بررسی تاثیر الیاف بازلت بر ظرفیت باربری ماسه تثبیت شده با سیمان و نانوسیلیس: مطالعه مدل فیزیکی

مقاله علمی-پژوهشی

امیر ابراهیمی، گروه مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

*__محسن موسیوند (نویسنده مسئول)__، گروه مهندسی عمران، واحد گنبد کاووس، دانشگاه آزاد اسلامی، گنبد کاووس، ایران

*__پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mousivand@iau.ir__

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۱- پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۰

صفحه ۲۹۰-۲۷۱

چکیده

خاک‌های ماسه‌ای، به‌ویژه در شرایط تراکم پایین، ممکن است ظرفیت باربری و سختی کافی برای تحمل بارهای وارده از پی‌های سطحی را نداشته باشند. در این پژوهش، عملکرد یک ترکیب بهسازی شامل تثبیت با سیمان، نانوسیلیس و تسلیح با الیاف بازالت برای بهبود رفتار باربری ماسه مورد بررسی قرار گرفت. برنامه آزمایشگاهی به‌صورت مرحله‌ای طراحی شد تا ابتدا نقش سیمان (۱، ۳ و ۶ درصد وزن خشک ماسه) و نانوسیلیس (۲، ٤، ۸ و ۱۶ درصد وزن سیمان) در افزایش ظرفیت باربری و مقادیر بهینه آن‌ها مشخص شود و سپس اثر الیاف (۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد وزن خشک ماسه)، در ماسه طبیعی، ماسه تثبیت‌شده با سیمان و سیمان- نانوسیلیس ارزیابی گردد. رفتار خاک با استفاده از آزمایش مدل فیزیکی بارگذاری صفحه بررسی شد. نمونه‌های حاوی الیاف و ماسه بدون دوره عمل‌آوری و نمونه‌های حاوی سیمان و یا سیمان- نانوسیلیس با و بدون الیاف در سنین عمل‌آوری مختلف (۷، ١٤ و ۲۸ روز) بررسی شدند. نتایج نشان داد که ۶٪ سیمان و ترکیب ۶٪ سیمان + ۸٪ نانوسیلیس به‌ترتیب به‌عنوان مقدار بهینه سیمان و ترکیب بهینه سیمان-نانوسیلیس تعیین شدند. ترکیب‌های بهینه سیمان، سیمان-نانوسیلیس و سیمان-نانوسیلیس-الیاف به‌ترتیب موجب ۲۳۷، ۳۱۳ و ٤۱۰ درصد افزایش ظرفیت باربری نسبت به نمونه شاهد (بهسازی نشده) شدند. مقدار بهینه الیاف به نوع ماتریس تثبیت‌شده وابسته بود؛ به‌طوری‌که مقدار بهینه الیاف بازالت در خاک بدون تثبیت و خاک تثبیت‌شده با سیمان ۰/۷۵ درصد بود، در حالی‌که با استفاده همزمان از سیمان و نانوسیلیس، مقدار بهینه الیاف به ۰/۵ درصد کاهش یافت. این موضوع نشان داد که اثربخشی و مقدار بهینه الیاف تابع نوع تثبیت‌کننده و ساختار ماتریس بوده و تعیین یک درصد ثابت الیاف برای ترکیب‌های مختلف بهسازی بدون توجه به نوع و ساختار ماتریس تثبیت‌شده، نمی‌تواند مبنای مناسبی برای طراحی باشد.

واژه‌های کلیدی: ماسه بابلسر، الیاف بازالت، نانوسیلیس، سیمان، آزمایش بارگذاری صفحه، ظرفیت باربری

۱- مقدمه

افزایش توسعه زیرساخت‌های عمرانی، گسترش شهرنشینی و محدودیت دسترسی به زمین‌های مناسب برای ساخت‌وساز، ضرورت استفاده از خاک‌های با کیفیت ژئوتکنیکی پایین را بیش از پیش آشکار ساخته است. در بسیاری از مناطق ساحلی، خاک‌های ماسه‌ای سست به دلیل تخلخل بالا، تراکم نسبی پایین و ظرفیت باربری محدود، به‌عنوان بستر نامناسب برای احداث سازه‌های سطحی و زیرسطحی شناخته می‌شوند (Loukidis and Salgado 2011; Ghasem Ghanbari et al. 2022). این خاک‌ها معمولاً در برابر اعمال بارهای استاتیکی و دینامیکی، رفتار تغییرشکل‌پذیر از خود نشان داده و در معرض

نشست‌های قابل توجه قرار دارند که می‌تواند پایداری و عملکرد سازه را تحت تأثیر قرار دهد. ازاین‌رو، بهسازی خاک‌های ماسه‌ای سست به‌عنوان یکی از مهم‌ترین موضوعات در مهندسی ژئوتکنیک مورد توجه قرار گرفته است. روش‌های مختلفی برای بهبود ویژگی‌های مهندسی خاک شامل تراکم مکانیکی، تزریق، استفاده از مصالح ژئوسنتتیک، تثبیت شیمیایی و فناوری‌های نوین مبتنی بر نانومواد توسعه یافته‌اند (Faramarzi and Mousivand 2026; Hosseini et al. 2025). در میان این روش‌ها، تثبیت شیمیایی با استفاده از مواد سیمانی به دلیل سهولت اجرا، هزینه نسبتاً مناسب و اثربخشی بالا در بهبود مقاومت برشی و ظرفیت باربری خاک، جایگاه ویژه‌ای یافته است (Roshani et al. 2025). عملکرد سیمان در خاک عمدتاً ناشی از فرآیندهای هیدراتاسیون و تشکیل محصولات سیمانی نظیر سیلیکات کلسیم هیدراته و آلومینات کلسیم هیدراته است که موجب ایجاد پیوند بین ذرات خاک، کاهش نسبت فضای خالی و افزایش انسجام ظاهری در محیط‌های دانه‌ای می‌شود (Choobbasti et al. 2015). مطالعات پیشین نشان می‌دهند که اثر سیمان بر عملکرد خاک به مقدار مصرف و شرایط آزمایش وابسته است. برای نمونه، در یک مطالعه بر روی ماسه تثبیت‌شده با سیمان، افزایش مقدار سیمان موجب بهبود پیوسته مقاومت و سختی شد، اما میزان این بهبود به شرایط خاک و دوره عمل‌آوری وابسته بود. همچنین، نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد که افزایش عملکرد با افزایش سیمان الزاماً روندی نامحدود ندارد و پس از رسیدن به مقدار مناسب، افزایش بیشتر سیمان می‌تواند بازدهی فزاینده کمتری ایجاد کند. بنابراین، تعیین مقدار بهینه سیمان باید بر اساس پاسخ مکانیکی موردنظر و شرایط خاک انجام شود، نه صرفاً بر مبنای افزایش مقدار ماده سیمانی. (Amhadi and Assaf 2021). علاوه بر درصد سیمان، زمان عمل‌آوری نیز یکی از عوامل کلیدی در عملکرد خاک تثبیت‌شده محسوب می‌شود. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که با افزایش دوره عمل‌آوری، واکنش‌های پوزولانی و هیدراتاسیون توسعه یافته و در نتیجه، ساختار ریزدانه‌ای مستحکم‌تری در خاک شکل می‌گیرد که منجر به افزایش ظرفیت باربری و بهبود رفتار مکانیکی می‌شود (Kumar et al. 2024). با وجود اثربخشی قابل توجه سیمان در بهسازی خاک، استفاده گسترده از آن با چالش‌هایی نظیر انتشار گاز دی‌اکسیدکربن، هزینه‌های اجرایی و در برخی موارد ایجاد رفتار ترد در خاک همراه است؛ بنابراین، استفاده از افزودنی‌های مکمل به‌منظور کاهش مصرف سیمان و افزایش بازده عملکردی آن به یکی از رویکردهای مهم پژوهشی تبدیل شده است (Yabaluie Khamesluei et al. 2024).

توسعه فناوری نانو افق‌های جدیدی را در حوزه مهندسی ژئوتکنیک و بهسازی خاک ایجاد کرده است. نانومواد به دلیل اندازه بسیار کوچک ذرات، سطح ویژه زیاد و واکنش‌پذیری بالا، قابلیت قابل توجهی در اصلاح ساختار ریزمقیاس خاک و بهبود خواص مکانیکی آن دارند (W. Wei et al. 2024; Choobbasti et al. 2015). در میان انواع مختلف نانومواد، نانوسیلیس به‌عنوان یکی از پرکاربردترین و مؤثرترین افزودنی‌ها در فرآیند تثبیت خاک شناخته می‌شود؛ زیرا این ماده علاوه بر دارا بودن سطح ویژه بسیار بالا، از فعالیت پوزولانی قابل توجهی برخوردار است و می‌تواند با هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراتاسیون سیمان واکنش داده و ترکیبات ژل‌مانند C-S-H بیشتری تولید نماید. این فرآیند سبب افزایش پیوستگی میان ذرات خاک، پرشدن فضای خالی بین دانه‌ها و ایجاد ساختاری متراکم‌تر در محیط خاک می‌شود .پژوهش‌های متعدد بیانگر آن است که افزودن نانوسیلیس به خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان می‌تواند منجر به افزایش مقاومت فشاری، کاهش نفوذپذیری، بهبود رفتار تنش–کرنش و افزایش دوام محیط تثبیت‌شده شود (Xu et al. 2023; Sam et al. 2022; Ghadr et al. 2020). برخی مطالعات گزارش کرده‌اند که حضور نانوسیلیس با تسریع واکنش‌های هیدراتاسیون، بهبود چشمگیری در مقاومت اولیه خاک ایجاد می‌کند و زمان لازم برای دستیابی به مقاومت مطلوب را کاهش می‌دهد. ساختار ریزدانه‌ای متراکم حاصل از حضور نانوسیلیس موجب کاهش ترک‌خوردگی و افزایش یکنواختی در توزیع تنش در محیط خاک می‌شود (Bayat 2025). بااین‌حال، اثر نانوسیلیس تابعی از مقدار مصرف، نوع خاک، مقدار سیمان و شرایط عمل‌آوری است و وجود یک مقدار بهینه در بسیاری از مطالعات گزارش شده است. برای مثال، در مطالعه‌ای بر خاک سیمانی، افزایش نانوسیلیس تا ۰٫۴٪ موجب افزایش ۴۷٫۲٪ مقاومت فشاری تک‌محوری ۷روزه نسبت به نمونه فاقد نانوسیلیس شد، در حالی‌که افزایش بیشتر از این مقدار موجب کاهش تدریجی مقاومت گردید.

در مطالعه دیگری، اثر ۰ تا ۸٪ نانوسیلیس در خاک‌های دارای ۳ تا ۱۵٪ سیمان بررسی شد و مقدار بهینه نانوسیلیس به میزان سیمان و شرایط خاک وابسته بود؛ به‌گونه‌ای که در برخی شرایط، ۶٪ نانوسیلیس بیشترین بهبود مقاومت را ایجاد کرد.

همچنین، در مطالعه‌ای بر ماسه تثبیت‌شده با ٦٪ سیمان، مقادیر ۰، ٤، ۸ و ۱۲٪ نانوسیلیس مورد بررسی قرار گرفت که نشان‌دهنده توجه مستقیم پژوهش‌های پیشین به اثر نانوسیلیس در ماتریس ماسه–سیمان است. این اختلاف در مقدار بهینه نشان می‌دهد که پاسخ خاک به نانوسیلیس قابل تعمیم مستقل از نوع خاک و مقدار سیمان نیست و لازم است مقدار بهینه آن برای هر ماتریس تثبیت‌شده به‌صورت تجربی تعیین شود (Choobbasti and Kutanaei 2017). با این وجود، بخش عمده مطالعات انجام‌شده بر آزمون‌های آزمایشگاهی کوچک‌مقیاس نظیر مقاومت فشاری تک‌محوری، برش مستقیم، تراکم و سه‌محوری متمرکز بوده و بررسی رفتار خاک تثبیت‌شده تحت شرایط بارگذاری نزدیک به محیط واقعی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از سوی دیگر، تفاوت در ویژگی‌های کانی‌شناسی، دانه‌بندی، تخلخل و شرایط محیطی خاک‌های ماسه‌ای مختلف سبب می‌شود که نتایج حاصل از یک منطقه جغرافیایی الزاماً قابلیت تعمیم مستقیم به سایر مناطق را نداشته باشد. این مسئله به‌ویژه در مورد ماسه‌های ساحلی شمال ایران و از جمله ماسه بابلسر، که دارای ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاص هستند، اهمیت بیشتری می‌یابد.

آزمایش با بررسی مستقیم پاسخ خاک تحت بارگذاری تدریجی، امکان ارائه اطلاعات ارزشمندی درباره رفتار تنش- نشست، سختی اولیه، ظرفیت باربری نهایی و میزان تغییرشکل خاک را می‌دهد (D ASTM 2003). برخلاف بسیاری از آزمایش‌های آزمایشگاهی کوچک‌مقیاس که صرفاً پارامترهای مقاومتی محدود را اندازه‌گیری می‌کنند، آزمایش بارگذاری صفحه قادر است رفتار یک سیستم خاک- پی را در ابعاد نزدیک‌تر به شرایط واقعی بازنمایی کند. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که خاک‌های تثبیت‌شده با مواد سیمانی در آزمایش بارگذاری صفحه، افزایش قابل توجهی در ظرفیت باربری بین ۱۰۰ تا ۲٦۷ درصد و کاهش نشست نسبت به نمونه‌های بهسازی‌نشده از خود نشان می‌دهند (Kasama et al. 2012; Hosseini et al. 2025). در مطالعه چای و همکاران (۲۰۲۱)، آزمایش PLT، به‌ترتیب برای ۵ تا ۱۰ درصد سیمان با افزایش ظرفیت باربری به‌ترتیب حدود ۱۰۰ تا ۲٦۷ درصد بود.

میزان نشست نیز در حدود ۳۹ تا ۸۹ درصد کاهش نسبت به نمونه شاهد تجربه نمود (Chai et al. 2021) . علاوه بر این، استفاده از افزودنی‌های نانومقیاس نظیر نانوسیلیس می‌تواند موجب بهبود بیشتر رفتار باربری و افزایش سختی سیستم خاک شود. با وجود این، تعداد پژوهش‌هایی که اثر همزمان درصدهای مختلف سیمان و نانوسیلیس را بر رفتار تنش- نشست خاک‌های ماسه‌ای سست با استفاده از آزمایش بارگذاری صفحه بررسی کرده باشند، همچنان محدود است (Adeniji 2024; Rasouli et al. 2017). از سوی دیگر، در بسیاری از مطالعات، تمرکز اصلی بر مقاومت فشاری یا پارامترهای ریزساختاری بوده و ارتباط این تغییرات با پاسخ باربری خاک در شرایط شبه‌میدانی کمتر تحلیل شده است.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در بهسازی خاک‌های دانه‌ای با استفاده از سیمان، نانوسیلیس و الیاف، هنوز نحوه طراحی و بهینه‌سازی سامانه‌های تثبیت و مسلح‌سازی چندجزئی به‌طور کامل روشن نشده است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که سیمان می‌تواند سختی و مقاومت ماسه را افزایش دهد و افزودن الیاف نیز با تغییر مکانیزم انتقال تنش و رفتار پس از گسیختگی، پاسخ خاک سیمانی را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ با این حال، بخش قابل توجهی از این مطالعات بر آزمون‌های سه‌محوری یا مقاومت فشاری متمرکز بوده است (Bahmani et al. 2016; N. Consoli et al. 2009; Nilo C Consoli et al. 2003; Nilo Cesar Consoli et al. 2003). در مقابل، مطالعات مبتنی بر آزمایش بارگذاری صفحه که مستقیماً رفتار بار- نشست و ظرفیت باربری سامانه پی- خاک را ارزیابی کنند، محدودتر هستند. از سوی دیگر، مطالعات مربوط به استفاده از نانوسیلیس در خاک‌های سیمانی نشان داده‌اند که این ماده می‌تواند با تغییر ریزساختار و بهبود ماتریس سیمانی، ویژگی‌های مکانیکی خاک را ارتقا دهد؛ بااین‌حال، هنوز روشن نیست که اصلاح ماتریس ماسه-سیمان با نانوسیلیس تا چه اندازه می‌تواند مقدار بهینه الیاف را تحت تأثیر قرار دهد؛ به‌ویژه اینکه افزایش انسجام و تراکم ماتریس ممکن است شرایط اندرکنش الیاف-ماتریس و در نتیجه مقدار بهینه الیاف برای دستیابی به بیشینه ظرفیت باربری را تغییر دهد. این مسئله از دیدگاه طراحی اهمیت دارد، زیرا عملکرد الیاف تنها به مقدار آن وابسته نیست و به کیفیت ماتریس، میزان درگیری الیاف با محیط اطراف و نحوه انتقال تنش میان اسکلت خاک، ماتریس سیمانی و الیاف نیز وابسته است.

مطالعات مربوط به خاک‌های الیافی و ماسه سیمانی نیز بر وابستگی عملکرد الیاف به شرایط سیمانی‌شدن و ویژگی‌های مکانیکی ماتریس تأکید کرده‌اند. برای مثال، در یک مطالعه مدل فیزیکی روی ماسه مسلح‌شده با الیاف بازالت، حداکثر ظرفیت

باربری ٤٦٧ کیلوپاسکال و حداکثر نسبت ظرفیت باربری برابر ۷٫۵ گزارش شد؛ در حالی‌که این مقادیر با تغییر تراکم نسبی، درصد الیاف و عمق تسلیح تغییر کردند (Sahlabadi et al. 2021). در مطالعه‌ای دیگر، بیشترین بهبود ظرفیت باربری ماسه در حدود ۱٪ الیاف و نزدیک به چهار برابر ظرفیت باربری ماسه خالص گزارش شد. این اختلاف در مقدار و میزان اثرگذاری الیاف نشان می‌دهد که عملکرد آن را نمی‌توان مستقل از ویژگی‌های خاک و شرایط ماتریس به یک درصد ثابت نسبت داد (Aksu Alcan and Çelik 2023; El-Emam et al. 2023).

بر این اساس، سؤال اصلی پژوهش حاضر این است که: آیا اصلاح ماتریس ماسه، سیمان و نانوسیلیس، مقدار بهینه الیاف بازالت موردنیاز برای دستیابی به بیشینه ظرفیت باربری را تغییر می‌دهد؟ برای پاسخ به این سؤال، اثر مقادیر مختلف الیاف در ماسه طبیعی، ماسه تثبیت‌شده با سیمان و ماسه تثبیت‌شده با ترکیب سیمان- نانوسیلیس، با استفاده از آزمایش مدل فیزیکی بارگذاری صفحه بررسی شد. در این راستا، ابتدا مقدار بهینه سیمان و ترکیب سیمان–نانوسیلیس تعیین و سپس اثر الیاف بازالت در ماتریس‌های مختلف ارزیابی شد. نوآوری اصلی پژوهش، بررسی تجربی تغییر مقدار بهینه الیاف در پی تغییر ماتریس تثبیت‌شده و ارتباط آن با ظرفیت باربری ماسه است. این رویکرد، مبنایی برای انتخاب مقدار مناسب الیاف متناسب با نوع و ساختار ماتریس تثبیت‌شده در بهسازی ماسه‌های مورد استفاده در پی‌های سطحی فراهم می‌کند.

۲- مواد و روش

۲-۱- مصالح مورد استفاده و مشخصات مواد

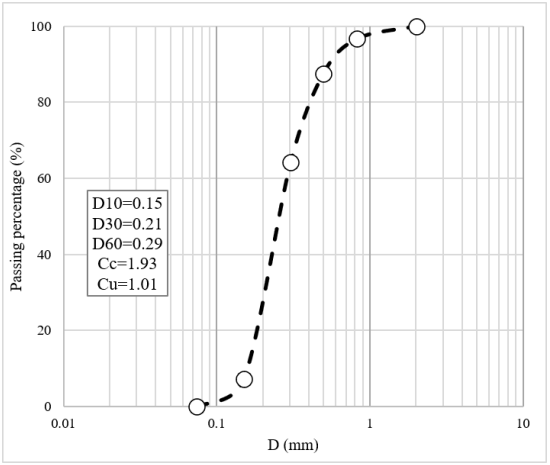
در این پژوهش، به‌منظور بررسی عملکرد یک سامانه تثبیت و مسلح‌سازی چندجزئی، از ماسه، سیمان، نانوسیلیس و الیاف بازالت به‌عنوان مصالح اصلی استفاده شد. ماسه به‌عنوان مصالح پایه و بستر مورد مطالعه، سیمان به‌عنوان عامل اصلی تثبیت، نانوسیلیس به‌عنوان ماده مکمل برای بهبود عملکرد ماتریس سیمانی و الیاف بازالت به‌عنوان عنصر مسلح‌کننده به کار گرفته شدند.

خاک ماسه‌ای بابلسر

در این پژوهش، ماسه طبیعی بابلسر به‌عنوان مصالح پایه برای انجام آزمایش‌های بارگذاری و بررسی اثر تسلیح الیافی و تثبیت سیمانی–نانوسیلیسی مورد استفاده قرار گرفت. این ماسه از نواحی ساحلی شهر بابلسر در استان مازندران، واقع در حاشیه جنوبی دریای خزر، تهیه شد. ماسه بابلسر یکی از مصالح طبیعی شناخته‌شده در مطالعات آزمایشگاهی ژئوتکنیک ایران است و به دلیل ساختار دانه‌ای نسبتاً یکنواخت و رفتار مکانیکی وابسته به تراکم، در مطالعات متعددی برای بررسی رفتار ماسه‌های ساحلی، مقاومت برشی، روانگرایی و روش‌های بهسازی خاک مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعات پیشین، ماسه بابلسر را بر اساس سیستم یکپارچه طبقه‌بندی خاک‌ها(USCS)، در گروه ماسه با دانه‌بندی ضعیف (SP) طبقه‌بندی کرده‌اند و ویژگی‌هایی نظیر درصد بالای ذرات ماسه‌ای، مقدار محدود ریزدانه‌ها و شکل ذرات عمدتاً نیمه‌گرد تا نیمه‌زاویه‌دار را برای آن گزارش نموده‌اند (Noorzad and Zarinkolaei 2015). به‌منظور آماده‌سازی مصالح، ماسه برداشت‌شده ابتدا در شرایط آزمایشگاهی و در دمای محیط خشک شد و پس از جداسازی مواد و ذرات نامطلوب، برای دستیابی به مصالحی با دانه‌بندی یکنواخت و قابل تکرار، از الک مناسب عبور داده شد. سپس، مشخصات فیزیکی و ژئوتکنیکی ماسه شامل توزیع اندازه ذرات، وزن مخصوص ذرات جامد، حداقل و حداکثر نسبت تخلخل و وزن واحد حجم خشک و سایر پارامترهای مورد نیاز، مطابق استانداردهای مربوطه تعیین گردید. نتایج آزمایش دانه‌بندی و طبقه‌بندی بر اساس USCS نشان داد که ماسه مورد استفاده در این پژوهش در گروه SP قرار دارد. این نوع دانه‌بندی، همراه با مقدار کم ریزدانه‌ها، موجب می‌شود رفتار مکانیکی ماسه عمدتاً تحت تأثیر اصطکاک و اندرکنش میان ذرات قرار گیرد و تغییرات تراکم و آرایش دانه‌ها نقش مهمی در پاسخ آن در برابر بارگذاری داشته باشد. از این منظر، ماسه بابلسر بستر مناسبی برای بررسی اثر تسلیح تصادفی با الیاف بازالت و ارزیابی میزان بهبود ظرفیت باربری ناشی از افزودن الیاف و مواد تثبیت‌کننده فراهم می‌کند. مشخصات فیزیکی و مهندسی ماسه مورد استفاده، شامل پارامترهای دانه‌بندی، ضرایب یکنواختی و انحنا، وزن مخصوص ذرات جامد، حداقل و حداکثر وزن مخصوص خشک، نسبت‌های تخلخل و سایر ویژگی‌های ژئوتکنیکی، در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین، منحنی دانه‌بندی ماسه مورد مطالعه در شکل ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و ژئوتکنیکی خاک ماسه‌ای بابلسر

Properties	Unit	Parameter	Value
Specific gravity	-	*Gs*	*2.76*
Mean grain size	*mm*	$D_{50,}$	0.24
Coefficient of curvature	-	C_c	1.32
Coefficient of uniformity	-	C_u	1.81
Maximum Dry unit gravity	kN/m^3	, γ_{dmax}	16.78
Minimum dry unit gravity	kN/m^3	γ_{dmin}	14.78
Maximum porosity ratio	-	e_{max}	0.83
Minimum porosity ratio	-	e_{min}	0.61
Optimal water content	%	ω_{opt}	15.00



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی و توزیع اندازه ذرات ماسه بابلسر مورد استفاده در پژوهش

سیمان

در این پژوهش، از سیمان پرتلند تیپ II به‌عنوان ماده تثبیت‌کننده ماسه استفاده شد. سیمان مصرفی از نوع تیپ II و تولید شرکت سیمان شاهرود بود و پیش از استفاده در شرایط خشک و دور از رطوبت نگهداری شد. در طرح آزمایش، مقدار سیمان بر اساس وزن خشک ماسه و در سه سطح ۱، ۳ و ٦ درصد در نظر گرفته شد و مقدار مناسب آن در مرحله مقدماتی آزمایش‌ها تعیین گردید. مشخصات اصلی فیزیکی و شیمیایی سیمان، شامل وزن مخصوص، ترکیب شیمیایی و سایر ویژگی‌های مورد نیاز، بر اساس اطلاعات تولیدکننده و نتایج آزمون‌های استاندارد، در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان پرتلند تیپ II

Properties	Value
Specific unit weight	**3.14**
Specific surface area (m^2/kg)	**320**
SiO_2 (%)	**15.9**
Al_2O_3 (%)	**9.5**
Fe_2O_3 (%)	**4.1**
CaO (%)	**60.4**
MgO (%)	**0.9**
SO_3 (%)	**6.4**
K_2O (%)	**0.7**
L.O.I (%)	**2.1**
Blaine (cm^2/g)	**3070**
Expansion (autoclave) (%)	**0.05**
Compressive strength (MPa)	
3 days	**17.5**
7 days	**30.2**
28 days	**40.1**

نانوسیلیس

در این پژوهش، از نانوسیلیس آمورف بر پایه دی‌اکسید سیلیسیم (SiO_2) به‌صورت پودر سفیدرنگ به‌عنوان ماده مکمل در تثبیت سیمانی ماسه استفاده شد. نانوسیلیس مورد استفاده به‌عنوان جایگزین جزئی از سیمان مصرفی در مقادیر ۲، ٤، ۸ و ١٦ درصد وزن سیمان به طرح‌های اختلاط افزوده شد. این محدوده با هدف بررسی اثر مقدار نانوسیلیس بر عملکرد مکانیکی ماسه تثبیت‌شده و تعیین مقدار مناسب آن انتخاب گردید. مشخصات اصلی فیزیکی و شیمیایی نانوسیلیس، شامل درصد SiO_2، اندازه متوسط ذرات، وزن مخصوص، سطح ویژه و سایر مشخصات فنی، بر اساس اطلاعات فنی محصول و نتایج آزمون‌های مربوطه در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانوسیلیس مصرفی

properties	value
Diameter (nm)	25-35
Surface volume ratio (m^2/g)	1.95
Density (g/cm^3)	1.68
Purity (%)	99
Shape	White powder

الیاف بازالت

در این پژوهش، الیاف بازالت برای تسلیح تصادفی ماسه مورد استفاده قرار گرفتند. انتخاب مشخصات هندسی الیاف، به‌ویژه طول آن، از عوامل مؤثر بر عملکرد ماسه مسلح محسوب می‌شود و مطالعات پیشین نیز تأثیر طول الیاف را بر رفتار مکانیکی و مقاومت ماسه مورد بررسی قرار داده‌اند (Wasti and Bütün 1996). در مطالعه حاضر، طول الیاف برابر با ۱۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. این مقدار با توجه به مقیاس آزمایش بارگذاری صفحه، عرض ۸۰ میلی‌متری صفحه و ضرورت دستیابی به توزیع یکنواخت الیاف در توده ماسه انتخاب گردید؛ به‌طوری‌که طول الیاف معادل ۰,۱۵ برابر عرض صفحه بارگذاری است. انتخاب الیاف کوتاه در این مقیاس آزمایش، ضمن فراهم‌کردن امکان اختلاط مناسب با ماسه، از ایجاد تجمعات موضعی و ناهمگنی در نمونه جلوگیری می‌کند (N. Consoli et al. 2009). مشخصات فیزیکی و شیمیایی الیاف بازالت مورد استفاده در این پژوهش در جدول ٤ ارائه شده است.

جدول ٤. مشخصات فیزیکی الیاف بازالت مورد استفاده در پژوهش

Characteristics	Unit	Results
Physical State		Solid fibrous
Color		Golden brown
Length	mm	12
Length/Diameter		70
Density	g/cm3	2.61
Fracture strength	MPa	2250
Elastic modulus	GPa	98
Tensile strength	MPa	3000

۲-۲- برنامه آزمایشگاهی و طرح اختلاط

در این پژوهش، به‌منظور بررسی نقش تسلیح الیافی در بهبود رفتار مکانیکی ماسه بابلسر و تعیین مقدار مناسب الیاف در شرایط مختلف تثبیت، یک برنامه آزمایشگاهی مرحله‌ای طراحی و اجرا شد. الیاف بازالت با طول ۱۲ میلی‌متر و در مقادیر ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱/۰ درصد وزن خشک ماسه، به‌عنوان متغیر اصلی آزمایش در نظر گرفته شد و عملکرد آن‌ها در سه وضعیت مختلف، شامل ماسه بدون تثبیت، ماسه تثبیت‌شده با سیمان و ماسه تثبیت‌شده با سیستم سیمان - نانوسیلیس، مورد ارزیابی قرار گرفت. در تمامی آزمایش‌ها، ماسه پیرامونی ناحیه بهسازی شده، با تراکم نسبی ثابت ۳۰ درصد آماده‌سازی شد، در حالی‌که تراکم نسبی ناحیه بهسازی‌شده، ۹۰ درصد در نظر گرفته شد. در گام نخست، به‌منظور تعیین مقادیر مناسب مواد تثبیت‌کننده، آزمایش‌های مقدماتی با استفاده از سیمان پرتلند تیپ II در مقادیر ۱، ۳ و ٦ درصد وزن خشک ماسه و نانوسیلیس در

مقادیر ۲، ٤، ۸ و ١٦ درصد وزن سیمان انجام شد و بر اساس نتایج حاصل، مقدار مناسب سیمان و نانوسیلیس برای مراحل بعدی تعیین گردید. در گام دوم، اثر مستقل الیاف بازالت بر رفتار ماسه طبیعی بررسی شد و با مقایسه پاسخ نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف الیاف، مقدار بهینه الیاف تعیین گردید. در گام سوم، مقدار بهینه الیاف برای ماسه تثبیت‌شده با سیمان تعیین شد؛ بدین منظور، مقدار منتخب سیمان از مرحله نخست ثابت نگه داشته شد و مقادیر مختلف الیاف به نمونه‌های ماسه- سیمان افزوده شدند. در گام نهایی نیز همین فرآیند برای سیستم ماسه–سیمان–نانوسیلیس تکرار شد؛ به‌گونه‌ای که مقادیر بهینه سیمان و نانوسیلیس حاصل از مرحله نخست ثابت نگه داشته شده و اثر مقادیر مختلف الیاف بر پاسخ مکانیکی نمونه‌ها بررسی گردید. در هر یک از مراحل، مقدار بهینه الیاف بر اساس دستیابی به حداکثر ظرفیت باربری و با در نظر گرفتن روند تغییرات منحنی بار–نشست تعیین شد؛ به‌عبارت دیگر، انتخاب مقدار بهینه صرفاً بر مبنای یک مقدار منفرد ظرفیت باربری انجام نشد، بلکه شکل و روند پاسخ بار–نشست نیز در فرآیند تصمیم‌گیری مورد توجه قرار گرفت. نمونه‌های حاوی مواد سیمانی در سنین ۷، ١٤ و ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفتند تا روند توسعه عملکرد مکانیکی در طول دوره عمل‌آوری ارزیابی شود. برای هر شرایط آزمایش، سه نمونه مستقل تهیه و آزمایش شد و مقدار نهایی هر حالت بر اساس میانگین نتایج سه تکرار گزارش گردید. پراکندگی نتایج تکراری برای شرایط یکسان در محدوده حدود ۳ تا ۵ درصد مشاهده شد که نشان‌دهنده تکرارپذیری قابل قبول آزمون‌ها در چارچوب برنامه آزمایش حاضر است.

این رویکرد با اصول گزارش تکرارپذیری آزمون‌های ژئوتکنیکی که بر ارزیابی پراکندگی نتایج حاصل از آزمون‌های تکراری تحت شرایط یکسان تأکید دارند، سازگار است (Tafreshi and Khalaj 2008). بدین ترتیب، برنامه آزمایش به‌صورت یک فرآیند مرحله‌ای از تعیین مقادیر مناسب مواد تثبیت‌کننده، ارزیابی عملکرد مستقل الیاف در ماسه، تعیین مقدار بهینه الیاف در ماسه - سیمان و در نهایت تعیین مقدار بهینه الیاف در سیستم ماسه–سیمان - نانوسیلیس طراحی شد. جزئیات کامل طرح‌های اختلاط، تعداد نمونه‌ها و مراحل آزمایش در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. ماتریس طرح آزمایش و ترکیبات مورد استفاده

Row	Name	Cement (%)	Nano Silica (%)	Fiber (%)	Water (%)
1	US	0	0	0	15
2	FRS	0	0	0.25-1.0	15
3	CSS	1-6	0	0	15
4	CNSS	1	1-16	0	15
5	CSFRS	1-6	0	0.25-1.0	15
6	CNSFRS	6	8	0.25-1.0	15

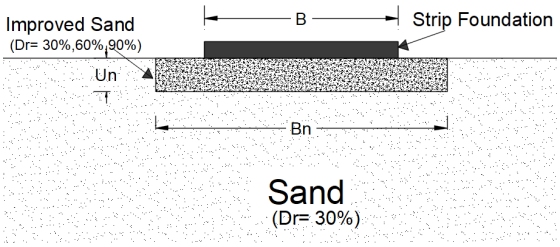
US: Untreated Sand, CSS: Cement-Stabilized Sand, CNSS: Cement–Nanosilica-Stabilized Sand, FRS: Fiber-Reinforced Sand, CSFRS: Cement-Stabilized Fiber-Reinforced Sand

۲-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها و شرایط عمل‌آوری

برای آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش، ماسه بابلسر ابتدا در شرایط آزمایشگاهی خشک و آماده شد. برای دستیابی به پراکنش یکنواخت نانوسیلیس و کاهش احتمال تشکیل آگلومره، نانوسیلیس ابتدا در بخشی از آب اختلاط به‌صورت یکنواخت پراکنده شد. سپس سوسپانسیون حاصل به مخلوط خشک ماسه و سیمان افزوده و اختلاط ادامه یافت. پس از توزیع مناسب سوسپانسیون در مخلوط، باقیمانده آب موردنیاز به‌تدریج اضافه شد و اختلاط تا دستیابی به مخلوطی یکنواخت ادامه یافت. این روش با توجه به تمایل نانوسیلیس به آگلومراسیون ناشی از نیروهای بین‌ذره‌ای و سطح ویژه بالای آن انتخاب شد؛ زیرا پراکنش نامناسب نانوسیلیس می‌تواند موجب تشکیل تجمعات ذره‌ای و ایجاد نواحی با تخلخل بیشتر در ماتریس شود (Haruehansapong et al. 2017; Hou et al. 2020). سیمان بر اساس درصد تعیین‌شده از وزن خشک ماسه و نانوسیلیس به‌عنوان جایگزین جزئی سیمان و بر اساس درصدی از وزن سیمان مصرفی در نظر گرفته شد. مصالح خشک ابتدا به‌صورت یکنواخت مخلوط شدند و سپس مقدار مشخص آب معادل رطوبت بهینه ۱۵ درصد، بدست آمده از آزمایشات پراکتور استاندارد، به مخلوط افزوده شد و اختلاط تا دستیابی به توزیع یکنواخت رطوبت و اجزای مخلوط ادامه یافت. در نمونه‌های

مسلح‌شده با الیاف، الیاف بازالت با طول ۱۲ میلی‌متر و مقدار تعیین‌شده در طرح اختلاط، به‌صورت تصادفی و تدریجی به مصالح اضافه و تا حصول توزیع یکنواخت در توده ماسه مخلوط شدند. نمونه‌ها در قالب‌های مستطیلی با ابعاد تعیین‌شده متناسب با عرض صفحه بارگذاری و عمق لایه بهسازی آماده شدند؛ به‌گونه‌ای که عرض و عمق ناحیه بهسازی به‌ترتیب بر اساس روابط $B_n = B + 3U_n$ و $\frac{U_n}{B}$ تعیین گردید، که در آن B عرض صفحه بارگذاری و Un عمق لایه بهسازی است. براساس آزمایشات اولیه میزان عمق تاثیر به میزان $\frac{U_n}{B} = 0.5$ بدست آمد که در تطابق با نتایج مازوز و همکاران (۲۰۲۵) نیز بود (Mazouz et al. 2025; Ebrahimi et al. 2026).

در مرحله بررسی اثر الیاف بازالت بر ظرفیت باربری ماسه، تراکم نسبی ناحیه بهسازی‌شده به‌عنوان یکی از متغیرهای آزمایش در سه سطح ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درصد در نظر گرفته شد تا اثر تراکم و میزان الیاف بر رفتار باربری و همچنین وابستگی عملکرد الیاف به تراکم خاک ارزیابی شود. پس از بررسی این مرحله، به‌منظور حذف اثر تراکم به‌عنوان یک متغیر مداخله‌گر و امکان مقایسه مستقیم عملکرد مواد تثبیت‌کننده، تراکم نسبی ناحیه بهسازی‌شده در تمامی آزمایش‌های بعدی شامل تثبیت با سیمان، سیمان–نانوسیلیس و ترکیب سیمان–نانوسیلیس–الیاف، برابر ۹۰ درصد ثابت نگه داشته شد.این در حالی است که ماسه پیرامونی در تمامی آزمایش‌ها با تراکم نسبی ثابت ۳۰ درصد متراکم گردید. این تفکیک امکان بررسی مستقل اثر تراکم ناحیه بهسازی را فراهم کرد، بدون آنکه تغییرات تراکم خاک پیرامونی بر پاسخ سیستم اثرگذار باشد. پس از آماده‌سازی و قالب‌گیری، نمونه‌های حاوی سیمان و نانوسیلیس در کیسه‌های پلاستیکی درزبندی‌شده قرار گرفتند تا از تبادل رطوبت و خشک‌شدن نمونه‌ها جلوگیری شود و در شرایط دمای آزمایشگاه تا سن مورد نظر عمل‌آوری شدند. نمونه‌ها در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز برای انجام آزمون بارگذاری صفحه مورد استفاده قرار گرفتند. در نمونه‌های ماسه و ماسه–الیاف که فاقد مواد سیمانی بودند، آزمون‌ها پس از آماده‌سازی و رسیدن نمونه به شرایط اولیه تعیین‌شده انجام شدند. شکل ۲ ابعاد نمونه، محدوده لایه بهسازی و نحوه استقرار صفحه بارگذاری را نشان می‌دهد.



شکل ۲. هندسه نمونه آزمایش و پیکربندی لایه بهسازی و صفحه بارگذاری

۲-۴- دستگاه و روش انجام آزمایش بارگذاری صفحه

به‌منظور ارزیابی ظرفیت باربری و رفتار بار–نشست ماسه بابلسر در شرایط مختلف تسلیح و تثبیت، آزمایش‌های بارگذاری صفحه در یک محفظه فولادی با ابعاد ۱/۵ × ۰/۸ × ۰/۸ متر انجام شد. صفحه بارگذاری از فولاد صلب با ابعاد ۴۰۰ × ۸۰ میلی‌متر و ضخامت ۲۵ میلی‌متر ساخته شد و به‌عنوان مدل پی نواری مورد استفاده قرار گرفت. بارگذاری توسط جک هیدرولیکی و تحت شرایط جابجایی–کنترل انجام شد و نیروی اعمالی با استفاده از لودسل اندازه‌گیری گردید. نشست قائم صفحه نیز توسط سه کرنش‌سنج نصب‌شده در نقاط مختلف صفحه ثبت شد و مقدار متوسط قرائت سه حسگر به‌عنوان نشست نهایی صفحه در هر مرحله بارگذاری در نظر گرفته شد. پیش از انجام هر آزمایش، مصالح مورد استفاده در هر ناحیه با رطوبت بهینه ۱۵ درصد مرطوب شده و در لایه‌های متوالی با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر در محفظه ریخته شد (N. Consoli et al. 2009). ماسه پیرامونی با تراکم نسبی ثابت ۳۰ درصد متراکم گردید، در حالی‌که ناحیه تعیین‌شده با تراکم نسبی هدف ۹۰ درصد آماده شد. بدین ترتیب، در هر آزمایش، تراکم نسبی خاک پایه و پیرامون ناحیه بهسازی ثابت بوده و تنها تراکم نسبی ناحیه بهسازی مطابق طرح آزمایش تغییر داده شد. برای دستیابی به تراکم نسبی هدف، جرم خشک موردنیاز خاک برای هر لایه بر

اساس حجم لایه و تراکم خشک متناظر با تراکم نسبی موردنظر محاسبه و به‌صورت کنترل‌شده در قالب قرار داده شد. ضخامت و حجم هر لایه ثابت نگه داشته شد و فرآیند تراکم تا دستیابی به حجم و چگالی هدف ادامه یافت. بدین ترتیب، مقدار خاک مصرفی در هر لایه متناسب با تراکم نسبی هدف تعیین شد و شرایط تراکم برای تمامی نمونه‌ها یکسان نگه داشته شد. پس از آماده‌سازی، چگالی خشک حاصل بر اساس جرم خاک و حجم نمونه کنترل و با مقدار هدف مقایسه شد تا یکنواختی و تکرارپذیری شرایط تراکم اطمینان حاصل شود.

برای نمونه‌های حاوی مواد تثبیت‌کننده، نواحی ماسه - سیمان، ماسه - سیمان - نانوسیلیس و ماسه - سیمان - نانوسیلیس - الیاف، پیش از انجام آزمون به‌صورت جداگانه آماده، متراکم و در شرایط کنترل‌شده عمل‌آوری شدند. در زمان انجام آزمون، ابتدا ماسه پایه در محفظه تا عمق و نسبت تراکم نسبی تعیین‌شده متراکم شد؛ سپس ناحیه متناظر با ابعاد ناحیه بهسازی از توده ماسه خارج و لایه تثبیت‌شده عمل‌آوری‌شده در محل تعیین‌شده قرار داده شد. پس از استقرار لایه بهسازی، ماسه پیرامون آن به‌صورت کنترل‌شده متراکم شد تا شرایط اولیه خاک اطراف لایه برای تمامی آزمایش‌ها یکسان باشد. در حالت ماسه مسلح با الیاف و فاقد مواد سیمانی، به‌دلیل عدم نیاز به دوره عمل‌آوری، پس از ایجاد فضای مورد نظر در توده ماسه، مخلوط ماسه و مقدار تعیین‌شده الیاف مستقیماً در محل قرار داده و در همان موقعیت تا چگالی نسبی هدف متراکم شد. پس از آماده‌سازی بستر، صفحه بارگذاری در مرکز سطح لایه قرار گرفت و بارگذاری به‌صورت تدریجی و تحت کنترل جابجایی اعمال شد. در طول آزمایش، نیروی اعمالی و نشست صفحه به‌صورت پیوسته ثبت و منحنی‌های بار - نشست برای شرایط مختلف استخراج شد. تمامی پارامترهای باربری در این پژوهش بر اساس منحنی‌های تنش–نشست حاصل از آزمایش‌های بارگذاری صفحه و با استفاده از یک معیار یکسان و قابل بازتولید برای تمامی پیکربندی‌ها تعیین شد. با توجه به ماهیت تدریجی منحنی‌های تنش-نشست و عدم مشاهده یک نقطه گسیختگی مشخص در برخی آزمایش‌ها، ظرفیت باربری نهایی q_u با استفاده در تمامی آزمایشات با استفاده از روش دو تانژانت تعیین شد. بدین منظور، یک خط مماس بر بخش تقریباً خطی اولیه منحنی و خط دوم بر بخش انتهایی منحنی در محدوده تغییرشکل‌های بزرگ رسم شد و تنش متناظر با محل تقاطع دو خط به‌عنوان ظرفیت باربری نهایی در نظر گرفته شد. این معیار بدون تغییر برای تمامی شرایط پیکربندی‌ها اعمال شد تا مقایسه ظرفیت باربری بین نمونه‌های شاهد و نمونه‌های تثبیت‌شده و مسلح‌شده بر مبنایی یکسان و قابل تکرار انجام گیرد. این رویکرد با روش‌های متداول تفسیر آزمایش بارگذاری صفحه و مطالعات پیشین انجام‌شده بر روی خاک‌های مسلح و تثبیت‌شده سازگار است (Nilo C Consoli et al. 2003; D1194 ASTM (1994; Ebrahimi et al. 2026). سختی سکانتی K_{50} از شیب خط واصل مبدأ منحنی تنش-نشست به نقطه متناظر با ۵۰ درصد ظرفیت باربری نهایی q_u تعیین شد.

۳- تجزیه و تحلیل داده‌ها

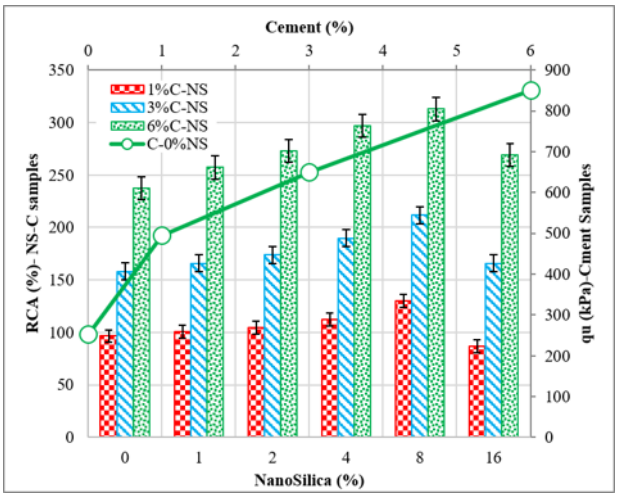
در این بخش، نتایج آزمایش‌های بارگذاری صفحه با هدف تبیین نقش هر یک از اجزای سامانه تثبیت و نحوه تغییر عملکرد خاک در اثر ترکیب آن‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. رویکرد تحلیل به‌صورت مرحله‌ای طراحی شده است تا پیش از ارزیابی سامانه تثبیت چندجزئی، سهم و عملکرد هر یک از مواد به‌طور مستقل مشخص شده و سپس اثر متقابل آن‌ها بر رفتار باربری خاک مورد بررسی قرار گیرد. بر این اساس، تحلیل نتایج در پنج مرحله متوالی انجام می‌شود: ابتدا اثر افزودن سیمان بر ظرفیت باربری و رفتار بار–نشست ماسه و تعیین مقدار بهینه سیمان بررسی می‌شود؛ سپس اثر همزمان سیمان و نانوسیلیس با هدف ارزیابی نقش نانوسیلیس در بهبود عملکرد ماتریس سیمانی و تعیین ترکیب بهینه سیمان-نانوسیلیس مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مرحله سوم، اثر مستقل الیاف بازالت بر رفتار ماسه در تراکم‌های نسبی مختلف ارزیابی می‌شود تا نقش مکانیکی الیاف در خاک فاقد تثبیت شیمیایی مشخص شود. در مرحله چهارم، تأثیر الیاف بر ماسه تثبیت‌شده با سیمان بررسی شده و تغییر عملکرد الیاف در حضور یک ماتریس سیمانی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در نهایت، در مرحله پنجم، اثر همزمان الیاف، سیمان و نانوسیلیس بررسی می‌شود تا مشخص شود آیا مقدار بهینه الیاف که در مراحل پیشین به‌صورت مستقل تعیین شده است، در سامانه سه‌جزئی نیز حفظ می‌شود یا در نتیجه تغییر ویژگی‌های ماتریس تثبیت‌شده تغییر می‌کند.

در تمامی مراحل، تحلیل صرفاً بر مقایسه مقادیر ظرفیت باربری متمرکز نیست، بلکه تغییرات رفتار بار - نشست، سختی سکانتی، روند توسعه مقاومت با افزایش درصد افزودنی و اثر سن عمل‌آوری نیز در نظر گرفته می‌شود. این رویکرد امکان تفکیک

سهم هر ماده از بهبود عملکرد و، مهم‌تر از آن، شناسایی برهم‌کنش میان اجزای سامانه را فراهم می‌کند. از این منظر، تعیین مقدار بهینه افزودنی‌ها به‌عنوان یک مسئله وابسته به ترکیب کل سامانه در نظر گرفته می‌شود؛ به‌گونه‌ای که مقدار بهینه یک ماده در حالت منفرد الزاماً به‌عنوان مقدار بهینه آن در یک سامانه چندجزئی فرض نمی‌شود. در نهایت، نتایج پنج مرحله در کنار یکدیگر قرار گرفته و مبنایی برای ارزیابی عملکرد طرح اختلاط نهایی و ارائه یک راهبرد مبتنی بر عملکرد برای بهسازی ماسه فراهم می‌کنند.

۳-۱- اثر نانوسیلیس بر ماسه تثبیت‌شده با سیمان و انتخاب ماتریس بهینه

به‌منظور مقایسه عملکرد ترکیبات مختلف تثبیت‌کننده و انتخاب ماتریس پایه برای مراحل بعدی پژوهش، ظرفیت باربری نمونه‌ها در سن ۲۸ روز در شکل ۳ مقایسه شده است. در بخش نخست، اثر افزایش مقدار سیمان بر ظرفیت باربری ماسه بررسی شده و در ادامه، با تثبیت مقدار سیمان در ٦٪، تأثیر درصدهای مختلف نانوسیلیس بر عملکرد خاک ارزیابی شده است. این مقایسه امکان تفکیک اثر افزایش مقدار سیمان از نقش نانوسیلیس در بهبود ماتریس سیمانی را فراهم می‌کند و مبنایی برای انتخاب ترکیب تثبیت‌کننده مناسب جهت بررسی اثر الیاف بازالت در مراحل بعدی پژوهش فراهم می‌سازد.



شکل ۳. تاثیر نانوسیلیس بر ظرفیت باربری ماسه تثبیت شده با سیمان: محور قائم سمت راست مربوط به نمونه سیمان فاقد نانوسیلیس و محور قائم سمت چپ مربوط به نمونه‌های حاوی نانوسیلیس است

مقایسه نتایج شکل ۳ نشان داد که پاسخ باربری ماسه به ترکیب سیمان و نانوسیلیس تابعی از برهم‌کنش میان مقدار سیمان و میزان نانوسیلیس است و نمی‌توان اثر این دو ماده را به‌صورت مستقل تفسیر کرد. در غیاب نانوسیلیس، افزایش مقدار سیمان موجب افزایش پیوسته ظرفیت باربری شد و نشان داد که در محدوده مورد بررسی، افزایش میزان سیمان تا ٦٪ همچنان موجب بهبود عملکرد ماتریس می‌شود. افزایش ظرفیت باربری از ۲۵۲ کیلوپاسکال در ماسه شاهد به ۸۵۰ کیلوپاسکال در نمونه حاوی ٦٪ سیمان، معادل حدود ۲۳۷٪ افزایش است و نشان می‌دهد که در سامانه حاضر، سیمان عامل اصلی ایجاد چارچوب مقاوم اولیه بوده است. این رفتار با نتایج مطالعات پیشین درباره تثبیت خاک‌های دانه‌ای با سیمان همخوانی دارد؛ در این مطالعات نیز افزایش مقدار سیمان عموماً موجب افزایش مقاومت و سختی خاک شده است، زیرا محصولات هیدراتاسیون سیمان نقاط تماس میان ذرات را تقویت کرده و انتقال تنش در اسکلت خاک را بهبود می‌دهند

با این حال، اضافه کردن نانوسیلیس به این ماتریس، یک افزایش خطی و نامحدود در عملکرد ایجاد نمی‌کند(Xu et al. 2023)؛ نتایج نشان دادند که پاسخ سیستم به مقدار نانوسیلیس وابسته بود. با افزایش نانوسیلس تا ۸درصد وزنی سیمان، ظرفیت باربری

به حداکثر خود رسیده و با افزایش بیشتر نانوسیلیس تا ۸ درصد دچار افت مقاومتی نسبت به نمونه با ۸ درصد نانوسیلیس شد. با این حال، نسبت به نمونه شاهد همچنان افزایش مقاومت در حدود ۲۷۰ درصد نشان داد. در حدود ۱۰۴۰کیلوپاسکال رسید که نسبت به نمونه شاهد در حدود ۳۱۳ درصد افزایش از خود نشان داد.

مکانیزم محتمل این رفتار را می‌توان در دو اثر همزمان نانوسیلیس جست‌وجو کرد. از یک سو، ذرات بسیار ریز نانوسیلیس با پر کردن بخشی از فضاهای خالی و افزایش سطح واکنش، امکان تشکیل محصولات هیدراتاسیون بیشتر و ایجاد یک ساختار متراکم‌تر را فراهم می‌کنند. همچنین واکنش پوزولانی نانوسیلیس با هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراتاسیون سیمان می‌تواند به تشکیل C–S–H ثانویه منجر شود و پیوستگی ماتریس سیمانی را افزایش دهد. شواهد ریزساختاری و شیمیایی ارائه‌شده در مطالعات وی و همکاران (۲۰۲٤) و عشق‌زاده و همکاران (۲۰۲۱) نیز افزایش محصولات C–S–H و متراکم‌تر شدن ساختار خاک سیمانی در حضور نانوسیلیس را تأیید کرده‌اند (Eshaghzadeh et al. 2021). از سوی دیگر، با افزایش بیش از حد نانوسیلیس، سطح ویژه بسیار زیاد ذرات می‌تواند موجب افزایش تقاضای آب و دشوارتر شدن پراکندگی یکنواخت آنها در ماتریس شود؛ در نتیجه، بخشی از پتانسیل واکنش پوزولانی ممکن است به دلیل تجمع ذرات یا توزیع غیریکنواخت آنها بالفعل نشود. بنابراین، وجود یک مقدار بهینه نانوسیلیس از دیدگاه فیزیکی و شیمیایی قابل انتظار است.

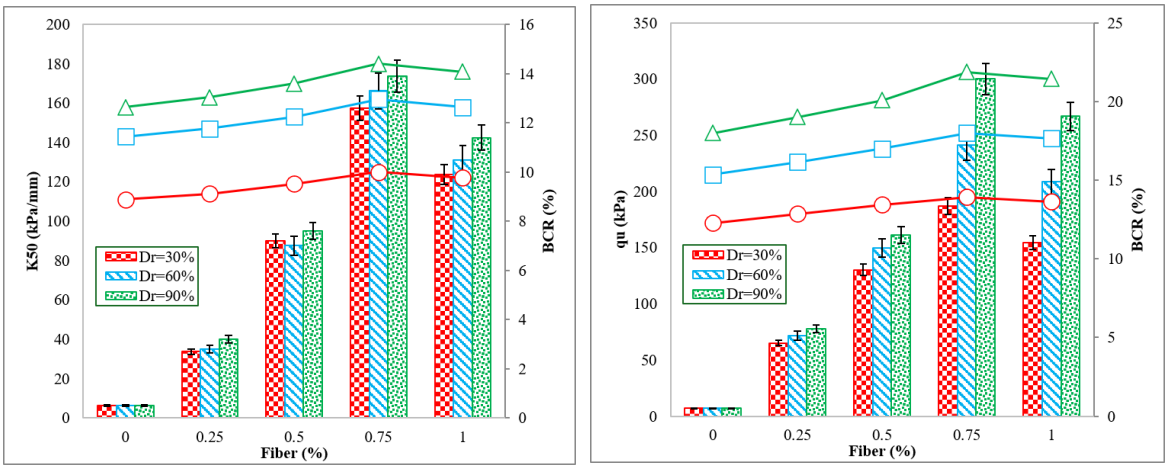
نکته مهم دیگر آن است که شدت اثر نانوسیلیس با افزایش مقدار سیمان بیشتر می‌شود. در داده‌های حاضر، افزایش نانوسیلیس در ماتریس دارای ٦٪ سیمان به افزایش محسوس‌تری در ظرفیت باربری منجر شد، در حالی‌که اثر آن در مقادیر پایین‌تر سیمان محدودتر بود. این روند نشان می‌دهد که کارایی نانوسیلیس به وجود یک ماتریس سیمانی کافی برای ایجاد و توسعه پیوندهای ناشی از واکنش‌های هیدراتاسیون و پوزولانی وابسته است. این موضوع با نتایج مطالعات چوب‌بستی و کوتانه‌ای (۲۰۱۷) نیز همخوانی دارد که نشان دادند عملکرد مخلوط خاک- سیمان- نانوسیلیس با نسبت اجزای مخلوط و مقدار سیمان مورد استفاده ارتباط دارد (Choobbasti and Kutanaei 2017).

بر این اساس، ترکیب ٦٪ سیمان و ۸٪ نانوسیلیس به‌عنوان ماتریس تثبیت پایه برای مراحل بعدی انتخاب شد. این انتخاب نه صرفاً بر اساس بیشینه بودن مقدار ظرفیت باربری، بلکه بر مبنای مشاهده یک روند مشخص افزایش عملکرد تا مقدار میانی نانوسیلیس و سپس افت عملکرد در مقدار بالاتر انجام شد. در این ترکیب، ظرفیت باربری نسبت به نمونه حاوی ٦٪ سیمان بدون نانوسیلیس حدود ۲۲٪ افزایش یافت که نشان‌دهنده سهم قابل توجه نانوسیلیس در بهبود عملکرد ماتریس سیمانی است.

۳-۲- اثرات الیاف بازالت بر رفتار مکانیکی ماسه

به‌منظور ارزیابی نقش مستقل الیاف بازالت در بهبود رفتار مکانیکی خاک، در نخستین مرحله از برنامه آزمایش، عملکرد ماسه بابلسر تقویت‌شده با مقادیر مختلف الیاف، بدون استفاده از هرگونه تثبیت‌کننده شیمیایی، مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این مرحله، تعیین میزان تأثیر الیاف بر پاسخ بار–نشست، ظرفیت باربری و ویژگی‌های تغییرشکل خاک، پیش از بررسی اثرات ترکیبی آن با سیمان و نانوسیلیس بود. از آنجا که عملکرد الیاف در خاک‌های دانه‌ای عمدتاً ناشی از ایجاد درگیری مکانیکی با ذرات، محدود کردن جابه‌جایی نسبی آن‌ها و توزیع مجدد تنش در توده خاک است، انتظار می‌رود افزودن الیاف بتواند رفتار باربری خاک را حتی در غیاب تثبیت‌کننده‌های شیمیایی نیز اصلاح کند. با این حال، میزان این بهبود به درصد الیاف، نحوه توزیع آن در خاک و کیفیت اندرکنش بین الیاف و ذرات ماسه وابسته است. در این مرحله، ماسه پیرامون ناحیه مسلح در تراکم نسبی ثابت ۳۰ درصد آماده شد و تراکم نسبی ناحیه مسلح در سه سطح ۳۰، ٦۰ و ۹۰ درصد تغییر داده شد؛ بنابراین، اثر تراکم نسبی گزارش‌شده در این بخش به‌طور مشخص مربوط به ناحیه مسلح و اندرکنش آن با صفحه بارگذاری است.

شکل ٤ اثر همزمان تراکم نسبی ناحیه بهسازی و مقدار الیاف بازالت بر پاسخ باربری ماسه را از دو دیدگاه مقاومت و تغییرشکل، به‌ترتیب از طریق ظرفیت باربری و سختی سکانتی نشان می‌دهد.



شکل ٤. تأثیر مقدار الیاف بازالت بر پاسخ باربری و سختی سکانتی ماسه

همانگونه که در شکل ٤ مشاهده می‌شود، در حالت بدون الیاف، افزایش تراکم نسبی موجب بهبود هر دو شاخص شد که بیانگر نقش غالب ساختار متراکم‌تر ناحیه بهسازی در کنترل رفتار باربری سیستم است. افزایش تراکم، از ۳۰ به ۹۰ درصد، با کاهش فضای خالی، افزایش تماس بین دانه‌ها و تقویت قفل‌شدگی مکانیکی، موجب بهبود انتقال تنش در توده خاک شد. این موضوع منجر شد مقاومت در برابر تغییرشکل و گسیختگی در سیستم خاک افزایش یابد. افزودن الیاف، این رفتار را در هر سه سطح تراکم تقویت کرد، اما روند نتایج نشان داد که نقش الیاف صرفاً افزایش مستقیم مقاومت نیست. در هر سه سطح تراکم نسبی، ظرفیت باربری با افزایش مقدار الیاف تا ۰/۷۵ درصد افزایش یافت، در حالی‌که افزایش بیشتر الیاف تا ۱ درصد با افت نسبی عملکرد همراه بود. بنابراین، وجود یک مقدار بهینه الیاف در هر سه سطح تراکم مشاهده شد؛ اما مقدار بهینه مشاهده‌شده در این مجموعه آزمایش‌ها لزوماً به معنی برتری قطعی ۰/۷۵ درصد نسبت به ۰/۵ درصد نیست، زیرا اختلاف نتایج در برخی شرایط محدود بوده و باید در چارچوب پراکندگی آزمون‌ها تفسیر شود.

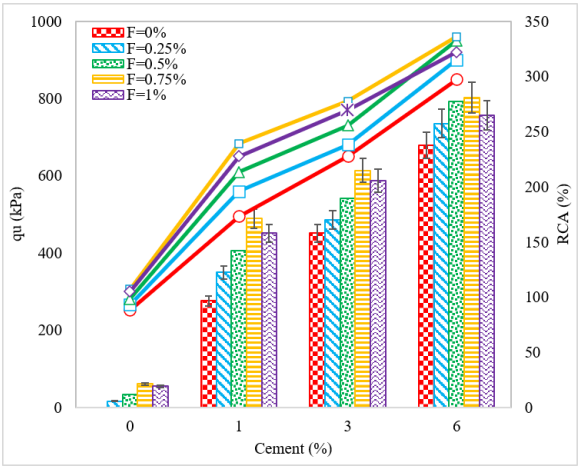
وجود چنین مقدار بهینه‌ای را می‌توان ناشی از رقابت میان دو سازوکار دانست: در مقادیر کم تا متوسط، افزایش تعداد الیاف فعال در ناحیه گسیختگی، امکان انتقال کشش میان دانه‌ها و محدود کردن جابه‌جایی نسبی آنها را افزایش می‌دهد؛ اما در مقادیر بالاتر، احتمال درهم‌تنیدگی الیاف و اختلال در یکنواختی ساختار دانه‌ای افزایش یافته و بخشی از مزیت ناشی از افزایش عناصر تقویتی از دست می‌رود. بنابراین، افزایش مقدار الیاف لزوماً به افزایش متناظر ظرفیت باربری منجر نمی‌شود. همچنین، افزایش ظرفیت باربری در حضور الیاف باید در کنار تغییرات K_{50} تفسیر شود؛ زیرا افزایش مقاومت نهایی الزاماً به معنای افزایش متناظر سختی در محدوده تغییرشکل‌های مورد استفاده برای محاسبه K_{50} نیست. وابستگی عملکرد الیاف به تراکم نسبی نیز از نکات مهم این نتایج است. افزایش تراکم نسبی ناحیه بهسازی شده، در مجموع موجب افزایش ظرفیت باربری و K_{50} شد و نشان داد که اثر الیاف در یک اسکلت متراکم‌تر ماسه‌ای با انتقال تنش مؤثرتر همراه است. در مقابل، در ناحیه مسلح‌شده با تراکم کمتر، فضای خالی بیشتر و تعداد کمتر تماس‌های دانه‌ای می‌تواند میزان بسیج اندرکنش الیاف–ماسه را محدود کند. این موضوع با نتایج آزمایش‌های بارگذاری صفحه یتیم‌اوغلو و همکاران مطابقت دارد. آنان نشان دادند که حضور الیاف بازالت می‌تواند مکانیزم تغییرشکل و گسیختگی ماسه را تغییر دهد و این اثر در ماسه متراکم به جابه‌جایی‌های بسیار کوچک‌تری آشکار می‌شود، در حالی که در ماسه‌های شل‌تر برای فعال‌شدن مکانیزم تقویتی به نشست بیشتری نیاز است. آنان این رفتار را تا حدی به محدودشدن اتساع و افزایش محصورشدگی مؤثر ناشی از الیاف نسبت دادند (Yetimoglu et al. 2005).

روند سختی سکانتی نیز در مجموع از همین برداشت مکانیکی پشتیبانی می‌کند، اما شدت تغییرات آن از ظرفیت باربری کمتر است. این تفاوت مهم است؛ زیرا نشان می‌دهد که الیاف بیش از آنکه سختی اولیه اسکلت ماسه را به‌طور چشمگیر تغییر دهند، در حین افزایش تغییرشکل و نزدیک‌شدن به ناحیه گسیختگی نیز در انتقال و بازتوزیع تنش نقش دارند. با افزایش تغییرشکل،

کشش در الیاف بسیج شده و آنها با ایجاد پل‌های کششی میان دانه‌ها، جابه‌جایی نسبی و گسترش ناحیه برشی را محدود می‌کنند. در نتیجه، افزایش ظرفیت باربری می‌تواند از تغییرات K_{50} محسوس‌تر باشد. این تفسیر با نتایج Hamidi and Hooresfand سازگار است؛ آنان نیز نشان دادند که افزودن مقدار کمی الیاف مصنوعی می‌تواند تنش گسیختگی ماسه را افزایش دهد، درحالی‌که پاسخ سختی اولیه الزاماً به همان میزان افزایش نمی‌یابد و حتی بسته به نوع و مقدار الیاف ممکن است کاهش یابد (Hamidi and Hooresfand 2013). از سوی دیگر، نتایج حاضر در مقایسه با یافته‌های وی و همکاران (۲۰۱۸) نکته قابل توجهی را آشکار می‌کند. آنها در آزمایش برش مستقیم گزارش کردند که الیاف اثر قابل‌توجهی بر سختی اولیه و مقاومت اوج ماسه نداشتند، اما کاهش مقاومت پس از اوج را محدود کرده و رفتار ماسه را شکل‌پذیرتر کردند (H. Wei et al. 2018). تفاوت میان آن نتایج و یافته‌های حاضر را می‌توان به تفاوت شرایط آزمایش نسبت داد. در آزمایش بارگذاری صفحه، خاک در یک میدان تنش سه‌بعدی و غیر یکنواخت زیر پی قرار گرفته و مکانیزم گسیختگی در حجم نسبتاً بزرگی از خاک توسعه می‌یابد؛ بنابراین، قابلیت الیاف برای پل‌زنی و محدودکردن گسترش ناحیه گسیختگی می‌تواند تأثیر مستقیم‌تری بر ظرفیت باربری داشته باشد. در مقابل، در آزمایش برش مستقیم، سطح برش از پیش تعریف شده است و امکان تغییر آزادانه مسیر گسیختگی محدودتر است. نکته دیگری که از مقایسه دو شاخص حاصل می‌شود، وجود یک تفاوت اساسی میان مقاومت نهایی و سختی تغییرشکلی است. افزایش K_{50} در حضور الیاف نشان می‌دهد که تقویت‌کننده‌ها صرفاً پس از وقوع گسیختگی فعال نمی‌شوند و بخشی از اثر آنها در محدوده بارگذاری مورد استفاده برای تعیین سختی نیز قابل مشاهده است؛ با این حال، افزایش بیشتر ظرفیت باربری نسبت به K_{50} نشان می‌دهد که سهم اصلی الیاف در بسیج مقاومت در مراحل میانی و نهایی بارگذاری ظاهر می‌شود. از این منظر، استفاده همزمان از ظرفیت باربری و K_{50} تصویر کامل‌تری از عملکرد الیاف نسبت به استفاده از هر یک از این پارامترها به‌تنهایی ارائه می‌دهد.

۳-۳- اثر الیاف بازالت بر ظرفیت باربری ماسه تثبیت‌شده با سیمان

پس از بررسی مستقل الیاف بر ظرفیت باربری ماسه طبیعی، در این مرحله تاثیر همزمان الیاف بازالت و سیمان ناحیه خاک-ناحیه بهسازی مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف اصلی، بررسی وابستگی عملکرد الیاف به میزان سیمانی‌شدن ناحیه بهسازی و تعیین مقدار مناسب الیاف در حضور ماتریس سیمانی بود. در این آزمایش‌ها، مقدار سیمان در ناحیه بهسازی در سه میزان ۱، ۳ و ۶ درصد و مقدار الیاف مختلف (۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد وزن خشک ماسه) تغییر داده شد. در تمامی این آزمایش‌ها، ماسه پیرامونی و ناحیه بهسازی به ترتیب با تراکم نسبی ثابت ۳۰ و ۹۰ درصد آماده شدند. بنابراین، اثر مشاهده‌شده ناشی از تغییر مقدار سیمان و الیاف را باید در چارچوب یک سیستم دولایه شامل ماسه پیرامونی و ناحیه بهسازی تفسیر کرد. نتایج حاصل در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۵. اثر الیاف بازالت بر ظرفیت باربری ماسه تثبیت شده با سیمان

شکل ۵ نشان می‌دهد که افزایش مقدار سیمان در ناحیه بهسازی، ظرفیت باربری سیستم را به‌طور محسوسی افزایش داده است و در تمامی سطوح سیمان، افزودن الیاف نیز ظرفیت باربری را نسبت به نمونه فاقد الیاف در همان سطح سیمان افزایش می‌دهد. این موضوع نشان می‌دهد که حضور الیاف در کنار سیمان نه‌تنها اثر تثبیت سیمانی را خنثی نمی‌کند، بلکه یک سازوکار تقویتی مکمل ایجاد می‌کند. در محدوده مورد بررسی، افزایش الیاف تا ۰/۷۵ درصد عموماً موجب افزایش ظرفیت باربری شد، در حالی‌که افزایش بیشتر تا ۱ درصد با کاهش نسبی عملکرد همراه بود. بنابراین، روند کلی شکل ۵ وجود یک مقدار میانی مطلوب برای الیاف را، مستقل از سطح سیمان، تأیید می‌کند.

در مقایسه با نمونه‌های بدون الیاف، میزان بهبود ایجادشده توسط الیاف در سطوح مختلف سیمان یکسان نیست. درصد افزایش ظرفیت باربری ناشی از الیاف در ۱، ۳ و ٦ درصد سیمان به‌ترتیب حدود ۳۸، ۲۲ و ۱۳ درصد در مقدار ۰/۷۵ درصد الیاف بود. بنابراین، اگرچه الیاف در همه سطوح سیمان موجب افزایش ظرفیت باربری شدند، سهم نسبی آنها با افزایش مقدار سیمان کاهش یافت. این روند نشان می‌دهد که با تقویت ماتریس سیمانی، سهم بیشتری از بار توسط پیوندهای سیمانی و اسکلت تثبیت‌شده خاک تحمل می‌شود و نقش نسبی الیاف در افزایش ظرفیت باربری کاهش می‌یابد. برای نمونه، در ٦٪ سیمان، افزودن ۰٫۷۵٪ الیاف ظرفیت باربری را نسبت به ماسه شاهد حدود ۱۲٫۹٪ افزایش داد؛ این در حالی است که خود تثبیت با ٦٪ سیمان افزایش بسیار بزرگ‌تری در ظرفیت باربری ایجاد کرده بود. این تفاوت نشان می‌دهد که سهم نسبی الیاف در یک ماتریس سیمانی قوی‌تر، در مقایسه با سهم اصلی سیمان، محدودتر است؛ هرچند اثر آن همچنان مثبت باقی می‌ماند.

این رفتار را می‌توان بر اساس تغییر سازوکار انتقال تنش در محیط تثبیت‌شده تفسیر کرد. در مقادیر کم و متوسط سیمان، افزایش مقاومت پیوندی میان ذرات باعث ایجاد یک ماتریس نسبتاً مقاوم می‌شود، در حالی‌که الیاف با ایجاد پل‌های کششی و محدود کردن جابه‌جایی نسبی دانه‌ها، یک مسیر انتقال تنش مکمل در ناحیه گسیختگی فراهم می‌کنند. در نتیجه، ترکیب دو سازوکار پیوند سیمانی و درگیری الیاف-ماسه می‌تواند موجب افزایش ظرفیت باربری شود. با افزایش بیشتر سیمان، مقاومت و پیوستگی ماتریس افزایش یافته و در نتیجه اثر نسبی الیاف نسبت به مقاومت پایه کاهش می‌یابد، هرچند اثر مطلق آن همچنان مثبت باقی می‌ماند. این رفتار با نتایج Consoli و همکاران که وجود مقدار بهینه الیاف و وابستگی عملکرد آن به میزان سیمانی‌شدن را گزارش کرده‌اند، همخوانی دارد (Nilo Cesar Consoli et al. 2003; Rasouli et al. 2017).

نکته قابل تامل دیگر در شکل ۵، ثبات مقدار بهینه مشاهده‌شده الیاف در سه سطح سیمان است. در هر سه درصد سیمان مصرفی در ناحیه بهسازی (۱، ۳ و ٦درصد)، بیشترین ظرفیت باربری در ۰/۷۵ درصد الیاف مشاهده شد. بااین‌حال، در ٦ درصد سیمان اختلاف میان مقادیر ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد الیاف محدود است؛ ازاین‌رو، این نتیجه باید به‌عنوان مقدار بهینه مشاهده‌شده در محدوده آزمایش حاضر تفسیر شود، نه یک مقدار بهینه مطلق و مستقل از شرایط آزمایش. این موضوع اهمیت بررسی مرحله بعدی را بیشتر می‌کند؛ زیرا با افزودن نانوسیلیس و اصلاح بیشتر ماتریس سیمانی، ممکن است تعادل میان سهم ماتریس و نقش الیاف تغییر کرده و مقدار بهینه الیاف جابه‌جا شود.

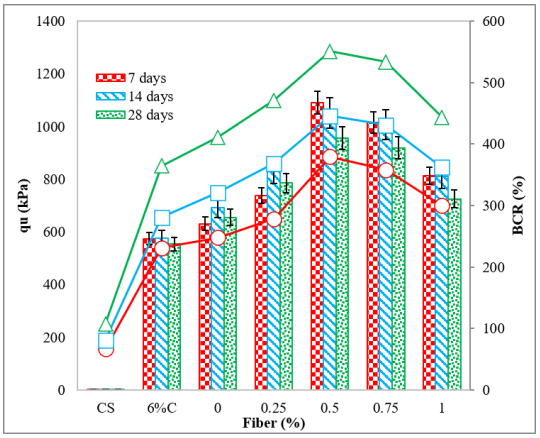
از دیدگاه اندرکنش اجزای سامانه، نتایج حاصل نشان می‌دهد که عملکرد الیاف بازالت در ماسه تثبیت‌شده را نمی‌توان مستقل از کیفیت ماتریس سیمانی–نانوسیلیسی تفسیر کرد. در نمونه‌های حاوی ٦٪ سیمان، افزودن نانوسیلیس تا مقدار بهینه موجب افزایش ظرفیت باربری ماتریس و بهبود پیوستگی ساختار تثبیت‌شده شد. هم‌زمان، مقدار الیاف لازم برای دستیابی به بیشترین ظرفیت باربری از ۰٫۷۵٪ در ماسه و ماسه–سیمان به ۰٫۵۰٪ در سامانه حاوی ٦٪ سیمان و ۸٪ نانوسیلیس کاهش یافت. این تغییر را می‌توان به تغییر تعادل میان دو سازوکار اصلی انتقال تنش نسبت داد؛ به‌گونه‌ای که با افزایش کیفیت و پیوستگی ماتریس سیمانی، سهم ماتریس در انتقال بار افزایش یافته و مقدار کمتری الیاف برای ایجاد یک شبکه مؤثر پل‌زنی و کنترل تغییرشکل کافی خواهد بود.

این وابستگی متقابل میان سیمان و الیاف، مبنای مناسبی برای بررسی مرحله بعدی پژوهش، یعنی تعیین اینکه آیا افزودن نانوسیلیس می‌تواند مقدار بهینه الیاف را تغییر دهد، فراهم می‌کند. با توجه به وابستگی عملکرد الیاف به ویژگی‌های ماتریس پیرامون، این پرسش مطرح می‌شود که آیا بهبود و اصلاح ماتریس سیمانی از طریق افزودن نانوسیلیس می‌تواند نحوه اندرکنش الیاف با خاک و ماتریس سیمانی، سازوکار انتقال تنش و در نهایت میزان مشارکت الیاف در بهبود رفتار باربری را تغییر دهد. بر این اساس، در مرحله بعد، با ثابت نگه‌داشتن مقدار سیمان در

سطح ٦ درصد و افزودن مقادیر مختلف نانوسیلیس، اثر اصلاح ماتریس سیمانی بر عملکرد الیاف بازالت بررسی شد. هدف این مرحله، صرفاً ارزیابی اثر مستقل نانوسیلیس نبود، بلکه تعیین این موضوع بود که آیا تغییر کیفیت و پیوستگی ماتریس سیمانی–نانوسیلیسی می‌تواند مقدار بهینه الیاف و میزان بهبود ظرفیت باربری حاصل از تسلیح الیافی را نیز تغییر دهد.

۳-٤- عملکرد خاک تثبیت‌شده با سیمان–نانوسیلیس مسلح‌شده با الیاف بازالت

پس از تعیین مقدار بهینه سیمان و نانوسیلیس، اثر افزودن الیاف بازالت بر رفتار باربری ماسه تثبیت‌شده با ٦٪ سیمان و مقادیر مختلف نانوسیلیس بررسی شد. برای این منظور، درصد الیاف در دامنه ۰ تا ۱٪ تغییر داده شد تا ضمن ارزیابی نقش الیاف در سامانه تثبیت‌شده، وابستگی مقدار بهینه الیاف به میزان نانوسیلیس نیز مشخص شود. نتایج حاصل از آزمایش‌های بارگذاری صفحه در شکل ٦ ارائه شده است.



شکل ٦. اثر درصد الیاف بازالت بر ظرفیت باربری ماسه تثبیت‌شده با ٦٪ سیمان و مقادیر مختلف نانوسیلیس

٤-یافته‌ها

نتایج شکل ٦ نشان می‌دهد که افزایش سن عمل‌آوری در تمامی ترکیبات موجب افزایش ظرفیت باربری شده است، که بیانگر توسعه تدریجی پیوندهای سیمانی و تکامل ساختار تثبیت‌شده در طول عمل‌آوری است. در کنار اثر سن، پاسخ سیستم به مقدار الیاف نیز غیرخطی بوده و در هر سه سن مورد بررسی، افزایش الیاف ابتدا موجب افزایش ظرفیت باربری و سپس، پس از رسیدن به یک مقدار مشخص، موجب کاهش آن شده است.

این روند بیانگر وجود یک مقدار بهینه الیاف در ماتریس سیمانی-نانوسیلیسی است و نشان می‌دهد که افزایش مقدار الیاف به‌تنهایی معیار مناسبی برای افزایش عملکرد خاک نیست.

نتایج بدست آمده در مطابقت با نتایج کنسولی و همکاران (۲۰۰۹) می‌باشد (N. Consoli et al. 2009). نکته مهم شکل، تغییر مقدار بهینه الیاف با افزایش نانوسیلیس است. در مقادیر پایین نانوسیلیس، بیشترین ظرفیت باربری در حدود ۰/۷۵٪ الیاف حاصل شده، در حالی‌که با افزایش نانوسیلیس به مقادیر بالاتر، نقطه اوج عملکرد به ۰/۵٪ الیاف منتقل می‌شود. این تغییر را می‌توان ناشی از تغییر کیفیت ماتریس سیمانی دانست؛ از سوی دیگر، ظرفیت باربری سیستم بهسازی شده در ۰/۵ درصد الیاف، دارای بیشترین مقدار در هر سه سن عمل‌آوری بود. این موضوع نشان می‌دهد که کاهش مقدار بهینه الیاف از ۰/۷۵٪ در ماسه طبیعی و ماسه-سیمان به ۰/۵٪ در توده بهسازی شده حاوی نانوسیلیس، صرفاً ناشی از شرایط خاص سن ۲۸ روز نیست، بلکه با تغییر کیفیت ماتریس تثبیت‌شده در حضور نانوسیلیس در کل دوره عمل‌آوری مشاهده می‌شود.

به بیان مکانیکی، بهبود ماتریس سیمانی-نانوسیلیسی می‌تواند ظرفیت انتقال تنش از اسکلت تثبیت‌شده به الیاف و بالعکس را تغییر دهد (Choobbasti and Kutanaei 2017) و در نتیجه، مقدار کمتری از الیاف برای دستیابی به یک شبکه تقویتی مؤثر کافی باشد. در مقادیر کم تا متوسط الیاف، الیاف با ایجاد درگیری مکانیکی با ذرات و ایجاد پل‌های کششی در ناحیه تغییرشکل‌یافته، می‌توانند جابه‌جایی نسبی دانه‌ها را محدود کرده و انتقال تنش را بهبود دهند. با افزایش مقدار الیاف فراتر از مقدار بهینه، افزایش احتمالی در تعداد عناصر تقویتی لزوماً به افزایش

ظرفیت باربری منجر نمی‌شود؛ زیرا اختلاط یکنواخت الیاف و حفظ تماس مؤثر میان ذرات نیز برای عملکرد تقویتی ضروری است. بنابراین، افت مشاهده‌شده در مقادیر ۰/۷۵ و یک درصد نسبت به ۰/۵ درصد را می‌توان به کاهش کارایی شبکه الیافی در مقادیر بالاتر نسبت داد، هرچند در پژوهش حاضر اندازه‌گیری مستقیمی از توزیع الیاف یا ساختار داخلی انجام نشده و این تفسیر باید به‌عنوان یک سازوکار احتمالی در نظر گرفته شود. رفتار مشابهی برای ماسه‌های مسلح‌شده با الیاف در مطالعات پیشین گزارش شده است (N. Consoli et al. 2009).

نکته مهم دیگر، افزایش ظرفیت باربری ناشی از ترکیب الیاف و ماتریس سیمانی–نانوسیلیسی در مقایسه با حالت فاقد الیاف است. در سن ۲۸ روز، ظرفیت باربری نمونه حاوی ٦٪ سیمان و ٨٪ نانوسیلیس از ۱۰۴۰ کیلوپاسکال در حالت بدون الیاف به ۱۲۸۵ کیلوپاسکال در حضور ۰/۵ درصد الیاف افزایش یافت؛ یعنی حدود ۲٤ درصد افزایش ظرفیت باربری نسبت به همان ماتریس فاقد الیاف. این نتیجه نشان می‌دهد که حتی پس از اصلاح ماتریس سیمانی توسط نانوسیلیس، الیاف همچنان یک سهم مکانیکی قابل توجه در افزایش ظرفیت باربری دارند؛ هرچند سهم نسبی آنها از عملکرد کل سامانه کمتر از اثر ترکیبی سیمان و نانوسیلیس است.

یکی دیگر از روندهای قابل توجه در نتایج، افزایش ظرفیت باربری با افزایش سن عمل‌آوری است. این افزایش در تمامی ترکیبات حاوی سیمان مشاهده شد، اما شدت آن در نمونه‌های دارای الیاف و نانوسیلیس بیشتر بود. این رفتار را می‌توان به تداوم هیدراتاسیون سیمان، تکامل پیوندهای سیمانی و افزایش تدریجی پیوستگی ماتریس نسبت داد. در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس، واکنش پوزولانی و تشکیل محصولات ثانویه هیدراتاسیون نیز می‌تواند به متراکم‌تر شدن ساختار و افزایش ظرفیت انتقال تنش کمک کند. از سوی دیگر، افزایش سن عمل‌آوری فرصت بیشتری برای انتقال و توزیع تنش میان ماتریس سیمانی، دانه‌های ماسه و الیاف فراهم می‌کند؛ بنابراین، اثر تقویتی الیاف در سنین بالاتر می‌تواند در قالب افزایش ظرفیت باربری نهایی آشکارتر شود. با این حال، روند افزایش ظرفیت باربری با سن باید در چارچوب ترکیب مواد تفسیر شود و نمی‌توان افزایش مشاهده‌شده را صرفاً به اثر الیاف یا نانوسیلیس نسبت داد، زیرا تکامل همزمان ماتریس سیمانی نیز در این تغییرات نقش دارد.

از نظر اثر الیاف، نکته قابل توجه آن است که ۰/۵ درصد الیاف در هر سه سن ۷، ۱٤ و ۲۸ روز بالاترین ظرفیت باربری را در میان مقادیر مختلف الیاف ایجاد کرده است. بنابراین، انتقال مقدار بهینه الیاف از ۰/۷۵ درصد در ماسه طبیعی و ماسه-سیمان به ۰/۵ درصد در سامانه سیمان- نانوسیلیس را نمی‌توان صرفاً به افزایش مقاومت در سن ۲۸ روز نسبت داد؛ بلکه این تغییر در کل دوره عمل‌آوری مشاهده شده است. این نتیجه نشان می‌دهد که اصلاح ماتریس توسط نانوسیلیس، در کنار توسعه مقاومت ناشی از عمل‌آوری، می‌تواند تعادل میان سهم ماتریس سیمانی و نقش تقویتی الیاف در انتقال تنش را تغییر دهد.

نتایج نشان می‌دهد که سن عمل‌آوری و مقدار الیاف دو عامل مستقل از یکدیگر نیستند و عملکرد نهایی سامانه حاصل برهم‌کنش میان تکامل ماتریس تثبیت‌شده و مکانیزم تقویت الیافی است. با این حال، از آنجا که هدف پژوهش حاضر تعیین روند توسعه مقاومت در شرایط آزمایشگاهی بوده است، اثر سن عمل‌آوری باید در محدوده سنین بررسی‌شده تفسیر شود و نمی‌توان بر اساس این داده‌ها رفتار بلندمدت سامانه را استنباط کرد. مقدار بهینه الیاف یک پارامتر ثابت و مستقل از سایر مواد تثبیت‌کننده نیست. در واقع، با اصلاح ماتریس سیمانی توسط نانوسیلیس، تعادل میان سهم مقاومت ماتریس و سهم پل‌زنی و درگیری مکانیکی الیاف تغییر می‌کند.

این موضوع با نتایج کنسولی و همکاران (۲۰۰۹) درباره وابستگی عملکرد الیاف به درجه سیمانی‌شدن سازگار است (N. Consoli et al. 2009)؛ آنان نشان دادند که اثر الیاف در ماسه سیمانی‌شده تابع وضعیت سیمانی‌شدن بوده و افزایش الیاف در همه سطوح سیمان الزاماً به افزایش مقاومت منجر نمی‌شود. در نتیجه، یافته اصلی این بخش صرفاً تعیین یک مقدار بهینه برای الیاف نیست، بلکه نشان می‌دهد بهینه‌سازی الیاف باید در چارچوب کل سامانه تثبیت انجام شود. بر اساس نتایج حاضر، ٨٪ نانوسیلیس و ۰/۵ درصد الیاف بازالت مناسب‌ترین ترکیب در کنار ٦٪ سیمان برای دستیابی به بیشترین ظرفیت باربری بوده و موجب افزایش حدود ۲٤٪ ظرفیت باربری نسبت به ماتریس فاقد الیاف شد. این میزان افزایش، در کنار تغییر مقدار بهینه الیاف از ۰/۷۵ به ۰/۵ درصد، نشان می‌دهد که نقش الیاف در سیستم بهسازی شده نهایی صرفاً افزایشی نیست، بلکه به کیفیت ماتریس تثبیت‌شده نیز وابسته است. این نتیجه از نظر طراحی اهمیت دارد، زیرا نشان می‌دهد تعیین درصد بهینه هر افزودنی به‌صورت مستقل می‌تواند به طرح اختلاط غیربهینه منجر شود؛ موضوعی که مطالعات جدید درباره ترکیب نانوسیلیس و الیاف نیز بر آن تأکید دارند.

۵-نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار باربری ماسه متراکم تثبیت‌شده با سیمان، نانوسیلیس و الیاف بازالت با استفاده از آزمایش مدل فیزیکی بارگذاری صفحه بررسی شد. رویکرد مرحله‌ای پژوهش امکان تعیین مقادیر بهینه افزودنی‌ها و بررسی تغییر عملکرد الیاف در شرایط مختلف تثبیت را فراهم کرد. مهم‌ترین یافته‌های پژوهش به شرح زیر است:

– ٦٪ سیمان به‌عنوان مقدار بهینه سیمان در محدوده مقادیر بررسی‌شده و تحت شرایط آزمایش تعیین شد و مبنای توسعه سامانه‌های مرکب قرار گرفت.

– افزودن نانوسیلیس به ماسه سیمانی موجب افزایش بیشتر ظرفیت باربری شد و ٨٪ نانوسیلیس برمبنای وزن سیمان و در محدوده مقادیر بررسی شده به‌عنوان مقدار بهینه در شرایط آزمایش‌شده تعیین گردید. افزایش بیشتر نانوسیلیس تا ١٦٪ با کاهش عملکرد همراه بود که بیانگر وجود یک محدوده بهینه برای این افزودنی است.

– در ماسه طبیعی و ماسه تثبیت‌شده با سیمان، مقدار بهینه الیاف در محدوده مقادیر بررسی شده ۰/۷۵ درصد بود؛ بااین‌حال، در ترکیب حاوی سیمان و نانوسیلیس، مقدار بهینه الیاف به ۰/۵ درصد کاهش یافت. این تغییر نشان می‌دهد که مقدار بهینه الیاف تابع ترکیب و کیفیت ماتریس تثبیت‌شده است و نمی‌توان آن را به‌صورت مستقل از سایر اجزا تعیین کرد.

– در محدوده ترکیبات بررسی‌شده، ترکیب ٦٪ سیمان + ٨٪ نانوسیلیس + ۰/۵ درصد الیاف بازالت بیشترین ظرفیت باربری را ایجاد کرد و ظرفیت باربری را به ۱۲۸۵ کیلوپاسکال رساند. این مقدار در مقایسه با ماسه شاهد بدون تثبیت، معادل حدود ٤١٠٪ افزایش ظرفیت باربری است. همچنین، افزودن ۰/۵ درصد الیاف به ماتریس 6%C–8%NS حدود ٢٤٪ ظرفیت باربری را نسبت به ماتریس فاقد الیاف افزایش داد. بنابراین، بهبود عملکرد سامانه مرکب را نمی‌توان صرفاً به افزایش مقدار یک افزودنی نسبت داد، بلکه انتخاب مناسب اجزای سامانه و برهم‌کنش میان آن‌ها اهمیت تعیین‌کننده دارد.

– به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که در چارچوب شرایط و دامنه ترکیبات بررسی شده در این پژوهش، بهینه‌سازی ترتیبی و وابسته به ترکیب رویکرد مناسب‌تری برای طراحی سامانه‌های تثبیت چندجزئی ماسه است. به‌ویژه، تغییر مقدار بهینه الیاف پس از افزودن نانوسیلیس نشان می‌دهد که تعیین مقدار هر افزودنی بر اساس عملکرد آن در یک رفتار سیستم منفرد می‌تواند به انتخاب طرحی غیربهینه در ترکیب بهسازی شده منجر شود.

– یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب سیمان، نانوسیلیس و الیاف بازالت، در محدوده شرایط و مصالح بررسی‌شده، ظرفیت بالایی برای بهبود رفتار باربری ماسه دارد. این نتایج در شرایط آزمایش حاضر، شامل ماسه پایه با تراکم نسبی ٣٠٪ و ناحیه بهسازی‌شده با تراکم نسبی مورد استفاده در هر مرحله، به دست آمده‌اند. بااین‌حال، تعمیم مقادیر بهینه به سایر خاک‌ها، تراکم‌های نسبی، شرایط رطوبتی، ابعاد و مقیاس‌های اجرایی مستلزم بررسی‌های تکمیلی و اعتبارسنجی در شرایط واقعی است.

محدودیت‌های پژوهش و پیشنهاد برای مطالعات آینده

با وجود نتایج قابل توجه این پژوهش، یافته‌ها در چارچوب نوع ماسه، شرایط تراکم، ابعاد مدل و محدوده مقادیر سیمان، نانوسیلیس و الیاف بازالت بررسی‌شده تفسیر می‌شوند. ازاین‌رو، بررسی عملکرد سامانه پیشنهادی در مقیاس‌های بزرگ‌تر، خاک‌های با مشخصات متفاوت و تحت شرایط بارگذاری و محیطی متنوع می‌تواند در مطالعات آینده مورد توجه قرار گیرد. همچنین، ارزیابی دوام بلندمدت و بررسی‌های ریزساختاری می‌تواند درک دقیق‌تری از پایداری عملکرد و سازوکار اندرکنش میان سیمان، نانوسیلیس و الیاف بازالت فراهم کند.

٦- مراجع

-Adeniji, Mujeeb Adewale (2024). *Investigating the Influence of Soil Properties on Foundation Settlement and Bearing Capacity*.

-Aksu Alcan, Bilge, and Semet Çelik (2023). The Effect of Different Fiber Reinforcement on Bearing Capacity under Strip Foundation on the Sand Soil: An Experimental Investigation. *Applied Sciences* 13 (17): 9769.

-Amhadi, Talal S., and Gabriel J. Assaf (2021).Improvement of Pavement Subgrade by Adding Cement and Fly Ash to Natural Desert Sand. *Infrastructures* 6 (11): 151.

-ASTM, D. (2003). 1194-94: Standard Test Method for Bearing Capacity of Soil for Static Load and Spread Footings. *ASTM International, West Conshohocken*.

Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 129 (1): 96–101.

-Ebrahimi, Amir, Aboozar Mirzakhani, Mohsen Mousivand, and Reza Samiromi. (2026). Effect of Biaxial Geogrid Rib Orientation on the Bearing Capacity and Deformation Response of Strip Footings beneath Bridges. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, e10918.

-El-Emam, Magdi, Ruba Elmootassem, Haitham Badrawi, and Ashraf Amin (2023). *Bearing Capacity and Strength of Fibre-Reinforced Sand: Experimental and Parametric Study*.

-Eshaghzadeh, Mehdi, Meysam Bayat, Rassoul Ajalloeian, and Sayyed Mahdi Hejazi (2021). Mechanical Behavior of Silty Sand Reinforced with Nanosilica-Coated Ceramic Fibers. *Journal of Adhesion Science and Technology* 35 (23): 2664–83.

-Faramarzi, Mahdi, and Mohsen Mousivand. (2026) Effects of Fibers on the Interfacial Shear Strength of a Two-Layer Bi-Material Polymer Concrete System. *AUT Journal of Civil Engineering*, ahead of print. **doi.org/10.22060/ajce.2026.24923.5960**

-Ghadr, Soheil, Arya Assadi-Langroudi, Ching Hung, Brendan C. O'Kelly, Hadi Bahadori, and Taher Ghodsi. (2020). Stabilization of Sand with Colloidal Nano-Silica Hydrosols. *Applied Sciences* 10 (15): 5192–5192.

-Ghasem Ghanbari, P., M. Momeni, M. Mousivand, and M. Bayat (2022). Unconfined Compressive Strength Characteristics of Treated Peat Soil with Cement and Basalt Fibre. *International Journal of Engineering* 35 (5): 1089–95.

-Hamidi, Amir, and Mahdi Hooresfand (2013). Effect of Fiber Reinforcement on Triaxial Shear Behavior of Cement Treated Sand. *Geotextiles and Geomembranes* 36: 1–9.

-(2017). Nanosilica Particle Size on the Water Permeability, Abrasion Resistance, Drying Shrinkage, and Repair Work Properties of Cement Mortar Containing Nano-SiO2. *Advances in Materials Science and Engineering* (1): 4213690.

-Hosseini, Seyed Amir Hossein, Meysam Bayat, Mohsen Mousivand, and Rassoul

-ASTM, D1194 (1994). Standard Test Method for Bearing Capacity of Soil for Static Load and Spread Footings. *American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, USA*.

-Bahmani, Sayed Hessam, Nima Farzadnia, Afshin Asadi, and Bujang BK Huat (2016). The Effect of Size and Replacement Content of Nanosilica on Strength Development of Cement Treated Residual Soil. *Construction and Building Materials* 118: 294–306.

-Bayat, Meysam (2025). Nanomaterials in Geotechnical Engineering: A Comprehensive Review on Soil Improvement Techniques. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, ahead of print. **doi.org/10.22059/ceij.2025.380531.2125**

-Chai, Yuan, Dai-Ping Jiang, Fu-Jiang Wang, and Hai-Bo Lyu. (2021). Investigation of Engineering Properties of Cement-Stabilized Calcareous Sand Foundation. *Advances in Materials Science and Engineering* 2021 (1): 9188560.

-Choobbasti, Asskar Janalizadeh, and Saman Soleimani Kutanaei. (2017). Microstructure Characteristics of Cement-Stabilized Sandy Soil Using Nanosilica. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 9 (5): 981–88.

-Choobbasti, Asskar Janalizadeh, Ali Vafaei, and Saman Soleimani Kutanaei (2015). Mechanical Properties of Sandy Soil Improved with Cement and Nanosilica. *Open Engineering* 5 (1).

-Consoli, NC, MDT Casagrande, A. Thomé, F. Dalla Rosa, and M. Fahey (2009). Effect of Relative Density on Plate Loading Tests on Fibre-Reinforced Sand. *Géotechnique* 59 (5): 471–76.

-Consoli, Nilo C, Michéle DT Casagrande, Pedro DM Prietto, and Anto$_{\chi}$ nio Thomé (2003). Plate Load Test on Fiber-Reinforced Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 129 (10): 951–55.

-Consoli, Nilo Cesar, Márcio Antonio Vendruscolo, and Pedro Domingos Marques Prietto (2003). Behavior of Plate Load Tests on Soil Layers Improved with Cement and Fiber.

Stabilized Soil Reinforced with Polypropylene/Basalt Fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering* 33 (9): 04021232.

–Sam, Shilpa Mary, PK Jayasree, and Elsa Jacob Joseph (2022). Effect of Nano Silica on Dispersion and Strength Characteristics of Silty Soil. 79–92.

–Tafreshi, SN Moghaddas, and O. Khalaj (2008). Laboratory Tests of Small-Diameter HDPE Pipes Buried in Reinforced Sand under Repeated-Load. *Geotextiles and Geomembranes* 26 (2): 145–63.

–Wasti, Yildiz, and Mustafa Denizhan Bütün. (1996). Behaviour of Model Footings on Sand Reinforced with Discrete Inclusions. *Geotextiles and Geomembranes* 14 (10): 575–84.

–Wei, Houzhen, Tao Zhao, Qingshan Meng, Xinzhi Wang, and Jianqiao He. (2018). Experimental Evaluation of the Shear Behavior of Fiber-Reinforced Calcareous Sands. *International Journal of Geomechanics* 18 (12): 04018175.

–Wei, Wang, Wu Erlu, Huang Shuaishuai, Song Xingjiang, Li Na, and Jiang Ping. (2024). "Experimental Investigation on Static and Dynamic Properties of Nanosilica Modified Cement Soil. *Construction and Building Materials* 412: 134746–134746.

–Xu, Zhishan, Yongsheng Ji, Jie Zhang, Zhongzhe Zhang, Qi Xue, and Furong Gao. (2023). Mechanism of Nano-SiO2 Internal Generation for Modification of Cement-Based Materials. *Journal of Building Engineering* 76: 107247–107247.

–Yabaluie Khamesluei, Mohammad Reza, Meysam Bayat, Mohsen Mousivand, and Mohammad Amin Nozari (2024). Effect of Zeolite Replacement and Tyre Fibre Inclusions on Geotechnical Properties of Cement-or Lime-Stabilised Sand. *Geomechanics and Geoengineering*, 1–16.
doi.org/10.1080/17486025.2024.2326087

–Yetimoglu, Temel, Muge Inanir, and Orhan Esat Inanir (2005). A Study on Bearing Capacity of Randomly Distributed Fiber-Reinforced Sand Fills Overlying Soft Clay. *Geotextiles and Geomembranes* 23 (2): 174–83.

Ajalloeian (2025). Comparative Analysis of the Effects of Fibres, Cement and Biopolymer on Soil Improvement. *Geomechanics and Geoengineering* 20 (6): 1360–88.

–Hou, Pengkun, Jie Shi, Srinivas Prabakar, et al. (2020). Effects of Mixing Sequences of Nanosilica on the Hydration and Hardening Properties of Cement-Based Materials. *Construction and Building Materials* 263: 120226.

–Kasama, Kiyonobu, Andrew J. Whittle, and Kouki Zen (2012). Effect of Spatial Variability on the Bearing Capacity of Cement-Treated Ground. *Soils and Foundations* 52 (4): 600–619.

–Kumar, B. Narendra, M. Rushikesh, and A. Akhil Kumar (2024). An Experimental Study on High Strength Self-Compacting Concrete Inclusion of Zeolite and Silica Fume as a Potential Alternative Sustainable Cementitious Materials. *Materials Today: Proceedings*.

–Loukidis, D., and Rodrigo Salgado (2011). Effect of Relative Density and Stress Level on the Bearing Capacity of Footings on Sand. *Géotechnique* 61 (2): 107–19.

–Mazouz, Badis, Ahmed Abderraouf Belkadi, Mudthir Bakri, et al. (2025). Model Testing and Response Surface Investigation of Eccentric Loading on Closely Spaced Strip Footings. *Scientific Reports* 15 (1): 41388.

–Noorzad, Reza, and Seyed Zarinkolaei (2015). Comparison of Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Sand under Triaxial Compression and Direct Shear. *Open Geosciences* 7 (October).
doi.org/10.1515/geo-2015-0041

–Rasouli, Habib, Hana Takhtfirouzeh, Abbasali Taghavi Ghalesari, and Roya Hemati (2017). Bearing Capacity Improvement of Shallow Foundations Using Cement-Stabilized Sand. *Key Engineering Materials* 723: 795–800.

–Roshani, Ehsan, Mohsen Mousivand, and Meysam Bayat (2025). Enhancing Mechanical Properties of Concrete Using Polymer-Modified Recycled Carpet Fiber Composites. *International Journal of Engineering* 38 (10): 2321–33.
doi.org/10.5829/ije.2025.38.10a.09.

–Sahlabadi, Seyed Hadi, Meysam Bayat, Mohsen Mousivand, and Mohsen Saadat. (2021). Freeze–Thaw Durability of Cement-

Effect of Basalt Fibers on the Bearing Capacity of Cement–Nanosilica-Stabilized Sand An Physical Model Study

Amir Ebrahimi, Department of Civil Engineering, Sha.C., Islamic Azad University, Shahrood, Iran.
***Mohsen Mousivand,** Department of Civil Engineering, GKM.C., Islamic Azad University, Gonbad Kavoos, Iran.*

E-mail: mousivand@iau.ir

Received: May 2026- Accepted: November 2026

ABSTRCT
Sandy soils, particularly under low-density conditions, may lack sufficient bearing capacity and stiffness to sustain loads imposed by shallow foundations. This study investigated the performance of a multi-component soil improvement approach incorporating cement, nanosilica, and basalt fibers to enhance the bearing behavior of sand. A stepwise experimental program was designed to first determine the effects and optimum contents of cement (1, 3, and 6% by dry weight of sand) and nanosilica (2, 4, 8, and 16% by weight of cement) on bearing capacity, followed by an evaluation of basalt fibers (0.25, 0.50, 0.75, and 1% by dry weight of sand) in natural sand and sand stabilized with cement and cement–nanosilica mixtures. The soil behavior was evaluated using physical model plate load tests. Natural sand and fiber-reinforced specimens were tested without a curing period, whereas specimens containing cement and/or cement–nanosilica, with and without fibers, were tested after curing periods of 7, 14, and 28 days. The results showed that 6% cement and a combination of 6% cement + 8% nanosilica were identified as the optimum cement content and optimum cement–nanosilica combination, respectively. The optimum cement, cement–nanosilica, and cement–nanosilica–fiber combinations increased the bearing capacity by 237%, 313%, and 410%, respectively, compared with the untreated reference sand. Furthermore, the optimum fiber content depended on the stabilized matrix. The optimum basalt fiber content was 0.75% in both natural sand and cement-stabilized sand, whereas it decreased to 0.50% when cement and nanosilica were used simultaneously.

Keywords: Babolsar Sand, Basalt Fibers, Nanosilica, Cement, Plate Load Test