



Research Article

## Geosynthetic Reinforced Embankment Design on Piles for Transportation Infrastructures: A European Code Comparison

Fatemeh Sepahvand<sup>a</sup>, Abdolhosein Haddad<sup>b\*</sup>

<sup>a</sup> PhD student of geotechnical Eng., Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, I. R. Iran.

<sup>b</sup> Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, I. R. Iran.

### PAPER INFO

#### **Paper history:**

Received: 2024-12-30

Revised: 2025-01-16

Accepted: 2025-01-20

#### **Keywords:**

Embankment;

Arching;

Geosynthetics;

Platform;

Load transfer Mechanism.

### ABSTRACT

Construction of embankments on soft soil is considered as one of the common challenging topics in the field of geotechnical engineering and transportation infrastructure. These challenges arise from unfavorable ground conditions, such as high compressibility, significant settlement, and low strength of the subsoil. Therefore, the use of innovative methods in the construction of embankments using geosynthetic layers and piles is increasingly gaining attention as a technical and economical option. This paper examines the reinforcement mechanism in the performance of embankments reinforced with geosynthetics and supported by piles in soft soils. The key areas of focus in this study include the performance of geosynthetic reinforcements (such as geogrids or geocells), the role of platform layers, and a comparison of design methods in the guidelines of the United Kingdom (BS8006), Germany (EBGEO), and the Netherlands (CUR226). In addition, the results of nine field studies are also considered in this research. The findings indicate that for calculating the effectiveness of the BS8006 method, the results are closer to the measured field values. Furthermore, for stress concentration ratios, differential settlements, and maximum tensile forces in geosynthetics, the values calculated using the CUR226 method are closer to the measured field values. Finally, based on the obtained results, recommendations for advancing future studies are presented.

\* Corresponding author

E-mail address: [ahaddad@semnan.ac.ir](mailto:ahaddad@semnan.ac.ir)

**How to cite this article:** Haddad, A. and Sepahvand, F. (2024). Geosynthetic Reinforced Embankment Design on Piles for Transportation Infrastructures: A European Code Comparison. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 10(4), 115-137 <https://doi.org/10.22075/jtie.2025.36381.1710>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



مقاله پژوهشی

## مقایسه گزینه‌های طراحی خاکریزهای مسلح شده با ژئوسنتتیک مستقر بر شمع در زیرساخت‌های حمل و نقل در آیین‌نامه‌های اروپایی

فاطمه سپهوند<sup>۱</sup>، عبدالحسین حداد<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

<sup>۲</sup> استاد، گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

| اطلاعات مقاله                                                                    | چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰<br>بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۲۷<br>پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱ | ساخت خاکریز روی خاک نرم یکی از موضوعات چالش برانگیز مشترک در حوزه مهندسی ژئوتکنیک و زیرساخت‌های حمل و نقل به شمار می‌آید. این چالش‌ها ناشی از شرایط نامساعد زمین مانند تراکم‌پذیری بالا، نشست زیاد و استحکام کم خاک بستر است. به همین دلیل، استفاده از روش‌های نوین در احداث خاکریزها با استفاده از لایه‌های ژئوسنتتیک و شمع به طور فزاینده‌ای به عنوان یکی از گزینه‌های فنی و اقتصادی مورد توجه و در حال گسترش است. این مقاله، به بررسی مکانیزم تسلیح در عملکرد خاکریز مسلح شده با ژئوسنتتیک و متکی بر شمع در زمین‌های نرم می‌پردازد. بخش‌های مورد توجه در این مطالعه شامل عملکرد مسلح‌کننده ژئوسنتتیک (ژئوگرید و یا ژئوسل) و نقش لایه پلتفرم و مقایسه گزینه‌های طراحی در آیین‌نامه‌های اروپایی شامل انگلستان (BS8006)، آلمان (EBGEO) و هلند (CUR226) است. علاوه بر این، نتایج ۹ مطالعه میدانی نیز در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که برای محاسبه کارایی، روش BS8006 نتایج نزدیکتری به مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی دارد. همچنین، برای نرخ تمرکز تنش، نشست تفاضلی و حداکثر نیروی کشش ژئوسنتتیک، مقادیر محاسبه شده توسط روش CUR226 به مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی نزدیک‌تر است. در نهایت، بر اساس نتایج به دست آمده، پیشنهادهایی برای پیشرفت در مطالعات آینده ارائه می‌گردد. |

### واژگان کلیدی:

خاکریز،

قوس‌زدگی،

ژئوسنتتیک،

پلتفرم،

مکانیزم انتقال بار.

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: [ahadad@semnan.ac.ir](mailto:ahadad@semnan.ac.ir)

استناد به این مقاله: حداد، عبدالحسین و سپهوند، فاطمه. (۱۴۰۳). مقایسه گزینه‌های طراحی خاکریزهای مسلح شده با ژئوسنتتیک مستقر بر شمع در

زیر ساخت‌های حمل و نقل در آیین‌نامه‌های اروپایی. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۱۰(۴)، ۱۱۵-۱۳۷

<https://doi.org/10.22075/jtie.2025.36381.1710>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

## ۱. مقدمه

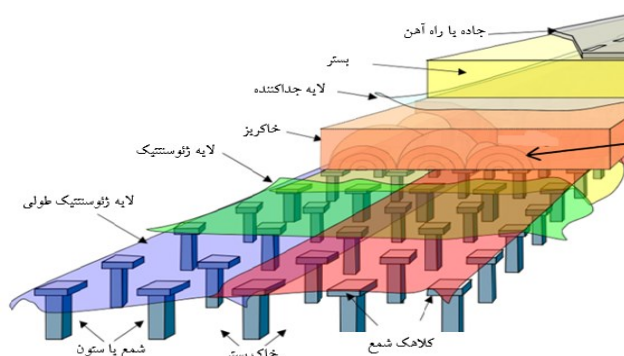
تقاضای فزاینده برای زیرساخت‌های مهندسی عمران در سراسر جهان و فقدان خاک‌های مناسب برای حمایت از سازه‌هایی مانند پل‌ها، راه‌آهن، ساختمان‌ها و خاکریزها، مهندسان را مجبور به ساخت و ساز روی زمین‌های خاکی نرم و ضعیف (خاک‌های مشکل‌دار) کرده است. یکی از روش‌های مؤثر برای حمایت از خاکریز جاده و راه‌آهن روی پی‌های نرم و گسترش جاده‌های موجود، استفاده از خاکریزهای تقویت‌شده با ژئوستتیک و شمع است. مشکل اصلی خاک نرم عمدتاً به دلیل نشست‌های بزرگ و تغییر شکل‌های جانبی است که به دلیل مقاومت برشی بسیار کم خاک نرم پی، اتفاق می‌افتد. این شرایط نامطلوب را می‌توان با روش‌های بهسازی خاک کاهش داد یا برطرف کرد. استفاده از مسلح‌کننده در زیر خاکریز روی خاک نرم، نشست‌های تفاضلی، در حین ساخت و حرکت جانبی خاکریز را محدود می‌کند، تعمیر و نگهداری کمتری مورد نیاز است و سطح کلاhek شمع نیز کاهش می‌یابد؛ در نتیجه، ساخت خاکریز اقتصادی‌تر است و زمان کمتری می‌برد (بالابان و اونور، ۲۰۱۸؛ گنیل و بوازا، ۲۰۰۹؛ هان، ۲۰۱۵؛ سیمون، ۲۰۱۲؛ آکوسا و همکاران، ۲۰۲۲؛ ادريس و همکاران، ۲۰۲۳). تقویت زیرسازی مسیرهای ریلی با استفاده از مسلح‌کننده مسطح و سه‌بعدی، خصوصاً مسلح‌کننده ژئوسل، که تغییر شکل‌های محوری و جانبی را تحت بارگذاری چرخه‌ای قطار بهبود می‌دهد به تأیید رسیده است (نگو و همکاران، ۲۰۱۴؛ ایندراراتنا و همکاران، ۲۰۱۱). ژانگ و همکاران (۲۰۲۴) در بخشی از پروژه خط قطار سریع‌السیر اقیانوس اطلس در اروپای جنوبی برای پشتیبانی از یک خاکریز متکی بر شمع یک سیستم خاکریز مسلح‌شده با ژئوستتیک و شمع را به عنوان راه‌حلی بهینه پیشنهاد کردند. نتایج مدل‌سازی آنها نشان داد که دو لایه ژئوستتیک با سختی کششی بالا، عملکرد کلی خاکریز

مسلح‌شده با ژئوستتیک و متکی بر شمع را افزایش می‌دهد. زهکش‌های عمودی پیش‌ساخته معمولاً برای تسریع نشست با ارائه مسیرهای زهکشی افقی کوتاه (آلمیدا و همکاران، ۲۰۰۰، ۲۰۰۵؛ ایندراراتنا و همکاران، ۱۹۹۴) و مسلح‌کننده ژئوستتیک (هامفری و هولتز، ۱۹۸۹؛ گیروود و همکاران، ۱۹۹۰؛ رو و همکاران، ۱۹۹۵) برای بهبود پایداری سازه‌های خاکی استفاده می‌شود. استفاده ترکیبی از زهکش‌های عمودی پیش‌ساخته و مسلح‌کننده ژئوستتیک در مقایسه با روش‌های ساخت مرسوم، امکان خاکریزهای مرتفع‌تر و زمان ساخت کوتاه را فراهم می‌کند (به عنوان مثال، رو و لی، ۲۰۰۵؛ لی و رو، ۲۰۰۱). همچنین، حداکثر نشست به‌خاطر افزایش سختی ژئوستتیک و شمع، کاهش می‌یابد (هان و گابر، ۲۰۰۲). عموماً ستون‌ها/شمع‌ها در یک الگوی شبکه مربعی یا مثلثی قرار دارند (یو و همکاران، ۲۰۱۶؛ یو و باتورست، ۲۰۱۷). هنگامی که عناصر مختلف موجود، با هم اندرکنش داشته باشند، مکانیسم‌های انتقال بار در خاکریز به شمع و خاک نرم پیچیده می‌شود (فام و دیاس، ۲۰۲۰؛ فاگوندرس و همکاران، ۲۰۱۶). در مسائل ژئوتکنیک به دلیل وابستگی‌های چندمتغیره پاسخ خاک و رفتار نامشخص خاک پیچیده است (جکسا، ۱۹۹۵). برای تسلیح و بهسازی خاکریزی که روی بستر خاک نرم قرار دارد در بیشتر مطالعات در مورد بهسازی با مسلح‌کننده ژئوستتیک و شمع و همچنین درک رفتار خاکریز مسلح‌شده با شمع و ژئوستتیک مطالبی بیان شده است. در خاکریز مسلح‌شده متکی بر شمع بیشتر به بررسی مکانیزم انتقال بار پرداخته شده است (بریانکون و سیمون، ۲۰۱۲، ۲۰۱۴؛ رو و لی، ۲۰۱۵؛ شن و همکاران، ۲۰۱۹؛ ون اکلن و همکاران، ۲۰۱۵؛ فام، ۲۰۲۲؛ لیو و همکاران، ۲۰۰۷). چگونگی اجرای کامل ظرفیت باربری خاکریزهای ژئوستتیک تقویت‌شده با شمع و ایجاد مزایای اقتصادی بهتر، موضوع مهم تحقیقات اخیر است. در این مقاله، مروری بر بررسی عملکرد و انتقال بار خاکریز مسلح‌شده

## ۲. طراحی خاکریز متکی بر شمع و تقویت شده

### با ژئوسنتتیک

خاکریز شمعی با پی مسلح شده در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. یک خاکریز شمعی با پی مسلح شده (ون اکلن و بروگمن، ۲۰۱۶).

پایداری آن اعمال شود (ون اکلن و بروگمن، ۲۰۱۶). روش‌های مختلفی برای طراحی خاکریزهای تقویت شده با ژئوسنتتیک و شمع موجود است. روش مناسب برای طراحی باید: ۱- مطابق استانداردها یا دستورالعمل‌ها یا کاربرگ‌های موجود باشد، ۲- روش طراحی انتخاب شده باید بتواند به طور مؤثر توزیع بار عمودی در خاکریزهای شمعی را در نظر بگیرد، ۳- روش طراحی انتخاب شده باید یک روش محاسبه دمرحله‌ای برای پیش‌بینی قوس و کرنش مسلح‌کننده ژئوسنتتیک ارائه کند، ۴- مدل تحلیلی انتخاب شده، در مقابل نتایج تجربی تأیید شود و روش‌های طراحی، جدید و اخیراً اصلاح شده را در نظر بگیرد. پرکاربردترین روش‌ها عبارتند از: استاندارد انگلستان BS8006، دستورالعمل طراحی آلمان EBGE0 و راهنمای طراحی کشور هلند CUR226. مواردی که در این آیین‌نامه‌ها برای مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی مورد بررسی قرار می‌گیرد شامل کارایی، نرخ تمرکز تنش، حد اکثر کشش ژئوسنتتیک و نشست تفاضلی است. در ادامه، هر یک از آیین‌نامه‌های فوق به طور مختصر معرفی می‌گردند.

با ژئوسنتتیک (ژئوگرید و ژئوسل) و متکی بر شمع، شده است و در ادامه به بررسی موردی ۹ مقاله میدانی، عملکرد سه استاندارد انگلستان، دستورالعمل آلمان و راهنمای کشور هلند پرداخته می‌شود.

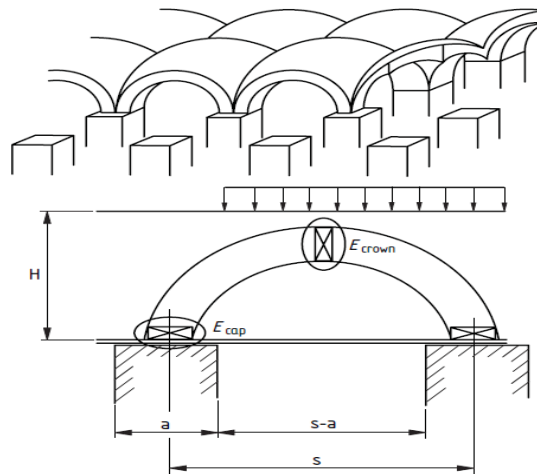
مسلح‌کننده شامل یک یا چند لایه ژئوسنتتیک است که در پی یا در قسمت پایین خاکریز قرار می‌گیرد. مکانیزم انتقال بار خاکریز به پی را می‌توان به عنوان ترکیبی از قوس‌زدگی خاک، اثر غشای کششی و تمرکز فشار دانست (ون اکلن و بروگمن، ۲۰۱۶؛ فام و دیاس، ۲۰۲۰؛ شو و همکاران، ۲۰۱۶). همه‌ی سیستم‌های شمع ممکن را می‌توان برای خاکریزها استفاده کرد، مشروط بر آن که تفاوت سختی بین شمع‌ها و خاک اطراف به اندازه کافی زیاد باشد. وظیفه اصلی خاکریز تقویت شده، انتقال بخش بزرگی از بار عمودی از روسازه به شمع‌ها است. الزامات خاکریزی که باید ایجاد شود عبارتند از: مقاومت، طول پیوند، سختی کششی و رفتار خزشی مسلح‌کننده، مقاومت برشی و قابلیت زهکشی مصالح، خواص فیلتر و عمر مفید آن، ارتفاع خاکریز، همچنین تغییر شکل‌های تفاضلی و یا کلی، بارهای خارجی، حمایت خاک زیرین برای ژئوسنتتیک و کنترل ژئوسنتتیک، تراز آب سطحی، کاربرد طرح، کلاس قابلیت مقاومت محل شمع، توزیع بار وارده بر شمع و مسلح‌کننده ژئوسنتتیک و همچنین الزامات اضافی ممکن است برای لبه‌های خاکریز در ارتباط با

مقایسه گزینه‌های طراحی خاکریزهای مسلح‌شده با ژئوسنتتیک مستقر بر شمع در زیرساخت‌های حمل‌ونقل در آیین‌نامه‌های اروپایی

## ۲-۱. آیین‌نامه BS8006(2010)

تعیین بارهای توزیع شده روی مسلح‌کننده‌ها ارائه شده است.

در نسخه BS 8006 (2010) دو روش مختلف برای



شکل ۲. تئوری قوس‌زدگی ارائه شده توسط هولت و راندولف (BS8600, 2010)

مجاور بر حسب متر،  $a$  اندازه (یا اندازه معادل) کلاهک-های شمع بر حسب متر،  $H$  ارتفاع خاکریز بر حسب متر،  $\varphi$  زاویه اصطکاک خاکریز بر حسب درجه و  $k_p$  ضریب مقاومت فشاری خاک است. تنش عمودی توزیع شده روی ژئوسنتتیک با اثر قوس‌شدن ( $\sigma_s^a$ ) از رابطه (۴) و تنش عمودی توزیع شده روی شمع از رابطه (۵) محاسبه می‌گردد.

$$\sigma_s^a = \frac{s^3(\gamma H + q)}{s + a} (1 - E_{min}) \quad (4)$$

$$\sigma_c = [S^3 H \gamma - \sigma_s (s^2 - b^2)] / b^2 \quad (5)$$

$\gamma$  وزن واحد خاکریز بر حسب کیلونیوتن بر متر مکعب و  $E_{min}$  کمترین مقدار از بین  $E_a^{cap}$  و  $E_a^{crown}$  است.  $q$  سرباره می‌باشد. از رابطه (۶) به‌دست می‌آید.

$$E_a^{cap} = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{2k_p}{(k_p + 1)(1 + \frac{a}{s})} \left[ \left(1 - \frac{a}{s}\right)^{-k_p} - \left(1 + k_p \frac{a}{s}\right) \right] \quad (7)$$

$$w_T = \frac{s^3(\gamma H + q)}{s^2 - a^2} (1 - E_{min}) \quad (8)$$

از نسبت تنش توزیع شده روی شمع به تنش توزیع شده روی خاک می‌توان نرخ تمرکز تنش را به‌دست آورد. حد

روش اول از فرمول مارستون، که در اصل از آزمایش‌های کرنش مسطح روی پل‌های منعطف در زیر خاکریزهای مرتفع گرفته شده استفاده می‌کند و روش دوم، روش هولت و راندولف (۱۹۸۸) است که یک راه-حل نظری جایگزین است که برای تعیین بار عمودی اعمال شده در سراسر مسلح‌کننده استفاده می‌شود. این روش بر اساس مکانیسم‌های مشاهده شده از آزمون‌های مدل با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از گنبد‌های نیمکره‌ای طراحی شده است (شکل ۲). برای محاسبه کارایی از رابطه (۱) استفاده می‌شود.

$$E_a^{crown} = 1 - [1 - (a/s)^2](A - AB + C) \quad (1)$$

که پارامترهای  $A$  و  $B$  و  $C$  از روابط ۱.۲ تا ۳.۲ محاسبه می‌گردد.

$$A = [1 - a/s]^2 (k_p - 1) \quad 1.2$$

$$B = \frac{s}{\sqrt{2}H} \left[ \frac{2k_p - 2}{2k_p - 3} \right] \quad 2.2$$

$$C = \frac{s - a}{\sqrt{2}H} \left[ \frac{2k_p - 2}{2k_p - 3} \right] \quad 3.2$$

و پارامتر  $k_p$  از رابطه (۳) محاسبه می‌گردد.

$$k_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \tan^2 \left[ 45 + \frac{\varphi}{2} \right] \quad (3)$$

که در این روابط،  $s$  فاصله مرکز به مرکز بین شمع‌های

## ۲-۲. آیین نامه آلمان (EBGEO 2011)

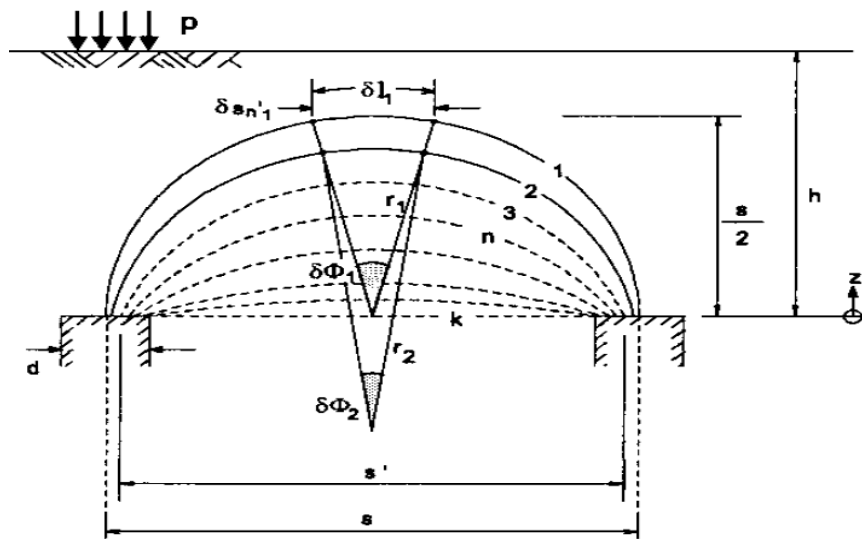
در دستورالعمل طراحی آلمان EBGEO2011، از مدل تعادل قوس خاک برای توصیف توزیع بار استفاده شده است (شکل ۳). اصول طراحی در این آیین نامه توسط کمپفرت و همکاران در سال ۱۹۹۹ و سپس در سال ۲۰۰۴ بسط داده شده است. مبنای روش طراحی در آیین نامه آلمان، استفاده از تئوری حد پایین در پلاستیسیته، آزمون های مقیاس آزمایشی و تحلیل های عددی است.

اکثر کشش ژئوستتیک از رابطه (۹) و نشست تفاضلی از رابطه (۱۰) به دست می آید.

$$6T^3 - 6\alpha^2 T - \alpha^2 J_{GR} = 0, \quad \alpha = \frac{\sigma_s^a}{2a} \quad (9)$$

$$y = (s-a) \sqrt{\frac{3\varepsilon}{8}} = (s-a) \sqrt{\frac{3T}{8J_{GR}}} \quad (10)$$

که در این روابط  $\varepsilon$  کرنش ژئوستتیک،  $T$  نیروی کششی ژئوستتیک و  $J_{GR}$  سختی کششی ژئوستتیک می باشد.



شکل ۳. نظریه چندقوس در مدل کمپفرت و همکاران (۲۰۰۴)

$$x = \frac{d(k_p - 1)}{\mu_2 s_d}; \quad s_d = \sqrt{s_x^2 + s_y^2} \quad (12)$$

$$h_g = \frac{s_d}{2} \text{ for } H \geq \frac{s_d}{2} \quad \text{or} \quad h_g = H \text{ for } H < \frac{s_d}{2} \quad (13)$$

همچنین، تنش وارد بر کلاهک شمع از رابطه (۱۴) به دست می آید.

$$\sigma_c^a = \left[ \left( (\gamma H + q) - \sigma_c^a \right) \frac{A_s}{A_c} + \sigma_c^a \right] \quad (14)$$

که در آن  $A_s$  مساحت مؤثر ( $A_s = s_x * s_y$ ) و  $A_c$  مساحت شمع می باشد. کارایی از رابطه (۱۵) به دست می آید.

$$E_a = \frac{P_c^a}{A_s(\gamma H + q)} \quad (15)$$

که  $P_c^a$  از ضرب مساحت شمع در  $\sigma_c^a$  به دست می آید.

در این آیین نامه، توزیع بار به صورت مثلثی برای محاسبات در نظر گرفته شده است. بر اساس دستورالعمل طراحی آلمانی، تنش عمودی توزیع شده روی خاک از رابطه (۱۱) تعیین می شود.

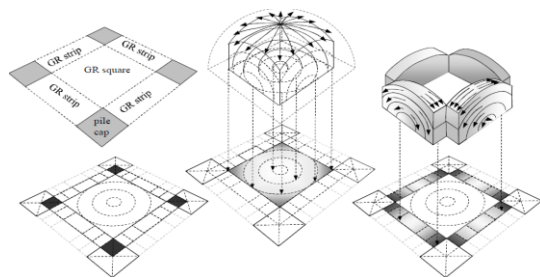
$$\sigma_s^a = \mu_1^x \left( \gamma + \frac{q}{H} \right) \left[ H(\mu_1 + h_g^2 \mu_2)^{-x} + h_g \left( \mu_1 + \frac{h_g^2 \mu_2}{4} \right)^{-x} - (\mu_1 + h_g^2 \mu_2)^{-x} \right] \quad (11)$$

پارامترهای  $\mu_1$ ،  $\mu_2$ ،  $x$ ،  $s_d$  و  $h_g$  از روابط (۱۲) و (۱۳) مجاسبه می شوند.

$$\mu_1 = \frac{1}{8}(s_d - d)^2; \quad \mu_2 = \frac{s^2 + 2ds_d - d^2}{2s_d^2};$$

مقایسه گزینه‌های طراحی خاکریزهای مسلح‌شده با ژئوستتیک مستقر بر شمع در زیرساخت‌های حمل‌ونقل در آیین‌نامه‌های اروپایی

سری آزمایش‌های آزمایشگاهی توسعه یافته است که در مقاله ون اکلن و همکاران (۲۰۱۲a) ارائه شده است. برای توزیع بار از توزیع یکنواخت و معکوس مثلثی استفاده می‌شود. محاسبه بار عمودی شامل مجموعه‌ای از قوس‌های متحدالمرکز دویبعی و سه‌بعی است که در شکل ۴ نشان داده شده است. قوس‌های کوچکتر بار کمتر و قوس‌های بزرگ بار بیشتری بر سطح زیرین خود وارد می‌کنند. نتیجه این است که یک بار نسبتاً بزرگ مستقیماً روی کلاهک شمع وارد می‌شود و بقیه بار روی نوارهای ژئوستتیک بین شمع‌های مجاور توزیع می‌شود.



شکل ۴. مدل قوس متحدالمرکز مطابق با ون اکلن و همکاران (۲۰۱۳)

از نسبت بار وارد بر کلاهک شمع به بار وارد بر خاک و ژئوستتیک به‌دست می‌آید. برای محاسبه نیروی کششی حد اکثر ژئوستتیک با استفاده از نمودارهایی که در CUR226(2016) ارائه شده است، ابتدا کرنش حد اکثر را تعیین و سپس از رابطه (۱۹) مقدار نیروی کششی حد اکثر ژئوستتیک تعیین می‌گردد.

$$T(x) = T_H \sqrt{1 + (y'(x))^2} \quad (19)$$

مقدار  $T_H$  از رابطه ۲۰ به‌دست می‌آید.

$$\int_0^{L/2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx - L/2 = \left(\frac{1}{J_{GR}}\right) \int_0^{L/2} T(x) dx \quad (20)$$

برای جزئیات روابط به راهنمای CUR226(2016) مراجعه شود. در جدول ۱، مبانی نظری سه آیین‌نامه مورد اشاره به طور خلاصه ارائه شده است.

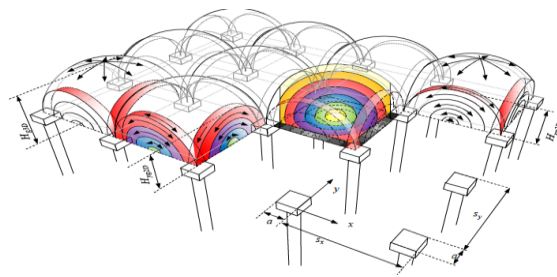
تمرکز نرخ تنش از نسبت تنش وارد بر شمع به تنش وارد بر خاک به‌دست می‌آید. برای محاسبه کشش حد اکثر ژئوستتیک از رابطه (۱۶) استفاده می‌گردد.

$$T_{max} = \varepsilon_{max} l \quad (16)$$

که برای محاسبه کرنش از گراف‌های آیین‌نامه استفاده می‌شود. نشست تفاضلی از رابطه (۱۰) محاسبه می‌گردد.

## ۳-۲. استاندارد کشور هلند (CUR226 2016)

راهنمای طراحی کشور هلند (CUR226 2016) از مدل قوس‌های متحدالمرکز ارائه شده توسط ون اکلن و همکاران (۲۰۱۳) استفاده می‌کند. این مدل بر اساس یک



برای محاسبه بار باقیمانده که شامل بار وارد بر خاک و ژئوستتیک از معادله (۱۷) و برای بار وارد بر کلاهک شمع از رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود.

$$P_s^a = F_{GRsquare} + F_{GRstrips} \quad (17)$$

$$P_c^a = (\gamma H + q) s_x s_y - (F_{GRsquare} + F_{GRstrips}) \quad (18)$$

که  $P_s^a$  قسمت بار باقیمانده که روی ژئوستتیک و خاک قرار دارد و  $P_c^a$  بار بخش انتقالی مستقیم به کلاهک شمع توسط اثر قوس‌زدگی است.  $F_{GRsquare}$  کل بار عمودی اعمال شده توسط نیمکره‌های سه‌بعی روی سطح مربعی و  $F_{GRstrip}$  بار عمودی کل اعمال شده توسط قوس‌های دویبعی روی نوارهای ژئوستتیک است. برای دسترسی به روابط کامل آنها به CUR22(2016) مراجعه شود. کارایی از رابطه (۱۵) به‌دست می‌آید. نرخ تمرکز تنش نیز

جدول ۱. مبانی نظری روش‌های طراحی موجود (فام و دیاس، ۲۰۲۰)

| روش طراحی               | BS 8006 (2010)           | EBGEO (2011)                | CUR226 (2016)            |
|-------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| مدل قوس                 | آنالیز تعادل حالت حدی    | آنالیز تعادل حالت حدی       | آنالیز تعادل حالت حدی    |
| فیزیک فرضیه قوس         | قوس نیمه استوانه‌ای      | طاق گنبدی نیمکره‌ای         | قوس نیمکره متحد المركز   |
| روش تحلیل               | سه بعدی                  | سه بعدی                     | سه بعدی                  |
| فرض محاسبات             | محدود کردن حالت تنش برشی | محدود کردن حالت تنش پلاستیک | محدود کردن حالت تنش برشی |
| محاسبات پایه ژئوستتیک   | تئوری غشای پیش تنیده     | تئوری غشای پیش تنیده        | تئوری غشای پیش تنیده     |
| تغییر شکل ژئوستتیک      | تغییر شکل سهمی وار       | تغییر شکل خطی شده           | تغییر شکل خطی شده        |
| توزیع فشار بر ژئوگرید   | بار یکنواخت              | توزیع فشار مثلثی            | معکوس مثلثی و یکنواخت    |
| مدل کرنش ژئوستتیک       | دو بعدی                  | دو بعدی                     | دو بعدی                  |
| حمایت خاک بستر          | در نظر گرفته نمی‌شود     | در نظر گرفته می‌شود         | در نظر گرفته می‌شود      |
| تأثیر چسبندگی خاکریز    | در نظر گرفته نمی‌شود     | در نظر گرفته نمی‌شود        | در نظر گرفته نمی‌شود     |
| تحکیم خاک بستر          | در نظر گرفته نمی‌شود     | در نظر گرفته نمی‌شود        | در نظر گرفته نمی‌شود     |
| اندرکنش خاک و ژئوگرید   | در نظر گرفته نمی‌شود     | در نظر گرفته نمی‌شود        | در نظر گرفته نمی‌شود     |
| اثر عدم قطعیت پارامترها | در نظر گرفته نمی‌شود     | در نظر گرفته نمی‌شود        | در نظر گرفته نمی‌شود     |

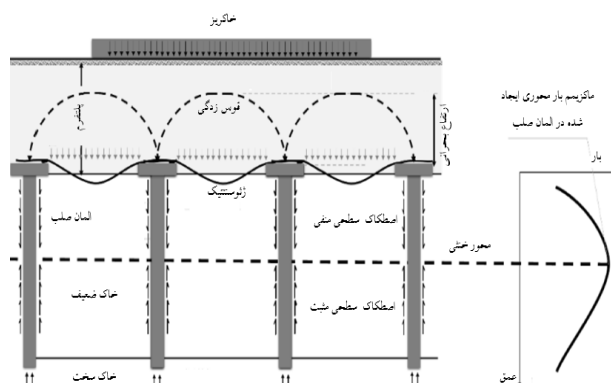
### ۳. عملکرد ژئوستتیک در خاکریز مستقر بر

#### شمع

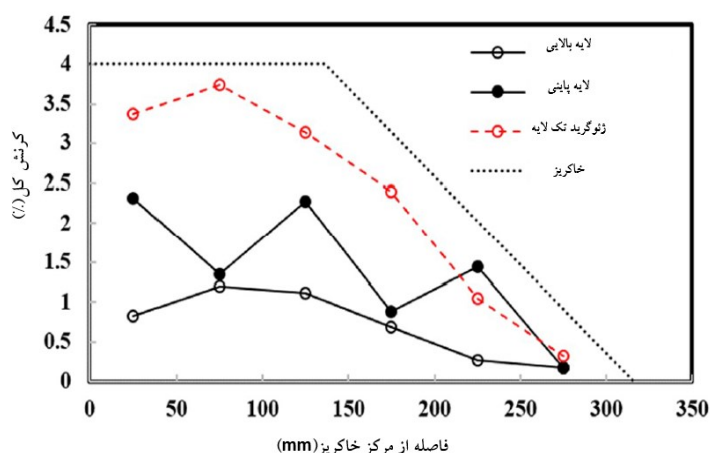
ژئوستتیک مقاومت برشی خاک را به دو روش جداگانه یعنی با کاهش نیروهای عامل شکست و افزایش نیروهای مقاوم در برابر شکست بهبود می‌دهد (جول و گرینوود، ۱۹۸۸). ژئوستتیک تحت وزن خاک و بارهای وارده، تغییر شکل داده و کشیده می‌شود (شکل ۵) و به عنوان یک غشای کششی بار را به ستون منتقل می‌کند. مهمترین فاکتورهای مؤثر بر غشای کششی ژئوستتیک شامل فاصله بین ستون‌ها، سختی و تعداد لایه‌های ژئوستتیک می‌باشد (فام و دیاس، ۲۰۲۰، وانگ و همکاران، ۲۰۲۳). کارایی غشاء با افزایش ارتفاع خاکریز و نسبت سطح بهبود یافته، کاهش می‌یابد. با افزایش ارتفاع خاکریز، افزایش قابل توجهی در حداکثر کرنش ژئوستتیک ایجاد می‌گردد (ون اکلن و همکاران، ۲۰۱۲ a). توزیع کشش در ژئوستتیک یکنواخت نیست و حداکثر کشش در

نزدیکی لبه شمع رخ می‌دهد. نتایج عددی همچنین ثابت کرده است که خاک بستر پشتیبانی قابل توجهی را فراهم می‌کند و کشش مسلح‌کننده را کاهش می‌دهد. کارایی غشاء با افزایش مدول خاک بستر کاهش می‌یابد (فام و دیاس، ۲۰۲۱). ژئوستتیک سخت به دلیل کاهش اثر غشای کششی، پلتفرم را تضعیف می‌کند (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۲). غشاء و قوس‌زدگی، موجب انتقال بار بیشتری به شمع می‌گردد (گیروود و همکاران، ۱۹۹۰). شن و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی خاکریزی با دو لایه ژئوگرید دریافتند که در ژئوگرید بالا و پایین توزیع کرنش‌های متفاوتی در امتداد جهت عرضی خاکریز مشاهده می‌گردد (شکل ۶). همچنین، در مقایسه با ژئوگرید، ژئوسل علاوه بر غشای کششی می‌تواند به عنوان پی سخت و گسترش توزیع بار ورودی به منطقه وسیع‌تر، آن را برای مقابله با مسائل پیش‌رو در ساخت خاکریزها روی خاک نرم مناسب سازد (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۰؛ لاتا و راجاگوپال، ۲۰۰۷).

مقایسه گزینه‌های طراحی خاکریزهای مسلح‌شده با ژئوستتیک مستقر بر شمع در زیرساخت‌های حمل‌ونقل در آیین‌نامه‌های اروپایی



شکل ۵. مکانیزم خاگریز مسلح شده با ژئوسنتتیک و متکی بر المان صلب (ربولدو و کارالو، ۲۰۱۹)



شکل ۶. توزیع کرنش کلی ژئوگریدها در امتداد جهت عرضی خاکریز با یک و دو لایه ژئوگرید (شن و همکاران، ۲۰۱۹)

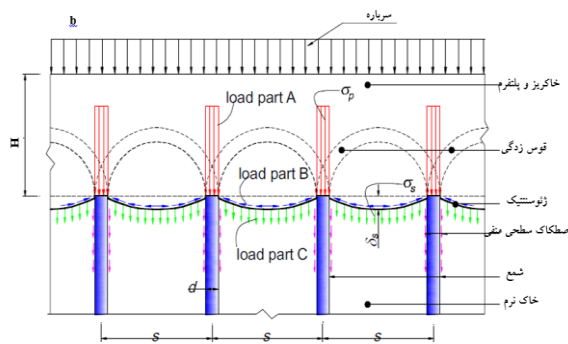
پركنده و اثر پراكندگي تنش عمودي، توزيع گسترده بار، مي باشد (شكل ۷). استفاده از ژئوسل باعث کاهش فشار روي خاك پي و در نتيجه کاهش تغيير شكل عمودي و حدود ۵۰ درصد کاهش تنش و ۳ تا ۴ برابر بهبود ظرفيت باربري مي شود (ويبوشا و همكاران، ۲۰۲۱؛ ژانگ و همكاران، ۲۰۱۰).

کاربرد موفقیت آمیز ژئوسل ها در ساخت خاکریز و مناسب بودن آن روی خاک نرم در مقالات گذشته بررسی شده است (داش و بورا، ۲۰۱۳؛ داش و همکاران، ۲۰۰۷؛ تانیو و همکاران، ۲۰۱۳). استفاده از مسلح کننده ژئوستتیک ژئوسل علاوه بر اثر غشای کششی دارای اثر مقاومت جانبی، مقاومت برشی بین دیوار ژئوسل و خاک



شکل ۷. مکانیزم رفتاری ژئوسل (سیتارام و همکاران، ۲۰۱۹)

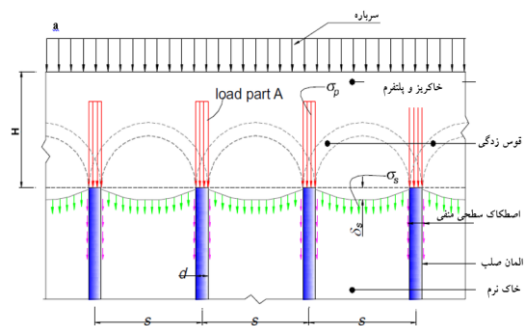
است (پن و همکاران، ۲۰۲۲). شمع‌ها درصد زیادی از بارهای کل (وزن خاکریز، اضافه بار یا بارهای خارجی) را حمل می‌کنند (قسمت A) و خاک نرم و ژئوسنتتیک مقدار باقیمانده بارگذاری را بر عهده می‌گیرند. بار باقیمانده به دو قسمت تقسیم می‌شود: قسمت B از ژئوسنتتیک به شمع و قسمت C به خاک بستر وارد می‌شود. به دلیل اعمال بار کمتر به خاک نرم بستر، نشست خاک نرم بستر و خاکریز کاهش می‌یابد. بار روی کلاهک شمع و اصطکاک منفی سطحی در امتداد شمع به ناحیه عمیق‌تر منتقل می‌شود (شکل ۸) (فام، ۲۰۱۸).



شکل ۸ مکانیسم انتقال بار، a: خاکریز متکی بر شمع و b: خاکریز مسلح شده با ژئوسنتتیک و شمع (فام، ۲۰۱۸)

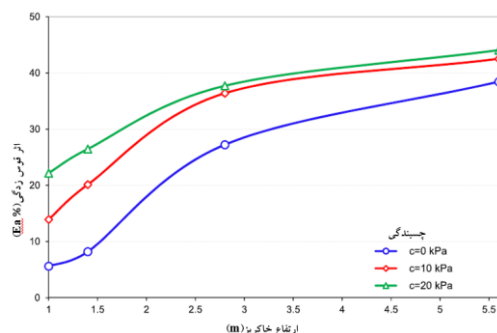
#### ۴. اثر ژئوسنتتیک بر مکانیزم قوس زدگی خاک

قوس زدگی خاکریز متکی بر ستون را می‌توان به عنوان پدیده توزیع مجدد تنش تعریف کرد که امکان انتقال بارهای بیشتر به ستون و کاهش بارهای وارد بر ژئوسنتتیک و خاک بستر را فراهم می‌کند. جزئیات قوس زدگی برای خاکریز با و بدون ژئوسنتتیک در شکل ۸ ارائه شده است. فاکتورهای کلیدی مؤثر بر قوس زدگی شامل: فاصله شمع، سختی کششی ژئوسنتتیک، نسبت مدول شمع به خاک، ارتفاع و ویژگی مصالح خاکریز

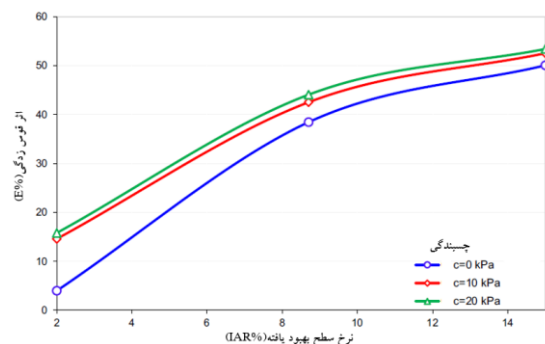


افزایش چسبندگی مصالح خاکریز، باعث افزایش قوس زدگی در خاکریزها می‌شود. ولی با افزایش ارتفاع خاکریز، اثر آن کمتر می‌گردد. کارایی قوس زدگی با

افزایش چسبندگی مصالح خاکریز، باعث افزایش قوس زدگی در خاکریزها می‌شود. ولی با افزایش ارتفاع خاکریز، اثر آن کمتر می‌گردد. کارایی قوس زدگی با



شکل ۹. تأثیر ارتفاع خاکریز و نرخ سطح بهبود یافته بر کارایی قوس زدگی (فام و دیاس، ۲۰۲۱)

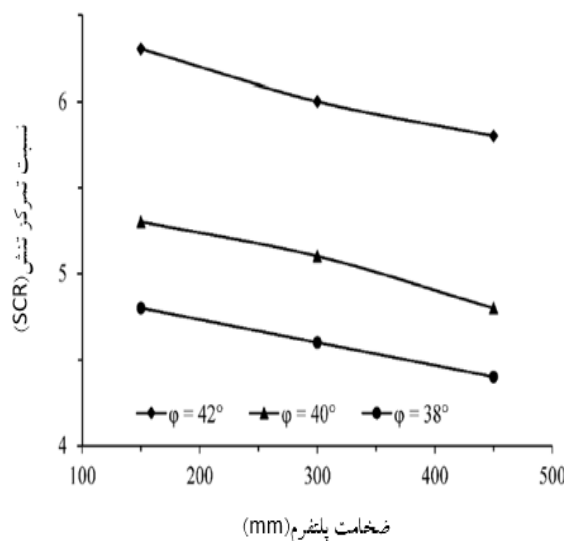


می‌کند. پس از تشکیل ساختار کامل قوس، اگرچه بار سرباره به طور مداوم افزایش می‌یابد، سازه قوس وارد حالت آسیب و بازیابی می‌شود. افزایش بار عمدتاً از

در مرحله شکل گیری قوس نیمه بسیج شده و قوس کاملاً بسیج شده، عملکرد تحمل بار اثر غشای کششی به طور چشمگیری افزایش و هماهنگی با اثر قوس عمل

مشاهده شده است. علاوه بر این، مقاومت خاک اطراف به طور قابل توجهی بر نسبت تمرکز تنش سیستم ترکیبی تأثیر می‌گذارد. در ابتدا با گذشت زمان، به سرعت افزایش و سپس به اوج می‌رسد و بعد تقریباً ثابت می‌شود. تثبیت تسریع شده خاک نرم تقویت شده با ستون سنگی با اعمال بار اضافی آغاز می‌گردد. تحکیم منجر به نشست و انتقال تدریجی بار از خاک نرم به ستون سنگی می‌شود. انتقال تدریجی بار از خاک نرم به ستون سنگی باعث افزایش نسبت تمرکز تنش خاک تقویت شده می‌شود. هنگامی که نسبت تمرکز تنش به اوج خود می‌رسد، تحکیم خاک نرم تقریباً کامل می‌شود و تغییر شکل ستون سنگی و خاک نرم تحت بار اضافی متوقف می‌شود. در تکمیل ادغام تحت بار اضافی، نسبت تمرکز تنش تقریباً ثابت می‌گردد (شکل ۱۰) (کومار و سامانتا، ۲۰۲۰).

طریق اثر غشای کششی تقسیم می‌شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۲). داس و دب (۲۰۱۸) پارامتر نسبت تمرکز تنش را بین ستون سنگی و خاک اطراف، تحت بارگذاری خاکریز اندازه‌گیری کرده و دریافتند که نسبت تمرکز تنش به ارتفاع بحرانی خاکریز، زمان و نسبت مدول ستون سنگی و خاک اطراف وابسته است. همچنین، طیف عملی پارامترهای مختلف خاک نرم تقویت شده با ستون سنگی مانند: نسبت جایگزینی مساحت، خواص مصالح ستون سنگ، ضخامت پوشش شنی بالا و مقاومت برشی زهکشی نشده خاک اطراف آن، توسط کومار و سامانتا (۲۰۲۰) مورد مطالعه قرار گرفت. نسبت تمرکز تنش به طور قابل توجهی تحت تأثیر ضخامت پلتفرم شنی بالای شمع است. با این حال، تأثیر ناچیزی از ویژگی‌های مصالح پلتفرم روی نسبت تمرکز تنش

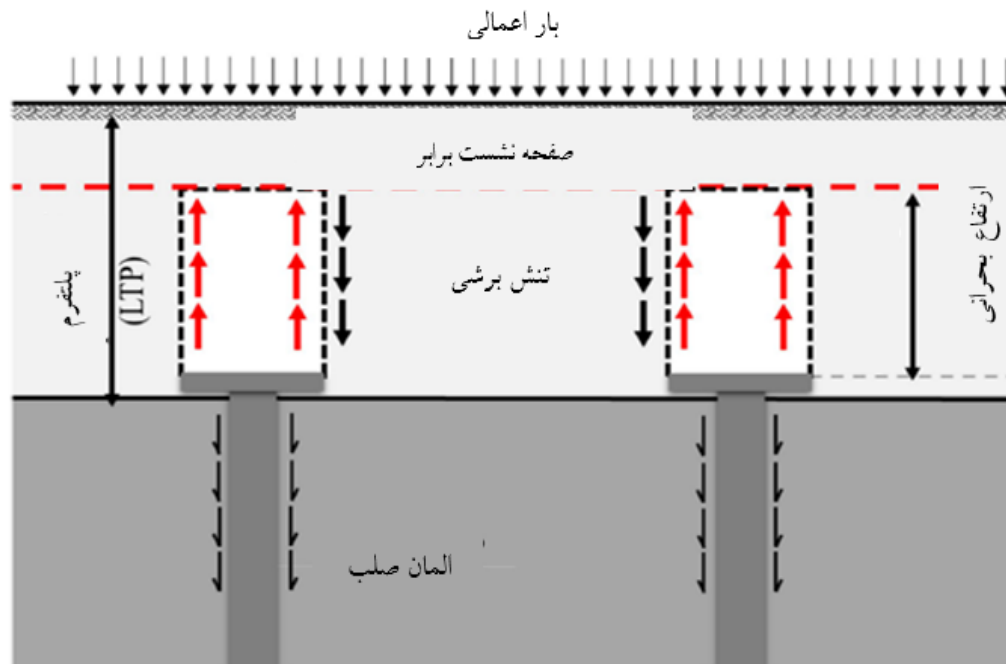


شکل ۱۰. تغییر در  $SCR_P$  در مقابل ضخامت لایه پلتفرم برای مصالح مختلف ستون ( $A_r = 17\%$ ) (کومار و سامانتا، ۲۰۲۰)

ژئوسنتتیک به عنوان یک غشای کششی، برای انتقال بار خاکریزی به ستون‌ها عمل می‌کند. چنانچه پلتفرم ضخامت کافی داشته باشد انتظار می‌رود که نیروهای برشی در یک صفحه افقی در خاکریز به نام صفحه‌ی نشست مساوی (نشست تفاضلی صفر) خاتمه یابد. به فاصله‌ی بالای کلاهک شمع تا صفحه نشست مساوی در خاکریز، ارتفاع بحرانی گفته می‌شود (شکل ۱۱).

## ۵. تأثیر پلتفرم مسلح‌شده بر مکانیزم انتقال بار

پلتفرم لایه‌ای شنی است که معمولاً در بالای شمع‌ها به منظور کمک به توزیع یکنواخت تنش و زهکش افقی برای دفع آب منفذی عمل می‌کند. هان و گابر (۲۰۰۲) مکانیزم انتقال بار پلتفرم روی خاک نرم را مطالعه و گزارش کردند که پلتفرم حاکی تقویت شده با یک لایه



شکل ۱۱. ارتفاع بحرانی و صفحه نشست برابر (ناتون، ۲۰۰۷)

تقویت می‌شود، به عنوان یک پلتفرم سخت رفتار می‌کند ( دانگ و همکاران، ۲۰۲۱). وو و همکاران (۲۰۲۲) در بررسی مدل آزمایشی با ساتریفیوژ نشان دادند که تنظیم ژئوگرید انتها قلاب شده در لایه پلتفرم معادل لنگر انداختن ژئوگرید در پنجه خاکریز و موجب تقویت اندرکنش خاک و ژئوگرید می‌گردد. لایه پلتفرم تقویت شده با ژئوگرید سخت‌تر، و یا چند لایه ژئوگرید باعث افزایش پایداری و انتقال بار خاکریز می‌شود. کینگ و همکاران (۲۰۱۷) مدل تغییر شکل قوسی و رابطه تجربی با نشست پلتفرم، رابطه بین سرویس‌پذیری و پارامترهای خاک نرم و شرایطی که منجر به فروپاشی تدریجی خاکریز مسلح‌شده متکی بر شمع می‌شود را بررسی کردند (کینگ و همکاران، ۲۰۱۷). اوکیای و دیاس (۲۰۱۰) با تحلیل‌های عددی از مکانیزم انتقال بار پلتفرم توسط خاک‌های آهکی و سیمانی، به این نتیجه رسیدند که پارامترهای مقاومت پلتفرم تأثیر مهمی بر کارایی دارند و انتقال بار به فاصله شمع‌ها و ضخامت پلتفرم مربوط می‌شود.

اگر ارتفاع خاکریزی کمتر از سطح نشست مساوی باشد، پدیده قوس‌زدگی غالب نیست. از آنجایی که قوس‌زدگی به طور کلی در این بخش از سیستم رخ می‌دهد، رفتار مصالح پلتفرم برای بهبود مکانیزم انتقال بار سیستم صلب حیاتی است. مکانیزم‌های برشی، اثر قوس در پلتفرم را هدایت می‌کنند. همچنین، تمرکز بر بررسی تأثیر اصطکاک مصالح پلتفرم و زوایای اتساع ضروری است (ربولد و کاروالیو، ۲۰۱۹؛ جنک و همکاران، ۲۰۰۷). در ارزیابی کاربرد ترکیبی ژئوسنتتیک و ستون‌های صلب و ستون سنگی در ساخت عملی خاکریزهای متکی بر ستون با و بدون پلتفرم دانه‌ای تقویت شده با ژئوگرید و ژئوسل روی خاک‌های نرم مطالعاتی انجام شده است. دست‌آورد آنها تأکید می‌کند که با وجود پلتفرم تقویت شده، ظرفیت باربری بیشتر بهبود می‌یابد. همچنین، تغییر شکل جانبی، خصوصاً در بالای ستون‌های سنگی کاهش می‌یابد (بریانکون و سیمون، ۲۰۱۲؛ مهران‌نیا و همکاران، ۲۰۱۸؛ گائو و همکاران، ۲۰۲۰؛ بورا و دش، ۲۰۱۲؛ شاهمندی و همکاران، ۲۰۲۳). هنگامی که پلتفرم خاک دانه‌ای با چند لایه مسلح‌کننده ژئوسنتتیک

## ۶. مطالعات میدانی

مکانیزم انتقال بار در خاکریزهای مسلح‌شده با ژئوسنتتیک و متکی بر شمع، از ترکیب پدیده‌های مختلف است که نیاز به در نظر گرفتن چندین برهمکنش بین ژئوسنتتیک-خاک-شمع دارد. برای مقایسه و بررسی سه روش ذکر شده (BS8006, EBGeo & CUR226) از ۹ مورد مطالعه میدانی استفاده شده است که در ادامه معرفی می‌گردند.

مورد اول مربوط به چن و همکاران (۲۰۲۰) می‌باشد. این مطالعه، مجموعه‌ای از آزمایش‌های میدانی را روی یک خاکریز متکی بر شمع و مسلح‌کننده ژئوسنتتیک که روی رسوبات دریایی نرم در منطقه ساحلی در کشور چین ساخته شده، را بررسی می‌کند. ترکیبی از آزمایش‌های میدانی و مدل‌های تحلیلی را برای بررسی نسبت سهم بار و کارایی سیستم خاکریزی متکی بر شمع استفاده می‌کند. خاکریز مورد مطالعه آنها با شمع‌های بتنی و آرایش مربعی و بدون پلتفرم و با استفاده از دو لایه ژئوگرید در خاکریز ساخته شده است. مورد دوم، مطالعه لی و همکاران (۲۰۱۹) است که عملکرد یک خاکریز متکی بر شمع و تقویت‌شده با ژئوسنتتیک و بدون تقویت‌کننده ژئوسنتتیک، با استفاده از آزمایش‌های مقیاس کامل است. آزمایش‌های مدل در مقیاس کامل در یک گودال بتنی با عمق ۳ متر، به عرض ۵ متر و طول ۱۵ متر، انجام شده است. شمع‌های مورد استفاده فولادی و در الگوی مربعی و پلتفرمی به ضخامت ۰/۱۵ متر می‌باشد. مورد سوم، مطالعه لو و همکاران (۲۰۱۹) است که با آزمایش‌های میدانی مربوط به پروژه تعریض خاکریزی در یانگژو، چین محدود می‌شود و هدف آن، ارزیابی توسعه قوس‌بندی خاک در یک خاکریز گسترده و تحلیل سهم بار بین شمع و خاک در زیر خاکریز در حال تعریض با در نظر گرفتن اثر قوس‌زدگی خاک است. برای تقویت خاکریزی گسترده از شمع اختلاط عمیق و الگوی آرایش مثلثی و لایه پلتفرم به ضخامت ۰/۳ متر و یک لایه

ژئوگرید تک‌محوری استفاده شده است. مورد چهارم، مطالعه بریانکون و سیمون (۲۰۱۷) است که مربوط به پروژه خط راه‌آهن سریع‌السیر اروپای آتلانتیک جنوبی که قبل از اتمام کار به باتلاق می‌رسد. برای بررسی کارایی روش خاکریز مسلح‌شده با ژئوگرید و متکی بر شمع و خاکریز متکی بر شمع بدون مسلح‌کننده برای خاکریزهای راه‌آهن با سرعت زیاد در خاک نرم است. در آن پروژه از شمع بتنی با آرایش مربعی، پلتفرمی به ضخامت ۰/۷ متری و دو لایه ژئوگرید استفاده شده است. مورد پنجم، مطالعه ژانگ و همکاران (۲۰۱۶) است که هدف از مطالعه آنها بهبود درک مکانیسم انتقال بار خاکریز متکی بر ستون سنگی شناور و آرایش مثلثی، پلتفرمی به ضخامت ۰/۳ متر و دو لایه ژئوگرید در مقیاس کامل روی خاک رس سیلتی با قابلیت تراکم متوسط به عنوان بخشی از راه‌آهن پرسرعت لیوژو به نانینگ چین است. آنها رویکرد تحلیلی جدید سه‌بعدی بر اساس آزمایش‌های میدانی جامع ارائه دادند. مورد ششم، مطالعه چن و همکاران (۲۰۱۶) است که یک مدل آزمایشی در مقیاس کامل از خاکریز راه‌آهن پرسرعت در یک محفظه آزمایش با عرض ۵/۵ متر، طول ۱۵ متر و ارتفاع ۴ متر در دانشگاه ژجیانگ چین است. برای ارزیابی نیروی کششی ژئوگرید تعبیه شده در پلتفرم شنی به ضخامت ۰/۵ متر است. مورد هفتم، مطالعه بریانکون و سیمون (۲۰۱۲) است که آزمایشی در مقیاس کامل از خاکریز مسلح‌شده با یک لایه ژئوگرید و متکی بر شمع بتنی با آرایش مربعی روی خاک نرم را توصیف می‌کند که در پروژه تحقیقاتی ملی فرانسه که در ۲۰ کیلومتری شمال شرقی پاریس قرار دارد. این آزمایش تأثیر پلتفرم شنی به ضخامت ۰/۵ متری و تقویت شده با ژئوسنتتیک در مکانیسم‌های انتقال بار را نشان می‌دهد. مورد هشتم، مطالعه چن و همکاران (۲۰۱۰) با داده‌های میدانی بزرگراه TJ در جنوب شرقی استان ژجیانگ در چین با خاکریزی متکی بر شمع بتنی و آرایش مربعی، بدون

ضخامت ۰/۵ متر و با دو لایه ژئوگرید برای بزرگراه نینگبو، استان ژجیانگ، چین، مورد مطالعه قرار دادند. خلاصه‌ای از مشخصات مقالات مورد مطالعه در جدول ۳ ارائه می‌گردد. در جدول ۴، مقادیر پارامترهای مورد نظر برای کارایی، نسبت تمرکز تنش، نشست تفاضلی و حد اکثر نیروی کششی ژئوستتیک براساس سه روش یاد شده محاسبه و ارائه شده است.

پلتفرم و با یک لایه ژئوگرید است. با داده‌های پایش‌شده میدانی از فشارهای تماسی که روی شمع‌ها و خاک‌ها تأثیر می‌گذارند، استفاده کرده تا نشست‌های شمع‌ها و خاک را گزارش و مورد بحث قرار دهند. مورد نهم، مطالعه لیو و همکاران (۲۰۱۵) است که استفاده از روش ستون سنگریزه دوغاب‌ریزی شده را برای ساخت یک خاکریز متکی بر شمع با آرایش مربعی و با پلتفرمی به

جدول ۳. چکیده ای از مشخصات مقالات میدانی مورد مطالعه

| مطالعات میدانی | مراجع                   | مشخصات خاکریز |                  |        |        |             |                  | آرایش شمع‌ها |          |      | سختی بستر      | سختی کششی ژئوستتیک | مساحت جایگزین |
|----------------|-------------------------|---------------|------------------|--------|--------|-------------|------------------|--------------|----------|------|----------------|--------------------|---------------|
|                |                         | H(m)          | $\gamma(kN/m^3)$ | Q(kPa) | C(kPa) | $\phi(deg)$ | $\phi_{eq}(deg)$ | $s_x(m)$     | $s_y(m)$ | a(m) | $k_s(kPa/m^3)$ | $J_{GR}(Kn/m)$     | IAR(%)        |
| 1              | Chen et al. (2020)      | 3             | 22               | 50     | 5      | 39          | 42.5             | 3            | 3        | 1.8  | 459            | 5080               | 36            |
| 2              | Lee et al. (2019)       | 2.55          | 20.2             | 0      | 0      | 33          | -                | 1.2          | 1.2      | 0.4  | 250            | 422                | 11.1          |
| 3              | Lu et al. (2019)        | 7.34          | 20               | 0      | 10     | 30          | 32.5             | 2.8          | 2        | 1.4  | 2300           | 1100               | 35            |
| 4              | Briancon & Simon (2017) | 4.25          | 21               | 0      | 0      | 35          | -                | 1.6          | 1.6      | 0.7  | 520            | 13272              | 2.8           |
| 5              | Zhang et al. (2016)     | 12.7          | 20               | 0      | 0      | 40          | -                | 1.86         | 1.86     | 0.89 | 1000           | 2000               | 22.9          |
| 6              | Chen et al. (2016)      | 3.2           | 21.2             | 12.55  | 12     | 42          | 47               | 1.8          | 1.8      | 1    | -              | 2459               | 30.9          |
| 7              | Briancon & Simon (2012) | 5             | 18.5             | 0      | 17.3   | 36          | 42.5             | 2.4          | 2.4      | 0.7  | 365            | 750                | 8.5           |
| 8              | Chen et al. (2010)      | 6             | 21               | 0      | 10     | 32          | 35               | 2            | 2        | 1    | 520            | 1500               | 25            |
| 9              | Liu et al. (2015)       | 4.6           | 19               | 0      | 11     | 30          | 35               | 2.4          | 2.4      | 1    | 316            | 1125               | 17.36         |

جدول ۴. مقایسه نتایج میدانی با سه روش طراحی CUR226, EBGeo, BS8006

| مطالعه میدانی | مقادیر میدانی |      |         |                | آیین‌نامه (2010) BS8006 |      |         |                | آیین‌نامه (2011) EBGeo |      |         |                | آیین‌نامه (2016) CUR226 |       |         |                |
|---------------|---------------|------|---------|----------------|-------------------------|------|---------|----------------|------------------------|------|---------|----------------|-------------------------|-------|---------|----------------|
|               | E%            | SCR  | DS (mm) | $T_{GR}(kN/m)$ | E%                      | SCR  | DS (mm) | $T_{GR}(kN/m)$ | E%                     | SCR  | DS (mm) | $T_{GR}(kN/m)$ | E%                      | SCR   | DS (mm) | $T_{GR}(kN/m)$ |
| ۱             | 81.2          | 10   | 27.5    | 8.6            | 79                      | 7.09 | 92      | 79             | 90                     | 16   | 73      | 51.3           | 90                      | 9     | 49.8    | 23.4           |
| ۲             | 76.4          | 25.9 | -       | -              | 68                      | 3.7  | 147     | 37.97          | 62                     | 12.8 | 114     | 23.2           | 63.7                    | 10.4  | 84      | 12.66          |
| ۳             | 68.6          | 3.62 | 12.33   | 3.7            | 83.5                    | 19.6 | 181     | 49.2           | 86                     | 11.5 | 79      | 9.35           | 83.7                    | 5.14  | 21      | 3.85           |
| ۴             | 88            | 304  | 29.2    | 74.85          | 83.3                    | 11.7 | 46      | 94             | 80.2                   | 17.1 | 78      | 265.4          | 81.6                    | 4.4   | 62.8    | 172.5          |
| ۵             | 69.2          | 6.96 | 9.6     | 8.3            | 94                      | 43.2 | 95.5    | 52             | 90.25                  | 31.2 | 54.7    | 17             | 90                      | 8.5   | 42      | 10             |
| ۶             | 72            | 5.8  | 35      | 17.93          | 86                      | 14.6 | 62      | 39.4           | 93.6                   | 33   | 60      | 36.88          | 77.6                    | 11.42 | 43.8    | 19.7           |
| ۷             | 88.8          | 53.6 | 41      | 6.5            | 66                      | 3.9  | 446     | 138.2          | 51.14                  | 11.3 | 239     | 39.8           | 77.4                    | 3.43  | 167.8   | 19.5           |
| ۸             | 87.6          | 15.2 | 9.1     | -              | 86.5                    | 19.2 | 116     | 53.86          | 82.6                   | 15.2 | 93      | 34.5           | 82                      | 4.6   | 67      | 18             |
| ۹             | 77.7          | 8    | 40      | -              | 71.6                    | 14.1 | 241     | 88.95          | 50.3                   | 4.82 | 160     | 39.4           | 68.8                    | 2.2   | 124     | 23.6           |

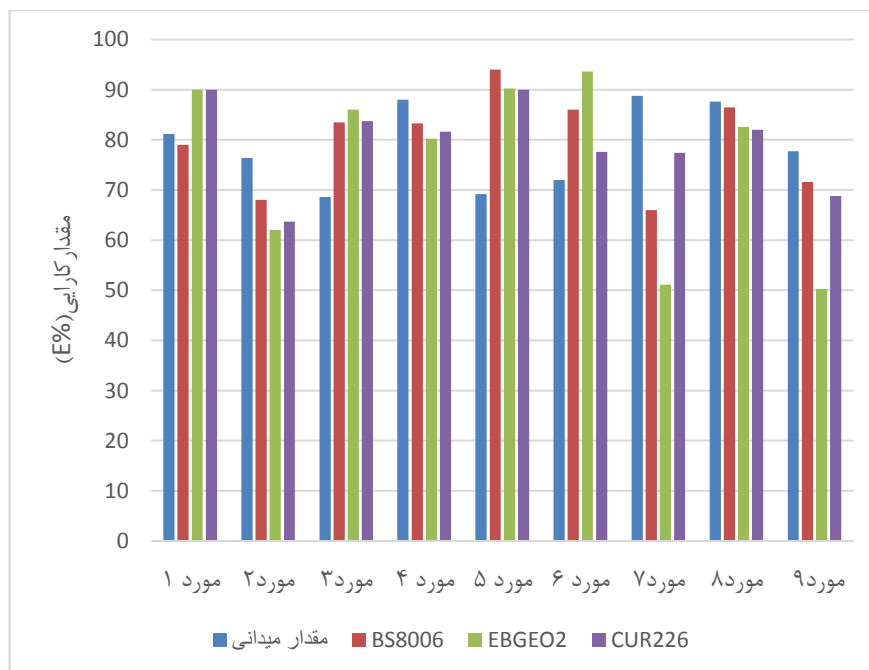
است و در مواردی مانند مورد ۵ که ارتفاع بلندتری دارد یا موارد ۶ و ۷ که چسبندگی بیشتری دارند اختلاف مقدار اندازه‌گیری شده با روش BS8006 بیشتر است. برای روش EBGeo و روش CUR226 مورد های ۲، ۴، ۷، ۸ و ۹ کارایی محاسبه شده کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده و در دیگر موارد بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده است. در موارد ۱، ۳، ۵ و ۶، سختی کششی بالای ژئوستتیک در این‌ها مشترک است به استثنای مورد ۴، که از تمام

۱-۶. کارایی شمع  
شاخص کارایی شمع ( $E(\%)$ )، به عنوان بخشی از بار کل خاکریزی که توسط شمع‌ها حمل می‌گردد، تعریف می‌شود. نتایج مقایسه کارایی شمع، مطابق شکل ۱۲ ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۲، مشاهده می‌شود که در موارد مطالعاتی ۱، ۲، ۴، ۸ و ۹، روش BS8006 اختلاف کمتری با مقدار اندازه‌گیری شده دارد. در این موارد، ارتفاع خاکریز و چسبندگی نسبت به موارد دیگر کمتر

مقایسه گزینه‌های طراحی خاکریزهای مسلح‌شده با ژئوستتیک مستقر بر شمع در زیرساخت‌های حمل‌ونقل در آیین‌نامه‌های اروپایی

به بررسی‌های انجام شده بهتر است که برای ارتفاع خاکریز محدوده‌ای تعیین گردد یا ضرایبی اعمال شود تا این اختلاف به حداقل برسد. در موارد ۶، ۷ و ۹، آنچه که متمایز کننده است مقدار چسبندگی است که مقدار بیشتری دارد. لذا بهتر است با وارد کردن ضریبی، اثر چسبندگی در روابط لحاظ گردد.

موارد بیشتر است. در مورد ۵ که دارای ارتفاع ۱۲/۷ متر است، در هر سه روش مقدار بزرگتری برای کارایی نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده ارائه می‌دهند. با توجه به اینکه در مورد ۵ چسبندگی صفر است و بقیه موارد این خاکریز مطابق با مطالعات گذشته طیف معمولی دارند تنها عامل ایجاد اختلاف را می‌توان به ارتفاع معطوف کرد. با توجه



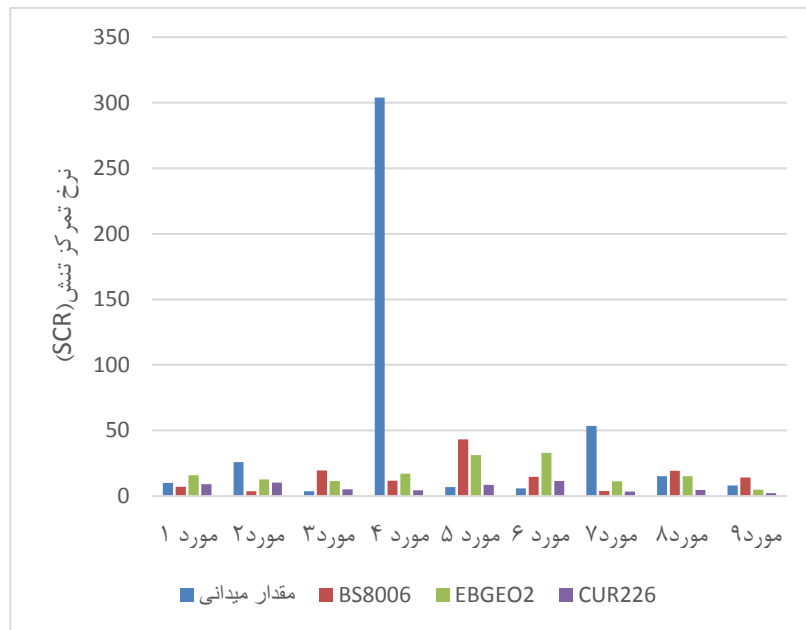
شکل ۱۲. مقایسه کارایی محاسبه شده با روش‌های طراحی با مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی

برای محاسبه کارایی، روش BS8006 و بعد روش CUR226 و سپس EBGeo2 عملکرد بهتری دارد.

متفاوتی دارند، نسبت تمرکز تنش ثابت نبوده و به ویژگی‌های ستون، خاک و سطوح تنش کرنش وابسته است. افزایش نسبت تمرکز تنش نشان‌دهنده انتقال تنش از خاک به ستون بوده است. در حالی که کاهش آن نشان‌دهنده انتقال تنش از ستون به خاک می‌باشد (هان، ۲۰۱۵). نرخ تمرکز تنش برای ۹ مطالعه موردی در شکل ۱۳ ارائه شده است.

## ۲-۶. نرخ تمرکز تنش (SCR)

نسبت تنش در ستون به مقدار تنش در خاک را نسبت تمرکز تنش می‌نامند که اغلب برای توصیف انتقال بار بین ستون و خاک نرم به کار می‌رود. اگر چه شرایط تنش معادل، ستون‌ها و خاک یک تنش مشابه را تحمل می‌کنند اما دارای نشست‌های مختلف می‌باشند. از آنجایی که ستون‌ها و خاک‌ها روابط تنش-کرنش



شکل ۱۳. مقایسه نرخ تمرکز تنش محاسبه شده با روش‌های طراحی با مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی

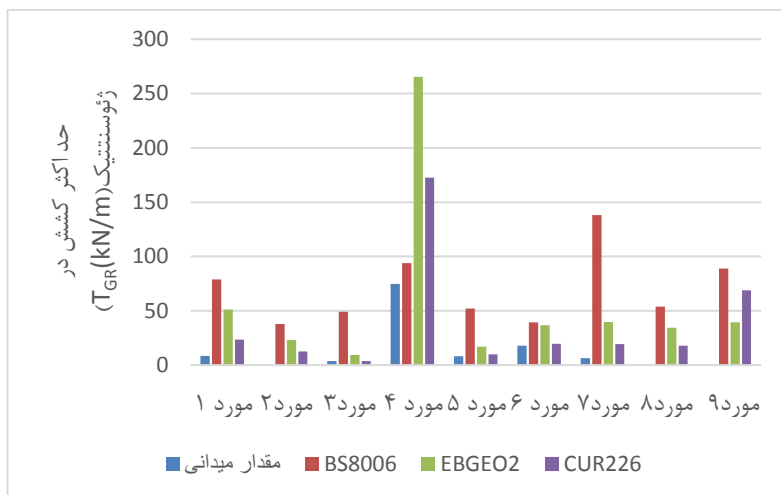
مورد ۷ و مورد ۶ مشاهده می‌شود که مورد ۶ که چسبندگی کمتری دارد، روش‌های ذکر شده عملکرد بهتری دارند. از بین سه روش ذکر شده، روش CUR226 برای محاسبه تنش وارد بر شمع و خاک از دقت بیشتری برخوردار است.

### ۳-۶. حداکثر نیروی کششی در مسلح‌کننده ( $T_{GR}$ )

در شکل ۱۴، مقایسه حداکثر نیروی کششی مسلح‌کننده در ۹ مورد مطالعه به سه روش BS8006, CUR226, EBGEO با مقدار اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. در هر سه روش ذکر شده، مقدار محاسبه شده با مقدار اندازه‌گیری شده اختلاف قابل توجهی دارد. روش CUR226 در بیشتر موارد عملکرد بهتری در محاسبه حد اکثر کشش در ژئوستتیک ارائه کرده است. این اختلاف نشان می‌دهد که روابط ارائه شده برای محاسبه حد اکثر کشش در ژئوستتیک نیاز به اصلاح و تغییر دارند و هر سه روش بهتر است آنالیز حساسیت و اهمیت پارامترها را انجام دهند و روابط اصلاح گردند.

نرخ تمرکز تنش از نسبت تنش وارد شده بر شمع به تنش وارد شده بر خاک و مسلح‌کننده به‌دست می‌آید. شکل ۱۳ نشان می‌دهد که در اکثر موارد بجز موارد ۴، ۷ و ۹، روش CUR226 عملکرد بهتری داشته است. در مورد ۴ که سختی کششی مسلح‌کننده بسیار بزرگتر از موارد دیگر است هر سه روش اختلاف زیادی با مقدار اندازه‌گیری شده دارند. در مورد ۴ که سختی کششی بزرگ می‌باشد، می‌توان گفت که مسلح‌کننده همانند تیر عمل کرده است و بیشتر بار را به شمع منتقل می‌کند. در موارد ۷، ۸ و ۹، آنچه که متمایزکننده است مقدار چسبندگی خاکریز است. بجز موارد ذکر شده، در بقیه موارد روش CUR226 عملکرد بهتری برای محاسبه نرخ تمرکز تنش دارد. از بین موارد مطالعاتی، مورد ۲ با کمترین ارتفاع و مورد ۷ با بیشترین چسبندگی مشاهده می‌گردد که مقدار نرخ تمرکز تنش اندازه‌گیری شده با مقدار محاسبه شده در هر سه روش ذکر شده اختلاف قابل توجهی دارد. این امر اهمیت ارتفاع و چسبندگی خاکریز را نشان می‌دهد که هر دو از پارامترهای تأثیرگذار در خاکریز مسلح‌شده متکی بر شمع می‌باشند. از مقایسه

مقایسه گزینه‌های طراحی خاکریزهای مسلح‌شده با ژئوسنتتیک مستقر بر شمع در زیرساخت‌های حمل و نقل در آیین‌نامه‌های اروپایی

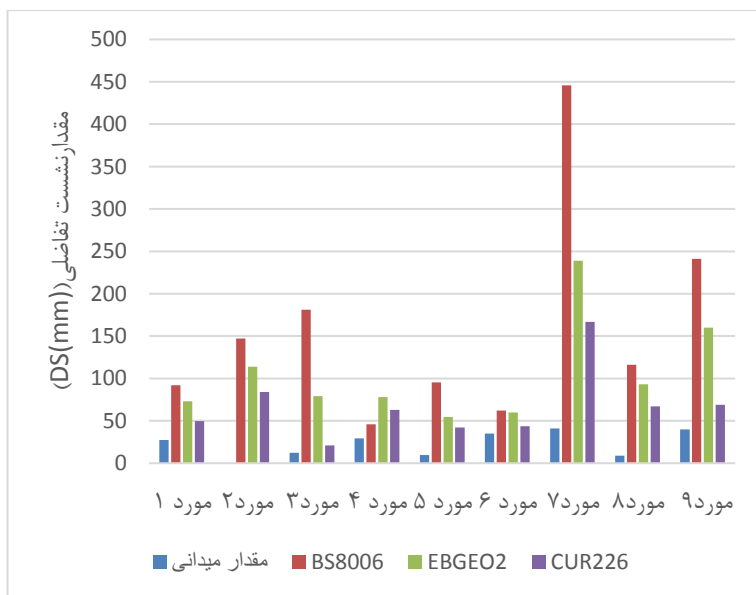


شکل ۱۴. مقایسه کشش حد اکثر ژئوسنتتیک محاسبه شده با روش‌های طراحی با مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی

#### ۶-۴. نشست تفاضلی بستر (SD)

است. نشست تفاضلی معادل تغییرشکل ژئوسنتتیک در نظر گرفته می‌شود. مطابق شکل ۱۵، در همه موارد، مقادیر به‌دست آمده از سه روش از مقدار اندازه‌گیری شده میدانی بیشتر است و در بین سه روش اختلاف روش BS از مقدار اندازه‌گیری شده بسیار بیشتر است. این نشان‌دهنده این است که در محاسبه تغییرشکل مسلح‌کننده، رابطه ارائه شده عملکرد ضعیفی دارد. در روش CUR مقادیر محاسبه شده نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده اختلاف کمتری دارند.

اختلاف نشست بین کلاهک شمع و تراز خاک نرم بین دو شمع، نشست تفاضلی نامیده می‌شود. در مورد خاکریزهای مسلح‌شده با ژئوسنتتیک و مستقر بر شمع، نشست تفاضلی نیز برابر با حد اکثر تغییرشکل قائم ژئوسنتتیک بین دو شمع است لازم به ذکر است که در صورتی می‌توان انحراف ژئوسنتتیک را به‌دست آورد که حد اکثر کشش ژئوسنتتیک مشخص باشد. در شکل ۱۵، نشست تفاضلی برای ۹ مطالعه مورد بررسی ارائه شده



شکل ۱۵. مقایسه نشست تفاضلی محاسبه شده با روش‌های طراحی با مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی

## ۷. پیشنهادها برای مطالعات آینده

بیشتر مطالعات انجام شده روی خاکریزهای مسلح شده با ژئوسنتتیک و متکی بر شمع، به صورت بخشی محدود به اجزای خاصی از این سیستم پیچیده بوده است. برای درک بهتر و ارائه الگوها در داده‌های موجود، نیاز به بررسی روابط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها (مانند پارامترهای مؤثر و عملکردهایی نظیر نشست و ضریب اطمینان) می‌باشد. این موضوع، به ویژه در زمینه انتقال بار، اهمیت دارد و مطالعات محدودی در این راستا انجام شده است. در روش‌های طراحی، کمتر به بحث اندرکنش خاکریز-شمع-خاک بستر و تأثیر مسلح‌کننده، خاک بستر نرم اطراف شمع، نیروهای افقی و اثر موقعیت مسلح‌کننده پرداخته شده است. همچنین، اثر گروهی و سختی شمع و نرخ مساحت بهبود یافته و تغییر تراز آب در خاک نرم بستر نیز در مراحل تئوری قوس‌زدگی و تئوری غشای کششی به طور کامل بررسی نشده‌اند. رفتار نشست سطحی خاکریز و پشتیبانی متقابل خاک نرم برای درک نیاز به مقاومت کششی طولانی مدت ژئوسنتتیک در خاکریزهای روی شمع، باید مورد بررسی قرار گیرد. بررسی پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد خاکریزهای مسلح متکی بر شمع‌های و تأثیر نوع ستون و مسلح‌کننده (مسطح یا سه‌بعدی) بر لایه پلتفرم و قوس خاک نیز از دیگر موضوعات پژوهشی است که به صورت محدود مورد توجه قرار گرفته و نیازمند مطالعات بیشتر می‌باشد. بررسی‌های انجام شده روی سه روش طراحی BS8006, CUR227, EBGeo نشان داد که علی‌رغم پیشرفت‌های قابل توجه در طراحی و اجرای خاکریزها، هنوز نقاط ضعفی وجود دارد که باید به آن‌ها پرداخته شود. به طور کلی، گسترش دامنه تحقیقات در این زمینه می‌تواند به بهبود طراحی و کارایی خاکریزهای مسلح شده با ژئوسنتتیک برای زیرساخت‌های اصلی مانند جاده‌ها و راه‌آهن کمک کند و زمینه‌ساز نوآوری‌های جدید در مهندسی ژئوتکنیک باشد.

## ۸. جمع‌بندی

در این مقاله، به مروری کلی بر مفاهیم و مکانیزم انتقال

بار خاکریزهای مسلح شده با ژئوسنتتیک و متکی بر شمع پرداخته شد. بررسی سیستماتیک ادبیات موجود، مطالعات موردی در خصوص مقایسه روش‌های طراحی BS8006, EBGeo, CUR226 با مقدار میدانی صورت گرفت. در ادامه، نتیجه‌گیری بر اساس مطالعه انجام شده ارائه می‌شود.

۱. یکی از نکات کلیدی تأثیر موقعیت و سختی کششی مسلح‌کننده‌ها بر عملکرد خاکریزهای متکی بر شمع است که باعث بهبود عملکردی کل سیستم می‌گردد. روابط ارائه شده در سه روش ذکر شده، نیاز به اعمال و اصلاح دارد. همچنین، بررسی‌ها نشان می‌دهد که انتخاب نوع مناسب ژئوسنتتیک و نحوه قرارگیری آن می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر نشست و پایداری خاکریز داشته باشد. به همین دلیل، پیشنهاد می‌شود که محققان آینده بررسی دقیق‌تری از اثرات مختلف مسلح‌کننده‌ها و طراحی‌های نوآورانه بپردازند تا بتوانند راهکارهای بهینه‌تری برای بهبود عملکرد خاکریزها ارائه دهند.

۲. استفاده از ژئوسل با توجه به هندسه سه‌بعدی و مکانیزم عملکردی آن که شامل اثر غشای کششی، محصورشدگی و توزیع تنش، تأثیر بیشتری نسبت به ژئوگرید، بر عملکرد سیستم خاکریز مسلح متکی بر شمع دارد. طبق مطالعات انجام شده خاکریزهای مسلح شده با ژئوسل و متکی بر شمع برای ساخت و تعمیر زیرساخت‌ها، خصوصاً برای راه‌آهن و قطار سریع‌السیر، عملکرد بهتری دارد. در سه روش یاد شده و مقالات کمتر مورد توجه بوده است و نیاز به بررسی و ارائه روابط برای تحلیل مکانیزم و طراحی دارد.

۳. براساس مطالعات انجام شده، پارامترهای مؤثر بر قوس‌زدگی شامل ارتفاع و مشخصات مصالح خاکریز، موقعیت و سختی کشش ژئوسنتتیک، نسبت مدول شمع به خاک می‌باشند. در دستورالعمل‌ها، در روابط ارائه شده برای محاسبه اثر قوس‌زدگی، اثر چسبندگی مصالح خاکریز صفر در نظر گرفته شده است. این امر باعث شده که مقادیر کارایی، نرخ تمرکز تنش، حد اکثر کشش ژئوسنتتیک و نشست تفاضلی با مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی اختلاف قابل توجهی داشته باشند. این موضوع

مقایسه گزینه‌های طراحی خاکریزهای مسلح‌شده با ژئوسنتتیک مستقر بر شمع در زیرساخت‌های حمل‌ونقل در آیین‌نامه‌های اروپایی

همچنین، با پلتفرم تقویت شده، ظرفیت باربری بیشتر بهبود می‌یابد. تغییر شکل جانبی، خصوصاً در بالای ستون‌های سنگی، کاهش می‌یابد. لذا بهتر است بررسی و اعمال مشخصات این بخش در محاسبات و روابط ارائه شده در نظر گرفته شود.

۶. بررسی روش‌های طراحی BS8006, CUR227, EBGeo با مقادیر به‌دست آمده میدانی نشان داد که در محاسبه کارایی و نسبت تمرکز تنش و همچنین نشست تفاضلی و کشش حد اکثر در ژئوسنتتیک بهتر است متناسب با پارامترهای حساس و مهم مانند ارتفاع خاکریز، سختی کششی مسلح‌کننده آنالیز حساسیت انجام شود و محدوده‌ای برای پارامترهای با اهمیت بیشتر مشخص گردد.

بهتر است بیشتر مورد بررسی قرار گیرد و روابط اصلاح شوند.

۴. هر چه زاویه اصطکاک خاک خاکریز بیشتر باشد، قوس‌بندی بهتری در طول تحکیم ایجاد می‌شود. پس از تشکیل قوس اولیه، با افزایش بار روباره، تغییر نسبی بیشتر و برقراری مجدد برخی شرایط قوس رخ می‌دهد. چنین رفتاری باعث ایجاد حلقه‌های بازخورد مثبت بین تنش و نشست بالای ستون و خاک زیرین می‌شود. در روش‌های موجود، بحث بازیابی قوس و عوامل مؤثر بر آن کمتر مورد بررسی قرار گرفته است و نیاز به توجه بیشتری دارد.

۵. پارامترهای مقاومت پلتفرم تأثیر مهمی بر کارایی دارند. انتقال بار به فاصله شمع‌ها و ارتفاع پلتفرم مربوط می‌شود.

## ۹. فهرست علائم اختصاری

|                         |                                                                 |                                    |                                                                   |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| $A_s$ (m <sup>2</sup> ) | مساحت مؤثر                                                      | $k_s$ (kN/m <sup>3</sup> )         | سختی خاک بستر                                                     |
| $A_c$ (m <sup>2</sup> ) | مساحت شمع                                                       | $q$ or $Q$ (kPa)                   | سربار گسترده یکنواخت بر بالای خاکریز                              |
| $a$ (m)                 | عرض کلاهک شمع                                                   | SCR                                | نرخ تمرکز تنش                                                     |
| $A$                     | بار انتقالی مستقیم وارد بر شمع                                  | $s_x, s_y$ (m)                     | فاصله مرکز به مرکز شمع در جهت افقی و عمودی                        |
| $B$                     | بخشی از بار باقیمانده که از طریق ژئوسنتتیک به شمع منتقل می‌گردد | $L/2 = S/2$ (m)                    | وسط فاصله بین دو شمع                                              |
| BS8006                  | آیین‌نامه انگلستان                                              | $T(x), T_{GR}$ or $T_{max}$ (kN/m) | نیروی کششی حد اکثر ژئوسنتتیک                                      |
| $C$ (kPa)               | چسبندگی خاک                                                     | $\sigma_s^a$ (Pa)                  | تنش عمودی توزیع شده روی ژئوسنتتیک و خاک در اثر قوس‌زدگی           |
| $C$                     | بخشی از بار باقیمانده که خاک نرم بین دو شمع تحمل می‌کند         | $\sigma_c^a$ (Pa)                  | تنش وارد بر کلاهک شمع در اثر قوس‌زدگی                             |
| CUR226                  | آیین‌نامه هلند                                                  | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )      | وزن واحد مصالح خاکریز                                             |
| $d$ (m)                 | قطر شمع                                                         | $\phi$ (deg)                       | زاویه اصطکاک داخلی خاکریز                                         |
| DS (mm)                 | نشست تفاضلی                                                     | $\phi_{eq}$ (deg)                  | زاویه اصطکاک داخلی معادل                                          |
| %E                      | کارایی شمع                                                      | $\varepsilon$                      | کرنش ژئوسنتتیک                                                    |
| EBGeo                   | آیین‌نامه آلمان                                                 | $T_H$ (kN/m)                       | مولفه نیروی افقی در ژئوسنتتیک                                     |
| $H$ (m)                 | ارتفاع خاکریز                                                   | $T$ (kN/m)                         | نیروی کششی ژئوسنتتیک                                              |
| $F_{GRsquare}$          | کل بار عمودی اعمال شده توسط نیمکره‌های سه بعدی روی سطح مربعی    | $F_{GRstrips}$                     | کل بار عمودی اعمال شده توسط قوس‌های دو بعدی روی نوارهای ژئوسنتتیک |
| $hg$ (m)                | ارتفاع قوس‌زدگی                                                 | $s_d$ (m)                          | فاصله مورب بین دو شمع                                             |
| IAR (%)                 | نرخ مساحت جایگزین                                               | $J$ or $J_{GR}$ (N/m)              | سختی کششی ژئوسنتتیک                                               |

- Akosah, S., Chen, J. and Bao, N. 2022. "Reinforcement of problematic soils using geotextile encased stone/sand columns". *Arab. J. Geosci.*, 15: 1371. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10561-0>
- Almeida, M., Spotti, P., Santa Maria, P., Martins, I. and Coelho, L. 2000. "Consolidation of a very soft clay with vertical drains". *Geotech.*, 50(2): 633-643.
- Almeida, M., Marques, M. and Spotti, P. 2005. "Two case histories of vertical drains in very soft clays". *Elsevier Geo-Engineering Book Series*, 3: 145-157. [https://doi.org/10.1016/S1571-9960\(05\)80008-4](https://doi.org/10.1016/S1571-9960(05)80008-4)
- Balaban, E. and Onur, M. I. 2018. "A numerical model on geosynthetic reinforced pile supported embankments". *Anadolu Univ. J. Sci. Tech., A-Appl. Sci. Eng.*, 19(2): 484-498.
- Bora, M. and Dash, S. K. 2012. "Floating stone columns in soft clay with unreinforced and geocell reinforced sand cushion". *Proceedings of Indian Geotechnical Conference*, December 13-15, Delhi.
- Briançon, L. and Simon, B. 2012. "Performance of pile-supported embankment over soft soil: Full-scale experiment". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* doi:10.1061/(ASCE)GT 1943-5606.0000561
- Briançon, L. and Simon, B. 2017. "Pile-supported embankment over soft soil for a high-speed line". *Geosynth. Int.*, 24(3): 293-305.
- Briançon, L., Simon, B. and Auray, G. 2014. "Pile-supported embankment over soft soil for South Europe Atlantic High Speed Line". 10<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics, Berlin.
- BS 8006. 1995. "Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills". British Standards Institution, London, UK.
- BSI (2010) BS8006-1. 2010. "Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills". British Standards Institution, London, UK.
- Chen, R. P., Xu, Z. Z., Chen, Y. M., Ling, D. S. and Zhu, B. 2010. "Field tests on pile-supported embankments over soft ground". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 136: 777-785.
- Chen, R. P., Wang, Y. W., Ye, X. W., Bian, X. C. and Dong, X. P. 2016. "Tensile force of geogrids embedded in pile-supported reinforced embankment: A full-scale experimental study". *Geotext. Geomembranes*, 44(2): 157-169.
- Chen, R., Liu, Q., Wang, H. and Liu, Y. 2020. "Performance of geosynthetic-reinforced pile-supported embankment on soft marine deposit". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering*, <https://doi.org/10.1680/jgeen.19.00136>
- CUR 226. 2016. "Design guideline basal reinforced piled embankments". Van Eekelen, S. J. M. and Brugman, M. H. A., Editors, CRC Press, Delft, Netherlands.
- Dang, C., Dang, L., Khabbaz, H. and Sheng, D. 2021. "Numerical study on deformation characteristics of fibre-reinforced load-transfer platform and columns-supported embankments". *Can. Geotech. J.*, 58: 328-350. [dx.doi.org/10.1139/cgj-2019-0401](https://doi.org/10.1139/cgj-2019-0401)
- Das, A. K. and Deb, K. 2018. "Experimental and 3D numerical study on time-dependent behavior of stone column-supported embankments". *Int. J. Geomech.*, 18(4): 04018011-16. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001110](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001110)
- Dash, S. K. and Bora, M. C. 2013. "Improved performance of soft clay foundations using stone columns and geocell-sand mattress". *Geotext. Geomembranes*, 41: 26-35. doi:10.1016/j.geotexmem.2013.09.001
- Dash, S. K., Rajagopal, K. and Krishnaswamy, N. R. 2007. "Behaviour of geocell reinforced sand beds under strip loading". *Can. Geotech. J.*, 44(7): 905-916. doi:10.1139/t07-035.
- EBGEO (Empfehlungen für Bewehrungen mit Geokunststoffen) Q9. 2011. "Recommendation for design and analysis of earth structures using geosynthetic reinforcements". German Geotechnical Society, Berlin, Germany.
- Edries, N. M., Al-Atroush, M. E., Rashed, A. and Ahmed, S. M. 2023. "Estimation of the piled embankment critical height: A systematic review". *Innov. Infrastruct. Solut.*, 8: 84. <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01047-3>
- Fagundes, D. F., Almeida, M., Thorel, L. et al. 2016. "Load transfer mechanism and deformation of reinforced piled embankments". *Geotext. Geomembranes*. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2016.11.002>
- Gao, J., Xu, H., Qian, J. W., Gong, Y. F., Zhan, Y. F. and Chen, P. 2020. "Settlement behavior of soft subgrade reinforced by geogrid-encased stone column and geocell-embedded sand cushion: A numerical analysis". *Adv. Civ. Eng.*, <https://doi.org/10.1155/2020/8874520>
- Giroud, J. P., Bonaparte, R., Beech, J. F. and Gross, B. A. 1990. "Design of soil layer-geosynthetic systems overlying voids". *Geotext. Geomembranes*, 9(1): 11-50.
- Gniel, J. and Bouazza, A. 2009. "Improvement of soft soils using geogrid encased stone columns". *Geotext. Geomembranes*. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.11.001>

- Han, J. 2015. "Principles and practices of ground improvement". John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Han, J. and Gabr, M. A. 2002. "Numerical analysis of geosynthetic-reinforced and pilesupported earth platforms over soft soil". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 128(1): 44e53.
- Hewlett, W. and Randolph, M. 1988. "Analysis of piled embankments". *Ground Eng.*, 21: 12-18.
- Humphrey, D. N. and Holtz, R. D. 1989. "Effect of surface crust on reinforced embankment". *Proc. Geosynth.* 1: 136-147.
- Indraratna, B., Balasubramaniam, A. S. and Ratnayake, P. 1994. "Performance of embankment stabilized with vertical drains on soft clay". *J. Geotech. Eng.*, 120(2): 257-273.
- Indraratna, B., Ngo, N. T. and Rujikiatkamjorn, C. 2011. "Behavior of geogrid-reinforced ballast under various levels of fouling". *Geotext. Geomembranes*, 29(3): 313e322.
- Jaksa, M. B. 1995. "The influence of spatial variability on the geotechnical design properties of a stiff, overconsolidated clay". Thesis, The University of Adelaide.
- Jenck, O., Dias, D. and Kastner, R. 2007. "Two-dimensional physical and numerical modeling of a pile-supported earth platform over soft soil". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 133(3): 295. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:3\(295\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:3(295))
- Jewell, R. A. and Greenwood, J. H. 1988. "Long term strength and safety in steep soil slopes reinforced by polymer materials". *Geotext. Geomembranes*, 7: 81-118.
- Kempfert, H. G., Zeaske, D. and Alexiew, D. 1999. "Interactions in reinforced bearing layers over partial supported underground". *Proc. of the 12<sup>th</sup> ECSMGE, Amsterdam, Balkema, Rotterdam*, pp. 1527-1532.
- Kempfert, H. G., Gobel, C., Alexiew, D. and Heitz, C. 2004. "German recommendations for reinforced embankments on pile-similar elements". In *Proceedings of the 3rd European Geosynthetics Conference, Munich, Germany*, 1-3, pp. 279-284.
- King, D. J., Bouazza, A., Gniel, J. R., Rowe, R. K. and Bui, H. H. 2017. "Load-transfer platform behaviour in embankments supported on semi-rigid columns: implications of the ground reaction curve". *Can. Geotech. J.*, 54: 1158-1175. [dx.doi.org/10.1139/cgj-2016-0406](https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0406)
- Kumar, G. and Samanta, M. 2020. "Experimental evaluation of stress concentration ratio of soft soil reinforced with stone column". *Innov. Infrastruct. Solut.* <https://doi.org/10.1007/s41062-020-0264-6>
- Latha, G. M. and Rajagopal, K. 2007. "Parametric finite element analyses of geocell supported embankments". *Can. Geotech. J.*, 44(8): 917-927.
- Lee, T., Lee, S., Lee, I. W. and Jung, Y. H. 2019. "Quantitative performance evaluation of GRPE: A full-scale modeling approach". *Geosynth. Int.*, 27(3): 1-22. <https://doi.org/10.1680/jgein.19.00017>
- Li, A. L. and Rowe, R. K. 2001. "Combined effects of reinforcement and prefabricated vertical drains on embankment performance". *Can. Geotech. J.*, 38(6): 1266-1282.
- Liu, H., Ng, C. and Fei, K. 2007. "Performance of a geogrid-reinforced and pile-supported highway embankment over soft clay: Case study". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 133(12): 1483-1493. [doi:10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:12\(1483\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:12(1483))
- Liu, K. W. and Rowe, R. K. 2015. "Numerical study of the effects of geosynthetic reinforcement viscosity on behaviour of embankments supported by deep-mixing-method columns". *Geotext. Geomembranes*, 43(6): 567-578. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotextmem.2015.04.020>
- Liu, H., Kong, G., Chu, J. and Ding, X. 2015. "Grouted gravel column-supported highway embankment over soft clay: Case study". *Can. Geotech. J.*, 52(11): 1725-1733.
- Lu, W., Miao, L., Wang, F., Zhang, J., Zhang, Y. and Wang, H. 2019. "A case study on geogrid-reinforced and pile-supported widened highway embankment". *Geosynth. Int.* 27(3): 261-274. <https://doi.org/10.1680/jgein.19.00024>
- Mehrannia, N., Kalantary, F. and Ganjian, N. 2018. "Experimental study on soil improvement with stone columns and granular blankets". *J. Central South Univ.*, 25(4): 866-878. <https://doi.org/10.1007/s11771-018-3790-z>
- Naughton, P.J. 2007. "The significance of critical height in the design of piled embankments". *Proc Geo-Denver 2007*:18–21. [https://doi.org/10.1061/40916\(235\)3](https://doi.org/10.1061/40916(235)3)
- Ngo, N. T., Indraratna, B. and Rujikiatkamjorn, C. 2014. "DEM simulation of the behavior of geogrid stabilised ballast fouled with coal". *Comput. Geotech.*, 55: 224e231.
- Nunez, M. L., Briçon, B. and Dias, D. 2013. "Analyses of a pile-supported embankment over soft clay: Full-scale experiment, analytical and numerical approaches". *Eng. Geol.*, 153: 53-67. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.11.006>
- Okyay, U. S. and Dias, D. 2010. "Use of lime and cement treated soils as pile supported load transfer platform". *Eng. Geol.*, 114(1-2): 34-44. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.03.008>

- Pan, G., Liu, X., Yuan, S., Wang, Y., Sun, D., Feng, Y. and Jiang, G. 2022. "A field study on the arching behavior of a geogrid-reinforced floating pile-supported embankment". *Transport. Geotech.*, 37: 100795. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100795>
- Pham, V. H. 2018. "3D modelling of soft soil improvement by rigid inclusions- complex and cyclic loading". Thesis, Universite Grenoble Alpes. <https://theses.hal.science/tel-01920663>
- Pham, T. A. 2022. "Design and analysis of geosynthetic-reinforced and floating column-supported embankments". *Int. J. Geotech. Eng.*, 16(10): 1276-1292. doi:10.1080/19386362.2021.1997209
- Pham, T. A. and Dias, D. 2020. "Comparison and evaluation of analytical models for the design of geosynthetic-reinforced and pile-supported embankments". *Geotext. Geomembranes*, 49(3): 528-549. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.11.001>
- Pham, T. A. and Dias, D. 2021. "3D numerical study of the performance of geosynthetic-reinforced and pile-supported embankments". *Soils Found.*, 61(5): 1319-1342. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.07.002>
- Rebolledo, J. and Carvalho, J. 2019. "Performance evaluation of rigid inclusion foundations in the reduction of settlements". *J. Soils Rocks, São Paulo*, 42(3): 265-279.
- Rowe, R. K. and Li, L. L. 2005. "Geosynthetic-reinforced embankments over soft foundations". *Geosynth. Int.*, 12(1): 50-85.
- Rowe, R., Gnanendran, C., Landva, A. and Valsangkar, A. .J. 1995. "Construction and performance of a full-scale geotextile reinforced test embankment". *Can. Geotech. J.*, 32: 512-534.
- Shahmandi, A., Ghazavi, M., Barkhordari, K. and Hashemi, M. 2023. "The effect of using reinforced granular blanket and single stone column on improvement of sandy soil: Experimental study". *Int. J. Eng., Trans. B: Applications*, 36(8): 1532-1547.
- Shen, P., Xu, C. and Han, J. 2019. "Centrifuge tests to investigate global performance of geosynthetic-reinforced pile-supported embankments with side slopes". *Geotext. Geomembranes*, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.103527>
- Simon, B. 2012. "General report session 5- rigid inclusions and stone columns general concept differences between SCS and RIS". ISSMGE- TC 211 Int. Symp. Gr. Improv. 2012.
- Sitharam, T. G., Hegde, A. M. and Kolathayar, S. 2019. "Geocells advances and applications". ebook. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-6095-8>
- Tanyu, B. F., Aydılek, A. H., Lau, A. W., Edil, T. B. and Benson, C. H. 2013. "Laboratory evaluation of geocell-reinforced gravel sub-base over poor subgrades". *Geosynth. Int.*, 20(2): 46-71. doi:10.1680/gein.13.00001
- Van Eekelen, S. J. M. and Brugman, M. H.A. 2016. "Basal Reinforced Piled Embankments". Published by SBRCURnet. [www.sbrcurnet.nl/international](http://www.sbrcurnet.nl/international)
- Van Eekelen, S. J. M., Bezuijen, A. and van Tol, A. F. 2012a. "Model experiments on piled embankments, Part I". *Geotext. Geomembranes*, 32: 69-81. doi:10.1016/j.geotexmem.2011.11.002
- Van Eekelen, S. J. M., Bezuijen, A. and van Tol, A. F. 2012b. "Model experiments on piled embankments, Part II". *Geotext. Geomembranes*, 32: 82-94. doi:10.1016/j.geotexmem.
- Van Eekelen, S. J. M., Bezuijen, A. and van Tol, A. F. 2013. "An analytical model for arching in piled embankments". *Geotext. Geomembranes*, 39: 78-102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.07.005>
- Van Eekelen, S. J. M., Bezuijen, A. and Van Tol, A. F. 2015. "Validation of analytical models for the design of basal reinforced piled embankments". *Geotext. Geomembranes*, 43(1): 56-81.
- Vibhoosha, M. P., Bhasi, A. and Nayak, S. 2021a. "Analysis of geocell-reinforced stone column-supported embankment considering soil-structure interaction". *Transport. Infrastruct. Geotech.*, 9: 54-72.
- Vibhoosha, M. P., Bhasi, A. and Nayak, S. 2021b. "A review on the design, applications and numerical modeling of geocell reinforced soil". *Geotech. Geol. Eng.*, 39: 4035-4057. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01774-3>
- Wang, K., Ye, J., Wang, X. and Qiu, Z. 2023. "The soil-arching effect in pile-supported embankments: A review". *Buid.*, 14(1): 126. <https://doi.org/10.3390/buildings14010126>
- Wu, D., Luo, C., Gao, Z., Li, D. and Xu, C. 2022. "Effect of different reinforced load transfer platforms on geosynthetic-reinforced pile-supported embankment: Centrifuge model test". *KSCE J. Civ. Eng.*, 26(2): 630-649. doi:10.1007/s12205-021-0623-7
- Xu, C., Song, S. and Han, J. 2016. "Scaled model tests on influence factors of full geosynthetic-reinforced pile-supported embankments". *Geosynth. Int.*, 23(2): 140-153. <https://doi.org/10.1680/jgein.15.00038>
- Yu, Y. and Bathurst, R. J. 2017. "Modelling of geosynthetic-reinforced column-supported embankments using 2D full-width model and modified unit cell approach". *Geotext. Geomembranes*, 45(2): 103-120. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.01.002>

- Yu, Y., Bathurst, R. J. and Damians, I. P. 2016. "Modified unit cell approach for modelling geosynthetic-reinforced column-supported embankments". *Geotext. Geomembranes*, 44: 332-343. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2016.01.003>
- Zhang, L., Zhao, M., Shi, C. and Zhao, H. 2010. "Bearing capacity of geocell reinforcement in embankment engineering". *Geotext. Geomembranes*, 28: 475-482. doi:10.1016/j.geotexmem.2009.12.011
- Zhang, C., Jiang, G., Liu, X. and Buzzi, O. 2016. "Arching in geogrid-reinforced pile-supported embankments over silty clay of medium compressibility: Field data and analytical solution". *Comput. Geotech.*, 77: 11-25.
- Zhang, C., Su, L. and Jiang, G. 2022. "Full-scale model tests of load transfer in geogrid-reinforced and floating pile-supported embankments". *Geotext. Geomembranes*, 50(5): 896-909. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.05.004>
- Zhang, J., Dias, D., Jenck, O. and Briancon, L. 2024. "3D numerical analysis of a geogrid-reinforced piled embankment: High-speed railway". *Int. J. Geomech.*, 24(11). DOI: 10.1061/IJGNALGMENG-8106