Semnan University

Journal of Transportation Infrastructure Engineering

Journal homepage: https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en

ISSN: 2821-0549

Research Article

Effect of Biaxial Geogrid Rib Orientation on the Bearing Capacity and Deformation Response of Strip Footings Beneath the Bridges

Amir Ebrahimi[a], Aboozar Mirzakhani[a], Mohsen Mousivand[b*], Reza Babaei Semiromi[a]

[a] Department of Civil Engineering, Sha. C., Islamic Azad University, Shahrood, I. R. Iran.
[b*] Department of Civil Engineering, GKM.C., Islamic Azad University, Gonbad Kavoos, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2026-06-13

Revised: 2026-08-25

Accepted: 2026-08-26

Keywords:

Biaxial geogrid, Rib orientation, Strip footing, Bearing capacity, Soil–geogrid interaction, Plate load test.

ABSTRACT

Orientation of biaxial geogrid components affects the bearing capacity and deformation response of bridge strip footings during subgrade reinforcement for bridge construction. In this study, plate load testing was conducted on a strip footing embedded in a clean sand bed reinforced with a single layer of geogrid at a constant depth of 0.25 times the footing width. To evaluate the contribution of each geogrid component, five configurations were considered: Unreinforced soil, full biaxial geogrid, perimeter frame without internal ribs, longitudinal rib arrangement, and transverse rib arrangement. The system performance was then assessed based on ultimate bearing capacity, settlement reduction under working stress, initial stiffness, zone of influence of the geogrid, and stored strain energy. The results indicate that geometric configuration of the geogrid plays a decisive role in the mechanical response of soil–footing system. The full biaxial geogrid exhibited the best overall performance across all evaluated parameters, achieving approximately 125% improvement in bearing capacity, 40% reduction in settlement under working stress, and 95% increase in initial stiffness compared to the unreinforced condition. This configuration also provided the largest zone of influence and the highest stored strain energy, indicating more effective mobilization of tensile resistance and stress transfer within the soil mass. Maximum reinforcement effectiveness is achieved when the geogrid continuity and rib orientation facilitate the simultaneous confinement of load transfer mechanisms, tensile resistance, stress redistribution, and deformation control.

*** Corresponding author.**
E-mail address: mousivand@iau.ir

How to cite this article: Ebrahimi, A., Mirzakhani, A., Mousivand, M. and Babaei Semiromi, R. (2026). Effect of biaxial geogrid rib orientation on the bearing capacity and deformation response of strip footings beneath the bridges. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering, 12(2), pp.171-197.*

DOI: https://doi.org/10.22075/jtie.2026.41527.1772

© 2026 The Author(s). Journal of Transportation Infrastructure Engineering published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

مجله زیرساخت های حمل و نقل

وبسایت نشریه : https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en

شاپا: 2821-0549

مقاله پژوهشی

نقش جهت‌گیری اجزای ژئوگرید دوطرفه در ظرفیت باربری و پاسخ تغییرشکلی پی‌های نواری پل‌ها

امیر ابراهیمی[۱]، ابوذر میرزاخانی[۱]، محسن موسیوند[۲*]، رضا بابایی سمیرمی[۱]

[۱] گروه مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران.

[۲] گروه مهندسی عمران، واحد گنبد کاووس، دانشگاه آزاد اسلامی، گنبد کاووس، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۰۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۰۴

واژه‌های کلیدی:

ژئوگرید دو طرفه؛

جهت‌گیری ژئوگرید؛

پی نواری؛

ظرفیت باربری؛

اندرکنش خاک–ژئوگرید؛

آزمایش بارگذاری صفحه.

چکیده

عملکرد پی‌های نواری مورد استفاده در برخی کاربردهای زیرساختی، از جمله سامانه‌های مرتبط با پل، به ظرفیت باربری و رفتار تغییرشکلی بستر خاک وابسته است. در این پژوهش، اثر جهت‌گیری اجزای ژئوگرید دوطرفه بر ظرفیت باربری و پاسخ تغییرشکلی یک پی نواری مدل‌شده آزمایشگاهی در بستر ماسه تمیز، با استفاده از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای بررسی شد. پی با یک لایه ژئوگرید در عمق ثابت معادل ۰/۲۵ برابر عرض پی مسلح گردید. برای ارزیابی سهم هر یک از اجزای ژئوگرید، پنج حالت شامل خاک غیرمسلح، ژئوگرید دوطرفه کامل، قاب پیرامونی بدون دنده‌های داخلی، آرایش دنده‌های طولی و آرایش دنده‌های عرضی در نظر گرفته شد. عملکرد سیستم بر اساس ظرفیت باربری نهایی، کاهش نشست در تنش کاری، سختی اولیه، ناحیه تأثیر مسلح‌سازی و انرژی کرنشی ذخیره‌شده ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که آرایش هندسی ژئوگرید نقش مهمی در پاسخ مکانیکی سیستم خاک–پی دارد. در محدوده شرایط آزمایش حاضر، ژئوگرید دوطرفه کامل در مقایسه با سایر آرایش‌های بررسی‌شده، بهترین عملکرد کلی را نشان داد؛ به‌طوری که در مقایسه با شرایط غیرمسلح، حدود ۱۲۵٪ افزایش در ظرفیت باربری، ۴۰٪ کاهش در نشست در تنش کاری و ۹۵٪ افزایش در سختی اولیه حاصل شد. این آرایش همچنین بیشترین افزایش در گستره ناحیه تأثیر مسلح‌سازی و بیشترین انرژی کرنشی ذخیره‌شده را نشان داد. نتایج، در محدوده شرایط آزمایش حاضر، نشان می‌دهد که پیوستگی شبکه و جهت‌گیری دنده‌های ژئوگرید می‌توانند در میزان مشارکت مسلح‌کننده در انتقال بار و کنترل تغییرشکل سیستم خاک–پی نقش مهمی داشته باشند.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mousivand@iau.ir

استناد به این مقاله: ابراهیمی، امیر.، میرزاخانی، ابوذر.، موسیوند، محسن. و بابایی سمیرمی، رضا. (۱۴۰۵). نقش جهت‌گیری اجزای ژئوگرید دوطرفه در ظرفیت باربری و پاسخ تغییرشکلی پی‌های نواری پل‌ها. *مهندسی زیر ساخت‌های حمل و نقل*، ۱۲ (۲)، ۱۷۱–۱۹۷.

DOI: https://doi.org/10.22075/jtie.2026.41527.1772

۱. مقدمه

عملکرد پی‌های نواری مورد استفاده در برخی کاربردهای زیرساختی، از جمله سامانه‌های مرتبط با پل، به ظرفیت باربری و رفتار تغییرشکلی بستر خاک وابسته است. در بسیاری از پروژه‌های حمل‌ونقل، به‌ویژه در بسترهای ماسه‌ای، ظرفیت باربری ناکافی و نشست بیش از حد می‌تواند عملکرد و بهره‌برداری مناسب اجزای متکی بر خاک را تحت تأثیر قرار دهد. از این‌رو، بهسازی بستر پی‌های نواری در چنین کاربردهایی به یکی از موضوعات مهم مهندسی ژئوتکنیک تبدیل شده است (آدنیجی و اولادیجی، ۲۰۲٤؛ داس، ۲۰۱۷؛ حسینی و همکاران، ۲۰۲٦). این محدودیت‌ها در نهشته‌های ماسه‌ای بارزتر می‌شوند، زیرا بازآرایی ذرات و محصورشدگی ناکافی تحت بارگذاری می‌تواند منجر به تغییرشکل‌های بیش از حد و کاهش ظرفیت باربری شود (الثنابانی و همکاران، ۲۰۲۵؛ قاسم قنبری و همکاران، ۲۰۲۲؛ یابالوئی خامش لوئی و همکاران، ۲۰۲٤). در میان روش‌های مختلف بهسازی زمین، مسلح‌سازی خاک با استفاده از ژئوسنتتیک‌ها به‌عنوان راهکاری مؤثر برای بهبود عملکرد بستر پی‌های سطحی، به ویژه در پروژه‌های زیرساختی از جمله سامانه‌های مرتبط با پل، که کنترل نشست و افزایش ظرفیت باربری اهمیت دارد، مورد توجه قرار گرفته است (چترابوج و مشرام، ۲۰۲٤). کنترل ظرفیت باربری و نشست نیز از عوامل مهم در حفظ عملکرد و بهره‌برداری مناسب اجزای متکی بر خاک محسوب می‌شود (دوهرتی و همکاران، ۲۰۱۸؛ بیات و همکاران، ۲۰۲۱). ژئوگریدها به دلیل توانایی در بهبود انتقال بار، محدودسازی جابه‌جایی خاک، و بسیج مقاومت کششی در توده خاک مسلح، توجه را به خود جلب کرده‌اند (شیل و پال، ۲۰۲٤). به‌کارگیری ژئوگرید در زیر پی‌های سطحی می‌تواند ظرفیت باربری را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داده و هم‌زمان موجب کاهش نشست و بهبود سختی کلی سیستم خاک– پی شود. در مقایسه با روش‌های متداول بهسازی خاک، مسلح‌سازی با ژئوگرید مزایایی همچون سهولت اجرا، مقرون‌به‌صرفه بودن، دوام مناسب، و سازگاری با طیف گسترده‌ای از شرایط میدانی را فراهم می‌آورد (دینگ و همکاران، ۲۰۲۲؛ دانتاس و همکاران، ۲۰۲۳). اگرچه عملکرد ژئوگرید به سازوکارهایی مانند قفل‌شدگی مکانیکی، بسیج مقاومت کششی و بازتوزیع تنش وابسته است، میزان مشارکت این سازوکارها می‌تواند به جهت‌گیری اعضای ژئوگرید نسبت به مسیرهای غالب تنش و تغییرشکل وابسته باشد. در ژئوگریدهای دوطرفه، اعضای طولی و عرضی ممکن است تحت شرایط بارگذاری پی نواری نقش یکسانی در انتقال نیرو و کنترل تغییرشکل نداشته باشند. از این‌رو، حذف یا تغییر جهت برخی از این اعضا می‌تواند پیوستگی شبکه، سطح اندرکنش مؤثر و مسیرهای انتقال بار در سیستم خاک –ژئوگرید را تغییر دهد. این وابستگی جهت‌دار، یکی از مبانی بررسی حاضر است، زیرا میزان مشارکت نسبی اجزای یک ژئوگرید دوطرفه در بهبود ظرفیت باربری و کنترل نشست پی نواری هنوز به‌طور کامل مشخص نشده است.

بخش قابل‌توجهی از مطالعات پیشین به بررسی رفتار پی‌های مسلح‌شده با ژئوگرید روی خاک‌های ماسه‌ای اختصاص یافته است. پژوهش‌های اولیه توسط محققانی نظیر ساویکی (۱۹۹۸)، اصول بنیادین خاک مسلح در زیر پی‌های سطحی را تبیین کرده و بهبود قابل‌ملاحظه عملکرد باربری از طریق استفاده از عناصر مسلح‌کننده را نشان داده‌اند. مطالعات بعدی، از جمله پژوهش‌های چانگ و همکاران (۱۹۹۵)، نقش مؤثر مسلح‌سازی با ژئوگرید را در کاهش نشست و بهبود توزیع تنش در زیر پی‌ها بیش از پیش مورد تأکید قرار دادند. سیمونینی (۲۰۰۰) به‌صورت جامع، سازوکارهای عملکرد سیستم‌های خاک مسلح را مورد بررسی قرار داد و بر اهمیت هندسه مسلح‌کننده و اندرکنش خاک– مسلح‌کننده

در تعیین عملکرد کلی سیستم تأکید کرد. مطالعات جدیدتر بر بهینه‌سازی پارامترهای مسلح‌سازی مؤثر بر رفتار پی‌ها متمرکز شده‌اند (شیل و پال، ۲۰۲٤). مطالعات آزمایشگاهی و عددی نشان داده‌اند که عمق استقرار مسلح‌کننده، عرض ناحیه مسلح‌شده، تعداد لایه‌ها، و فاصله‌گذاری بین آن‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر ظرفیت باربری و رفتار نشست پی‌های سطحی دارند. برای مثال، چندین پژوهشگر گزارش کرده‌اند که در بسیاری از شرایط آزمایشگاهی، یک عمق بهینه برای استقرار مسلح‌کننده در محدوده‌ای نزدیک به ۰/۲۵ تا ۰/۵۰ برابر عرض پی مشاهده شده است که فراتر از آن، سهم مسلح‌کننده در بهبود عملکرد به‌تدریج کاهش می‌یابد (فاخر و فخرالدین، ۲۰۲۱؛ عنبرانی و همکاران، ۲۰۲٤). به‌طور مشابه، تبرویی و همکاران (۲۰۲٦) نشان داده‌اند که عرض مسلح‌کننده بر پراکندگی تنش و گسترش سطح گسیختگی تأثیرگذار است، به‌گونه‌ای که افزایش عرض مسلح‌کننده عموماً تا رسیدن به یک طول حدی، موجب بهبود عملکرد سیستم می‌شود. در مجموع، این مطالعات نشان می‌دهند که عملکرد مسلح‌سازی نه‌تنها به حضور ژئوگرید، بلکه به پارامترهای هندسی و نحوه استقرار آن در توده خاک وابسته است. با این حال، تمرکز غالب این مطالعات بر تعیین موقعیت و مقدار مناسب مسلح‌کننده بوده و نقش آرایش و جهت‌گیری اجزای تشکیل‌دهنده ژئوگرید کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

با وجود پیشرفت‌های قابل‌توجه در شناخت سیستم‌های پی مسلح، بیشتر مطالعات پیشین عمدتاً بر پارامترهای متداولی نظیر عمق استقرار مسلح‌کننده، فاصله‌گذاری، نسبت مدفون‌شدگی، و تعداد لایه‌های ژئوگرید تمرکز داشته‌اند. در مقابل، توجه نسبتاً کمتری به تأثیر آرایش هندسی و نقش جهت‌دار اعضای ژئوگرید معطوف شده است. در ژئوگریدهای دوطرفه، انتقال بار از طریق شبکه‌ای به‌هم‌پیوسته از اعضای طولی و عرضی صورت می‌گیرد (حسین و مگید، ۲۰۱٦).

ژئوگریدهای یک‌محوره و دوطرفه از متداول‌ترین انواع مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیک هستند که تفاوت اصلی آن‌ها در نحوه توزیع و جهت‌گیری اعضای مقاوم‌کننده و در نتیجه، در مسیرهای انتقال نیرو در توده خاک است. در ژئوگرید یک‌محوره، بخش عمده مقاومت کششی در یک راستای غالب بسیج می‌شود، در حالی‌که ژئوگرید دوطرفه با برخورداری از اعضای متعامد، امکان انتقال و توزیع نیرو در دو راستای اصلی را فراهم می‌کند. کینگ و همکاران (۱۹۹۳)، با مطالعات آزمایشگاهی روی پی‌های مسلح‌شده، نشان دادند که نوع، آرایش و پیکربندی مسلح‌کننده می‌تواند علاوه بر ظرفیت باربری، بر میزان نشست و نحوه گسترش تغییرشکل در توده خاک تأثیرگذار باشد؛ به‌گونه‌ای که عملکرد مسلح‌سازی تنها تابع مقاومت کششی اسمی ژئوگرید نیست و به نحوه قرارگیری و اندرکنش آن با خاک نیز وابسته است. این وابستگی در ژئوگریدهای دوطرفه می‌تواند به‌صورت ناهمسانگردی مکانیکی بروز کند، زیرا پاسخ سیستم خاک–ژئوگرید به جهت بارگذاری نسبت به اعضای ژئوگرید وابسته است. مطالعات آزمایشگاهی و بررسی‌های رفتاری پیشین نیز نشان داده‌اند که جهت‌گیری بارگذاری و اجزای مسلح‌کننده می‌تواند بر پاسخ مکانیکی سیستم خاک–ژئوگرید اثرگذار باشد (یتیم‌اغلو و همکاران، ۱۹۹٤؛ الرکابی و همکاران، ۲۰۱۷). از این‌رو، بررسی عملکرد ژئوگرید دوطرفه صرفاً بر مبنای وجود یا عدم وجود مسلح‌کننده کافی نیست و لازم است نقش جهت‌گیری و پیوستگی اعضای آن نسبت به مسیرهای غالب تنش و تغییرشکل نیز مورد توجه قرار گیرد. بنابراین، اگرچه مطالعات پیشین وابستگی رفتار خاک – ژئوگرید به جهت بارگذاری و ناهمسانگردی مسلح‌کننده را نشان داده‌اند، رویکرد غالب همچنان ارزیابی ژئوگرید به‌عنوان یک شبکه کامل بوده است. در نتیجه، مشخص نیست که اعضای طولی و عرضی این

شبکه تا چه اندازه و با چه تفاوتی در پاسخ پی نواری مشارکت می‌کنند.

چندین مطالعه نشان داده‌اند که کارایی مسلح‌سازی ممکن است ناهمسانگرد باشد و به جهت‌گیری اجزای ژئوگرید نسبت به مسیرهای تنش اصلی وابسته باشد (حسین و مجید، ۲۰۱۶؛ الرکابی و همکاران، ۲۰۱۷؛ گائو و مجید، ۲۰۱۸). با این حال، تمرکز این مطالعات عمدتاً بر رفتار جهت‌دار ژئوگرید و اندرکنش خاک–ژئوگرید بوده است و مسئله سهم مستقل اجزای تشکیل‌دهنده یک ژئوگرید دوطرفه در عملکرد پی نواری به‌صورت مستقیم مورد بررسی قرار نگرفته است. به‌ویژه، در مطالعات حسین و مجید، (۲۰۱۶) و گائو و مجید (۲۰۱۸) مسئله حذف انتخابی اعضای طولی یا عرضی یک ژئوگرید دوطرفه و مقایسه مستقیم عملکرد این پیکربندی‌ها با ژئوگرید کامل و قاب پیرامونی مدنظر نبوده است. از این‌رو، اگرچه مطالعات پیشین وابستگی رفتار ژئوگرید به جهت بارگذاری و ویژگی‌های اندرکنش خاک–ژئوگرید را نشان داده‌اند، هنوز مشخص نیست که هر یک از اجزای طولی و عرضی شبکه در شرایط بارگذاری پی نواری تا چه اندازه در بسیج عملکرد مسلح‌کننده مشارکت دارند.

در پژوهش حاضر، این محدودیت با استفاده از یک رویکرد آزمایشگاهی مقایسه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، علاوه بر ژئوگرید دوطرفه کامل، با حذف نظام‌مند اعضای داخلی، سه پیکربندی شامل قاب پیرامونی (PF)، اعضای طولی (LR) و اعضای عرضی (TR) ایجاد و عملکرد آن‌ها با حالت غیرمسلح مقایسه شده است. این رویکرد امکان بررسی نقش نسبی جهت‌گیری، پیوستگی و توزیع اعضای ژئوگرید را فراهم می‌کند؛ موضوعی که با تغییر صرف جهت قرارگیری یک ژئوگرید کامل نسبت به بارگذاری قابل تفکیک نیست.

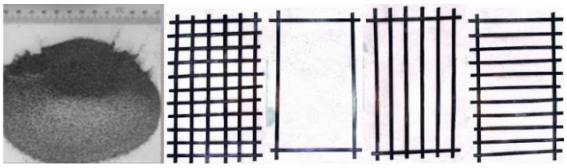
در پی‌های نواری، توسعه نواحی برشی و تغییرشکل‌های سطحی عمدتاً در یک جهت غالب رخ می‌دهد، که می‌تواند موجب تفاوت در میزان مشارکت اعضای ژئوگرید در راستاهای مختلف شود (گائو و همکاران، ۲۰۲۱). .با این وجود، سهم مستقل اعضای طولی و عرضی ژئوگرید به‌ندرت در شرایط آزمایشگاهی کنترل‌شده به‌صورت مجزا بررسی و تحلیل شده است. در نتیجه، میزان تأثیرگذاری اجزای خاص ژئوگرید بر بهبود ظرفیت باربری و رفتار تغییرشکلی همچنان به‌طور کامل مشخص نیست. یکی دیگر از محدودیت‌های موجود در ادبیات پژوهشی، فقدان مطالعات نظام‌مند در زمینه پیکربندی‌های جزئی ژئوگرید است. بخش عمده مطالعات موجود، ژئوگرید دوطرفه را به‌عنوان یک سیستم یکپارچه مسلح‌سازی بررسی کرده‌اند، در حالی‌که اثر حذف انتخابی اعضای داخلی و تغییر پیکربندی آن بر بسیج سازوکارهای مسلح‌سازی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. چنین مطالعاتی می‌توانند بینش ارزشمندی درباره مکانیزم‌های بنیادی اندرکنش خاک–ژئوگرید ارائه داده و مشخص کنند که آیا تمامی اجزای ژئوگرید به یک میزان در عملکرد مسلح‌سازی نقش دارند یا خیر (بیلدیک و لامان، ۲۰۲۰؛ چن و همکاران، ۲۰۲۱؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۵).

به‌منظور رفع این شکاف‌های پژوهشی، مطالعه حاضر به‌صورت آزمایشگاهی به بررسی تأثیر جهت‌گیری اعضای ژئوگرید دوطرفه بر رفتار باربری و تغییرشکلی پی‌های نواری مستقر بر ماسه تمیز می‌پردازد. مجموعه‌ای از آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای در آزمایشگاه با استفاده از مدل پی نواری مسلح‌شده با یک لایه ژئوگرید در عمق مدفون ثابت انجام شد. علاوه بر آرایش کامل ژئوگرید دوطرفه، آرایش‌های اصلاح‌شده نیز از طریق حذف نظام‌مند اجزای منتخب ژئوگرید، شامل آرایش قاب پیرامونی، آرایش اعضای طولی، و آرایش اعضای عرضی، مورد بررسی قرار گرفت. عملکرد هر آرایش بر اساس ظرفیت باربری نهایی، کاهش نشست در تنش کاری، سختی اولیه، ناحیه تأثیر ژئوگرید، و انرژی کرنشی

ذخیره‌شده ارزیابی شد نوآوری این پژوهش در تفکیک و ارزیابی آزمایشگاهی سهم نسبی اجزای طولی و عرضی یک ژئوگرید دوطرفه و بررسی اثر حذف انتخابی این اجزا بر عملکرد پی نواری است. در این چارچوب، آرایش ژئوگرید کامل، قاب پیرامونی، اعضای طولی و اعضای عرضی تحت شرایط آزمایشگاهی یکسان مقایسه شدند تا نقش پیوستگی شبکه و جهت‌گیری اعضا در ظرفیت باربری و رفتار تغییرشکلی سیستم خاک–پی مشخص شود. برخلاف مطالعات پیشین که ژئوگرید را به‌عنوان یک عنصر مسلح‌کننده یکپارچه در نظر گرفته‌اند، این پژوهش تلاش دارد تا مشخص کند که جهت‌گیری اعضا چگونه بر انتقال تنش، کنترل تغییرشکل، و کارایی مسلح‌سازی تحت بارگذاری پی نواری تأثیر می‌گذارد. انتظار می‌رود یافته‌های این مطالعه به درک بهتر سازوکارهای اندرکنش خاک–ژئوگرید و نقش جهت‌دار اجزای مسلح‌کننده کمک کرده و مبنایی برای بررسی و بهینه‌سازی آرایش مسلح‌سازی در مطالعات و کاربردهای مرتبط با پی‌های سطحی فراهم کند. اگرچه مدل آزمایشگاهی حاضر یک مدل ایده‌آل‌شده از پی نواری است و ویژگی‌های اختصاصی یک پی واقعی پل در آن شبیه‌سازی نشده است، انتخاب این مدل امکان بررسی کنترل‌شده نقش جهت‌گیری اجزای ژئوگرید در رفتار سیستم خاک–پی را فراهم می‌کند. از این‌رو، یافته‌های این پژوهش می‌توانند در درک مکانیزم‌های عملکرد ژئوگرید در کاربردهای مرتبط با بهسازی بستر پی‌های نواری زیرساخت‌های حمل‌ونقل، از جمله پل‌ها، مورد استفاده قرار گیرند؛ با این حال، تعمیم مستقیم نتایج به شرایط واقعی پروژه‌ها مستلزم بررسی شرایط هندسی، بارگذاری و خاکی مربوط به هر پروژه است.

۲. مواد و روش‌ها

نمایی کلی از مصالح مورد استفاده در این مطالعه و پیکربندی‌های مسلح‌سازی به‌کاررفته در برنامه آزمایشگاهی در شکل ۱ ارائه شده است. این شکل، ماسه تمیز مورد استفاده به‌عنوان بستر پی را به همراه آرایش‌های مختلف ژئوگرید نشان می‌دهد که به‌منظور بررسی تأثیر جهت‌گیری اعضا و پیوستگی هندسی بر رفتار پی‌های مسلح مورد استفاده قرار گرفته‌اند. آرایش‌های مسلح‌سازی بررسی‌شده، که از یک ژئوگرید دوطرفه و از طریق اصلاح کنترل‌شده اجزای ساختاری آن به‌دست آمده‌اند، شامل ژئوگرید کامل دوطرفه (BG)، قاب پیرامونی بدون اعضای داخلی (PF)، آرایش اعضای طولی (LR) و آرایش اعضای عرضی (TR) می‌باشند؛ علاوه بر این، حالت غیرمسلح به‌عنوان حالت مرجع (CS) نیز در نظر گرفته شده است. ارائه این پیکربندی‌ها در ابتدای کار، درک روشنی از ماتریس آزمایش‌ها فراهم کرده و تفسیر پاسخ‌های مکانیکی ارائه‌شده در بخش‌های بعدی را تسهیل می‌کند.



(a) (b) (c) (d) (e)

شکل ۱. مصالح مورد استفاده در این مطالعه: a) ماسه، b) ژئوگرید دوطرفه، c) قاب پیرامونی، d) اعضای طولی و e) اعضای عرضی

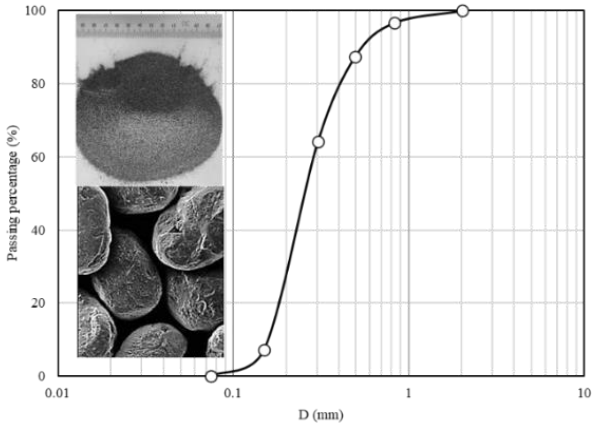
۲-۱. مصالح

ماسه تمیز و یکنواخت دانه‌ریز کوارتزی برداشت‌شده از بابلسر در استان مازندران، ایران، در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. این ماسه بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد خاک‌ها (USCS) در گروه ماسه بددانه‌بندی‌شده (SP) طبقه‌بندی می‌شود. توزیع دانه‌بندی و تصویر میکروسکوپ الکترونی آن در شکل ۲ ارائه شده است. همچنین، خواص ژئوتکنیکی این ماسه در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. خواص ژئوتکنیکی ماسه بابلسر

Properties	*Parameter*	*Unit*	*Value*
Specific gravity	*Gs*	-	*2.76*
Mean grain size	D_{50},	*mm*	0.24
Coefficient of curvature	C_c	-	1.32
Coefficient of uniformity	C_u	-	1.81
Maximum dry unit weight	γ_{dmax}	kN/m^3	16.78
Minimum dry unit weight	γ_{dmin}	kN/m^3	14.78
Maximum void ratio	e_{max}	-	0.83
Minimum void ratio	e_{min}	-	0.61
Optimum water content	ω_{opt}	%	13.00
Relative density	*Dr*	%	30

در تمامی آزمایش‌های این پژوهش، بستر ماسه‌ای با تراکم نسبی هدف Dr=30% آماده شد. تراکم نسبی نمونه‌ها بر اساس رابطه $Dr=\left(\frac{e_{max}-e}{e_{max}-e_{min}}\right)\times 100$ تعیین گردید. با توجه به مقادیر emax=0.83 و emin=0.61 ، نسبت تخلخل متناظر با تراکم نسبی ۳۰ درصد حدود ۰/۷۶ و وزن واحد خشک متناظر حدود kN/m^3 ۱۵/۳۵ به دست می‌آید.



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی و تصویر میکروسکوپ الکترونی ماسه بابلسر

بنابراین، مقدار هدف تراکم بستر در تمامی آزمایش‌ها بر اساس این وزن واحد خشک کنترل شد.

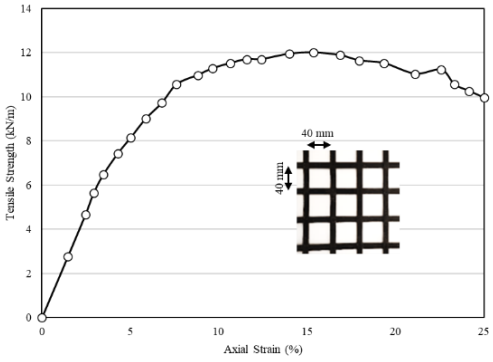
در این مطالعه، یک ژئوگرید پلیمری دوطرفه با چشمه‌های مربعی به‌منظور بررسی تأثیر آرایش اجزای مسلح‌کننده بر رفتار باربری پی‌های نواری مستقر بر خاک ماسه‌ای مورد استفاده قرار گرفت. این ژئوگرید از شبکه‌ای منظم شامل اعضای طولی و عرضی متقاطع تشکیل شده و به‌عنوان عنصر مسلح‌کننده در بستر ماسه‌ای به‌کار گرفته شد. انتخاب این نوع ژئوگرید به دلیل کاربرد گسترده آن در بهسازی پی‌های سطحی و اثربخشی

اثبات‌شده آن در بهبود عملکرد مکانیکی خاک‌های دانه‌ای انجام شد.

ژئوگرید مورد استفاده در این پژوهش دارای مقاومت کششی نهایی برابر با ۱۲ کیلونیوتن بر متر و کرنش گسیختگی ۲۵ درصد بود. همچنین، اندازه چشمه‌ها، ضخامت ژئوگرید و جرم واحد سطح آن به‌ترتیب برابر با ٤٠ × ٤٠ میلی‌متر، ۱/۲ میلی‌متر و ۲۵۰ گرم بر متر مربع اندازه‌گیری شد. این مشخصات بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام‌شده و آزمایش کشش ژئوگرید مورد استفاده در مطالعه حاضر تعیین شدند و خواص فیزیکی و مکانیکی حاصل در جدول ۲ و شکل ۳ ارائه شده است.به‌منظور تعیین مشخصات مکانیکی ژئوگرید، آزمایش‌های کشش مطابق با استاندارد ASTM D6637 انجام شد (ASTM 2015). نتایج حاصل از آزمایش کشش حاضر، از نظر مشخصات مکانیکی، با مقادیر گزارش‌شده توسط لیو و همکاران. (۲۰۲۵) برای ژئوگرید مشابه مطابقت مناسبی نشان داد. علاوه بر این، ابعاد چشمه‌ها و ضخامت اعضای ژئوگرید پیش از انجام آزمایش‌ها، با استفاده از کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد تا از یکنواختی هندسی و صحت ابعادی نمونه‌ها اطمینان حاصل گردد.

جدول ۲. پارامترهای فیزیکی و مکانیکی ژئوگرید دوطرفه

Parameter	Unit	Value
Aperture size	mm	40x40
Thickness	mm	1.2
Ultimate tensile strength	kN/m	12
Failure strain	%	25
Mass per unit area	g/m^2	250



شکل ۳. نمودار تنش–کرنش ژئوگرید

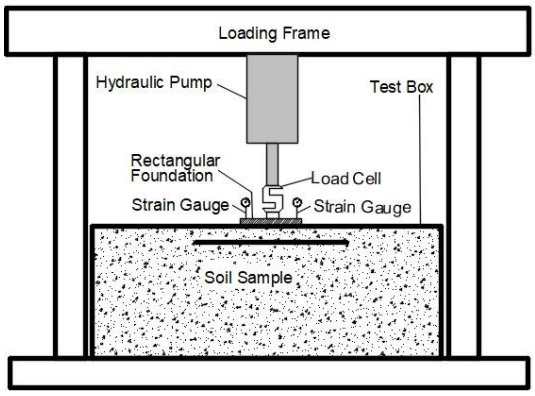
۲-۲. آرایش آزمایشگاهی و سیستم بارگذاری

به‌منظور اجرای برنامه آزمایشگاهی این پژوهش، یک سامانه مدل‌سازی فیزیکی شامل جعبه خاک، تجهیزات بارگذاری و ابزارهای پایش جابه‌جایی طراحی و مورد استفاده قرار گرفت. هدف اصلی از این آرایش، شبیه‌سازی رفتار پی‌های نواری مستقر بر خاک ماسه‌ای مسلح در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی و فراهم‌سازی امکان ارزیابی قابل اعتماد پاسخ باربری و تغییرشکلی سیستم خاک–پی بود. برای اعمال بارگذاری، از یک پی نواری صلب فولادی ST52 با ضخامت ۲۵ میلی‌متر و عرض و طول به ترتیب برابر با ۸۰ و ٤٠٠ میلی‌متر ساخته شد. با توجه به ضخامت نسبتاً زیاد صفحه در مقایسه با عرض پی (t/B=0.31) و صلبیت بالای فولاد، تغییرشکل خمشی صفحه در مقایسه با تغییرشکل بستر خاک ناچیز در نظر گرفته شد. ابعاد پی به‌گونه‌ای انتخاب گردید که با نسبت طول به عرض L/B=5، اثرات سه‌بعدی در بخش مرکزی پی محدود شده و شرایط نزدیک به کرنش

صفحه‌ای در توده خاک به‌طور مناسبی تقریب زده شود. از آنجا که صلبیت صفحه بارگذاری نقش مهمی در دقت و قابلیت اعتماد نتایج آزمایش بارگذاری صفحه‌ای دارد، توجه ویژه‌ای به تعیین ضخامت مناسب صفحه معطوف شد. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که افزایش ضخامت صفحه موجب کاهش تغییرشکل خمشی و بهبود یکنواختی انتقال تنش به خاک زیرین می‌شود. اگرچه در برخی تحقیقات، حداقل ضخامت‌های ایمن برای شرایط بارگذاری مشخص پیشنهاد شده است، اما ضخامت مناسب همچنان به عواملی نظیر نوع خاک، مقیاس مدل، سطح تنش و شرایط مرزی وابسته است. با توجه به اینکه در این مطالعه از ماسه یکنواخت استفاده شده و تنش‌ها مستقیماً به محیط دانه‌ای منتقل می‌شوند، ضخامت ۲۵ میلی‌متر برای صفحه فولادی انتخاب شد تا صلبیت کافی صفحه در طول بارگذاری فراهم شده و از بروز تغییرشکل خمشی قابل‌توجه و ناخواسته در حین آزمایش جلوگیری شود. این انتخاب بر اساس مطالعات پیشین در زمینه مدل‌سازی فیزیکی پی‌های سطحی و طراحی صفحات بارگذاری صلب نیز مورد تأیید قرار گرفته است. کلیه آزمایش‌ها در یک محفظه فولادی صلب با ابعاد داخلی ۱۵۰۰ × ۸۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۸۰۰ میلی‌متر انجام شد. پی نواری در راستای طولی محفظه و در موقعیت مرکزی آن قرار گرفت، به‌گونه‌ای که محور طولی پی با محور طولی جعبه هم‌راستا باشد. به‌منظور ارزیابی اثرات مرزی، ابعاد مخزن نسبت به عرض پی مورد بررسی قرار گرفت. مطالعه مازروز و همکاران (۲۰۲۵) نشان داده است که در پی‌های سطحی مستقر بر خاک ماسه‌ای، ناحیه گسیختگی و تغییرشکل‌یافته می‌تواند در طرفین پی تا حدود ۲/۵برابر عرض پی و در عمق تا حدود ۳ برابر عرض پی گسترش یابد. بر این اساس، برای جلوگیری از تداخل دیواره‌های جانبی و کف مخزن با ناحیه گسیختگی، لازم است مرزهای محفظه در فاصله‌ای بیشتر از این محدوده از لبه‌های پی قرار داشته باشند. در مطالعه حاضر، عرض پی برابر ۸۰ میلی‌متر و عرض و ارتفاع داخلی مخزن به‌ترتیب برابر ۸۰۰ میلی‌متر بود؛ بنابراین، نسبت عرض و ارتفاع مخزن به عرض پی هر دو برابر 10B است. با توجه به قرارگیری پی در مرکزی مخزن، فاصله لبه‌های پی تا هر یک از دیواره‌های جانبی برابر ۳۶۰ میلی‌متر، معادل 4.5B، و فاصله کف مخزن تا سطح زیرین پی برابر ۸۰۰ میلی‌متر، معادل 10B، است. از این‌رو، فاصله مرزهای جانبی به‌طور محسوسی بیشتر از گستره تقریبی ناحیه گسیختگی گزارش‌شده در مطالعه پیشین است (مازوز و همکاران، ۲۰۲۵). بنابراین، ابعاد مخزن و موقعیت قرارگیری پی در این پژوهش فضای کافی برای توسعه آزاد ناحیه گسیختگی فراهم کرده و اثر محدودکنندگی دیواره‌های جانبی و کف مخزن بر پاسخ باربری پی را به حداقل می‌رساند. علاوه بر این، استفاده از دیواره‌های فولادی صلب و ضخیم از تغییرشکل جانبی جعبه در حین آزمایش جلوگیری کرده و شرایط پایدار آزمایشگاهی را در طول فرآیند بارگذاری تضمین نمود.

بارگذاری قائم پی به‌صورت پیوسته و کنترل‌شده با جابه‌جایی با نرخ ثابت 0.5 mm/min انجام شد. این نرخ با مقادیر مورد استفاده در مطالعات آزمایشگاهی مشابه پی‌های نواری روی ماسه (حدود ۰/۱۵ تا ۱ mm/min) سازگار است (کسکین و لامان، ۲۰۱۳). در این روش، جابه‌جایی قائم پی با نرخ ثابت اعمال گردید و نیروی متناظر توسط لودسل دیجیتال و نشست پی به‌طور هم‌زمان توسط سه LVDT به‌صورت پیوسته ثبت شد. پاسخ سیستم به‌صورت پیوسته در طول فرآیند بارگذاری پایش گردید (احمد، ۲۰۲۲). آزمایش تا رسیدن نشست پی به 0.1B ادامه یافت. با توجه به عرض پی برابر ۸۰ میلی‌متر، مقدار نشست متناظر با این معیار برابر ۸ میلی‌متر بود و این مقدار به عنوان معیار پایان آزمایش در تمامی آزمایش‌ها بصورت یکسان در نظر گرفته شد. ظرفیت باربری نهایی نیز با استفاده از معیار یکسان و قابل بازتولید تعریف‌شده در بخش «تعیین پارامترهای رفتاری و

شاخص‌های عملکرد» استخراج شد. موقعیت لایه ژئوگرید، عمق مدفون‌شدگی، نسبت‌های هندسی آن نسبت به پی، و آرایش‌های مختلف ژئوگرید در بستر ماسه‌ای به‌صورت شماتیک در شکل ٤ ارائه شده است تا درک بهتری از آرایش آزمایشگاهی و شرایط هندسی حاکم بر آزمایش‌ها فراهم گردد.



شکل ٤. نمای شماتیک دستگاه آزمایش مدل فیزیکی (بدون مقیاس)

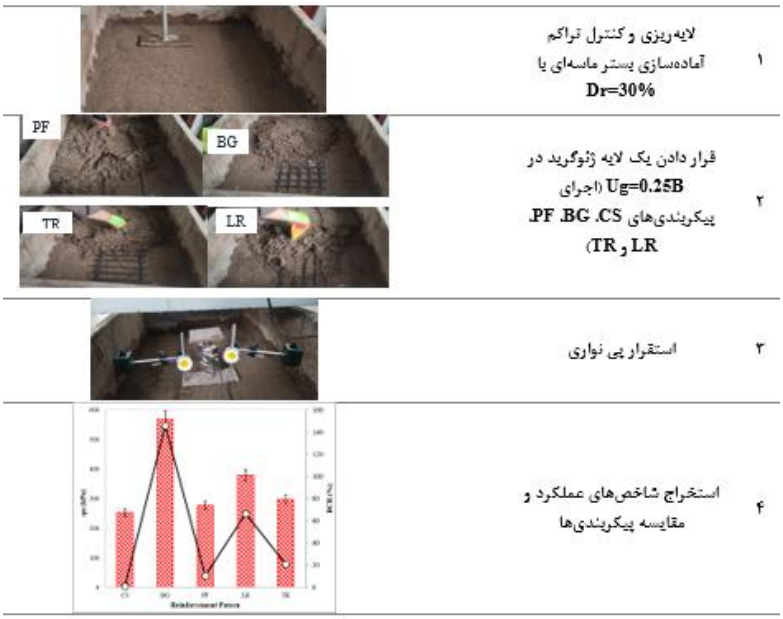
در مطالعه حاضر، تمرکز اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی بر پاسخ کلی سیستم خاک–پی، شامل بار اعمالی و نشست پی، بوده و نیروی کششی، کرنش یا تغییرشکل موضعی ژئوگرید به‌صورت مستقیم اندازه‌گیری نشده است. از این‌رو، رابطه نیرو–تغییرشکل کششی ژئوگرید در حین بارگذاری به‌طور تجربی تعیین نشد و تحلیل عملکرد ژئوگرید بر اساس تغییرات پاسخ بار–نشست و ظرفیت باربری سیستم انجام گرفت. این محدودیت در تفسیر نتایج و مقایسه آرایش‌های مختلف ژئوگرید مورد توجه قرار گرفته است.

۲-۳. آرایش‌های مسلح‌سازی

به‌منظور ارزیابی سهم مستقل اجزای مختلف ژئوگرید در عملکرد سیستم خاک مسلح، یک ژئوگرید مرجع دوطرفه انتخاب و با اعمال تغییرات هندسی، چندین آرایش مسلح‌سازی مختلف ایجاد شد. قطعات ژئوگرید مورد استفاده در آزمایش‌ها دارای ابعاد ۱۰۰۰ × ٦۰۰ میلی‌متر بودند که با توجه به عرض پی B=80mm ، به‌ترتیب معادل ۱۲/۵ و ۷/۵ برابر عرض پی در نظر گرفته شدند. ژئوگرید به‌صورت افقی و در موقعیت مرکزی نسبت به پی در داخل بستر ماسه‌ای قرار داده شد، به‌گونه‌ای که در صورت قرارگیری بعد ۱۰۰۰ میلی‌متری در راستای طولی محفظه، فاصله لبه‌های ژئوگرید تا دیواره‌های انتهایی و جانبی محفظه به‌ترتیب ۲۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر بود. بنابراین، ژئوگرید در هیچ نقطه‌ای با دیواره‌های محفظه تماس مستقیم نداشت. همچنین، در صورت قرارگیری مرکزی ژئوگرید نسبت به پی، امتداد آن از لبه‌های پی در راستای طولی و عرضی به‌ترتیب برابر با ۵.۷۵ و ۳.۲۵ عرض پی بود. این ابعاد با هدف فراهم‌کردن طول و عرض کافی برای توسعه مکانیزم اندرکنش خاک – ژئوگرید و جلوگیری از محدودشدن مستقیم آن توسط مرزهای محفظه انتخاب شد. با توجه به گزارش مطالعات پیشین مبنی بر گسترش تقریبی ناحیه گسیختگی تا حدود 2.5B در طرفین پی، امتداد ژئوگرید از لبه‌های پی در هر دو راستا از این محدوده بیشتر بوده و از نظر هندسی، فضای کافی برای توسعه ناحیه گسیختگی مورد انتظار در محدوده مسلح‌شده فراهم می‌کرد (مازوز و همکاران، ۲۰۲۵).

در تمامی آزمایش‌ها، نوع ماده، ضخامت و ابعاد کلی ژئوگرید ثابت نگه داشته شد، در حالی که آرایش و جهت‌گیری اعضای طولی و عرضی آن به‌صورت هدفمند تغییر داده شد. حذف یا بازآرایی بخشی از اعضای داخلی ژئوگرید می‌تواند موجب تغییر در سختی مؤثر مسلح‌کننده، سطح تماس مؤثر خاک – ژئوگرید و در نتیجه نحوه انتقال تنش و بسیج مقاومت اندرکنشی شود. از این‌رو، اثر مشاهده‌شده در آرایش‌ها به عنوان پاسخ توأمان خاک و هندسه مؤثر مسلح‌کننده تفسیر شده و این ملاحظه در تحلیل نتایج مورد توجه قرار گرفته است. بدین منظور، پنج حالت مختلف شامل یک حالت غیرمسلح و چهار آرایش مسلح مورد بررسی قرار گرفت.

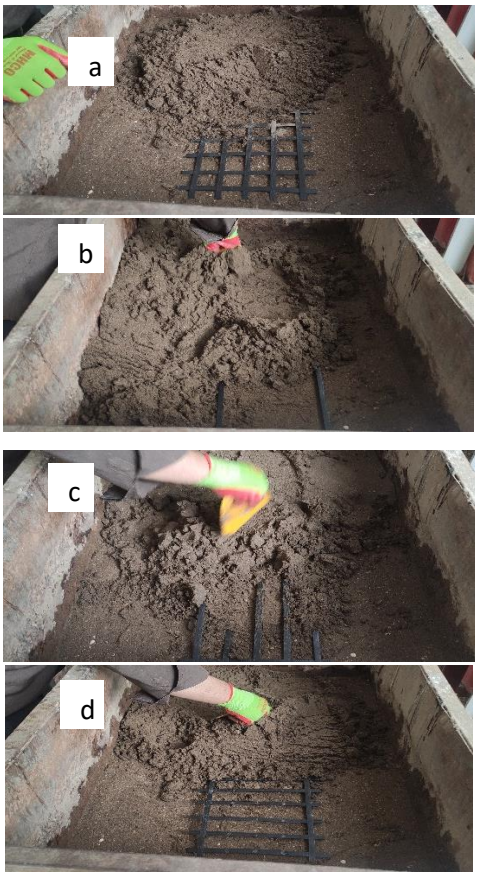
حالت اول مربوط به وضعیت غیرمسلح (CS) است که در آن هیچ عنصر مسلح‌کننده‌ای در توده خاک قرار داده نشده و به‌عنوان شرایط پایه برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های مسلح به‌کار رفته است. حالت دوم شامل آرایش کامل ژئوگرید دوطرفه (BG) است که در آن ژئوگرید بدون هیچ‌گونه تغییر هندسی و با حفظ کامل اعضای طولی و عرضی مورد استفاده قرار گرفته و به‌عنوان حالت مرجع مسلح‌شده در نظر گرفته شده است. در حالت سوم، به‌منظور بررسی سهم شبکه داخلی ژئوگرید، تمامی اعضای داخلی حذف شده و تنها قاب پیرامونی حفظ گردید که در ادامه با عنوان آرایش قاب پیرامونی (PF) معرفی می‌شود. در این آرایش، ساختار شبکه داخلی حذف شده و تنها یک قاب مرزی در اطراف ناحیه مسلح باقی مانده است. حالت چهارم مربوط به آرایش اعضای طولی (LR) است که در آن، علاوه بر قاب پیرامونی، تنها اعضای داخلی هم‌راستا با محور طولی پی نواری حفظ شده و اعضای عرضی حذف گردیدند. با توجه به هم‌راستایی این اعضا با محور پی، انتظار می‌رود که این آرایش نقش مؤثرتری در انتقال بار کششی و کنترل گسترش ناحیه گسیختگی تحت شرایط کرنش صفحه‌ای ایفا کند. حالت پنجم آرایش اعضای عرضی (TR) را شامل می‌شود که در آن تنها اعضای داخلی عمود بر محور طولی پی، همراه با قاب پیرامونی، حفظ شده و اعضای طولی حذف گردیدند. شماتیک انواع پیکربندی‌ها در شکل ٦ ارائه شده است. در این آرایش‌ها، هدف از تغییر هندسه ژئوگرید، جداسازی نسبی نقش پیوستگی شبکه و جهت‌گیری اعضای مسلح‌کننده بود نه حذف اثر تغییر سختی یا سطح اندرکنش: از این‌رو، این عوامل در تفسیر مقایسه‌ای نتایج مورد توجه قرار گرفتند.



شکل ۵. روند اجرایی آزمایش‌های پژوهش حاضر

نمای کلی از روند گام‌به‌گام به‌کاررفته در این تحقیق در شکل ۵ ارائه شده است که توالی مراحل از آماده‌سازی مصالح و آرایش نمونه‌ها تا انجام آزمایش بارگذاری صفحه‌ای و ارزیابی مقایسه‌ای عملکرد را نشان می‌دهد. در تمامی آرایش‌های مسلح‌شده، یک لایه ژئوگرید در عمق ثابت 0.25B نسبت به سطح بستر قرار داده شد. این عمق بر اساس نتایج مطالعه مقدماتی انجام‌شده در چارچوب این پژوهش انتخاب شد و در ادامه

آزمایش‌های اصلی به‌عنوان یک پارامتر ثابت در نظر گرفته شد. انتخاب این عمق با توجه به نتایج مطالعات پیشین که عمق اولین لایه مسلح‌کننده را در محدوده حدود 0.25B تا 0.35B برای پی‌های نواری روی ماسه گزارش کرده‌اند، همچنین، بر اساس نتایج مطالعه مقدماتی انجام‌شده در این پژوهش صورت گرفت (کاپور و همکاران، ۲۰۲۳).



شکل ٦. انواع ژئوگریدهای مورد استفاده در تحقیق حاضر: a) ژئوگرید کامل دوطرفه (BG)، b) قاب پیرامونی بدون اعضای داخلی (PF)، c) آرایش اعضای عرضی (عمود بر محور پی) (TR)، و d) آرایش اعضای طولی (هم راستای بر محور پی) (LR)

۲-٤. روش آماده‌سازی بستر ماسه‌ای و کنترل تراکم

به‌منظور اطمینان از یکنواختی شرایط اولیه و افزایش قابلیت تکرارپذیری نتایج، تمامی نمونه‌های آزمایشگاهی با استفاده از یک روش ثابت و کنترل‌شده آماده‌سازی شدند. بر اساس نتایج آزمایش‌های تعیین مشخصات فیزیکی خاک، رطوبت بهینه ماسه برابر با ۱۵ درصد تعیین شد و تمامی نمونه‌ها با این رطوبت آماده‌سازی شدند. همچنین، وزن مخصوص خشک هدف برای ساخت بستر ماسه‌ای بر اساس دانسیته نسبی هدف ۹۰ درصد تعیین گردید. برای این منظور، مقدار ماسه مورد نیاز برای هر مرحله بر اساس حجم لایه و وزن مخصوص خشک هدف محاسبه شده و خاک پس از تنظیم رطوبت تا مقدار بهینه ۱۵ درصد به‌صورت لایه‌های متوالی با ضخامت تقریبی ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر در داخل مخزن آزمایش ریخته شد. پس از پخش یکنواخت هر لایه، عملیات تراکم به‌صورت یکنواخت و با اعمال انرژی تراکمی ثابت انجام گرفت تا توزیع چگالی در سراسر سطح لایه تا حد امکان یکنواخت باشد. سپس سطح هر لایه تراز شده و لایه بعدی روی آن اجرا گردید. این فرآیند تا دستیابی به ارتفاع نهایی بستر ادامه یافت. به‌منظور کنترل کیفیت نمونه‌سازی و اطمینان از یکسان بودن شرایط تراکم در تمامی آزمایش‌ها، وزن کل مصالح مصرفی، حجم اشغال‌شده و وزن مخصوص خشک حاصل به‌طور مستمر کنترل و با مقادیر هدف مقایسه گردید. در تمامی آزمایش‌ها، اختلاف وزن مخصوص خشک اندازه‌گیری‌شده با مقدار هدف در محدوده قابل قبول آزمایشگاهی حفظ شد تا اثر تغییرات ناشی از آماده‌سازی نمونه بر نتایج به حداقل برسد. همچنین تمامی نمونه‌ها با رطوبت اولیه یکسان و با استفاده از رویه اجرایی مشابه ساخته شدند تا تنها متغیر مستقل پژوهش، یعنی آرایش هندسی اجزای ژئوگرید، بر پاسخ مکانیکی سیستم خاک – پی تأثیرگذار باشد. این روش آماده‌سازی امکان مقایسه مستقیم و قابل اعتماد عملکرد آرایش‌های مختلف ژئوگرید را فراهم نموده و از ایجاد خطاهای ناشی از تغییرات دانسیته یا ناهمگنی بستر خاک جلوگیری می‌کند.

۲-۵. تعیین پارامترهای رفتاری و شاخص‌های عملکرد

به‌منظور ارزیابی رفتار مکانیکی سیستم خاک–پی–ژئوگرید، مجموعه‌ای از شاخص‌های کلیدی شامل ظرفیت باربری نهایی، ناحیه تأثیر مسلح‌سازی، مدول عکس‌العمل بستر، کاهش نشست در تنش کاری و سختی اولیه پاسخ تنش–نشست از نتایج آزمایش بارگذاری صفحه‌ای استخراج شد. تمامی پارامترها بر اساس منحنی‌های تنش–نشست حاصل از برنامه آزمایشگاهی و با استفاده از معیارهای یکسان و قابل بازتولید برای تمامی پیکربندی‌ها تعیین شدند. با توجه به ماهیت تدریجی منحنی‌های تنش–نشست و عدم مشاهده یک نقطه گسیختگی مشخص در برخی از آزمایش‌ها، ظرفیت باربری نهایی در تمامی پیکربندی‌ها با استفاده از روش دو تانژانت تعیین شد. بدین منظور، یک تانژانت بر بخش تقریباً خطی اولیه منحنی و تانژانت دوم بر بخش انتهایی منحنی در ناحیه تغییرشکل‌های بزرگ رسم گردید و تنش متناظر با محل تقاطع دو تانژانت به‌عنوان ظرفیت باربری نهایی qu در نظر گرفته شد. این معیار بدون تغییر برای تمامی پیکربندی‌ها اعمال شد تا مقایسه ظرفیت باربری از یک مبنای یکسان و قابل بازتولید برخوردار باشد.

سختی اولیه سیستم از شیب اولیه منحنی تنش–نشست در محدوده تغییرشکل‌های کوچک استخراج شد که نمایانگر پاسخ شبه‌الاستیک اولیه سیستم پیش از توسعه نواحی تسلیم یا گسیختگی موضعی است. مدول عکس‌العمل بستر از نسبت تنش اعمالی به نشست متناظر در بخش خطی اولیه منحنی تنش–نشست محاسبه شد و به‌عنوان شاخصی از سختی معادل سیستم خاک–پی مورد استفاده قرار گرفت. کاهش نشست در تنش کاری به‌صورت درصد کاهش نشست نسبت به حالت غیرمسلح در سطح تنش کاری مشخص تعریف شد. در این پژوهش، به‌منظور ایجاد یک سطح بارگذاری مرجع یکسان برای مقایسه عملکرد سرویس‌پذیری آرایش‌های مختلف، تنش کاری معادل ۵۰ درصد ظرفیت باربری نهایی حالت غیرمسلح در نظر گرفته شد. با توجه به ظرفیت باربری نهایی ۲۵۲ کیلوپاسکال برای حالت غیرمسلح، تنش کاری برابر با ۱۲۶ کیلوپاسکال تعیین گردید. بنابراین، نشست متناظر با این تنش در تمامی آرایش‌ها استخراج و درصد کاهش نشست نسبت به حالت غیرمسلح محاسبه شد این تنش به‌منظور ارزیابی عملکرد تغییرشکلی در سطح بارگذاری یکسان و پیش از رسیدن به معیار پایان آزمایش انتخاب شد. در مطالعه حاضر، به دلیل آنکه نیروی کششی و کرنش ژئوگرید در حین آزمایش بارگذاری پی به‌صورت مستقیم اندازه‌گیری نشد، انرژی کرنشی جذب‌شده توسط ژئوگرید به‌عنوان یک شاخص مستقل از نتایج آزمایش استخراج نشد.

گستره ناحیه تأثیر مسلح‌سازی به‌عنوان یک شاخص هندسی و تقریبی برای مقایسه دامنه تغییرشکل سطح خاک در آرایش‌های مختلف تعریف شد. این شاخص بر اساس گستره افقی ناحیه‌ای از سطح ماسه که در اثر بارگذاری پی دچار نشست قابل مشاهده می‌شد، تعیین گردید؛ به‌گونه‌ای که فاصله افقی از محدوده بارگذاری تا نقطه‌ای که تغییرشکل سطحی خاک عملاً متوقف شده و نشست قابل مشاهده‌ای در سطح ماسه وجود نداشت، به‌عنوان طول ناحیه تأثیر در نظر گرفته شد. این اندازه‌گیری برای تمامی پیکربندی‌ها با معیار مشاهده‌ای ثابت انجام شد و سپس تغییر نسبی آن نسبت به حالت غیرمسلح مطابق رابطه (۱) محاسبه شد.

$$\Delta L = \frac{(Li - L_{CS})}{L_{CS}} \times 100 \qquad (۱)$$

که در آن Li طول ناحیه تغییرشکل سطحی در هر یک از پیکربندی‌های مسلح‌سازی و LCS طول متناظر در حالت غیرمسلح است. این شاخص بیانگر میدان تنش یا جابه‌جایی در داخل توده خاک نیست، بلکه یک معیار

هندسی و مشاهده‌ای برای مقایسه نسبی گستره تغییرشکل سطحی در شرایط آزمایش حاضر است.

به‌منظور ارزیابی تکرارپذیری و کاهش اثر تغییرپذیری‌های آزمایشگاهی، هر یک از پیکربندی‌های مورد بررسی در سه آزمایش مستقل و تحت شرایط یکسان تکرار شد. برای هر پیکربندی، مقادیر شاخص‌های استخراج‌شده از سه آزمایش با یکدیگر مقایسه و مقدار میانگین به‌عنوان نتیجه نهایی گزارش شد. همچنین، انحراف معیار و ضریب تغییرات برای نتایج حاصل محاسبه گردید. بررسی پراکندگی داده‌ها نشان داد که ضریب تغییرات در تمامی پیکربندی‌ها در محدوده ۳ تا ۵ درصد قرار دارد که بیانگر تکرارپذیری مناسب نتایج و پراکندگی محدود داده‌های آزمایشگاهی است. به‌منظور نمایش بصری این پراکندگی، در شکل‌های مربوط به نتایج اصلی، میله‌های خطا بر اساس انحراف معیار نتایج سه تکرار ارائه شده‌اند.

۳. نتایج و بحث

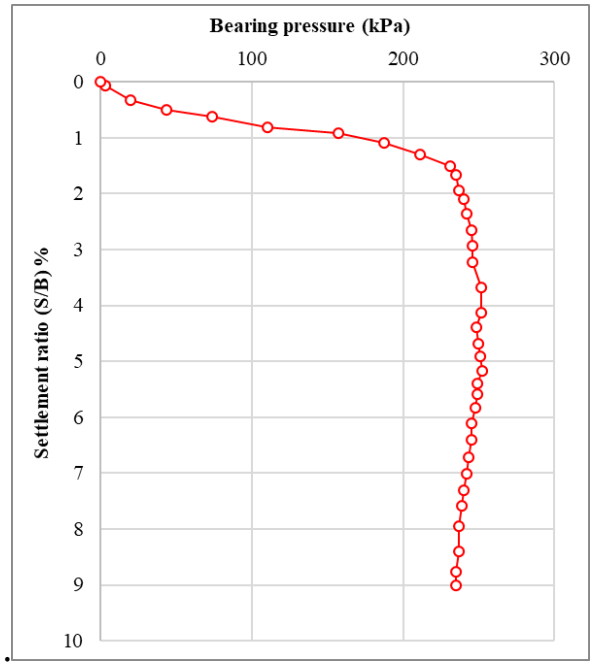
برای ارزیابی تأثیر آرایش هندسی اجزای ژئوگرید بر رفتار مکانیکی پی‌های نواری مستقر بر خاک ماسه‌ای، نتایج آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای بر اساس مجموعه‌ای از شاخص‌های عملکردی کلیدی تحلیل شد. پاسخ سیستم خاک–پی تحت پنج حالت مختلف شامل خاک غیرمسلح، ژئوگرید کامل دوطرفه، آرایش قاب پیرامونی، آرایش اعضای طولی، و آرایش اعضای عرضی به‌صورت نظام‌مند بررسی شد تا نقش جهت‌گیری اعضا و پیوستگی ساختاری در عملکرد سیستم مشخص گردد. این تحلیل بر مبنای مقایسه منحنی‌های بار–نشست و استخراج پارامترهای اساسی شامل ظرفیت باربری نهایی، کاهش نشست در تنش کاری، سختی اولیه، مدول عکس‌العمل بستر، ناحیه تأثیر ژئوگرید، و انرژی کرنشی ذخیره‌شده انجام شد. علاوه بر مقایسه‌های عددی، روند تغییرات و روابط متقابل میان این پارامترها نیز بررسی گردید تا درک جامع‌تری از مکانیزم‌های حاکم حاصل شود. از آنجا که تمامی شرایط آزمایش شامل خواص خاک، عمق استقرار ژئوگرید، هندسه پی، مشخصات مصالح و روش بارگذاری ثابت نگه داشته شد، تفاوت‌های مشاهده‌شده در رفتار صرفاً به آرایش هندسی و جهت‌گیری ژئوگرید نسبت داده می‌شود. بر این اساس، تحلیل حاضر بر شناسایی مکانیزم‌های غالب مسلح‌سازی و تعیین کارآمدترین آرایش ژئوگرید در بهبود عملکرد پی‌های سطحی متمرکز است.

۳-۱. پاسخ پایه ماسه غیرمسلح

ابتدا رفتار مکانیکی نمونه کنترل (خاک غیرمسلح) مورد بررسی قرار گرفت تا مبنایی برای ارزیابی اثربخشی آرایش‌های مختلف ژئوگرید فراهم شود. رفتار ماسه غیرمسلح تحت بارگذاری صفحه‌ای به‌عنوان حالت مرجع، امکان ارزیابی کمی بهبودهای ناشی از مسلح‌سازی را فراهم می‌سازد و نقش ژئوگرید در تغییر ظرفیت باربری و ویژگی‌های تغییرشکلی را مشخص می‌کند. در این راستا، منحنی تنش–نشست حاصل از آزمایش حالت غیرمسلح تحلیل و پارامترهای کلیدی شامل ظرفیت باربری نهایی، مدول عکس‌العمل بستر، سختی اولیه و نشست در تنش کاری استخراج شد. این پارامترها سپس به‌عنوان مقادیر مرجع برای مقایسه با حالت‌های مسلح مورد استفاده قرار گرفتند تا ارزیابی کمی و یکپارچه‌ای از میزان بهبود عملکرد امکان‌پذیر گردد. منحنی تنش–نشست خاک غیرمسلح در شکل ۷ نشان داده شده است.

در این تحقیق، با توجه به عدم وقوع گسیختگی ترد در ماسه، ظرفیت باربری نهایی بر اساس معیار نشست معادل ۱۰ درصد عرض پی (0.1B) برابر با ۸ میلی‌متر تعریف شد. منحنی بار–نشست به‌دست‌آمده از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای برای نمونه کنترل (ماسه بدون هرگونه افزودنی) رفتار کلاسیک و متداول خاک‌های

دانه‌ای با دانسیته کم را نشان می‌دهد. این منحنی با افزایش تدریجی نشست همراه با افزایش تنش اعمالی مشخص می‌شود، بدون آن‌که قله مشخص یا افت ناگهانی در مقاومت باربری مشاهده گردد.



شکل ۷. منحنی بار- نشست ماسه غیرمسلح (حالت کنترل)

این رفتار بیانگر پاسخ سخت‌شوندگی کرنشی و وقوع تغییرشکل برشی موضعی است که با نظریه‌های کلاسیک ظرفیت باربری در ماسه هم‌خوانی دارد (هلیس و همکاران، ۲۰۲۳). به دلیل پایین بودن دانسیته نسبی خاک، بازآرایی ذرات تحت بارگذاری به‌صورت تدریجی رخ می‌دهد و این امر موجب تراکم پیشرونده خاک پیش از تشکیل هرگونه سطح گسیختگی مشخص می‌شود؛ در نتیجه، مقاومت نهایی به‌جای وقوع یک گسیختگی ناگهانی، به‌صورت مجانبی و تدریجی بسیج می‌گردد (وسیچ، ۱۹۷۳). در بخش ابتدایی منحنی، شیب نسبتاً تند بیانگر پاسخ شبه‌الاستیک اسکلت خاک است که عمدتاً تحت تأثیر بسته شدن فضاهای خالی و افزایش تدریجی تعداد تماس‌های بین‌ذره‌ای کنترل می‌شود. با افزایش سطح تنش، کاهش تدریجی سختی مشاهده می‌گردد که از طریق کاهش شیب منحنی قابل تشخیص است و نشان‌دهنده گذار از رفتار عمدتاً الاستیک به تغییرشکل پلاستیک ناشی از بازآرایی و لغزش ذرات است. این روند با نتایج مطالعات پیشین مبتنی بر آزمایش بارگذاری صفحه‌ای روی ماسه که توسط عتیق و همکاران (۲۰۲۵) و بیلدیک و لامان (۲۰۲۰) گزارش شده‌اند، هم‌خوانی خوبی دارد (عتیق و همکاران، ۲۰۲۵) که در آن، رفتار کنترل‌شده توسط نشست به‌جای یک مکانیزم گسیختگی برشی مشخص، پاسخ طراحی را تعیین می‌کند. عدم وجود یک نقطه گسیختگی کاملاً مشخص نیز نشان می‌دهد که سیستم دچار گسیختگی برشی کلی نمی‌شود و هیچ سطح لغزش پیوسته‌ای در توده خاک تحت شرایط بارگذاری اعمال‌شده توسعه نمی‌یابد. این رفتار برای خاک‌های با دانسیته نسبی کم که تحت تنش محصورکننده نسبتاً پایین قرار دارند، همان‌گونه که معمولاً در آزمایش‌های بارگذاری سطحی مشاهده می‌شود، قابل

انتظار است (بولس، ۱۹۸۷). علاوه بر این، پاسخ تقریباً خطی مشاهده‌شده در محدوده تنش‌های میانی امکان برآورد قابل‌اعتماد پارامترهای تغییرشکلی مانند مدول تغییرشکل و مدول عکس‌العمل بستر را فراهم می‌سازد، زیرا این بخش از منحنی نمایانگر شرایط بهره‌برداری (سرویس‌دهی) به‌جای حالت حدی نهایی است. بنابراین، پاسخ بار–نشست نمونه غیرمسلح به‌عنوان مبنای اساسی برای ارزیابی اثرات مسلح‌سازی با ژئوگرید و بهسازی خاک عمل کرده و مرجع روشنی برای کمی‌سازی میزان بهبود عملکرد ارائه می‌دهد. این رویکرد به‌طور گسترده در مطالعات آزمایشگاهی بهسازی زمین توصیه شده است، جایی که مشخصه‌یابی خاک دست‌نخورده برای جداسازی اثرات مسلح‌سازی و تضمین تحلیل مقایسه‌ای معنادار، امری ضروری تلقی می‌شود (روتایدا، ۲۰۲۳).

در مود گسیختگی و ظرفیت باربری منحنی بار–نشست ماسه غیرمسلح به‌وضوح افزایش پیوسته نشست را بدون تشکیل یک قله مشخص نشان می‌دهد که مشخصه مکانیزم گسیختگی برشی موضعی در خاک‌های دانه‌ای است. بر اساس نظریه کلاسیک ظرفیت باربری، در خاک‌هایی با دانسیته نسبی پایین، تشکیل کامل یک سطح گسیختگی پیوسته پیش از وقوع تغییرشکل‌های قابل‌توجه حاصل نمی‌شود و در نتیجه، بسیج مقاومت برشی به‌صورت تدریجی و هم‌زمان با افزایش بارگذاری رخ می‌دهد (ترزاقی و همکاران، ۱۹۹۶). عدم وجود افت ناگهانی پس از رسیدن به بار اوج نیز با نتایج وسیچ (۱۹۷۳) در خصوص رفتار پی‌های سطحی روی ماسه هم‌خوانی دارد؛ جایی که گسیختگی به‌جای شکست ترد، توسط تجمع تدریجی کرنش‌ها کنترل می‌شود. ظرفیت باربری نهایی به‌دست‌آمده از نتایج آزمایشگاهی تقریباً برابر با ۲۵۰ کیلوپاسکال است که در محدوده متداول گزارش‌شده برای ماسه در منابع طراحی‌محور قرار می‌گیرد (هلیس و همکاران، ۲۰۲۳). با در نظر گرفتن ضریب اطمینان متعارف برابر با ۳، مطابق با توصیه بولس (۱۹۸۷) برای طراحی پی‌های سطحی، ظرفیت باربری مجاز بر اساس معیار گسیختگی برشی حدود ۸۳ کیلوپاسکال برآورد می‌شود. با این حال، همان‌گونه که بورلند و همکاران (۱۹۸۵) تأکید کرده‌اند، در خاک‌های ماسه‌ای اغلب نشست معیار کنترل‌کننده در طراحی پی‌ها است؛ بنابراین، تنش متناظر با نشست در حالت بهره‌برداری (در این تحقیق به میزان نصف ظرفیت باربری) تصویر واقع‌بینانه‌تری از عملکرد بهره‌برداری خاک ارائه می‌دهد. این اختلاف میان ظرفیت نهایی و ظرفیت بهره‌برداری، ماهیت کنترل‌شده توسط تغییرشکل در رفتار ماسه را برجسته می‌سازد.

مدول عکس‌العمل بستر که از بخش شبه‌خطی منحنی بار–نشست استخراج شده است، تقریباً برابر با ۰/۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب به‌دست آمد که نشان‌دهنده سختی نسبتاً کم اما پایدار محیط خاکی است. بر اساس مدل بستر وینکلر، این پارامتر بیانگر نسبت بین فشار تماس و نشست متناظر بوده و بنابراین به‌طور مستقیم بازتاب‌دهنده پاسخ بهره‌برداری سیستم خاک–پی است، نه مقاومت نهایی آن (بولس، ۱۹۸۷). مقدار اندازه‌گیری‌شده در محدوده متداول گزارش‌شده برای ماسه قرار دارد که معمولاً بین ۰/۵ تا یک کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب است (داس، ۲۰۱۷). سختی نسبتاً پایین را می‌توان به نسبت تخلخل بالا و تماس محدود بین ذرات در ماسه نسبت داد؛ شرایطی که با افزایش تنش به‌تدریج و در نتیجه بازآرایی ذرات و تراکم‌پذیری، بهبود می‌یابد. علاوه بر این، آزمایش‌ها تحت شرایط تنش محصورکننده پایین و در تراز سطح زمین انجام شده‌اند که این امر نیز موجب کاهش سختی معادل سیستم خاک می‌شود؛ موضوعی که توسط بولس (۱۹۸۷) نیز مورد تأکید قرار گرفته است.

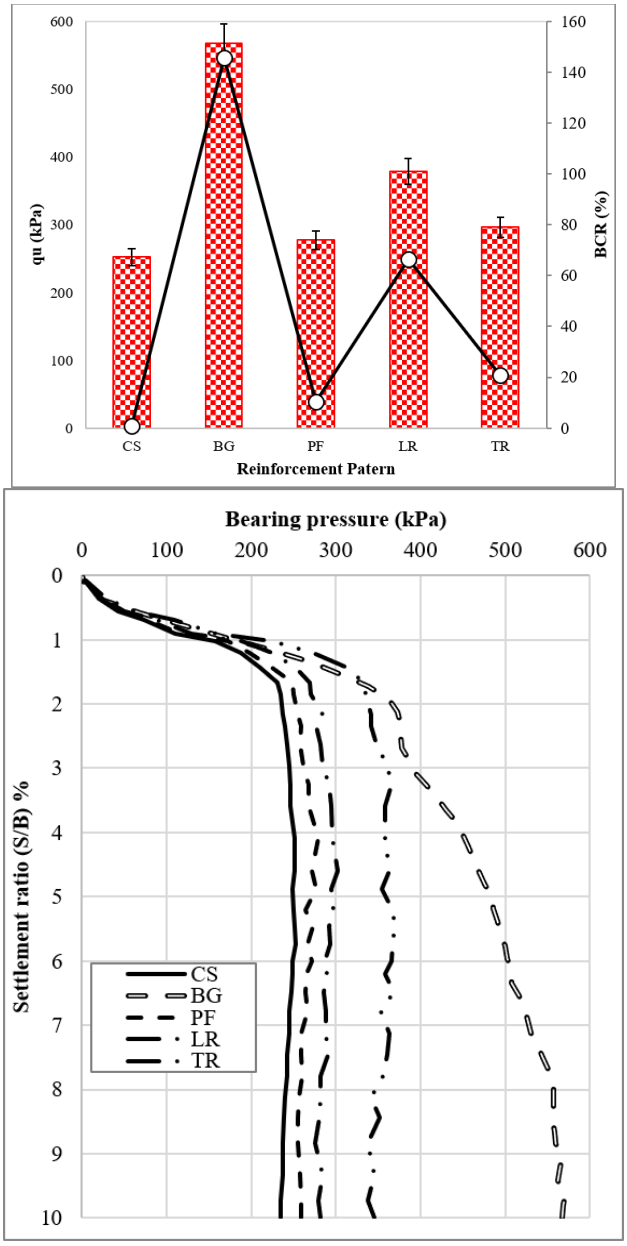
مدول الاستیسیته معادل که از پاسخ شبه‌الاستیک اولیه صفحه صلب استخراج شده است، تقریباً برابر با ۲۸ مگاپاسکال برآورد گردید. این مقدار در محدوده

گزارش‌شده برای ماسه تا با تراکم متوسط قرار می‌گیرد (آقایارزاده، ۲۰۱۹) که نشان‌دهنده پاسخ خاک با سختی نسبتاً کم تا متوسط است. از دیدگاه مکانیکی، این مدول بیانگر رژیم تغییرشکلی است که در آن بازآرایی و لغزش ذرات بر رفتار غالب بوده و نه صرفاً کرنش الاستیک اسکلت خاک. این رفتار با مشاهدات اندرسون (۱۹۹۱) هم‌خوانی دارد. وی نشان داد که سازمان‌یافتگی مجدد ذرات، سازوکار اصلی کنترل‌کننده نشست پی‌ها در ماسه است. هم‌خوانی مدول استخراج‌شده با محدوده‌های پذیرفته‌شده، تأیید بیشتری بر این موضوع فراهم می‌کند که پاسخ بار–نشست اندازه‌گیری‌شده، بازتاب‌دهنده رفتار واقعی خاک بوده و می‌تواند با اطمینان برای واسنجی مدل‌های عددی و ارزیابی‌های مقایسه‌ای بعدی اثرات مسلح‌سازی و بهسازی با ژئوگرید مورد استفاده قرار گیرد. پاسخ تنش–نشست به‌دست‌آمده از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای روی ماسه غیرمسلح، که به‌عنوان مبنای ارزیابی سیستم‌های مسلح به کار رفته است، رفتار به‌طور مشخص غیرخطی را نشان می‌دهد که با سختی اولیه پایین و توسعه تدریجی گسیختگی همراه است. در مرحله بارگذاری اولیه (نشست‌های تقریباً تا حدود ۵ میلی‌متر)، منحنی دارای شیب نسبتاً ملایم است که بیانگر مدول تغییرشکل پایین و تراکم اولیه اسکلت دانه‌ای است. این پاسخ ناشی از دانسیته نسبی پایین ماسه و سهولت بازآرایی ذرات تحت شرایط تنش محصورکننده کم است. با پیشروی بارگذاری به محدوده نشست‌های میانی، منحنی به‌تدریج از رفتار خطی فاصله می‌گیرد و هم‌زمان نرخ افزایش نشست نسبت به تنش اعمالی افزایش می‌یابد که بیانگر بسیج تدریجی مقاومت برشی و کاهش سختی خاک در اثر لغزش و بازآرایی ذرات است. در این مرحله، اگرچه تعداد تماس‌های بین‌ذره‌ای افزایش می‌یابد، نبود محصورشدگی جانبی مؤثر، تغییرشکل جانبی را تسهیل کرده و موجب کاهش حمایت تنش جانبی و افت تدریجی مقاومت برشی می‌شود. در نزدیکی ظرفیت باربری نهایی (حدود ۲۵۲ کیلوپاسکال در این مطالعه)، منحنی تنش–نشست به پاسخ مجانبی میل می‌کند، به‌گونه‌ای که افزایش‌های قابل توجه در نشست تنها با افزایش‌های جزئی در تنش اعمالی همراه است. این رفتار نشان‌دهنده توسعه تدریجی گسیختگی در ماسه است که با تشکیل و گسترش تدریجی نواحی برشی در زیر پی نواری، به‌جای تشکیل ناگهانی یک سطح گسیختگی مشخص، مشخص می‌شود. نشست‌های متناظر در این سطح تنش نسبتاً زیاد بوده و ماهیت شکل‌پذیر بالای ماسه را تأیید می‌کند. علاوه بر این، بررسی نشست در محدوده تنش‌های بهره‌برداری (تقریباً ٤٠ تا ٦٠ درصد بار نهایی) نشان می‌دهد که همچنان تغییرشکل‌های قابل توجهی رخ می‌دهد؛ موضوعی که بیانگر آن است که در طراحی پی‌های سطحی روی ماسه، کنترل نشست نسبت به گسیختگی برشی نهایی نقش تعیین‌کننده‌تری دارد. این رفتار مشاهده‌شده با تفسیرهای کلاسیک ژئوتکنیکی ارائه‌شده توسط ترزاقی (۱۹۹٦) و همچنین مطالعات بعدیتوسط داس و سیواکوگان (۲۰۱۷) هم‌خوانی دارد؛ آثاری که همگی بر نقش کلیدی دانسیته نسبی، توزیع تنش و محصورشدگی جانبی در کنترل پاسخ تنش–کرنش خاک‌های دانه‌ای تأکید دارند.

۳-۲. تأثیر آرایش ژئوگرید بر ظرفیت باربری

نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای، که به‌صورت منحنی‌های تنش–نشست ارائه شده‌اند، مبنای اصلی ارزیابی پاسخ مکانیکی خاک تحت آرایش‌های مختلف مسلح‌سازی را تشکیل می‌دهند. شکل ۸، روابط تنش–نشست متناظر با چهار آرایش مسلح‌سازی ژئوگرید را نشان می‌دهد که شامل: ۱) آرایش کامل ژئوگرید دوطرفه، ۲) آرایش قاب پیرامونی بدون اعضای داخلی، ۳) مسلح‌سازی یک‌محوره در راستای طولی (محور X)، و ٤) مسلح‌سازی یک‌محوره در راستای عرضی (محور Y) است. این پیکربندی‌ها به‌صورت نظام‌مند طراحی

شده‌اند تا سهم پیوستگی اعضای ژئوگرید و اثر جهت‌گیری آن‌ها بر عملکرد باربری پی نواری مستقر بر ماسه به‌طور مجزا مورد ارزیابی قرار گیرد. برای ارزیابی دقت و قابلیت تکرارپذیری نتایج، تمامی آزمایش‌ها در هر حالت سه بار تکرار شدند و نتایج به‌صورت میانگین گزارش گردید. علاوه بر این، انحراف معیار برای تمامی پارامترهای کلیدی از جمله ظرفیت باربری نهایی محاسبه شد. نتایج نشان داد که مقدار انحراف معیار در تمامی حالت‌های آزمایش در بازه ۳ تا ۵ درصد قرار دارد که بیانگر پراکندگی محدود داده‌ها و تکرارپذیری مناسب نتایج آزمایشگاهی است.



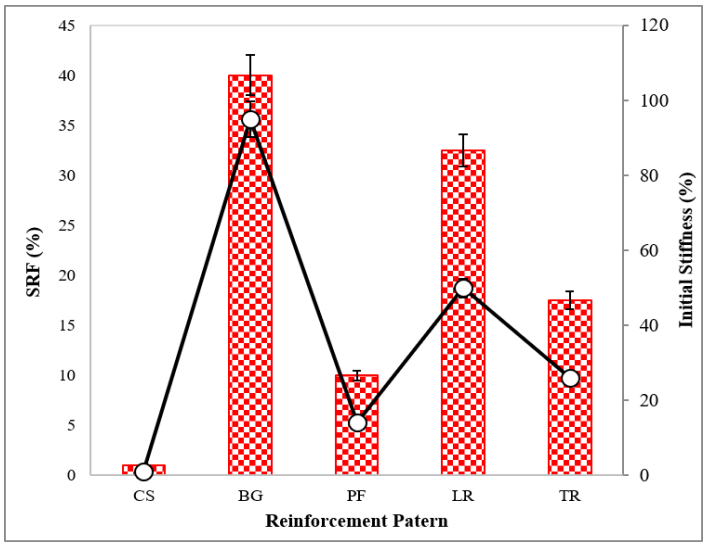
شکل ۸. تأثیر آرایش ژئوگرید بر ظرفیت باربری پی نواری روی ماسه

نتایج ظرفیت باربری نهایی به‌وضوح نشان می‌دهد که آرایش هندسی اجزای ژئوگرید نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد پی نواری مستقر بر ماسه دارد. به‌طور کلی، پاسخ سیستم روندی افزایشی اما غیرخطی را از حالت غیرمسلح به سمت آرایش کامل ژئوگرید دوطرفه نشان می‌دهد که بیانگر افزایش تدریجی کارایی سیستم با افزایش یکپارچگی ساختاری مسلح‌کننده است (روتایدا، ۲۰۲۳؛ تاکور و شارما، ۲۰۲٤). آرایش کامل ژئوگرید دوطرفه بیشترین میزان بهبود را نشان می‌دهد، در حالی که آرایش اعضای طولی در رتبه بعدی قرار می‌گیرد و آرایش‌های اعضای عرضی و قاب پیرامونی در مقایسه، سهم محدودتری در افزایش ظرفیت باربری دارند. این روند به‌روشنی نشان می‌دهد که صرف وجود مسلح‌سازی ژئوگرید برای دستیابی به عملکرد بهینه کافی نیست و جهت‌گیری و پیوستگی اجزای آن نسبت به میدان تنش و سازوکارهای گسیختگی، از اهمیت بنیادی برخوردار است. در حالت غیرمسلح، ظرفیت باربری نهایی برابر با ۲۵۲/۲۲ کیلوپاسکال بوده که به‌عنوان مبنای مرجع در نظر گرفته می‌شود. آرایش کامل ژئوگرید دوطرفه ظرفیت باربری را به ٥٦٧/٥٠ کیلوپاسکال افزایش می‌دهد که معادل حدود ۱۲۵ درصد بهبود نسبت به خاک غیرمسلح است و بیشترین میزان ارتقا در میان تمامی حالات آزمایش‌شده محسوب می‌شود. این بهبود قابل‌توجه بیانگر برهم‌کنش هم‌افزای اعضای طولی و عرضی است که می‌تواند منجر به انتقال مؤثرتر تنش کششی، بازتوزیع تنش در زیر پی و محدودسازی تغییرشکل جانبی خاک گردد (حسین و مجید، ۲۰۱٦). در نتیجه، سازوکار گسیختگی به تأخیر افتاده و در ناحیه‌ای عمیق‌تر و گسترده‌تر در توده خاک توسعه می‌یابد. در مقابل، آرایش قاب پیرامونی افزایش بسیار محدودی در ظرفیت باربری تا مقدار ۲۷۷/٤٤ کیلوپاسکال ایجاد می‌کند که معادل تنها حدود ۱۰ درصد بهبود است. این افزایش اندک نشان می‌دهد که نبود اعضای داخلی ژئوگرید به‌طور قابل‌توجهی مانع از شکل‌گیری یک توده خاک مسلح مؤثر می‌شود و صرفاً وجود عناصر مرزی برای بسیج سازوکارهای معنادار اندرکنش خاک–ژئوگرید کافی نیست. آرایش اعضای طولی ظرفیت باربری را به ۳۷۸/۳۳ کیلوپاسکال می‌رساند (حدود ۵۰ درصد افزایش)، در حالی‌که آرایش اعضای عرضی مقدار نسبتاً پایین‌تری برابر با ۲۹٦/۳٦ کیلوپاسکال (حدود ۱۷/۵ درصد افزایش) ارائه می‌دهد. اختلاف قابل‌توجه میان این دو آرایش یک‌محوره، نقش غالب هم‌راستایی مسلح‌سازی با راستاهای اصلی تنش و تغییرشکل را تحت شرایط پی نواری به‌خوبی نشان می‌دهد. به‌ویژه، اعضای طولی که هم‌راستا با جهت توسعه گسیختگی تحت شرایط کرنش صفحه‌ای هستند، به‌طور مؤثرتری در کشش بسیج شده و در نتیجه مقاومت بیشتری در برابر گسترش تدریجی ناحیه برشی فراهم می‌کنند. از دیدگاه مکانیکی، عملکرد برتر سیستم ژئوگرید کامل را می‌توان به فعال‌سازی هم‌زمان چندین سازوکار مسلح‌سازی نسبت داد؛ از جمله انتقال بار کششی، بهبود توزیع تنش، و افزایش محصورشدگی ذرات ماسه. با توجه به اینکه اندازه چشمه ژئوگرید در مقایسه با اندازه متوسط دانه‌ها (٤۰ میلی‌متر در برابر ۰/۲٤ میلی‌متر) نسبتاً بزرگ است، استنباط می‌شود که در این مطالعه، بازتوزیع تنش و عملکرد غشایی کششی نسبت به قفل‌شدگی مستقیم ذرات نقش غالب‌تری داشته‌اند. به‌طور کلی، نتایج تأیید می‌کنند که عملکرد بهینه ژئوگرید تنها زمانی حاصل می‌شود که اجزای آن به‌صورت پیوسته و در راستای مسیرهای غالب تنش بسیج شوند؛ به‌گونه‌ای که تمام سازوکارهای قابل‌دسترس اندرکنش خاک–مسلح‌کننده در یک حجم کافی از خاک فعال گردند.

۳-۳. تأثیر جهت‌گیری ژئوگرید بر سختی اولیه و کاهش نشست در سطح تنش بهره‌برداری

به‌منظور ارزیابی اثر آرایش‌های مختلف ژئوگرید بر پاسخ

تغییرشکلی سیستم خاک–پی، تغییرات کاهش نشست در تنش بهره‌برداری و سختی اولیه برای تمامی حالات بررسی‌شده در شکل ۹ ارائه شده است. نتایج به‌صورت درصد تغییر نسبت به حالت غیرمسلح بیان شده‌اند تا امکان مقایسه مستقیم و کمی اثربخشی هر آرایش در بهبود پاسخ اولیه مکانیکی و رفتار تغییرشکلی خاک فراهم شود. در این شکل، عملکرد ژئوگرید کامل دوطرفه، آرایش قاب پیرامونی، آرایش اعضای طولی و آرایش اعضای عرضی در مقایسه با حالت کنترل (غیرمسلح) مورد ارزیابی قرار گرفته است. این مقایسه مبنای روشنی برای شناسایی نقش جهت‌گیری ژئوگرید و پیوستگی ساختاری آن در کنترل تغییرشکل‌های اولیه و افزایش سختی کلی سیستم فراهم می‌سازد.



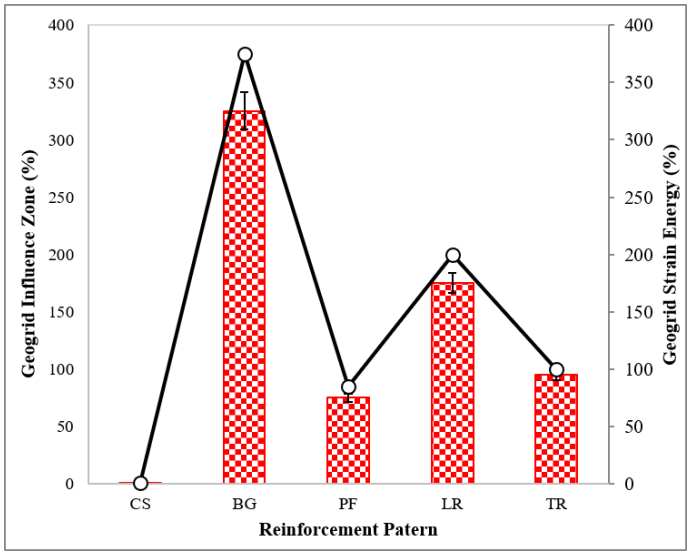
شکل ۹. تأثیر آرایش‌های مختلف ژئوگرید بر کاهش نشست در تنش بهره‌برداری و سختی اولیه پی نواری

تأثیر آرایش‌های مختلف ژئوگرید بر کاهش نشست در سطح تنش بهره‌برداری، روندی واضح و وابسته به جهت‌گیری را نشان می‌دهد که بیانگر آن است که پاسخ تغییرشکلی سیستم خاک–پی به‌شدت تحت کنترل آرایش فضایی عناصر مسلح‌کننده قرار دارد. نتایج نشان می‌دهد که آرایش کامل ژئوگرید دوطرفه بیشترین میزان کاهش نشست را فراهم می‌کند (هارشیتا و همکاران، ۲۰۲۶). پس از آن، آرایش اعضای طولی بیشترین اثرگذاری را نشان می‌دهد، در حالی‌که آرایش اعضای عرضی سهم کمتری در کاهش تغییرشکل دارد و آرایش قاب پیرامونی کمترین کارایی را در کنترل تغییرشکل‌های قائم از خود نشان می‌دهد (کومانامانچی و همکاران، ۲۰۲۵). سازگاری این روند با نتایج ظرفیت باربری نهایی نشان می‌دهد که سازوکارهای غالب مسلح‌سازی از همان مراحل اولیه بارگذاری فعال شده و نقش تعیین‌کننده‌ای در کنترل رفتار بهره‌برداری ایفا می‌کنند. از نظر کمی، ژئوگرید کامل دوطرفه موجب کاهش حدود ٤٠ درصدی نشست می‌شود که بیشترین میزان بهبود در میان تمامی حالات مورد بررسی است. این عملکرد بیانگر اهمیت وجود یک شبکه مسلح‌سازی پیوسته دوجهته در بهبود اندرکنش خاک–ژئوگرید، افزایش بازتوزیع بار و محدودسازی تغییرشکل جانبی خاک است. در مقابل، آرایش قاب پیرامونی تنها حدود ۱۰ درصد کاهش نشست ایجاد می‌کند که نشان‌دهنده ناکافی بودن مسلح‌سازی مرزی به‌تنهایی برای تشکیل یک توده خاک مسلح مؤثر یا کنترل معنادار جابه‌جایی‌های قائم است. در

میان آرایش‌های یک‌محوره، اعضای طولی حدود ۳۲/۵ درصد کاهش نشست ایجاد می‌کنند، در حالی که اعضای عرضی تنها حدود ۱۷/۵ درصد بهبود ارائه می‌دهند. این اختلاف قابل‌توجه، نقش حیاتی هم‌راستایی مسلح‌سازی با مسیرهای غالب انتقال تنش و سازوکارهای گسیختگی تحت شرایط پی نواری را برجسته می‌سازد. از دیدگاه مکانیکی، عملکرد برتر سیستم ژئوگرید کامل را می‌توان به فعال‌سازی هم‌زمان عملکرد غشایی کششی، افزایش محصورشدگی جانبی و بازتوزیع سه‌بعدی تنش در توده خاک مسلح نسبت داد. عملکرد بهتر اعضای طولی نسبت به اعضای عرضی نیز احتمالاً ناشی از هم‌راستایی آن‌ها با مسیرهای اصلی تنش و جهت توسعه ناحیه برشی تحت شرایط کرنش صفحه‌ای است که امکان بسیج مؤثرتر مقاومت کششی را فراهم می‌سازد. در مقابل، اعضای عرضی به دلیل قرارگیری عمود بر مسیرهای غالب تنش، سهم کمتری در انتقال بار و کنترل تغییرشکل دارند. تحلیل سختی اولیه نیز این روندها را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که آرایش ژئوگرید تأثیر قابل‌توجهی بر پاسخ بار–تغییرشکل در مراحل اولیه بارگذاری دارد. آرایش کامل ژئوگرید دوطرفه موجب افزایش حدود ۹۵ درصدی در سختی اولیه می‌شود که بیشترین بهبود در میان تمامی حالات است. این موضوع نشان‌دهنده افزایش چشمگیر مقاومت سیستم در برابر تغییرشکل اولیه و کاهش تمرکز تنش در توده خاک است. آرایش قاب پیرامونی افزایش نسبتاً کمی در حدود ۱٤ درصد ایجاد می‌کند که بیانگر محدودیت آن در تشکیل ناحیه مسلح مؤثر در غیاب شبکه داخلی است. در آرایش‌های یک‌محوره، اعضای طولی موجب افزایش حدود ۵۰ درصدی سختی اولیه می‌شوند، در حالی که اعضای عرضی تنها حدود ۲٦ درصد بهبود ایجاد می‌کنند. این اختلاف نیز بر نقش غالب جهت‌گیری مسلح‌سازی در پاسخ مکانیکی اولیه تأکید دارد. از منظر مکانیکی، عملکرد برتر ژئوگرید کامل دوطرفه به توانایی آن در بسیج هم‌زمان نیروهای کششی در هر دو راستای اصلی، افزایش اثر قفل‌شدگی و محصورشدگی، و ایجاد توزیع یکنواخت‌تر تنش در زیر پی نسبت داده می‌شود. با توجه به بزرگ بودن نسبی اندازه چشمه ژئوگرید در مقایسه با اندازه متوسط دانه‌های ماسه، استنباط می‌شود که در این مطالعه، مکانیزم انتقال بار کششی و بازتوزیع تنش نسبت به قفل‌شدگی مستقیم ذرات نقش غالب‌تری دارد. به‌طور کلی، نتایج به‌روشنی نشان می‌دهد که بهبود نشست و افزایش سختی اولیه نه‌تنها تابع وجود ژئوگرید است، بلکه به‌شدت به آرایش هندسی و هم‌راستایی جهت‌دار عناصر مسلح‌کننده با میدان تنش وابسته است.

۳-٤. تأثیر آرایش هندسی ژئوگرید بر ناحیه تأثیر و انرژی کرنشی ذخیره‌شده

گستره فضایی بهسازی خاک و ظرفیت جذب انرژی سیستم مسلح، دو شاخص کلیدی برای ارزیابی کارایی خاک مسلح‌شده با ژئوگرید هستند. به‌منظور کمی‌سازی اثر هندسه ژئوگرید بر این جنبه‌ها، ناحیه تأثیر ژئوگرید و انرژی کرنشی ذخیره‌شده برای تمامی آرایش‌های مورد بررسی تعیین گردید. این پارامترها دیدگاه‌های مکملی از مکانیزم‌های اندرکنش خاک–ژئوگرید ارائه می‌دهند؛ به‌طوری که ناحیه تأثیر بیانگر توزیع فضایی اثر مسلح‌سازی در توده خاک و انرژی کرنشی نشان‌دهنده میزان درگیری کششی و ظرفیت جذب انرژی ژئوگرید در حین بارگذاری است. شکل ۱۰، نمای مقایسه‌ای این دو شاخص عملکردی را برای حالت غیرمسلح و تمامی آرایش‌های مسلح‌سازی شامل ژئوگرید کامل دوطرفه، قاب پیرامونی، اعضای طولی و اعضای عرضی ارائه می‌دهد. این مقایسه امکان ارزیابی نظام‌مند تأثیر هندسه ژئوگرید بر کارایی فضایی مسلح‌سازی و توانایی سیستم در ذخیره و اتلاف انرژی مکانیکی تحت بارگذاری را فراهم می‌سازد.



شکل ۱۰. تأثیر آرایش ژئوگرید بر ناحیه تأثیر و انرژی کرنشی ذخیره‌شده

تحلیل ناحیه تأثیر ژئوگرید و انرژی کرنشی ذخیره‌شده، تفاوت‌های قابل‌توجهی را در کارایی مسلح‌سازی آرایش‌های مختلف ژئوگرید نشان می‌دهد و نقش حیاتی جهت‌گیری اعضا و پیوستگی ساختاری را در کنترل هم گستره فضایی بهسازی خاک و هم میزان بسیج کشش در سیستم خاک–ژئوگرید برجسته می‌سازد (کولی و همکاران، ۲۰۱۳؛ کومانامانچی و همکاران، ۲۰۲۵). روند کلی نتایج نشان می‌دهد که افزایش پیوستگی شبکه ژئوگرید موجب ارتقای قابل‌توجه هم در ناحیه تأثیر و هم در مقدار انرژی کرنشی ذخیره‌شده در ژئوگرید می‌شود. در تمامی حالات بررسی‌شده، آرایش کامل ژئوگرید دوطرفه بالاترین عملکرد را ارائه داده است. پس از آن آرایش اعضای طولی قرار می‌گیرد، در حالی که آرایش اعضای عرضی و قاب پیرامونی به‌ترتیب کارایی کمتری نشان می‌دهند. هم‌خوانی این روند با نتایج مربوط به ظرفیت باربری نهایی و سختی اولیه بیانگر وجود وابستگی قوی میان توسعه فضایی ناحیه مسلح‌شده و پاسخ مکانیکی کلی سیستم است. از نظر کمّی، آرایش کامل ژئوگرید دوطرفه موجب افزایش حدود ۳۲۵ درصدی ناحیه تأثیر ژئوگرید و حدود ۳۷۵ درصدی انرژی کرنشی ذخیره‌شده نسبت به حالت غیرمسلح شده است که بیشترین میزان بهبود در میان تمامی آرایش‌ها محسوب می‌شود. این رفتار نشان می‌دهد که حضور هم‌زمان اعضای طولی و عرضی موجب بازتوزیع مؤثرتر تنش و بسیج گسترده‌تر نیروهای کششی در حجم بزرگ‌تری از خاک می‌گردد. در مقابل، آرایش قاب پیرامونی کمترین بهبود را نشان داده و تنها افزایش حدود ۷۵ درصدی در ناحیه تأثیر و ۸۵ درصدی در انرژی کرنشی داشته است؛ موضوعی که بیانگر ناکافی بودن مسلح‌سازی مرزی به‌تنهایی برای تشکیل یک توده خاک مسلح کارآمد است. در میان آرایش‌های یک‌محوره، اعضای طولی عملکرد بهتری نسبت به اعضای عرضی داشته‌اند؛ به‌طوری‌که افزایش‌های حدود ۱۷۵ و ۲۰۰ درصدی در برابر ۹۵ و ۱۰۰ درصد برای ناحیه تأثیر و انرژی کرنشی مشاهده شده است. این اختلاف به هم‌راستایی اعضای طولی با مسیرهای اصلی تنش و الگوی مورد انتظار گسیختگی تحت شرایط پی نواری و کرنش صفحه‌ای نسبت داده می‌شود. از دیدگاه مکانیکی، عملکرد برتر سیستم دوطرفه ناشی از فعال‌سازی هم‌زمان مکانیزم‌های انتقال بار کششی، بازتوزیع تنش و

محصورشدگی جانبی است که در نهایت منجر به ایجاد میدان تنش یکنواخت‌تر و کاهش تمرکز تنش در زیر پی می‌شود. انرژی کرنشی بالاتر ذخیره‌شده در این آرایش نیز بیانگر بسیج بیشتر مقاومت کششی در شبکه ژئوگرید است که امکان جذب و بازتوزیع بخش بزرگ‌تری از بار اعمالی را فراهم می‌کند. با توجه به بزرگ بودن نسبی اندازه چشمه ژئوگرید در مقایسه با اندازه متوسط دانه‌های ماسه، استنباط می‌شود که در این مطالعه، مکانیزم‌های انتقال تنش و بازتوزیع تنش نسبت به قفل‌شدگی مستقیم ذرات نقش غالب‌تری داشته‌اند. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که کارایی ژئوگرید نه‌تنها به وجود آن، بلکه به آرایش هندسی و هم‌راستایی جهت‌دار اجزای آن نسبت به میدان تنش وابسته است و بر اهمیت طراحی بهینه آرایش مسلح‌سازی در پی‌های سطحی تأکید می‌کند.

۳-۵. تفسیر مکانیزم‌های تقویت و نقش جهت‌گیری اجزای ژئوگرید

نتایج حاصل از تمامی شاخص‌های عملکردی شامل ظرفیت باربری نهایی، سختی اولیه، کاهش نشست، ناحیه تأثیر ژئوگرید و انرژی کرنشی ذخیره‌شده نشان می‌دهد که مکانیزم تقویت در پژوهش حاضر عمدتاً تحت تأثیر جهت‌گیری و پیوستگی اعضای ژئوگرید قرار داشته است. با توجه به اینکه اندازه چشمه ژئوگرید مورد استفاده (٤٠ میلی‌متر) در مقایسه با اندازه متوسط ذرات ماسه (٠/٢٤ میلی‌متر) بسیار بزرگ بوده است، انتظار نمی‌رود مکانیزم قفل‌شدگی مستقیم ذرات درون چشمه‌های ژئوگرید نقش غالبی در بهبود رفتار باربری داشته باشد. در چنین شرایطی، عملکرد تقویتی ژئوگرید عمدتاً از طریق اندرکنش اصطکاکی بین خاک و اعضای ژئوگرید، محدودسازی تغییرشکل‌های جانبی خاک، توسعه اثر غشایی کششی و انتقال نیروهای کششی در طول شبکه حاصل می‌شود. با اعمال بار و افزایش نشست پی، تغییرشکل ژئوگرید موجب ایجاد نیروهای کششی در اعضای شبکه شده و این نیروها بخشی از بار اعمالی را به نواحی دورتر از مرکز بارگذاری منتقل می‌کنند. در نتیجه، تمرکز تنش در زیر پی کاهش یافته و حجم بزرگ‌تری از خاک در فرآیند تحمل بار مشارکت می‌کند. برتری محسوس آرایش دارای اعضای طولی نسبت به آرایش دارای اعضای عرضی نیز مؤید این مکانیزم است. در شرایط کرنش مسطح حاکم بر پی نواری، توسعه ناحیه گسیختگی و مسیرهای غالب انتقال تنش عمدتاً در راستای اعضای طولی اتفاق می‌افتد؛ بنابراین این اعضا قادرند نیروهای کششی را با کارایی بیشتری بسیج کرده و گسترش ناحیه گسیختگی را محدود نمایند. از سوی دیگر، عملکرد برتر ژئوگرید دوطرفه کامل نسبت به تمامی آرایش‌های دیگر نشان می‌دهد که حضور هم‌زمان اعضای طولی و عرضی علاوه بر افزایش ظرفیت انتقال نیرو، موجب توزیع یکنواخت‌تر تنش و توسعه گسترده‌تر ناحیه تقویت‌شده در خاک می‌شود. همچنین افزایش قابل توجه انرژی کرنشی ذخیره‌شده در آرایش‌های دارای پیوستگی بیشتر بیانگر بسیج مؤثرتر ظرفیت کششی ژئوگرید است. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که در پژوهش حاضر، مکانیزم غالب تقویت نه قفل‌شدگی مستقیم ذرات، بلکه ترکیبی از محدودسازی جانبی خاک، انتقال کششی نیرو، اثر غشایی ژئوگرید و بازتوزیع تنش در حجم بزرگ‌تری از توده خاک بوده است.

از آنجا که نیروی کششی و کرنش ژئوگرید به‌صورت مستقیم در طول آزمایش اندازه‌گیری نشد، سهم کمی مؤلفه کششی ژئوگرید در افزایش ظرفیت باربری قابل تعیین نیست. بنابراین، تفاوت مشاهده‌شده بین آرایش‌های مختلف باید به‌عنوان پاسخ حاصل از اندرکنش همزمان خاک و هندسه مؤثر مسلح‌کننده، شامل تغییر در سختی مؤثر، سطح اندرکنش و مسیر انتقال نیرو، تفسیر شود. اندازه‌گیری مستقیم توزیع کرنش و نیروی

کششی ژئوگرید می‌تواند در مطالعات آینده برای تفکیک کمی این سازوکارها مورد استفاده قرار گیرد.

لازم به تأکید است که تغییر آرایش اعضای ژئوگرید، علاوه بر تغییر جهت‌گیری مسیرهای انتقال نیرو، موجب تغییر سختی مؤثر و سطح اندرکنش مؤثر خاک–ژئوگرید نیز می‌شود. بنابراین، تفاوت عملکرد بین آرایش‌های BG، PF، LR و TR را نمی‌توان صرفاً به اثر جهت‌گیری ریب‌ها نسبت داد؛ بلکه این تفاوت‌ها بازتاب اثر همزمان هندسه آرایش، میزان مشارکت اعضای طولی و عرضی، سختی مؤثر مسلح‌کننده و سطح اندرکنش خاک–ژئوگرید هستند. این موضوع به‌عنوان یکی از محدودیت‌های مطالعه حاضر در تفسیر نتایج در نظر گرفته شده است.

٤. نتیجه‌گیری

این مطالعه به‌صورت آزمایشگاهی اثر آرایش هندسی و جهت‌گیری اجزای ژئوگرید دوطرفه بر ظرفیت باربری و رفتار تغییرشکلی یک پی نواری مدل‌شده روی ماسه تمیز بابلسر را بررسی کرد. در تمامی آزمایش‌های مربوط به مقایسه پیکربندی‌ها، یک لایه ژئوگرید در عمق ثابت B ۰/۲۵ قرار داده شد و شرایط خاک، مصالح، هندسه پی و نحوه بارگذاری ثابت نگه داشته شد. پنج حالت شامل خاک غیرمسلح، ژئوگرید کامل دوطرفه، قاب پیرامونی، آرایش اعضای طولی و آرایش اعضای عرضی مورد مقایسه قرار گرفتند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، در محدوده شرایط آزمایش حاضر، تغییر آرایش اعضای ژئوگرید تأثیر قابل‌توجهی بر ظرفیت باربری و پاسخ نشست–بار سیستم خاک–پی داشت.

ژئوگرید کامل دوطرفه در مقایسه با سایر آرایش‌های بررسی‌شده بهترین عملکرد کلی را نشان داد و ظرفیت باربری نهایی را حدود ۱۲۵ درصد نسبت به حالت غیرمسلح افزایش داد. همچنین کاهش نشست و افزایش سختی اولیه در این آرایش بیشتر از سایر پیکربندی‌ها بود. این نتایج نشان می‌دهد که حفظ پیوستگی شبکه و مشارکت هم‌زمان اعضای طولی و عرضی می‌تواند در شرایط آزمایش حاضر به عملکرد مؤثرتر سیستم مسلح منجر شود.

در میان پیکربندی‌های جزئی، آرایش اعضای طولی عملکرد بهتری نسبت به آرایش اعضای عرضی نشان داد. این رفتار، با توجه به هندسه پی نواری و راستای غالب بارگذاری، می‌تواند بیانگر مشارکت مؤثرتر اعضای طولی در انتقال بار و کنترل تغییرشکل در شرایط آزمایش حاضر باشد. با این حال، از آنجا که نیرو و کرنش ژئوگرید مستقیماً اندازه‌گیری نشده است، این تفسیر به‌عنوان یک توضیح مکانیکی محتمل ارائه می‌شود و نه یک مشاهده مستقیم از بسیج نیروی کششی.

عملکرد محدودتر قاب پیرامونی در مقایسه با ژئوگرید کامل نیز نشان داد که وجود شبکه داخلی و پیوستگی اعضا می‌تواند در بهبود رفتار سیستم خاک–پی اهمیت داشته باشد. با این حال، تفاوت عملکرد پیکربندی‌های جزئی باید با در نظر گرفتن تغییر هم‌زمان سختی مؤثر و سطح تماس مسلح‌کننده با خاک تفسیر شود؛ زیرا حذف اعضای داخلی ژئوگرید علاوه بر تغییر جهت‌گیری شبکه، مقدار مسلح‌کننده و سطح اندرکنش مؤثر را نیز تغییر می‌دهد.

شاخص‌های مربوط به ناحیه تأثیر و انرژی کرنشی ذخیره‌شده نیز تفاوت عملکرد پیکربندی‌ها را نشان دادند؛ با این حال، این شاخص‌ها در چارچوب روش‌های تعریف و محاسبه ارائه‌شده در این پژوهش تفسیر می‌شوند و نباید به‌عنوان اندازه‌گیری مستقیم میدان تنش یا نیروی کششی ژئوگرید تلقی شوند. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که پیوستگی شبکه و جهت‌گیری اجزای ژئوگرید می‌تواند بر نحوه انتقال بار و کنترل تغییرشکل در سیستم خاک–پی اثرگذار باشد.

مطالعه حاضر بر یک نوع ماسه تمیز، یک نوع ژئوگرید، یک پی نواری مدل آزمایشگاهی، یک لایه مسلح‌کننده و عمق نصب ثابت B ۰/۲۵ متمرکز بوده

است. بنابراین، یافته‌های حاضر نباید به‌عنوان یک معیار عمومی برای تعیین آرایش یا عمق بهینه ژئوگرید در همه شرایط تلقی شوند. بررسی اثر عمق‌های مختلف، تعداد لایه‌های مسلح‌کننده، ویژگی‌های متفاوت خاک و ژئوگرید و شرایط بارگذاری متنوع، از جمله بارگذاری‌های مرتبط با کاربردهای واقعی زیرساختی، برای تعمیم نتایج به مقیاس میدانی ضروری است.

نتایج این مطالعه، در محدوده شرایط آزمایشگاهی حاضر، می‌تواند به درک بهتر نقش آرایش هندسی ژئوگرید در بهسازی بستر پی‌های نواری کمک کند و به‌عنوان مبنایی برای مطالعات توسعه‌ای و کاربردهای مرتبط با پی‌های نواری در زیرساخت‌های حمل‌ونقل، از جمله پل‌ها، مورد استفاده قرار گیرد.

۵. تقدیر و قدردانی

نویسندگان از تمامی افرادی که در انجام این پژوهش و تهیه مقاله همکاری و مساعدت داشته‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنند.

٦. تأییدیه اخلاقی

نویسندگان تأیید می‌کنند که این مقاله حاصل پژوهش اصیل بوده و مطالب آن پیش‌تر در هیچ مجله دیگری منتشر نشده است. همچنین مقاله به‌طور هم‌زمان برای انتشار به مجله دیگری ارسال نشده است.

۷. مشارکت‌های نویسندگان

امیر ابراهیمی در طراحی و اجرای آزمایش‌ها، جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل نتایج و نگارش اولیه مقاله مشارکت داشته است. ابوذر میرزاخانی در تدوین روش تحقیق، نظارت بر روند پژوهش و ارزیابی نتایج علمی مشارکت داشته است. محسن موسیوند در تحلیل و تفسیر داده‌ها، بررسی علمی یافته‌ها و بازبینی مقاله مشارکت داشته است. رضا بابایی سمیرمی در ارائه مشاوره تخصصی، بررسی نتایج و ویرایش نهایی مقاله مشارکت داشته است. تمامی نویسندگان نسخه نهایی مقاله را بررسی و تأیید کرده‌اند.

۸. منابع مالی

این پژوهش بدون دریافت حمایت مالی اختصاصی از هیچ‌گونه سازمان، مؤسسه یا نهاد مالی انجام شده است.

۹. تعارض منافع

نویسندگان اظهار می‌دارند که در انجام پژوهش و انتشار این مقاله، هیچ‌گونه منافع متعارضی که بر نتایج یا روند انتشار مقاله تأثیرگذار باشد، وجود نداشته است.

۱۰. مراجع

Adeniji, M. A., & Oladeji, A. F. (2024). “Investigating the influence of soil properties on foundation settlement and bearing capacity”. Project Report, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Ladokeakintola University of Technology, Ogbomoso, Nigeria. https://www.researchgate.net/publication/385525628

Aghayarzadeh, M. (2019). “Continuum-based numerical simulation of static and high-strain dynamic pile load testing adopting advanced soil models”. University of Technology Sydney Australia.

Ahmad, H. (2022). “Sustainability effect of geogrid reinforced tire-shred sand mixtures on the load pressure-settlement response of shallow footing”. Heliyon, 8(11). https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(22)03031-6

Al-Rkaby, A. H., Chegenizadeh, A., & Nikraz, H. (2017). “Anisotropic strength of large scale geogrid-reinforced sand: Experimental study”. Soils Found., 57(4): 557–574.

Alsanabani, N., Hamid, W., Alnuaim, A., & Al-Gahtani, K. (2025). “An innovative foundation for enhancing the mechanism of transferring vertical loads on sandy soil”. Scientific Reports, 15(1), 39885.

Anbarani, M. R., Abrishami, S., & Bayat, M. (2024). “Influence of load eccentricity on performance and contact pressures of ring foundations on geogrid-reinforced sand”. KSCE J. Civ. Eng., 28(12), 5524–5533. https://doi.org/10.1007/s12205-024-2307-6

Andersen, G. R. (1991). “Physical mechanisms controlling the strength and deformation behavior of frozen sand”. Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology.

ASTM, D. (2015). “Standard test method for determining tensile properties of geogrids by the single or multi-rib tensile method”. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.

Attique, M., Hassan, S., Alshameri, B., Hassan, W., Ghani, S., & Ansari, A. (2025). “Evaluating the impact of various tensile strengths of non-woven geotextiles on subgrade CBR enhancement: An experimental approach”. Int. J. Pavement Res. Technol., 1–18.

Bayat, M., Khosravian Homami, A., & Mousivand, M. (2021). “Shear strength and wind erosion potential of biologically improved sand”. Geomicrobiol. J., 38(7): 631–638.

Bildik, S., & Laman, M. (2020). “Effect of geogrid reinforcement on soil-structure–pipe interaction in terms of bearing capacity, settlement and stress distribution”. Geotextile Geomembranes, 48(6): 844–853.

Bowles, J. E. (1987). “Elastic foundation settlements on sand deposits”. J. Geotech. Eng., 113(8): 846–860.

Burland, J., Burbidge, M., & Wilson, E. (1985). “Settlement of foundations on sand and gravel”. Proceed. Institut. Civ. Eng., 78(6): 1325–1381.

Chang, D. T. T., Sun, T. S., & Hung, F. Y. (1995). “Pullout mechanism of geogrids under confinement by sandy and clayey soils”. Transport. Res. Record, 64–72.

Chatrabhuj, & Meshram, K. (2024). “Use of geosynthetic materials as soil reinforcement: An alternative eco-friendly construction material”. Discover Civ. Eng., 1(1): 41.

Chen, J., Guo, X., Sun, R., Rajesh, S., Jiang, S., & Xue, J. (2021). “Physical and numerical modelling of strip footing on geogrid reinforced transparent sand”. Geotextiles and Geomembranes, 49(2): 399–412.

Dantas, M. M. V., de Medeiros Melo Neto, O., de Figueiredo Lopes Lucena, L. C., Patricio, J. D., & Rodrigues, J. K. G. (2023). “Instrumentation of a physical model of soil structure reinforced with geogrid”. Arab. J. Geosci., 16(11): 614.

Das, B. M. (2017). “Shallow foundations: Bearing capacity and settlement”. CRC Press.

Das, B. M., & Sivakugan, N. (2017). “Fundamentals of geotechnical Engineering”. Cengage Learning.

Ding, X., Luo, Z., & Ou, Q. (2022). “Mechanical property and deformation behavior of geogrid reinforced calcareous sand”. Geotextiles and Geomembranes, 50(4): 618–631.

Doherty, J., Gourvenec, S., & Gaone, F. (2018). “Insights from a shallow foundation load-settlement prediction exercise”. Comput. Geotech., 93: 269–279.

Fakher, N., & Fakhruldin, M. (2021). “Experimental study of relative density effect on bearing capacity of sand reinforced with geogrid”. Kufa J. Eng., 12(3): 46–55.

Gao, G., & Meguid, M. (2018). “Effect of particle shape on the response of geogrid-reinforced systems: Insights from 3D discrete element analysis”. Geotextiles and Geomembranes, 46(6): 685–698.

Gao, Z., Zhao, J., & Li, X. (2021). “The deformation and failure of strip footings on anisotropic cohesionless sloping grounds”. Int. J. Numer. Analyt. Meth. Geomech., 45(10): 1526–1545.

Ghasem Ghanbari, P., Momeni, M., Mousivand, M., & Bayat, M. (2022). “Unconfined compressive strength characteristics of treated peat soil with cement and basalt fibre”. Int. J. Eng., 35(5): 1089–1095.

Harshitha, M., Kumar, R., Vidyashree, J., Agrawal, U., & Sathvik, S. (2026). “Investigating the impact of biaxial geogrid reinforcement on subgrade soil strength enhancement: A machine learning analysis using the MARS model”. Indian Geotech. J., 56(3): 1194–1213.

Helis, R., Mansouri, T., & Abbeche, K. (2023). “Behavior of a circular footing resting on sand reinforced with geogrid and grid anchors”. Eng., Technol. Appl. Sci. Res., 13(1): 10165–10169.
Hoseini, S., Bayat, M., Mousivand, M., & Ajalloeian, R. (2026). “Effect of wet-dry cycles on the compressive strength of soil improved with fibers, cement, and tree gum”. J. Struct. Constr. Eng., 12(12): 204-222.
Hussein, M. G., & Meguid, M. A. (2016). “A three-dimensional finite element approach for modeling biaxial geogrid with application to geogrid-reinforced soils”. Geotextiles Geomembranes, 44(3): 295–307.
Kapor, M., Skejić, A., Medić, S., & Balić, A. (2023). “DIC assessment of foundation soil response for different reinforcement between base and soft subgrade layer – Physical modeling”. Geotextiles Geomembranes, 51(3): 390–404. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2023.01.003
Keskin, M., & Laman, M. (2013). “Model studies of bearing capacity of strip footing on sand slope”. KSCE J. Civ. Eng., 17: 699–711. https://doi.org/10.1007/s12205-013-0406-x
Khing, K., Das, B., Puri, V., Cook, E., & Yen, S. (1993). “The bearing-capacity of a strip foundation on geogrid-reinforced sand”. Geotextiles Geomembranes, 12(4): 351–361.
Kolay, P., Kumar, S., & Tiwari, D. (2013). “Improvement of bearing capacity of shallow foundation on geogrid reinforced silty clay and sand”. J. Constr. Eng., 2013(1): 293809.
Kommanamanchi, V., Chennarapu, H., & Balunaini, U. (2025). “Mechanistic evaluation of biaxial and triaxial geogrids and geocells reinforcing C&D waste aggregate layers for sustainable flexible pavements”. Constr. Build. Mater., 497: 143867.
Liu, C. H., Lo, C. C., & Hung, C. (2025). “Experimental study on mechanical behavior of additive-manufactured geogrid-reinforced sand”. Acta Geotech., 20(9): 4553–4569. https://doi.org/10.1007/s11440-025-02637-4
Mazouz, B., Belkadi, A. A., Bakri, M., Boufarh, R., Mansouri, T., Dridi, M., & Douadi, A. (2025). “Model testing and response surface investigation of eccentric loading on closely spaced strip footings”. Sci. Reports, 15(1): 41388.
Rutaida, Z. (2023). “Effect of geocell and geogrid inclusion on railway ballast stability”. Thesis, CQ University, Australia. https://doi.org/10.25946/28201532
Sawicki, A. (1998). “Developments in the mechanics of reinforced soil: Empirical background and analytical approaches”. Appl. Mech. Rev., 51(11): 651-668.
Shil, T., & Pal, S. K. (2024). “Load-sharing mechanism and performance of geosynthetic-reinforced soil under external loading: A review”. Geomech. Geoeng., 19(5): 895–914.
Simonini, P. (2000). “Effects of a single geosynthetic reinforcement on the mechanical behavior of a sand layer”. Road Mater. Pavement Des., 1(3): 281–301.
Tabaroei, A., Zhao, Y., & Pham, T. A. (2026). “Settlement and mobilized bearing capacity of circular footings on geosynthetic-reinforced sand: Experimental and numerical study”. Geotech. Geol.. Eng., 44(4): 197. https://doi.org/10.1007/s10706-026-03677-7
Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). “Soil mechanics in engineering practice”. John Wiley & Sons.
Thakur, V., & Sharma, R. K. (2024). “Experimental evaluation on behavior of geocell–geogrid reinforced sand subjected to combined static and cyclic loading”. Indian Geotech. J., 54(4): 1406–1419. https://doi.org/10.1007/s40098-023-00815-3
Vesić, A. S. (1973). “Analysis of ultimate loads of shallow foundations”. J. Soil Mech. Found. Div., 99(1): 45–73.
Yabaluie Khamesluei, M. R., Bayat, M., Mousivand, M., & Nozari, M. A. (2024). “Effect of zeolite replacement and tyre fibre inclusions on geotechnical properties of cement-or lime-stabilised sand”. Geomech. Geoeng., 1–16. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/17486025.2024.2326087
Yetimoglu, T., Wu, J. T., & Saglamer, A. (1994). “Bearing capacity of rectangular footings on geogrid-reinforced sand”. J. Geotech. Eng., 120(12): 2083–2099.