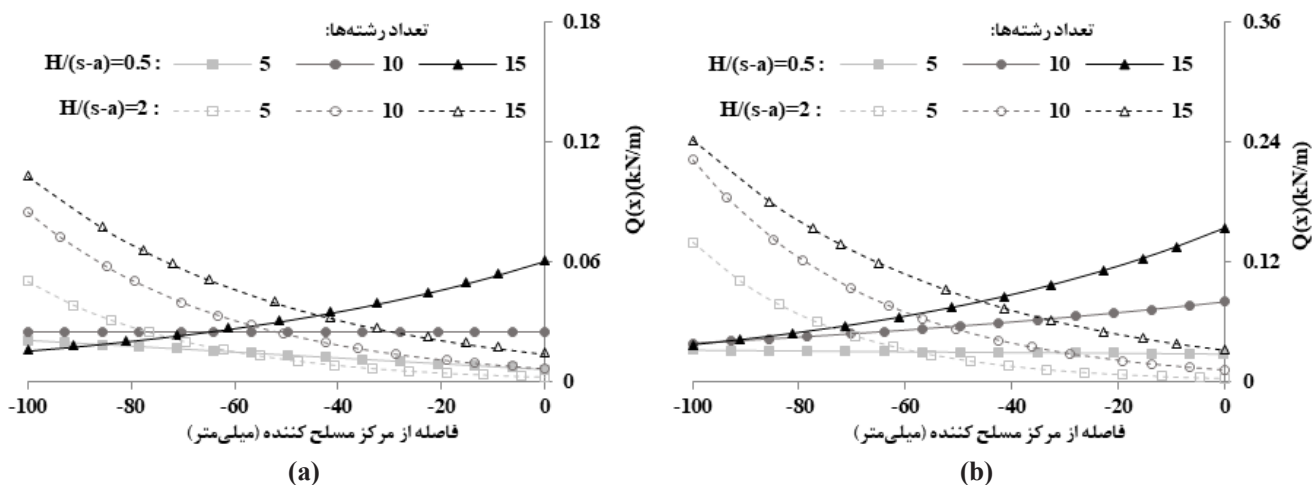


شکل ۱۵. توزیع بار روی مسلح کننده در حین افزایش نیروی کششی در مسلح کننده ۱۵ رشته‌ای
(a) $H/(s-a) = 0.5$ (b) $H/(s-a) = 1$ (c) $H/(s-a) = 1.5$ (d) $H/(s-a) = 2$
(آزمایش‌های ۱-۴)

Fig. 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)

۳-۴- توزیع بار روی مسلح کننده
شکل c,d- 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 می‌رسد.
مقدار حداکثر $Q(x)$ در موقعیت کنار تیر برای ۱، ۰/۷۵، ۰/۵، ۰/۲۵، T_0/T_{max} در مرتفع‌ترین خاکریز $H/(s-a) = 2$ ، به ترتیب از چپ به راست ۰/۲۴، ۰/۱۷، ۰/۱، ۰/۳۸ (kN/m) است. کاهش ارتفاع خاکریز ($H/(s-a) < 1$) تمرکز توزیع بار را از کنار تیر به سمت موقعیت مرکز (بین

در حداکثر شیب مسلح کننده در موقعیت مرکز را با سه برابر شدن تعداد رشته‌های مسلح کننده نشان می‌دهد. برای خاکریز های مرتفع ($H/(s-a) = 2$) که حداکثر تغییر شیب مسلح کننده در کنار تیر اتفاق می‌افتد، افزایش تعداد رشته‌ها باعث کاهش حداکثر تغییرات شیب مسلح کننده خواهد شد. برای $H/(s-a) = 2$ در مسلح کننده ۵، ۱۰ و ۱۵ رشته‌ای حداکثر تغییرات شیب مسلح کننده در لحظه نزدیک به گسیختگی به ترتیب ۰/۴۲، ۰/۳۲ و ۰/۲۲ اندازه‌گیری شدند. کاهش ۴۸ درصدی در حداکثر تغییر شیب مسلح کننده در موقعیت کنار تیر را با سه برابر شدن تعداد رشته‌های مسلح کننده نشان می‌دهد.



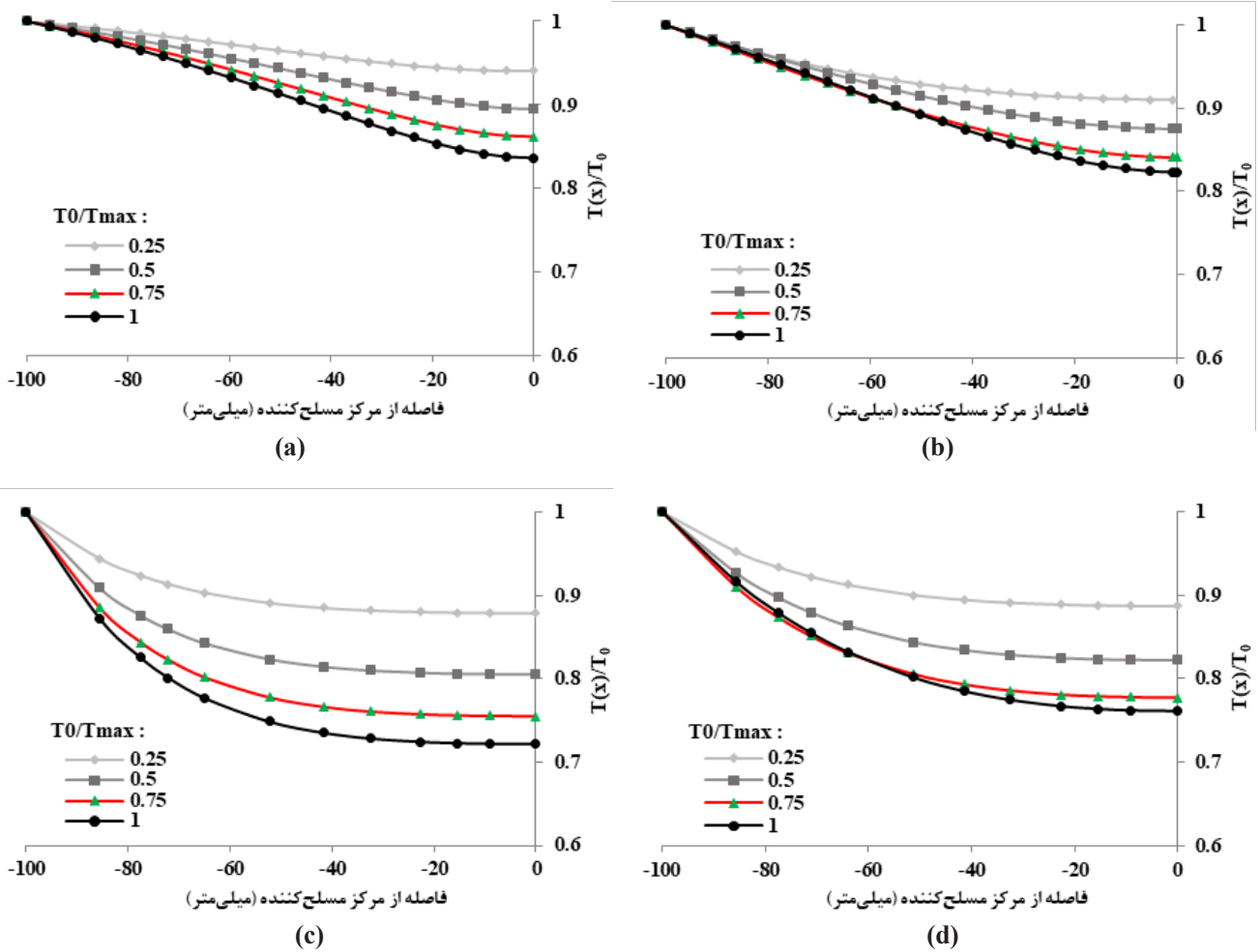
شکل ۱۶. تأثیر تعداد رشته‌های مسلح‌کننده و نسبت ارتفاع خاکریز بر توزیع بار روی مسلح‌کننده (a) $T_0/T_{max}=0.5$ (b) $T_0/T_{max}=1$ (آزمایش‌های ۱ و ۴ - ۸)

Fig. 16. The effect of the number of filaments of reinforcement and embankment height ratio on the load distribution on the reinforcement (a) $T_0/T_{max}=0.5$ (b) $T_0/T_{max}=1$ (Tests 1 and 4 - 8)

شباهت بیشتری به حالت الگوی توزیع بار یکنواخت دراد و برای مسلح‌کننده ۱۵ رشته‌ای $Q(x)$ ، شباهت بیشتری به الگوی توزیع بار مثلی در لحظه نزدیک به گسیختگی مسلح‌کننده دارد. برای خاکریزهای مرتفع $H/(s-a)=2$ ، 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 ($H/(s-a) = 0.5$)، حداکثر مقدار $Q(x)$ در ۱۰، ۱۵ و ۲۰ رشته‌ای به ترتیب برابر 0.028 ، 0.08 و 0.15 (kN/m) اندازه‌گیری شدند. سه برابر شدن تعداد رشته‌ها حدود $5/3$ برابر حداکثر مقدار $Q(x)$ را افزایش داد. در خاکریز با ارتفاع زیاد ($H/(s-a) = 2$)، مقدار حداکثر $Q(x)$ در $T_0/T_{max} = 1$ برای مسلح‌کننده ۵، ۱۰ و ۱۵ به ترتیب 0.14 ، 0.22 و 0.24 (kN/m) اندازه‌گیری شدند که نشان می‌دهد با سه برابر شدن تعداد رشته‌ها حدود $1/72$ برابر حداکثر مقدار $Q(x)$ افزایش یافت (شکل ۱۶-b).

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 ۱۵-a,d). برای کمترین ارتفاع خاکریز $H/(s-a) = 0.5$ ، مقدار حداکثر $Q(x)$ در موقعیت مرکز (بیشترین فاصله از کنار تیرها)، با افزایش نیروی کششی در مسلح‌کننده برای ۱، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ T_0/T_{max} به ترتیب از چپ به راست 0.021 ، 0.06 ، 0.1 ، 0.15 (kN/m) است (شکل ۱۵-a). 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 ($T_0/T_{max} = 1$) حداکثر $Q(x)$ برای $H/(s-a) = 0.5$ در مقایسه با ۲ از 0.15 به 0.24 (kN/m) (حدود ۶۰ درصد) افزایش می‌یابد (شکل ۱۵-a,d). شکل ۱۶ نشان می‌دهد افزایش تعداد رشته‌های 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.

برای مسلح‌کننده ۵ رشته‌ای در $H/(s-a) = 0.5$ ، نمودار $Q(x)$



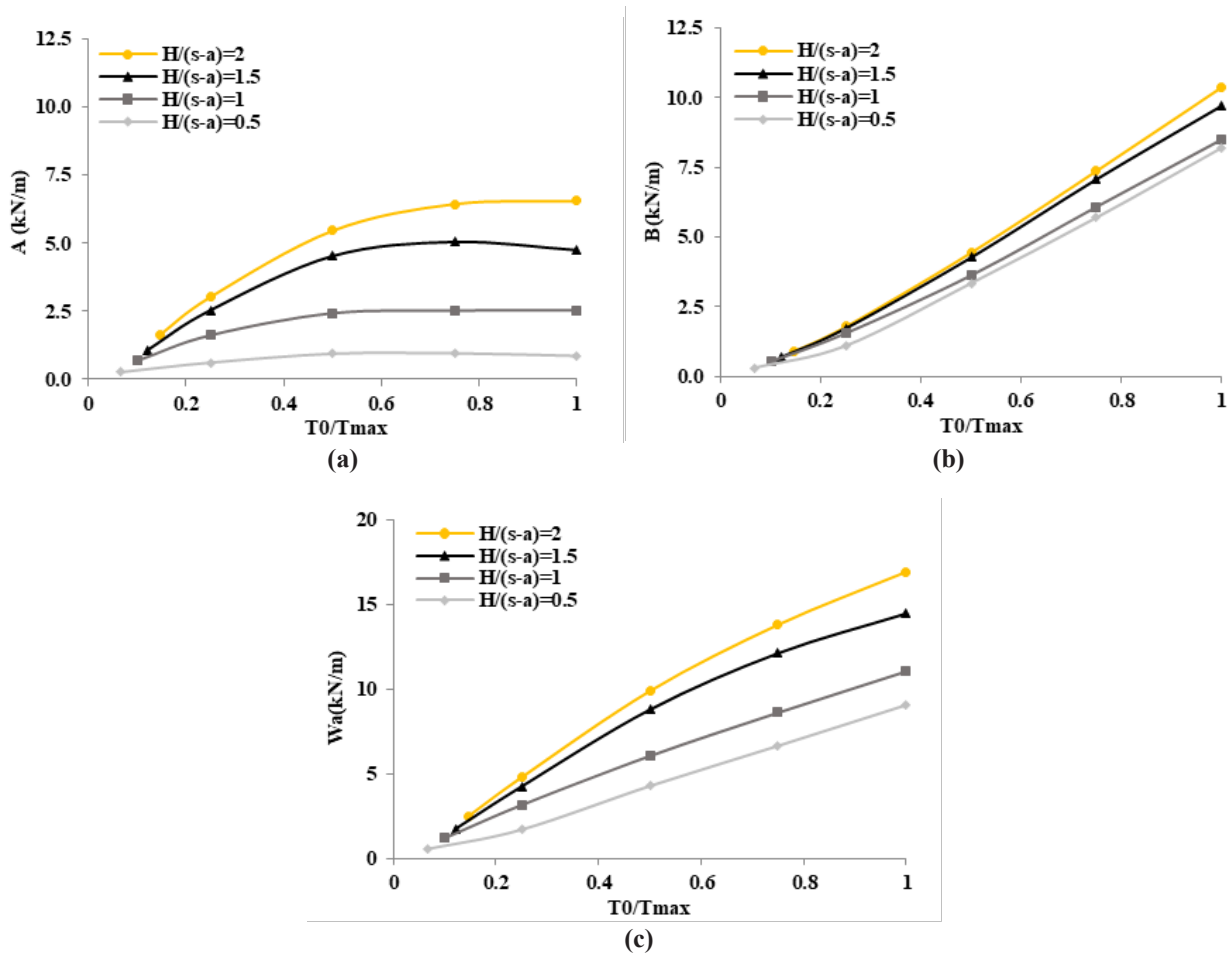
شکل ۱۷. توزیع نیروی کششی در طول مسلح کننده در حین افزایش نیروی کششی در مسلح کننده ۱۵ رشته‌ای
 a) $H/(s-a) = 0.5$ b) $H/(s-a) = 1$ c) $H/(s-a) = 1.5$ d) $H/(s-a) = 2$
 (آزمایش‌های ۱ - ۴)

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)

خاکریزی سبب می‌شود که توزیع نیروی کششی در طول مسلح کننده به گونه‌ای باشد که در موقعیت مرکز نسبت به کنار تیر، نیروی کششی در مسلح کننده کاهش بیشتری را تجربه کند. در تمامی آزمایش‌ها در حین افزایش نیروی کششی در مسلح کننده (T_0/T_{max}) ، تمرکز توزیع نیروی کششی برای قسمتی از مسلح کننده نزدیک به تیر، افزایش می‌یابد. در خاکریز با ارتفاع کم $(H/(s-a) = 0.5)$ 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 مسلح کننده اتفاق

۴-۴- توزیع نیروی کششی در طول مسلح کننده

شکل ۱۷ نشان می‌دهد که بیشینه نیروی کششی در مسلح کننده در نزدیکی تیر اتفاق می‌افتد $(T(x)/T_0 = 1)$. با حرکت در مسلح کننده از کنار تیر به سمت موقعیت مرکز، نیروی کششی در مسلح کننده کاهش می‌یابد $(T(x)/T_0 > 1)$. بیشترین مقدار کاهش نیروی کششی در مسلح کننده، در مرکز مسلح کننده اتفاق می‌افتد. برای تعداد ثابتی از رشته‌های مسلح کننده، هر چقدر تمرکز توزیع بار در نزدیکی تیر افزایش یابد (بخش ۳-۴)، نیروی کششی کاهش بیشتری را در طول مسلح کننده تجربه می‌کند. افزایش ارتفاع

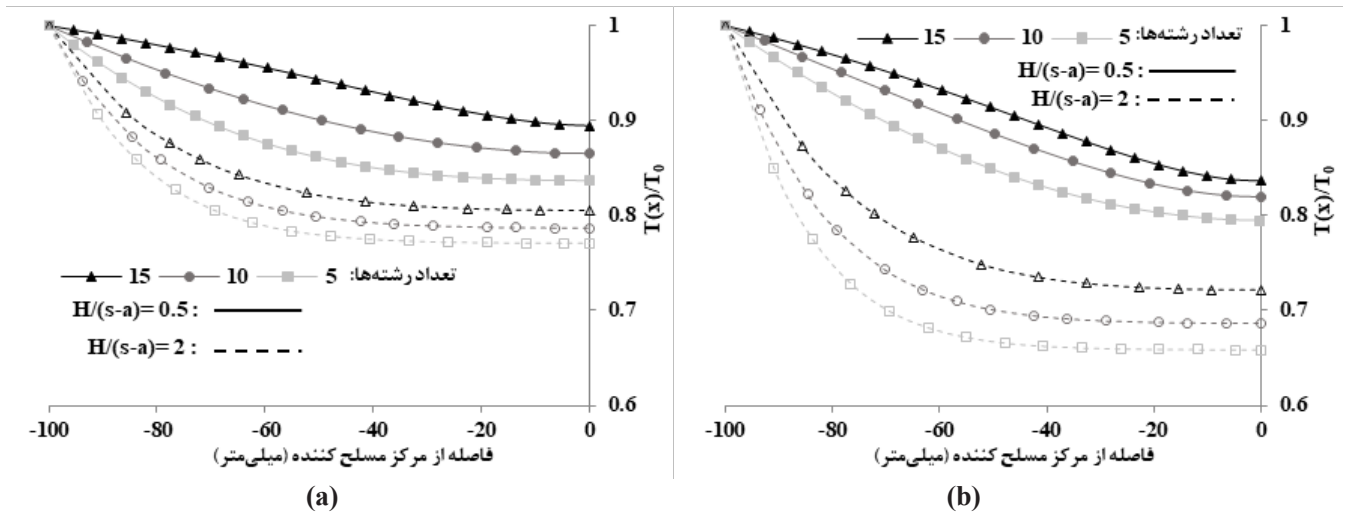


شکل ۱۸. تأثیر نسبت ارتفاع خاکریزی بر A، B و Wa در حین افزایش نیروی کششی در مسلح‌کننده ۱۵ رشته‌ای (a) تغییرات A (b) تغییرات B (c) تغییرات Wa (آزمایش‌های ۱ - ۴)

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 طوری که هر چقدر ارتفاع خاکریزی بیشتر باشد، این شیب بیشتر خواهد بود؛ اما مرحله بعدی از ۵۰ 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 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 $T_0/T_{max} = 1$ برای

می‌افتد، به ترتیب از چپ به راست ۰/۸۳، ۰/۸۶، ۰/۸۹، ۰/۹۴ می‌باشد (شکل ۱۷-a)؛ در حالی که در خاکریز مرتفع‌تر ($H/(s-a) = 2$)، برای ۱، ۰/۷۵، ۰/۲۵، ۰/۵ 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 می‌باشد (شکل ۱۷-d). 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 ($T_0/T_{max} = 0.5$) با یک شیب صعودی اتفاق



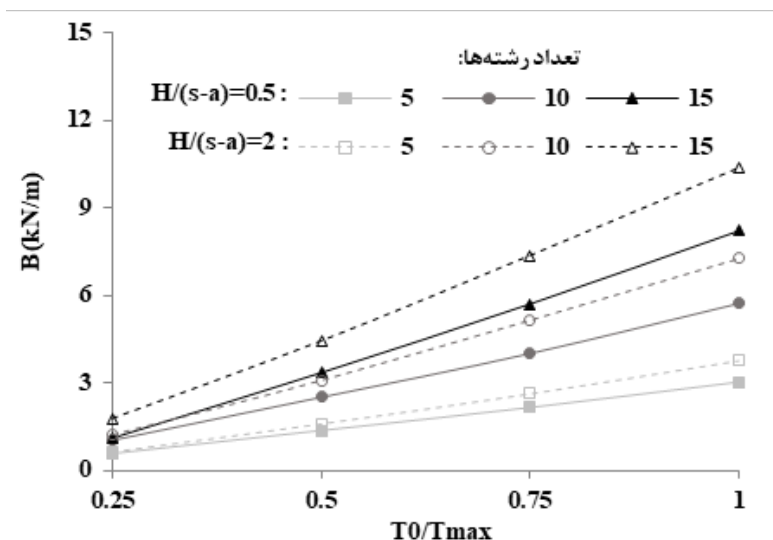
شکل ۱۹. تأثیر تعداد رشته‌های مسلح‌کننده و نسبت ارتفاع خاکریزی بر توزیع نیروی کششی در طول مسلح‌کننده (a) $T_0/T_{max}=0.5$ ، (b) $T_0/T_{max}=1$ (آزمایش‌های ۱ و ۴ - ۸)

Fig. 19. The effect of the number of reinforcement filaments and embankment height ratio on the tensile force distribution along the reinforcement (a) $T_0/T_{max}=0.5$, (b) $T_0/T_{max}=1$ (Tests 1 and 4 - 8)

یکنواخت‌تر باشد و $T(x)/T_0$ در موقعیت مرکز به ۱ 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 حالتی که حداکثر ظرفیت کششی مسلح‌کننده فعال شود (مقدار ظرفیت کششی مسلح‌کننده (T_{max}) ، برای مسلح‌کننده ۵ و ۱۵ رشته‌ای با توجه به جدول ۱ به ترتیب ۵ و $15(kN/m)$ است)، برای کمترین ارتفاع خاکریز و بیشترین تعداد رشته مسلح‌کننده (آزمایش ۱)، در مقایسه با بیشترین ارتفاع خاکریزی و کمترین تعداد رشته‌های مسلح‌کننده (آزمایش ۸)، مقدار $T(x)/T_0$ در موقعیت مرکز مسلح‌کننده کاهش بیشتری را تجربه می‌کند. حدود ۲۰ درصد کاهش از 0.83 به 0.66 کاهش می‌یابد (شکل ۱۹-b). که نشانه 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 $T_0/T_{max} = 0.5$ و $H/(s-a) = 0.5$ مقدار بار منتقل شده توسط مسلح‌کننده (B) با افزایش تعداد رشته‌ها از ۵ به ۱۵،

$2, 1/5, 1, 0.5$ ، $H/(s-a) = 0.5$ به ترتیب از چپ به راست $3/10, 9/10, 8/5$ (kN/m) است (افزایش ۲۶ درصدی ظرفیت مسلح‌کننده ۱۵ رشته‌ای با ۴ برابر شدن ارتفاع خاکریزی). 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 $2, 1/5, 1, 0.5$ ($H/(s-a) = 0.5$) به ترتیب از چپ به راست $9/9, 8/8, 6$ (kN/m) است (مقدار W_a با ۴ برابر شدن ارتفاع خاکریزی $5/2$ برابر شد). با فعال شدن درصد بیشتری از ظرفیت کششی مسلح‌کننده (به دلیل ثابت ماندن رشد A برای $T_0/T_{max} < 0.5$)، تأثیر ارتفاع خاکریز در انتقال W_a به تیر کاهش می‌یابد. مقدار W_a در $T_0/T_{max} = 1$ برای $2, 1/5, 1, 0.5$ ، $H/(s-a) = 0.5$ به ترتیب از چپ به راست $71, 14/5, 11$ (kN/m) می‌باشد (مقدار W_a با ۴ 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)



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)

توزیع کرنش را در نزدیکی تیر افزایش می‌دهد.

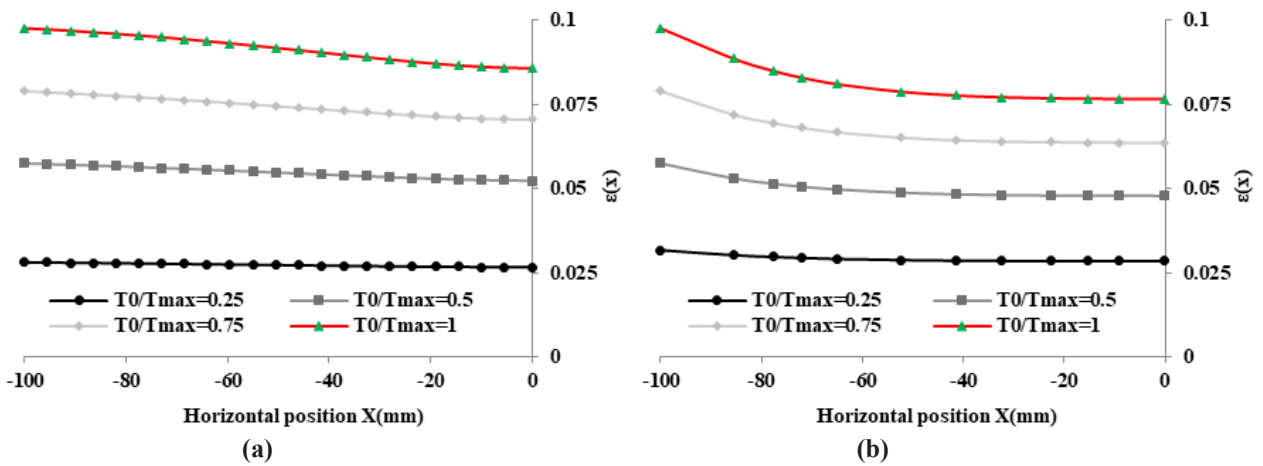
شکل ۲۲ نشان می‌دهد که کاهش ارتفاع خاکریزی و افزایش تعداد رشته‌های مسلح‌کننده در لحظه نزدیک به گسیختگی مسلح‌کننده، علاوه بر افزایش مقدار کرنش در طول مسلح‌کننده، توزیع کرنش در طول مسلح‌کننده را نیز یکنواخت‌تر می‌کند و بیشترین تمرکز کرنش در نزدیکی تیر (توزیع غیر یکنواخت‌تر کرنش)، برای خاکریزهای مرتفع‌تر 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 به ۴۰ (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 رشته‌های 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.

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

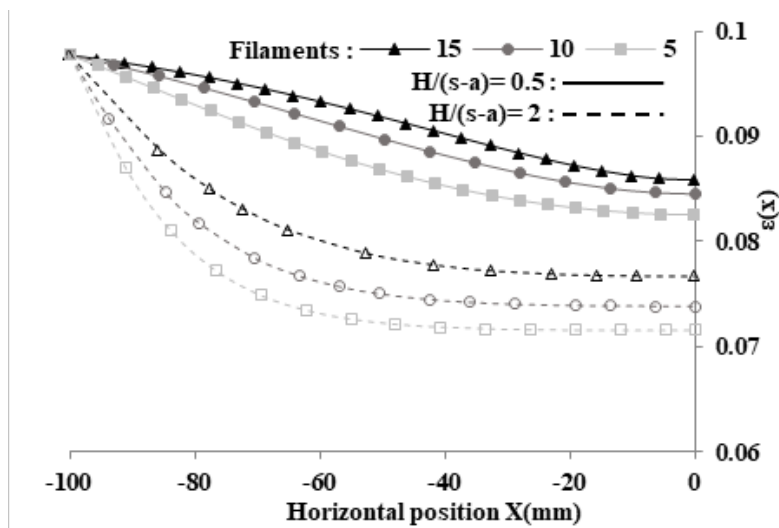
۴-۵- توزیع کرنش در طول مسلح‌کننده

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، تغییرات 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 $H/(s-a)=2$ مقدار $\varepsilon(x)$ در $T_0/T_{max}=0.25$ از ۰/۳۱ در مسلح‌کننده کنار تیر به ۰/۲۸ در مرکز مسلح‌کننده کاهش می‌یابد ($\Delta\varepsilon(x)=10\%$). اما در $T_0/T_{max}=1$ مقدارش از ۰/۹۷ در قسمتی از مسلح‌کننده کنار تیر به ۰/۷۶ در مرکز مسلح‌کننده کاهش می‌یابد ($\Delta\varepsilon(x)=22\%$). کمترین مقدار $\varepsilon(x)$ در مرکز مسلح‌کننده برای $T_0/T_{max}=1$ و $H/(s-a)=0.5$ ، به ترتیب از چپ به راست ۰/۰۷۶، ۰/۰۸۶ می‌باشد که نشان می‌دهد افزایش ارتفاع خاکریزی، تمرکز



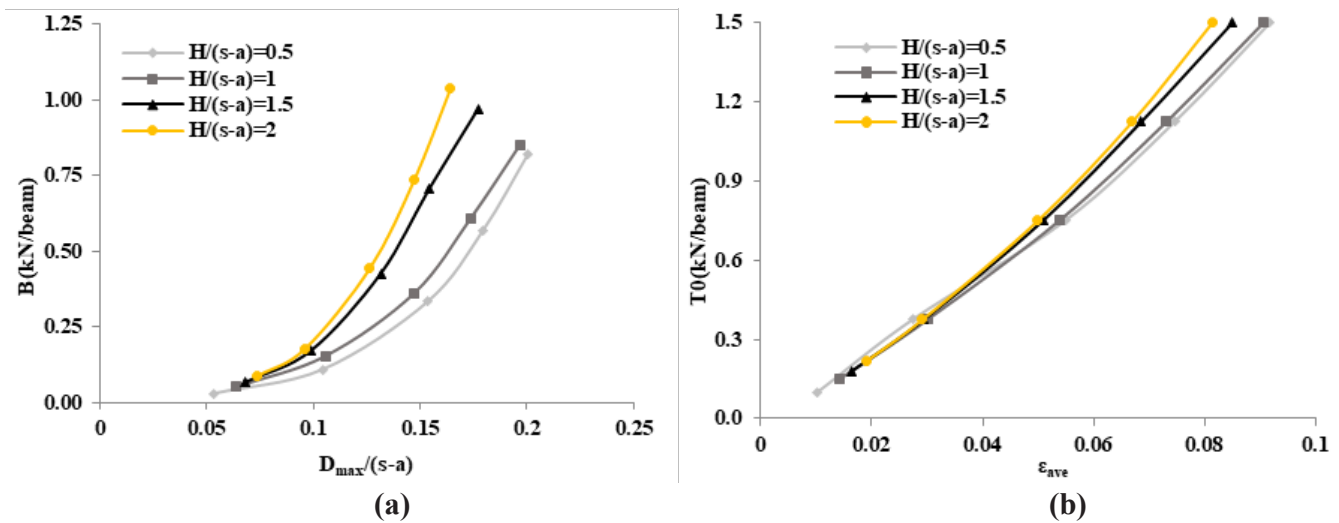
شکل ۲۱. توزیع کرنش در طول مسلح‌کننده در حین افزایش نیروی کششی در مسلح‌کننده ۱۵ رشته‌ای
 (a) $H/(s-a) = 0.5$ (b) $H/(s-a) = 2$
 (آزمایش‌های ۱ - ۴)

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 لحظه نزدیک به گسیختگی مسلح‌کننده ($T_0/T_{max}=1$), (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 ($T_0/T_{max}=1$), (Tests 1 and 4 - 8)



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 ماکزیم مسلح کننده (b) تغییرات T_0 و کرنش متوسط مسلح کننده (آزمایش‌های ۱-۴)

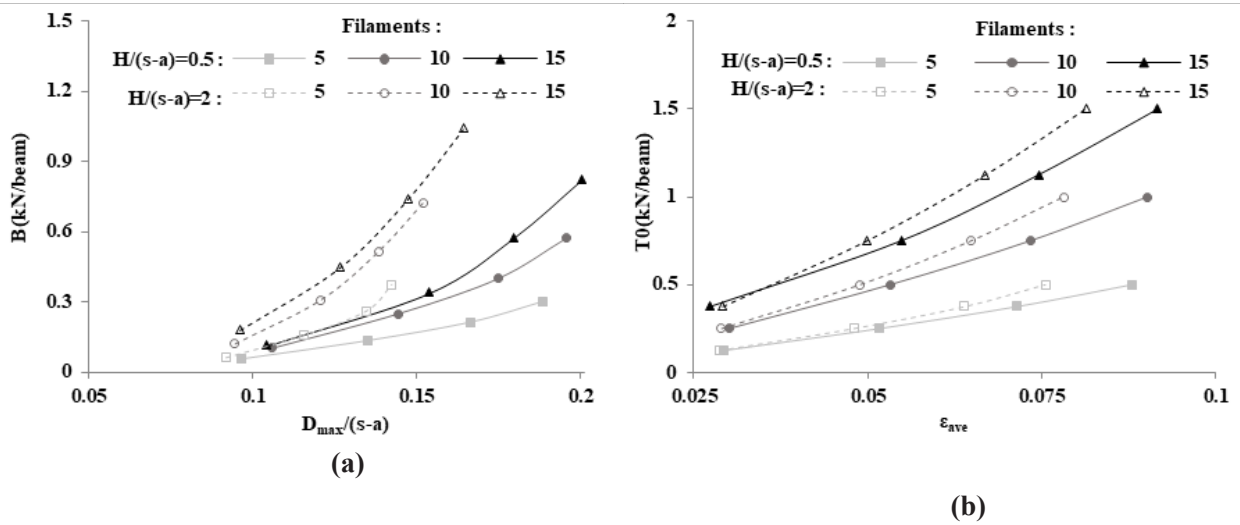
Fig. 23. The effect of embankment height ratio on ϵ_{ave} and $D_{max}/(s-a)$ during the test up to the moment just before rupture of the 15- filament reinforcement (a) Graph B - $D_{max}/(s-a)$ (b) Graph T_0 - ϵ_{ave} (Tests 1 - 4)

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 مسلح کننده، ظرفیت مسلح کننده را برای انتقال بار به تیر (B_{max}) افزایش می‌دهد. برای ۲، $H/(s-a) = 0.5$ 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 $H/(s-a) = 0.5$ برای یک مقدار ثابت $D_{max}/(s-a) = 0.125$ مقدار B، برای مسلح کننده ۵، ۱۰ و ۱۵ رشته‌ای، به ترتیب (kN/m) ۱/۶۸، ۲/۷۶ و ۳/۱۴ است (۷۸ درصد افزایش). شکل b-۲۴ نشان می‌دهد که هر دو عامل افزایش ارتفاع خاکریزی و افزایش تعداد رشته‌های مسلح کننده، باعث افزایش سختی در مسلح کننده می‌شوند. با سه برابر شدن تعداد رشته‌ها از ۵ به ۱۵ در $H/(s-a) = 2$ برای $\epsilon_{ave} = 0.075$ مقدار T_0 متناسب با افزایش تعداد رشته‌ها سه برابر خواهد شد. مقدار T_0 در $\epsilon_{ave} = 0.075$ با چهار برابر شدن نسبت ارتفاع خاکریزی، حدود ۱۷/۵ درصد افزایش می‌یابد.

که این عدم توزیع یکنواخت نیروی کششی (تجمع نیروی کششی در مجاورت تیر) و به دنبال آن تجمع کرنش ($\epsilon(x)$) 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 a-۲۳).

شکل ۲۳ نشان می‌دهد مقدار حداکثر ϵ_{ave} و $D_{max}/(s-a)$ که مسلح کننده در لحظه 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 لحظه نزدیک به گسیختگی مسلح کننده، به ترتیب از چپ به راست ۰/۰۸۱، ۰/۰۸۵، ۰/۰۹، ۰/۰۹۲ است (۱۲ درصد کاهش در مقدار کرنش متوسط مسلح کننده در لحظه 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 لحظه نزدیک به گسیختگی، با افزایش ۴ برابری در نسبت ارتفاع خاکریز). همچنین می‌توان مشاهده کرد که به ازای



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

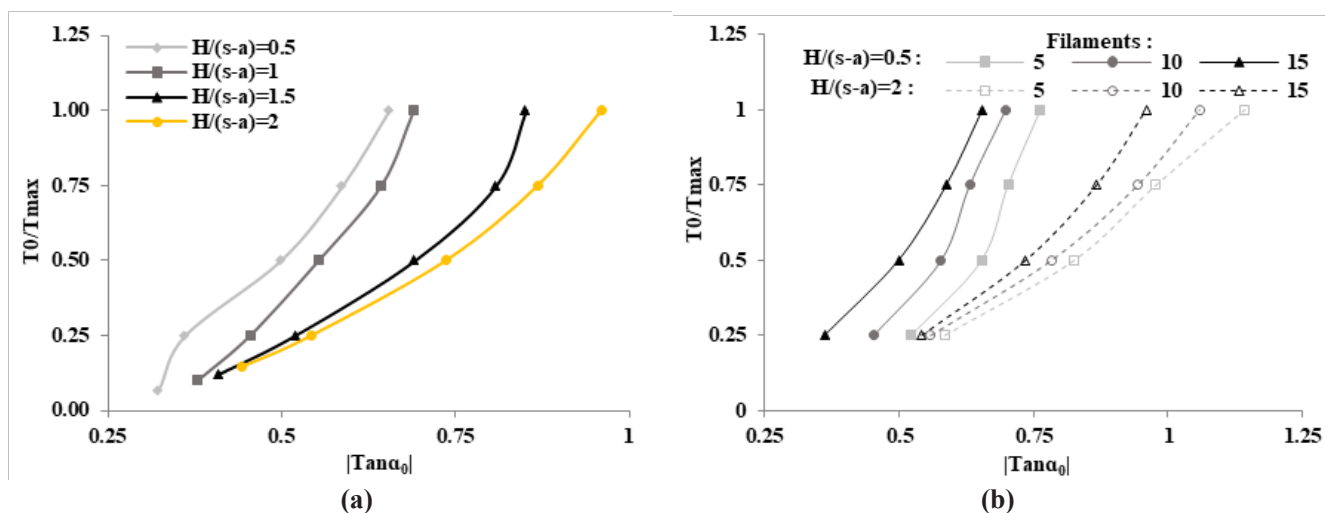
Fig. 24. The effect of embankment height ratio and the number of reinforcement filaments on ϵ_{ave} and $D_{max}/(s-a)$ during the test up to the moment just before rupture of the filaments reinforcement (a)Graph $B-D_{max}/(s-a)$ (b)Graph $T_0-\epsilon_{ave}$ (Tests 1 and 4 – 8)

مشخصی از ظرفیت کششی مسلح‌کننده شیب کنار منحنی تغییر شکل، کاهش خواهد یافت. این کاهش در $T_0/T_{max} = 0.25$ (۲۵ درصد ظرفیت کششی مسلح‌کننده)، با سه برابر شدن تعداد رشته‌های مسلح‌کننده در ۲، $H/(s-a) = 0.5$ ، به ترتیب از چپ به راست ۷ و ۳۱ درصد خواهد بود. همچنین، در لحظه نزدیک به گسیختگی مسلح‌کننده با سه برابر شدن تعداد رشته‌ها در ۲، $H/(s-a) = 0.5$ ، 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 $B = 3$ (kN/m) مقدار شیب مسلح‌کننده با سه برابر شدن تعداد رشته‌ها برای ۲، $H/(s-a) = 0.5$ به مقدار یکسان و حدود ۳۸ درصد کاهش می‌یابد.

۴-۶- شیب مسلح‌کننده کنار تیر

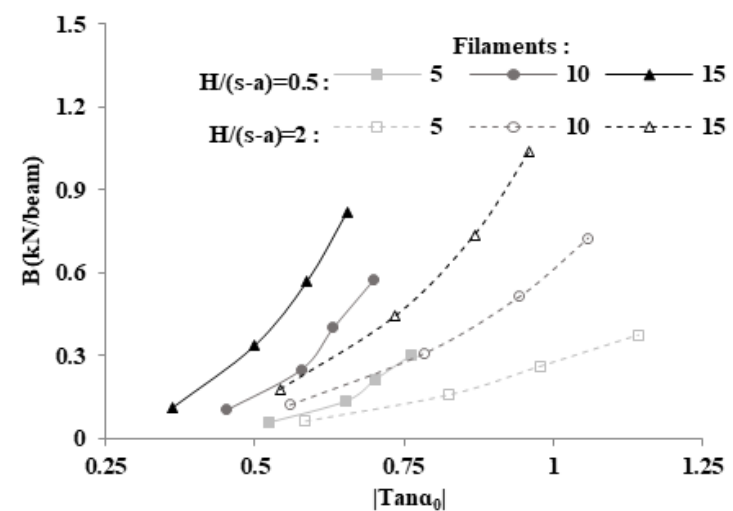
شکل ۲۵-a نشان می‌دهد که در حین آزمایش و با افزایش مقدار نیروی کششی در مسلح‌کننده، شیب نمودار تغییر شکل در کنار تیر افزایش می‌یابد، به طوری که مقدار و محدوده این شیب ($|Tan\alpha_0|$)، با افزایش نسبت ارتفاع خاکریز افزایش می‌یابد. برای کمترین ارتفاع خاکریز $H/(s-a) = 0.5$ تغییرات شیب مسلح‌کننده در کنار تیر، در محدوده ۰/۳۶ تا ۰/۶۵ و برای بیشترین ارتفاع خاکریز $H/(s-a) = 2$ در محدوده ۰/۴۵ تا ۰/۹۵ اندازه‌گیری شدند.

برای مسلح‌کننده ۱۵ رشته‌ای با افزایش نسبت ارتفاع خاکریز از ۰/۵ به ۲، حداکثر شیب کنار مسلح‌کننده در $T_0/T_{max} = 1$ (لحظه نزدیک به گسیختگی) از ۰/۶۵ به ۰/۹۵ افزایش می‌یابد (حدود ۴۶ درصد شیب کنار، در لحظه نزدیک به گسیختگی مسلح‌کننده، افزایش می‌یابد). شکل ۲۵-b نشان می‌دهد که با افزایش تعداد رشته‌های مسلح‌کننده برای درصد



شکل ۲۵. تأثیر نسبت ارتفاع و تعداد رشته‌های مسلح‌کننده بر شیب مسلح‌کننده کنار تیر در حین آزمایش (a) تأثیر نسبت ارتفاع (آزمایش‌های ۱ - ۴) (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 $B-|Tan\alpha_0|$ (آزمایش‌های ۱ و ۴ - ۸)

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

۵- نتیجه گیری

باری که غیرمستقیم توسط کشش مسلح کننده به شمع منتقل می گردد،	B	kN/m
طول هر تیر عمود بر صفحه دو بعدی ($X-Z$) آزمایش	b	mm, ($b=100$ mm)
حداکثر مقدار B که قبل از گسیختگی رشته ها به شمع منتقل خواهد شد (ظرفیت B),	B_{max}	kN/m
تغییرات شیب مسلح کننده	d^2z/dx^2	
حداکثر تغییر شکل (نشست) مسلح کننده در موقعیت مرکز آن ($X=0$ mm),	D_{max}	mm
نسبت نشست حداکثر مسلح کننده در موقعیت مرکز آن ($X=0$ mm),	$D_{max}/(s-a)$	mm
تعداد رشته های مسلح کننده	Filaments	
ارتفاع خاگریز روی تیرها،	H	mm
نسبت ارتفاع خاگریز	$H/(s-a)$	
سختی مسلح کننده متناظر با نیروی کششی T_i ,	J_i	kN/m
بعد صفحه بارگذاری برای اعمال سربار،	L, W	mm
نصف طول مسلح کننده بین دو تیر قبل از تغییر شکل،	$L1$	mm
نصف طول مسلح کننده بین دو تیر بعد از تغییر شکل،	$L2$	mm
توزیع بار قائم روی مسلح کننده،	$Q(X)$	kN/m
بزرگترین نیم قطر قوس های تشکیل شده در خاگریز روی مسلح کننده در راستای محور Z ,	R_a	mm
بزرگترین نیم قطر قوس های تشکیل شده در خاگریز در راستای محور X ,	R_b	mm
فاصله مرکز تا مرکز تیرها،	s	mm
فاصله کنار تیر ۱ تا کنار تیر ۲ مجاورش،	$(s-a)$	mm
نیروی کششی ایجاد شده در مسلح کننده در لبه تیر (T_{edge}),	T_0	mm
نسبتی از ظرفیت کششی مسلح کنند که حداکثر آن ۱ می باشد،	T_0/T_{max}	mm
مولفه افقی نیروی کششی ایجاد شده،	T_H	mm
نیروی کششی که بر اثر بار قائم در مسلح کننده در موقعیت i ایجاد می شود،	T_i	mm
حداکثر مقدار نیروی کششی که رشته ها می تواند تحمل کند (ظرفیت کششی رشته ها)،	T_{max}	kN/bm
مولفه قائم نیروی کششی ایجاد شده در لبه تیر،	$T_{V\ edge}$	kN/m
تصویر قائم نیروی کششی مسلح کننده در قسمت i مسلح کننده،	T_{vi}	kN/m
نیروی کششی در مختصات x در مسلح کننده،	$T(x)$	kN/m
نسبت نیروی کششی در مختصات x به نیروی کششی در مسلح کننده (کنار) لبه تیر،	$T(x)/T_0$	kN/m

آزمایش های دوبعدی، با استفاده از میله های فلزی، به عنوان خاگریز دوبعدی، به منظور بررسی رفتار مسلح کننده ژئوسینتتیکی در خاگریزهای متکی بر شمع انجام شد. آزمایش ها به طور مخصوصی طراحی شدند تا امکان اندازه گیری جداگانه هر کدام از پارامترهای A (تأثیر قوس) و B (اثر مسلح کننده) در حین آزمایش امکان پذیر باشد. ۸ آزمایش به منظور بررسی تأثیر ارتفاع خاگریزی و تعداد رشته های مسلح کننده، بر رفتار آن انجام گرفت.

- در خاگریز مرتفع تر قوس های تشکیل شده در خاگریز در حین آزمایش هندسه آنها کمتر تغییر می کند. و این امر سبب تشکیل قوس های پایدار تر در خاگریزهای مرتفع تر می گردد.

- برای خاگریزهای مرتفع ($H/(s-a) > 1$)، تجمع توزیع سربار قائم و بیشینه تغییرات شیب مسلح کننده، در حین افزایش نیروی کششی در قسمتی از مسلح کننده کنار تیر اتفاق می افتد. برای خاگریزهای با ارتفاع کم ($H/(s-a) < 1$)، در حین افزایش نیروی کششی در مسلح کننده، بیشینه تغییرات شیب مسلح کننده و تمرکز توزیع بار، در موقعیت مرکز مسلح کننده اتفاق می افتد.

- برای تعداد رشته های مسلح کننده ثابت، در حالتی که تجمع نیروی کششی در قسمتی از مسلح کننده نزدیک به تیر بیشتر باشد (خاگریزهای مرتفع)، با یک T_0 ثابت، مسلح کننده 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 ۴ برابر شدن ارتفاع خاگریز 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 رشته های مسلح کننده به دلیل افزایش سختی آن، مسلح کننده می تواند علاوه بر کاهش نشست، بار (B) بیشتری را به شمع منتقل کند. با سه برابر شدن تعداد رشته ها، مسلح کننده با یک نشست ثابت قادر خواهد بود حداکثر تا ۱/۷۷ برابر بار منتقل شده به شمع را افزایش دهد.

۶- فهرست علائم

باری که مستقیماً توسط قوس زدگی به شمع منتقل می شود،	A	kN/m
عرض (بعد) تیر،	a	mm
حداکثر مقدار A که قبل از گسیختگی رشته ها به شمع منتقل می شود،	A_{max}	kN/m

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. Briçon, 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,

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 i با راستای افق، °	α_i
کرنشی که در اثر تغییر شکل رشته‌های مسلح‌کننده اتفاق می‌افتد	ε_{ave}
کرنش یک المان از مسلح‌کننده بعد از تغییر شکل	ε_i

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 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.
- 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-

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

