[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.5.9]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.703]

بررسی‌های آزمایشگاهی تأثیر هیبرید نانوذرات در به‌سازی خاک اطراف حرم مطهر رضوی

سهیل قره*، کیمیا یزدانی، فاطمه اخلاقی؛
دانشگاه پیام نور، تهران

تاریخ: دریافت ۹۸/۰٦/۱٦ پذیرش ۹۸/۰۹/۳۰

چکیده

به‌سازی خاک‌های مسئله‌دار در محیط‌های شهری و به‌ویژه کلان‌شهرها از مهم ترین چالش‌های مهندسان عمران است. در این پژوهش با توجه به قابلیت افزایش سطح ویژه ذرات خاک به‌وسیلهٔ نانوذرات، به‌منظور به‌سازی خاک اطراف حرم مطهر رضوی در مشهد، بررسی‌های آزمایشگاهی روی ترکیبات جدیدی از نانوذرات رس و سیلیکا انجام شد که بر اساس نتایج، نسبت‌های بهینه نانورس ۲/۵٪ و ۵٪ و نسبت‌های بهینه نانوسیلیکا ۰/۲۵٪ و ۱٪ به‌دست آمدند، به‌طوری‌که هیبرید ساخته شده از ۵٪ نانورس و ۱٪ نانوسیلیکا به‌عنوان بهترین ترکیب موجب افزایش ۷۸۵٪ ظرفیت باربری و کاهش ٦۰٪ نشست خاک بررسی شد. در راستای این پژوهش، روش به‌سازی پیشنهادی جای‌گزینی مناسب برای روش‌های سنتی نظیر اجرای شمع بتنی مسلح، سیستم میکروپایل، جت گروتینگ و غیره در بناهای فرسوده است که علاوه بر افزایش سهولت اجرا و سرعت عملیات اجرایی، به‌میزان چشم‌گیری با کاهش هزینه‌های اجرا همراه است.

واژه‌های کلیدی: به‌سازی خاک، هیبرید نانوذرات، ظرفیت باربری، نانورس، نانوسیلیکا

مقدمه

امروزه با توجه به افزایش روزافزون ساخت و ساز، استفاده از روش‌های به‌سازی به‌منظور بهبود پروفیل خاک‌های مسئله‌دار به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است و پیش‌بینی می‌شود

*نویسنده مسئول ghareh_soheil@pnu.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.5.9]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.703]

برای دست‌یابی به راه حل‌های مقرون به‌صرفه و کاهش مصالح استفاده شده، به‌سازی زمین در آینده از اهمیت حیاتی برخوردار شود [۱]، [۲]، [۳]. به‌سازی خاک با افزایش مقاومت برشی و کنترل خصوصیات انقباضی انبساطی خاک می‌تواند موجب افزایش ظرفیت باربری بستر و تقویت روسازی و فونداسیون شود [٤]. امروزه با پیشرفت تکنولوژی، استفاده از نانوذرات در پژوهش‌های مهندسی مورد علاقه محققان در سراسر جهان قرار گرفته است و برای بهبود خواص ژئوتکنیکی از آن استفاده می‌شود [۵]، [٦]، [۷]، [۸]. نانوذرات به‌دلیل زیاد بودن سطح ویژه و بارهای سطحی، حتی در مقادیر کم تأثیر فوق‌العاده‌ای بر خواص شیمیایی، فیزیکی و مهندسی خاک از جمله نفوذپذیری و خواص مقاومتی برجای می‌گذارند [۵]. طی سال‌های اخیر، نانوذرات مختلف از جمله نانورس، نانوسیلیکا، نانولوله‌های کربنی، نانوذرات فلزی و اکسید فلزی مانند Tio_2، Al_2O_3 به‌منظور کاربردهای مهندسی و به‌سازی خاک به‌کار گرفته شده است. نانورس که اساساً از لایه‌های به‌هم چسبیده سیلیکات تشکیل شده است، به‌طور گسترده به‌عنوان یک افزودنی مقرون به‌صرفه برای تقویت خواص مکانیکی، حرارتی و جداکننده در سیستم‌های پلیمری پیشنهاد شده که با توجه به زیاد بودن سطح ویژه، منجر به افزایش آب در سطح بیرونی نانوذرات می‌شود [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]. تاکنون بررسی‌های متعددی روی تأثیر افزودن نانورس بر خواص مهندسی خاک‌ها انجام شده است. عباسی و همکاران، با بررسی تأثیر نانورس بر پتانسیل پراکندگی دو نوع خاک رسی با پلاستیسیته کم و پلاستیسیته زیاد به این نتایج دست یافتند که افزودن نانورس به خاک‌های پراکنده رسی، می‌تواند به‌میزان چشم‌گیری میزان پراکندگی آن‌ها را کاهش دهد [٦]. طبرسا و همکاران نمونه‌های مختلف خاک در منطقه شبکه سد بوستان گنبد و اینچه برون واقع در استان گلستان را تحت تأثیر به‌سازی در نسبت‌های متفاوت (۰/۲، ۰/۵، ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی) بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها حاکی از نقش بسیار مهم نانورس بر خواص خمیری، مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری و افزایش شاخص خمیری، درصد رطوبت بهینه، مقاومت فشاری، چسبندگی و مقاومت برشی و هم‌چنین کاهش وزن مخصوص حداکثر، رفتار پراکندگی و فروریزشی و نیز کاهش بسیار محسوس پتانسیل رمبندگی نمونه‌ها است [۷]. کنعانی‌زاده و خوش نیت استفاده از نانورس را برای ممانعت از نفوذ شیرابه‌های زباله به داخل خاک در سه حالت خنثی، اسیدی و قلیایی بررسی کردند. نتایج آزمایش‌های انجام شده بیان‌گر کاهش

نفوذپذیری در حالت خنثی از ۳×۱۰^{-۹} به $۷/۷٤ \times ۱۰^{-۱۱}$ سانتی‌متر بر ثانیه، در حالت اسیدی از $۳/٦٦ \times ۱۰^{-۹}$ به $۷/۹ \times ۱۰^{-۱۰}$ سانتی‌متر بر ثانیه و برای حالت بازی از $۳/۲۵ \times ۱۰^{-۹}$ به $۵/۲٤ \times ۱۰^{-۱۰}$ سانتی‌متر بر ثانیه بود [۸].

قاضی و همکاران، مقاومت فشاری خاک رس عمل‌آوری شده با استفاده از نانورس را ارزیابی کردند. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان‌دهندهٔ افزایش مقاومت فشاری خاک تا ۳٤ درصد، کاهش شکل‌پذیری و افزایش سختی خاک با افزودن ۸ درصد وزنی این نانو ماده به خاک بود [۹]. در پژوهش‌های دیگری بهاری و همکاران تأثیر افزودن نانورس با نسبت‌های وزنی ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد را در بهبود خواص فیزیکی خاک‌های سیلتی بررسی کردند. نتایج پژوهش‌های آنها بیان‌گر افزایش حد خمیری، حد روانی، زاویهٔ اصطکاک داخلی، چسبندگی، مقاومت و هم‌چنین کاهش فرسایش بستر و انتقال مواد قرضه در نمونه‌های به‌سازی شده با نانورس است [۱۰]. ویژگی‌های مقاومتی لای به‌سازی شده با نانورس به‌وسیلهٔ نیکوکار و همکاران بررسی شد. نتایج حاکی از افزایش مقاومت به‌وسیلهٔ نانورس در خاک بررسی شده در نتیجهٔ کاهش تخلخل و بهبود ظرفیت باربری ذرات خاک است. به عبارتی، نانورس به‌عنوان پرکننده حفرات بین ذرات، با ایجاد میکرو ساختار در خاک موجب افزایش مقاومت می‌شود [۱۱]. بررسی تأثیر افزودن نانورس در نسبت‌های وزنی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد بر میزان نشست‌پذیری خاک‌های فروریزشی به‌وسیلهٔ فاضلی و تیم تحقیقاتی‌اش انجام شد. نتایج بیان‌گر کاهش نشست‌پذیری خاک با افزایش میزان نانورس در خاک است [۱۲].

حسینی و طبرسا تأثیر کاربرد ذرات نانورس در ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزنی بر خاک رسی مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن (۰/۳، ۰/٦ و ۰/۹ درصد وزنی) بررسی کردند. تحقیقات انجام شده حاکی از بهبود خصوصیات و رفتار خاک مسلح شده در مقایسه با کاربرد الیاف استفاده شده به تنهایی است. نتایج این پژوهش بیان‌گر تأثیر نانورس بر افزایش درصد رطوبت بهینه، زاویهٔ اصطکاک داخلی و مقاومت فشاری و هم‌چنین کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر خاک مسلح شده با الیاف است [۱۳]. ایران‌پور و حداد تأثیر چهار نانو ذره رس، مس، آلومینا و سیلیکا را در ٤ نسبت وزنی (۰/۱، ۰/۲، ۰/٤ و ۰/٦) درصد بر روی خاک‌های فروریزشی با استفاده از آزمایش تحکیم مضاعف بررسی کردند. نتایج

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.5.9]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.703]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.5.9]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.703]

آزمایش‌ها نشان می‌دهد افزودن مقادیر اندک تا درصد بهینه تأثیر مطلوبی بر خاک داشته اما با افزودن مقادیری بیش از این نسبت، پارامترهای مقاومتی خاک کاهش می‌یابد [١٤]. بازیار و همکارانش خواص پلاستیسیته خاک‌های رسی را با افزودن نانورس در نسبت‌های وزنی ۱، ۲، ٤ و ۸ درصد بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها حاکی از افزایش حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری خاک با افزایش نانورس در خاک است [۱۵].

نانوذرات سیلیکون دی‌اکسید که با عنوان نانوذرات سیلیکا و یا نانوسیلیکا نیز شناخته می‌شود از دیگر مواد افزودنی به‌منظور به‌سازی خاک است. این نانوذره موجب ایجاد تغییرات فیزیکی نظیر بهبود چگالی خاک با پر کردن حفرات آن می‌شود [۵]. بوترون و همکاران تأثیر نانوذرات سیلیس را با انجام آزمایش‌های تحکیم یک‌بعدی، سه‌محوری و مقاومت فشاری بررسی کردند. آزمایش‌های انجام شده حاکی از افزایش مقاومت خاک، کاهش نفوذپذیری و تغییر حالت خاک از شکل‌پذیری به الاستوپلاستیک است [١٦]. بهمنی و همکاران در پژوهش‌های خود اثرات افزودن این نانوذره را در نسبت‌های وزنی ۰/۲، ۰/٤، ۰/۸ و ۱ درصد بر حدود اتربرگ، هدایت هیدرولیکی و مقاومت فشاری خاک سیمانته شده بررسی کردند. نتایج بیان‌گر کاهش شاخص خمیری، افزایش مقاومت فشاری و هدایت هیدرولیکی خاک است به‌طوری‌که افزودن ۰/٤ درصد نانوسیلیکا موجب افزایش مقاومت فشاری تا ۸۰ درصد شده است [۱۷]. چنگیزی و حداد اثر افزودن نانوسیلیکا را در نسبت‌های وزنی ۰/۵، ۰/۷ و ۱ درصد بر خصوصیات خاک‌های رسی از جمله حدود اتربرگ، مقاومت برشی، مقاومت فشاری محصور نشده و وزن مخصوص خشک حداکثر بررسی کردند و نتایج تحقیقات نشان می‌دهد افزایش مقادیر نانوسیلیکا باعث افزایش حدود اتربرگ، زاویهٔ اصطکاک داخلی، چسبندگی، مقاومت فشاری محصور نشده و حداکثر وزن مخصوص خاک و کاهش شاخص پلاستیسیته و میزان نشست‌پذیری خاک می‌شود [۱۸].

محدودهٔ بررسی شده

شهر مشهد به‌عنوان یکی از مهم‌ترین کلان شهرهای کشور روی نهشته‌های آبرفتی جوان واقع شده و نواحی وسیعی از آن به‌ویژه محدوده‌های مجاور حرم مطهر رضوی، بر رسوبات ریزدانه سیلتی- رسی بنا شده است. هم‌چنین در قسمت‌هایی از بستر شهر که بافت غالب

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.5.9]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.703]

خاک درشت‌دانه است، رسوبات ریزدانه به‌صورت لنزهای بین لایه‌ای مشاهده می‌شوند [۱۹]. حافظی مقدس و قزی در سال ۱۳۸٦، نقشهٔ پهنه‌بندی توان ظرفیت باربری مجاز پی را در شهر مشهد بر اساس اطلاعات ۲۰۰ گمانه و با توجه به نتایج آزمایش‌های برش مستقیم، سه محوری و نفوذ استاندارد تهیه کردند. بر اساس این نقشه، در شهر مشهد به طرف شرق همراه با ریزدانه شدن خاک از ظرفیت باربری کاسته شده به‌طوری‌که برای پی سطحی با عرض و عمق ۱ متر بخش مرکزی و شرقی شهر در گروه خاک‌های با ظرفیت باربری کم و خیلی کم قرار دارد [۲۰]. به‌همین منظور با توجه به خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های محدودهٔ حرم مطهر رضوی و هم‌چنین ضرورت ساخت سازه‌های بلندمرتبه نظیر هتل‌ها و مجتمع‌های تجاری و نیاز به مقاوم سازی خاک بناهای فرسوده اطراف حرم مطهر رضوی و با توجه به مشکلات روش‌های سنتی مانند استفاده از سیمان و آهک، ضرورت به‌کارگیری روش‌های نوین که علاوه بر بهبود خواص مقاومتی خاک و کاهش آلودگی‌های زیست محیطی، از نظر اجرایی آسان باشد، احساس می‌شود.

فناوری نانو، یکی از فناوری‌های نوین به‌سازی خاک در حوزهٔ مهندسی ژئوتکنیک است و تاکنون تحقیقات انجام شده در زمینهٔ به‌سازی خاک با استفاده از نانوذرات، به‌صورت مجزا و یا با ترکیب با افزودنی‌هایی مانند سیمان و آهک انجام شده است و تأثیر هم‌افزایی نانوذرات رس و سیلیکا با یک‌دیگر بررسی نشده است. بنابراین با توجه به‌کاربرد منحصربفرد هریک از این نانوذرات، هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر نانوذرات رس و سیلیکا بر یک‌دیگر و دست‌یابی به ترکیب بهینه آن‌ها به‌عنوان جای‌گزین مناسبی برای مصالح سنتی در خاک‌های ضعیف و مسئله‌دار است، به‌طوری‌که نه تنها از نظر مقاومتی، ظرفیت باربری خاک را افزایش دهد بلکه از نظر افزایش سرعت عملیات اجرایی و هم‌چنین کاهش هزینه‌های اجرا نیز مؤثر باشد.

به‌همین منظور در این پژوهش ابتدا نقش هر یک از این نانوذرات به‌صورت مستقل طی آزمایش‌های مکانیک خاک، از جمله حدود اتربرگ، مقاومت فشاری محصور نشده و برش مستقیم بررسی و با توجه به مقادیر بهینه، هیبرید نانوذرات با ترکیبات متفاوت تهیه و سپس به‌طور مجزا آزمایش‌های مقاومتی خاک روی آنها انجام شد و در نهایت ترکیب بهینه نانوذرات در ساخت هیبرید برای به‌سازی نمونه خاک بررسی شده تعیین شد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.5.9]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.703]

مواد و روش‌ها

۱. خاک بررسی شده

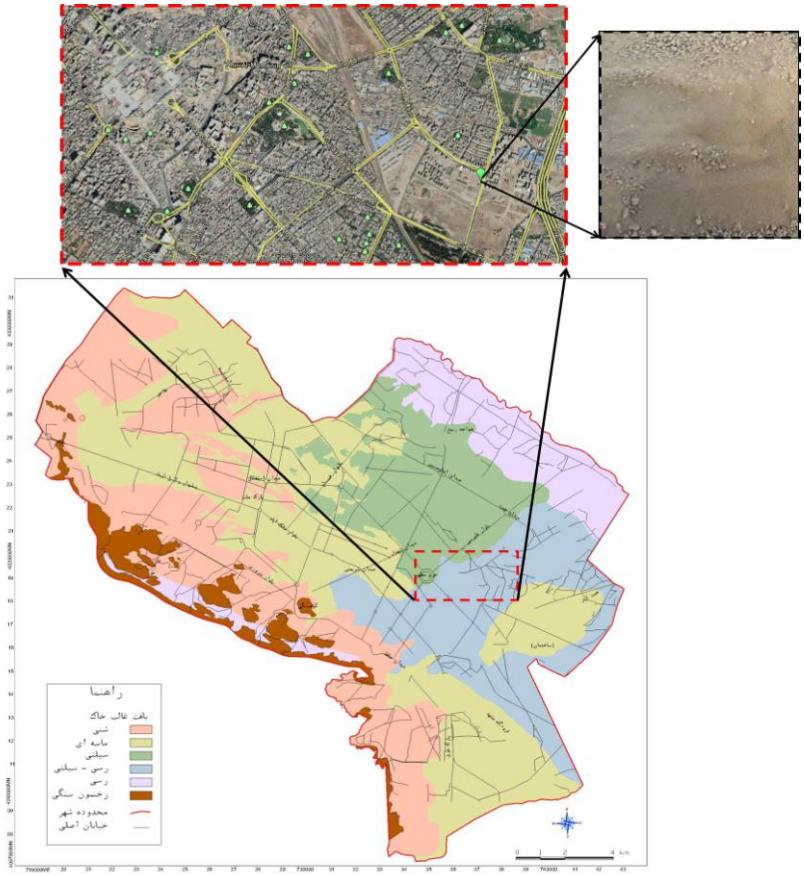
چنان‌که بیان شد خاک اطراف حرم مطهر رضوی در مشهد از نـوع ریزدانـه و بـا ظرفیـت باربری کم است که با توجه به وجود ساختمان‌های بافت فرسوده اطراف حرم مطهـر رضـوی و بروز نشست‌های نامتقارن در برخی موارد، خاک استفاده شده در بررسی‌های آزمایشـگاهی این پژوهش، از این محدوده انتخاب شد.

به‌همین منظور در این پژوهش خصوصیات مکانیکی و مقاومتی این خاک به‌صورت خالص و هم‌چنین به‌سازی شده با نانورس، نانوسیلیکا و هیبرید آن‌ها بررسی شده است. نوع خاک با استفاده از نتایج آزمایش‌های الک و هیدرومتری، سیلتی- رسی همراه با ماسه تعیین شد. در شکل ۱ تصویر خاک عبوری از الک شمارهٔ ٤ و موقعیت برداشت آن در شهر مشهد و در شکل ۲ منحنی دانه‌بندی این خاک نشان داده شده است. برای تعیین ساختار شیمیایی و نوع کانی‌های رسی تشکیل دهنده خاک معمولاً از آزمایش تفرق اشعهٔ ایکس استفاده می‌شود، که به‌همین منظور این آزمایش با دقت بسیار زیاد بر نمونه خاک خالص انجام شد. نتایج حاصل از آزمایش XRD نمایان‌گر درصد بالای کانی‌های گروه کوارتز، کلسیت و دولومیت است که فاز اصلی خاک را تشکیل می‌دهد. هم‌چنین به‌منظور تعیین پارامترهای مقاومتی خاک تمامی آزمایش‌های استاندارد مورد نیاز مکانیک خاک انجام و نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است

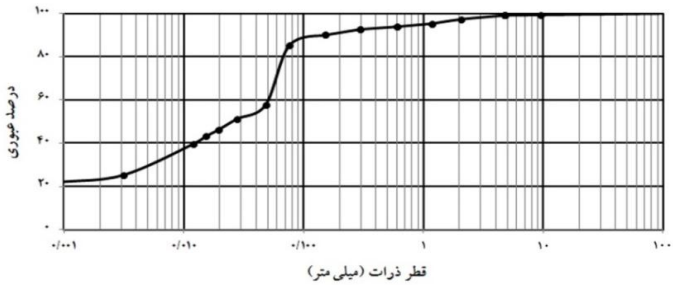
نانوذرات

نانورس استفاده شده در این پژوهش از نوع مونت موریلونیت K10 و به‌صورت پـودری و همچنین نانوسیلیکا به‌صورت پودری و با خلوص ۹۹٪ تهیه شده است. در شکل ۳ تصاویر نانورس و نانوسیلیکا استفاده شده و در جداول ۲ تا ۵ مشخصات شیمیایی و فیزیکی آنها کـه از شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان اخذ شده، آورده شده است

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.5.9]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.703]



شکل ۱. محدودهٔ بررسی شده و نمونه خاک برداشت شده از محدودهٔ مجاور حرم مطهر رضوی در مشهد

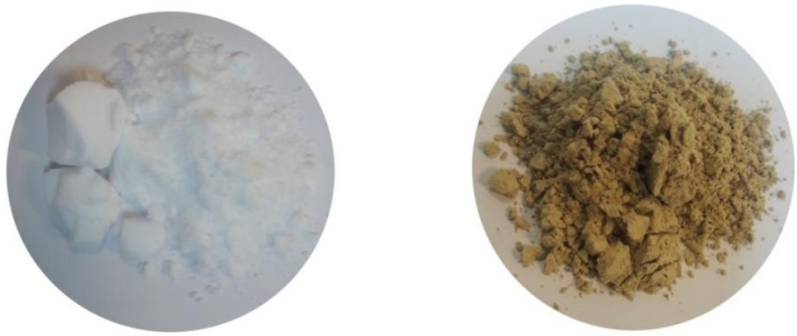


شکل ۲. منحنی **دانه‌بندی خاک بررسی شده**

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.5.9]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.703]

جدول ۱. مشخصات مکانیکی خاک بررسی شده

خصوصیات	مقدار	واحد	استاندارد
چگالی دانه‌های خاک	۲/٦٤	-	ASTM D 854-87
وزن مخصوص خشک حداکثر (□)	۱٦/۹۵	(kN/m^3)	ASTM D 698-78 (standard)
رطوبت بهینه (□)	۱٤	(درصد)	ASTM D 698-78 (standard)
حد خمیری (PL)	۱۸	(درصد)	ASTM D 4318-87
حد روانی (LL)	۲۲/۵	(درصد)	ASTM D 4318-87
شاخص خمیری (PI)	۵	(درصد)	ASTM D 4318-87
حداکثر مقاومت فشاری	٤۳	(kPa)	ASTM D 2166-87
زاویه اصطکاک داخلی (Φ) (Degree)	۲۵/۱۵	(درجه)	ASTM D 3080-90
چسبندگی (C)	۰/۲۵	(kg/cm^2)	ASTM D 3080-90
شن	۳	(درصد)	ASTM D 422-87
ماسه	۱۲	(درصد)	ASTM D 422-87
سیلت و رس	۸۵	(درصد)	ASTM D 421-58
نوع خاک	CL-ML	-	USCS



الف ب

شکل ۳. تصاویر مربوط به نانوذرات استفاده شده، الف) نانورس ب) نانوسیلیکا

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.5.9]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.703]

جدول ۲. مشخصات شیمیایی نانورس

عنصر	LOI	Fe_2O_3	TiO_2	Cao	K_2O	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Na_2O
درصد	۱۵/٤۵	۵/٦۲	۰/٦۲	۱/۹۷	۰/۸٦	۵۰/۹۵	۱۹/٦	۳/۲۹	۰/۹۸

جدول ۳. مشخصات شیمیایی نانوسیلیکا

عنصر	Fe	Na	Ca	Ti	SiO_2
مقدار	۲۰ < ppm	۵۰ < ppm	۷۰ < ppm	۱۲۰ < ppm	٪۹۹>

جدول ٤. مشخصات فیزیکی نانورس

نوع کانی	چگالی (gr/cm^3)	PH	رطوبت (٪)	رنگ
مونت مریلونیت	۰/۵–۰/۷	۲/۵–۳/۵	۱–۲	زرد
اندازه ذرات (nm)	فاصله بین ذرات (A°)	ضریب تبادل یونی (meg/100 gr)	هدایت الکتریکی (MV)	مساحت ویژه (m^2/gr)
۱–۲	٦۰	٤۸	–۲۵	۲۲۰–۲۷۰

جدول ۵. مشخصات فیزیکی نانوسیلیکا

مساحت ویژه (m^2/gr)	اندازه ذرات (nm)	چگالی (gr/cm^3)	چگالی واقعی (gr/cm^3)	رنگ
۲۰۰	۱۱–۱۳	۰/۱۰<	۲/٤	سفید

بررسی‌های آزمایشگاهی

آزمایش‌های آزمایشگاهی روشی برای تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک و پیش‌بینی رفتار آن در شرایط متفاوت است. در این پژوهش ابتدا تأثیر افزودن هریک از نانوذرات به‌صورت مستقل بر خواص مکانیکی خاک بررسی شده با نسبت‌های وزنی (درصد) متفاوت از نانورس (۰/۱، ۰/۵، ۱، ۲/۵ و ۵) و نانوسیلیکا (۰/۱۵، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱) با استفاده از آزمایش‌های مختلف بررسی شد. درصدهای نسبت وزنی با توجه به پژوهش‌ها و بررسی‌های انجام شده به‌وسیلهٔ سایر محققان به‌گونه‌ای انتخاب شد تا علاوه بر دست‌یابی به نتیجهٔ مطلوب، از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه باشد و بتوان از این مقادیر برای کاربردهای صنعتی نیز بهره گرفت. لازم به ذکر است درصدهای نسبت وزنی در مصالح

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.5.9]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.703]

نانو در آزمایش‌های مقدماتی انتخاب و تدقیق شد و سپس بر اساس آن‌ها آزمایش‌های تکمیلی انجام شد.

پس از تعیین نسبت بهینه هریک از نانوذرات، ٤ طرح اختلاط برای دست‌یابی به ترکیب بهینه این هیبرید تهیه و آزمایش‌های مقاومتی و مکانیکی روی مخلوط خاک و هیبرید نانوذرات انجام شد. این آزمایش‌ها شامل آزمایش تراکم استاندارد، حدود اتربرگ، مقاومت فشاری محصور نشده و برش مستقیم است، که روی نمونه‌های خالص و به‌سازی شده با نانورس و نانوسیلیکا و هیبرید نانوذرات و بر اساس استانداردهای ASTM انجام شد. در جدول ٦، آزمایش‌های انجام شده بر تمام نمونه‌های خاک خالص و به‌سازی شده، آورده شده است.

یکی از مهم‌ترین مسائل در انجام بررسی‌های آزمایشگاهی، نحوهٔ ساخت نمونه‌ها و تعیین نسبت ترکیب خاک با افزودنی‌ها، به‌منظور شبیه‌سازی هرچه دقیق‌تر عملیات اجرایی است. در این پژوهش به‌منظور تهیهٔ نمونه‌های آزمایشگاهی، خاک خالص و نانوذرهٔ مورد نظر در نسبت‌های وزنی معین به‌صورت خشک با یک‌دیگر ترکیب و سپس رطوبت بهینه لازم که از آزمایش تراکم به‌دست آمده است، با کمک اسپری مخصوصی به آن اضافه شد. لازم به ذکر است با توجه به کلوئیدی بودن نانوذرات استفاده شده در این پژوهش، امکان اختلاط مستقیم آب و نانوذرات و سپس افزودن آن‌ها با استفاده از اسپری به خاک وجود ندارد. به‌علاوه به‌دلیل تغییر خواص مکانیکی و فیزیکی خاک در صورت استفاده از هم‌زن‌های برقی، در این پژوهش خاک و نانوذرات به‌صورت دستی با یک‌دیگر مخلوط شدند.

بر اساس تحقیقات انجام شده، به‌منظور جلوگیری از کلوخه شدن و تجمع ذرات نانو و هم‌چنین اطمینان از پخش همگن رطوبت در نمونه‌های آزمایشگاهی، بسته به نوع خاک باید چند ساعت نمونه‌ها درون محفظه‌ای بسته نگه‌داری شوند که حداقل زمان توقف در جدول ۷ آورده شده است [۲۱] و با توجه به خاک بررسی شده در این محدوده نمونه‌های آماده‌سازی شده در محفظه‌هایی در دمای ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد و به مدت ۲٤ ساعت تحت عمل‌آوری قرار گرفتند. به‌منظور افزایش دقت در نتایج، برای هر نسبت وزنی دو نمونه مشابه تهیه و آزمایش‌ها تکرار شد که نتایج آزمایش مجدد نشان‌دهندهٔ صحت آزمایش‌ها است. لازم

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.5.9]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.703]

به ذکر است در مواردی که دو نمونه مشابه نتایج متفاوتی داشتند، تکرارپذیری تا رسیدن به صحت بررسی‌های آزمایشگاهی انجام شد. هم‌چنین برای اطمینان از نحوهٔ قرارگیری نانوذرات در خاک، بررسی‌های آزمایشگاهی میکروسکوپ الکترونی روی نمونه‌های خاک خالص و به‌سازی شده با نسبت‌های بهینه انجام شد

جدول ٦. آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌های خاک خالص و به‌سازی شده

نوع آزمایش / خاک بهسازی شده		تراکم استاندارد	مقاومت فشاری محصورنشده	برش مستقیم	حدود اتربرگ	میکروسکوپ الکترونی	تفرق اشعه ایکس
نانو ذرات	نسبت وزنی (درصد)						
نانورس	۰	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	۰/۱		✓	✓	✓		
	۰/۵		✓	✓	✓		
	۱		✓	✓	✓		
	۲/۵		✓	✓	✓	✓	
	۵		✓	✓	✓	✓	
نانوسیلیکا	۰/۱		✓	✓	✓		
	۰/۲۵		✓	✓	✓	✓	
	۰/۵		✓	✓	✓		
	۰/۷۵		✓	✓	✓		
	۱		✓	✓	✓	✓	
هیبرید	۵٪ نانورس + ۰/۲۵٪ نانوسیلیکا		✓	✓	✓		
	۵٪ نانورس + ۱٪ نانوسیلیکا		✓	✓	✓	✓	
	۲/۵٪ نانورس + ۰/۲۵٪ نانوسیلیکا		✓	✓	✓		
	۲/۵٪ نانورس + ۱٪ نانوسیلیکا		✓	✓	✓		

جدول ۷. روش آماده‌سازی خشک- زمان توقف [۲۱]

حداقل زمان توقف (ساعت)	رده‌بندی خاک بر اساس استاندارد ASTM D2487
نیازی نیست	SP, SW, GP, GW
۳	SM, GM
۱۸	SC, GC, OL, CL, ML
۳٦	PT, OH, CH, MH

بحث و نتایج

تأثیر نانوذرات بر حدود اتربرگ

به‌منظور بررسی تأثیر نانورس و نانوسیلیکا بر خواص پلاستیسیته خاک، آزمایش حدود اتربرگ روی نمونه‌های خاک قبل و بعد از به‌سازی، بر اساس استاندارد ASTM – 4318-87 انجام شد. نتایج این آزمایش بر خاک خالص و خاک به‌سازی شده با نانورس و نانوسیلیکا با نسبت‌های وزنی متفاوت در شکل ٤ ارائه شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود افزایش نانورس تا ۵ درصد وزنی خاک، موجب افزایش حد روانی، حد خمیری و هم‌چنین شاخص خمیری خاک می‌شود. با توجه به زیاد بودن سطح ویژهٔ نانورس به‌دلیل ابعاد بسیار کوچک آن، با افزودن این ماده به خاک، سطح تماس ذرات خاک بیش‌تر شده و به سبب نزدیک شدن به شرایط فولوکوله، جذب آب به‌وسیلهٔ ذرات خاک بیش‌تر و در نتیجه حدود اتربرگ خاک افزایش می‌یابد. هم‌چنین برای نمونه‌های به‌سازی شده با نانوسیلیکا با افزایش این نسبت وزنی، حد روانی و حد خمیری خاک افزایش یافته اما در عین حال به‌دلیل افزایش بیش‌تر حد خمیری در مقایسه با حد روانی، شاخص خمیری خاک کاهش می‌یابد.

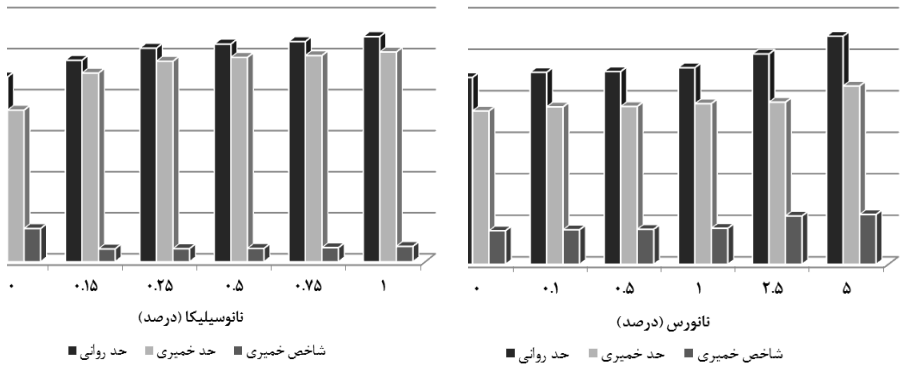
نتایج به‌دست آمده از این پژوهش با پژوهش‌های بهاری و همکاران، بازیار و همکاران، طبرسا و همکاران، بهمنی و همکاران و چنگیزی و حداد مقایسه شد و چنان‌که در این پژوهش افزودن نانورس موجب افزایش حدود روانی و خمیری و نیز شاخص خمیری می‌شود، پژوهش‌های بهاری و همکاران و بازیار و همکاران و طبرسا و همکاران نیز مؤید این نتایج است. هم‌چنین افزایش حدود روانی و خمیری و کاهش شاخص خمیری خاک

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.5.9]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.703]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.5.9]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.703]

پس از افزودن نانو سیلیکا در پژوهش‌های بهمنی و همکاران و چنگیزی و حداد نیز مشـاهده شده است که با نتایج این پژوهش هم‌خوانی دارد [۷]، [۱۰]، [۱۵]، [۱۷]، [۱۸].

به‌منظور تعیین تغییرات تورم‌پذیری در خاک با افزایش عناصر تسلیح، نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی بر اساس مقادیر ارائه شده در جدول ۸ ارزیابی شد. با توجه به شاخص خمیری و حد روانی نمونه‌ها و بر اساس استاندارد ارائه شده، خاک بررسی شده در این پژوهش دارای درجه تورم کم بوده و افزودنی‌های بررسی شده در این پژوهش نیز تأثیری بر افزایش تورم خاک ندارند.



شکل ۴. تأثیر نانورس و نانوسیلیکا بر حدود اتربرگ

جدول ۸. ارزیابی پتانسیل تورم‌پذیری خاک‌ها بر اساس شاخص خمیری [۲۲]

درجه تورم (کیفی)	حد روانی	شاخص خمیری
کم	<۳۰	۰– ۱۵
متوسط	۳۰–۴۰	۱۰– ۳۵
زیاد	۴۰–۶۰	۲۰– ۵۵
خیلی زیاد	۶۰<	۳۵ <

تأثیر نانوذرات بر مقاومت برشی خاک

یکی از مسائل مهم در بررسی پایداری خاک برای طراحی پی‌ها، دیوارهای حائل، خاکریزها و غیره، وجود اطلاعات کافی درباره پارامترهای مقاومت برشی خاک (زاویهٔ

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.5.9]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.703]

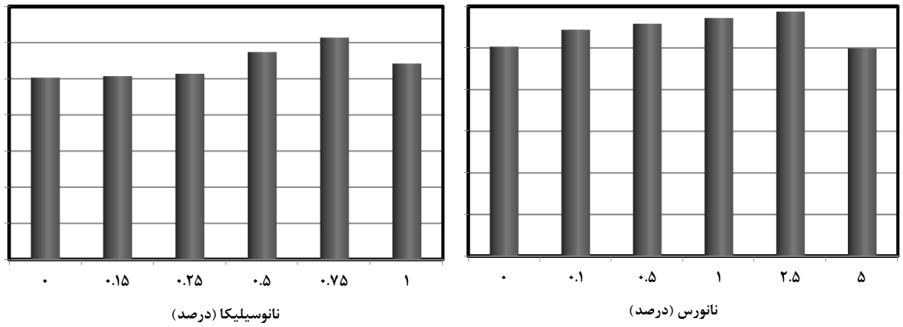
اصطکاک داخلی و چسبندگی) است. بررسی‌ها نشان می‌دهد نانوذرات به استثناء اسمکتیت و هالوسیت به‌دلیل ایجاد پیوند با ذرات خاک و ایجاد سنگ‌دانه‌ای نسبتاً بزرگ‌تر و قوی‌تر موجب افزایش زاویهٔ اصطکاک و چسبندگی می‌شود [۲۳]. در این مرحله آزمایش مقاومت برش مستقیم روی نمونه‌های خاک به‌سازی شده با نانورس و نانوسیلیکا به‌صورت کوچک مقیاس درون قالب مربعی با ابعاد ۲× ٦× ٦ سانتی‌متری با توجه به سربارهای قائم متناظر با بارگذاری اعمال شده قبل از اخذ نمونه‌ها، در حالت تحکیم نیافته زهکشی نشده و با سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه مطابق با استاندارد ASTM-D 3080-90 انجام شد.

در این پژوهش تأثیر وجود نانوذرات بر پارامترهای مقاومت برشی خاک بررسی و مشاهده شده است. به‌طوری‌که زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک در نمونه‌های به‌سازی شده با نانورس و نانوسیلیکا در اکثر نسبت‌های وزنی نسبت به خاک خالص افزایش می‌یابد. حداکثر نسبت افزایش این پارامتر ۲۲ درصد و ۱۷ درصد به‌ترتیب در نمونه‌های به‌سازی شده با ۰/۷۵ درصد نانوسیلیکا و ۲/۵ درصد نانورس است (شکل ۵).

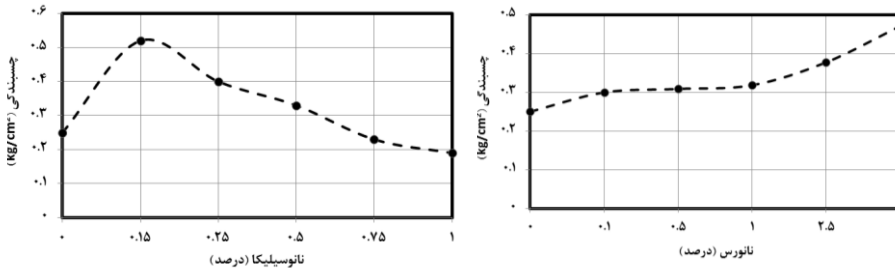
از دیگر پارامترهای مؤثر بر مقاومت برشی خاک میزان چسبندگی آن است. مقایسهٔ نتایج آزمایش برش مستقیم خاک خالص با خاک به‌سازی شده با نانورس نشان می‌دهد در تمام نمونه‌های به‌سازی شده با نانورس میزان چسبندگی روند صعودی داشته است و در نمونه به‌سازی شده با ۵ درصد نانورس، نسبت به خاک خالص ۸٤ درصد افزایش چسبندگی حاصل شده است. با این حال در نمونه‌های به‌سازی شده با نانوسیلیکا پارامتر چسبندگی در نسبت‌های کم به‌سرعت افزایش و سپس کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که در نمونه‌های به‌سازی شده با ۰/۱۵ وزنی نانوسیلیکا نسبت به خاک خالص ۱۰۸ درصد افزایش نشان می‌دهند و پس از آن با افزایش نانوسیلیکا این پارامتر کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که در نمونه‌های به‌سازی شده با ۰/۷۵ و ۱ درصد وزنی حتی نسبت به خاک خالص نیز کم‌تر می‌شود (شکل ٦). قدرت زیاد جذب آب ذرات نانوسیلیکا و کاهش مقدار آب مورد نیاز ذرات خاک در نمونه‌های به‌سازی شده با نسبت‌های وزنی بیش‌تر این نانوذره را می‌توان به‌عنوان عاملی مؤثر در کاهش میزان چسبندگی خاک عنوان کرد. افزایش پارامترهای مقاومت برشی با افزودن نانورس در پژوهش‌های بهاری و همکاران، حسینی و طبرسا و تأثیر افزودن

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.5.9]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.703]

نانوسیلیکا در پژوهش‌های چنگیزی و حداد نیز مشاهده شده است که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد [۱۰]، [۱۳]، [۱۸].



شکل ۵. مقایسه تغییرات زاویهٔ اصطکاک داخلی در خاک‌های به‌سازی شده با نانورس و نانوسیلیکا



شکل ٦. مقایسه تغییرات چسبندگی در خاک‌های به‌سازی شده با نانورس و نانوسیلیکا

تأثیر نانوذرات بر مقاومت فشاری محصور نشده

به‌منظور تعیین مقاومت فشاری خاک به‌سازی شده با نانوذرات، نمونه‌سازی برای انجام آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده مطابق با استاندارد ASTM D 2166-87 و بارگذاری با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام و نمونه‌ها تحت افزایش بارگذاری گسیخته شدند. رفتار تنش- کرنش نمونه‌های خاک به‌سازی شده با درصدهای متفاوت نانورس و نانوسیلیکا تحت آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده، در شکل ۷ بررسی شده است. با توجه به افزایش پیوستگی بین ذرات خاک به‌دلیل نفوذ نانوذرات و افزایش خواص خمیری و کاهش تخلخل خاک، مقاومت فشاری خاک در نمونه‌های به‌سازی شده، افزایش و کرنش در لحظه گسیختگی آن کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که در نمونه‌های به‌سازی شده با ۲/۵ درصد وزنی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.5.9]

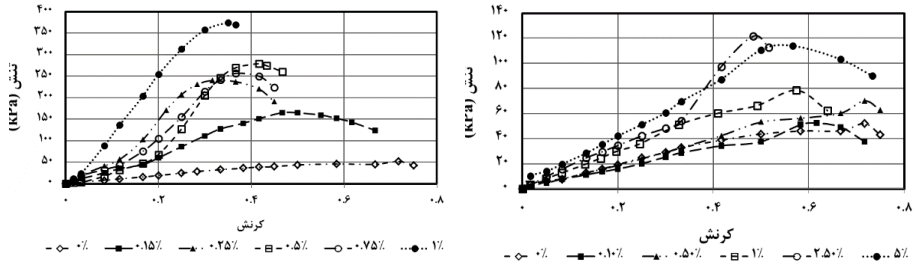
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.703]

نانورس مقاومت فشاری خاک تا ۱۳٤ درصد افزایش و مقادیر کرنش تا ۳۳ درصد کاهش می‌یابد. شایان توجه است افزودن مقادیر بیش از نسبت وزنی بهینه به‌دلیل نحوهٔ پراکنش ذرات نانورس موجب کاهش مقاومت خاک می‌شود، که این پدیده به‌علت افزایش مرزدانه‌ها و سرعت در شکست نمونه در مقادیر زیاد نانوذرات رخ می‌دهد.

نتایج آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده روی نمونه‌های خاک به‌سازی شده با نانوسیلیکا نشان می‌دهد مقاومت فشاری نسبت به خاک خالص به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است، به‌طوری‌که با افزودن نانوسیلیکا تا ۱ درصد وزنی، مقاومت فشاری نمونه‌ها ٦۲۰ درصد افزایش داشته است. هم‌چنین افزودن این مقدار نانوسیلیکا موجب کاهش مقادیر کرنش به میزان ۵۱ درصد شده است.

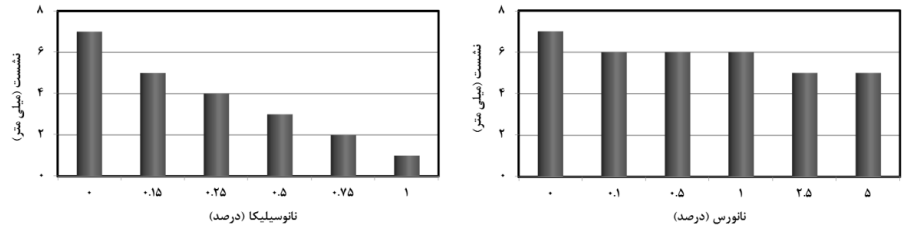
بررسی تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده در پژوهش‌های سایر محققان از جمله نیکوکار و همکاران، حسینی و طبرسا، بوترون و همکاران، بهمنی و همکاران و چنگیزی و حداد نشان می‌دهد مشابه با نتایج این پژوهش، افزودن نانوذرات رس و سیلیکا به خاک موجب افزایش مقاومت فشاری محصور نشده می‌شود [۱۰]، [۱۲]، [۱۵]، [۱٦]، [۱۷]. با توجه به اهمیت نشست‌های نامتقارن در دوران بهره‌برداری، بر اساس نتایج آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده و تغییر ارتفاع نمونه‌ها پس از اعمال بار، تأثیر نانوذرات بر نشست‌پذیری خاک بررسی شده، ارزیابی شد که نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی در شکل ۸ ارائه شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود به‌سازی خاک با نانوذرات موجب کاهش نشست‌پذیری خاک بررسی شده است، به‌طوری‌که میزان نشست‌پذیری خاک در نمونه‌های به‌سازی شده با ۱ درصد وزنی نانوسیلیکا و ۲/۵ و ۵ درصد نانورس به‌ترتیب با ۸٦ درصد و ۲۹ درصد کاهش همراه بوده است، که این نتایج با تحقیقات سایر پژوهش‌گران از جمله فاضلی و همکارانش روی خاک‌های فروریزشی نیز هم‌خوانی دارد [۱۲].

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.5.9]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.703]



ب الف

شکل ۷. تأثیر مقادیر مختلف نانوذرات بر مقاومت فشاری محصورنشده خاک به‌سازی شده با الف) نانورس ب) نانوسیلیکا



ب الف

شکل ۸. تأثیر مقادیر مختلف نانوذرات بر تغییرات نشست‌پذیری خاک به‌سازی شده با الف) نانورس ب) نانوسیلیکا

ساخت هیبرید

در این پژوهش، بر اساس نتایج آزمایش‌های مقاومت برشی و فشاری، ٤ نسبت وزنی ۲/۵ و ۵ درصد نانورس و ۰/۲۵ و ۱ درصد نانوسیلیکا به‌عنوان نسبت‌های بهینه تعیین و هیبرید نانوذرات در ٤ ترکیب متفاوت ساخته شد (جدول ۹). سپس خاک بررسی شده در این پژوهش با استفاده از هیبریدهای ساخته شده، به‌سازی و نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ، مقاومت برشی و مقاومت فشاری بر آنها بررسی شد.

جدول ۹. هیبریدهای ساخته شده با درصدهای متفاوت نانوذرات

نام هیبرید	ترکیب نانوذرات
5NC + 0.25NS	۵ درصد نانورس + ۰/۲۵ درصد نانوسیلیکا
5NC + 1NS	۵ درصد نانورس + ۱ درصد نانوسیلیکا
2.5NC + 0.25NS	۲/۵ درصد نانورس + ۰/۲۵ درصد نانوسیلیکا
2.5NC + 1NS	۲/۵ درصد نانورس + ۱ درصد نانوسیلیکا

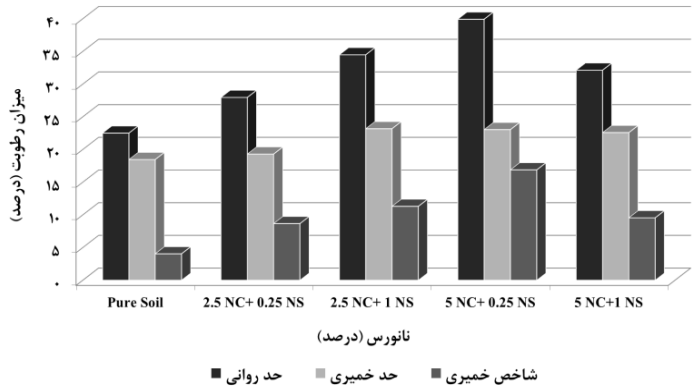
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.5.9]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.703]

تأثیر هیبرید نانوذرات بر حدود اتربرگ خاک

نتایج آزمایش حدود اتربرگ بر خاک به‌سازی شده با هیبرید نانوذرات رس و سیلیکا در شکل ۹ نمایش داده شده است. با توجه به نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی این پژوهش و مقایسه با شاخص تورم (جدول ۳)، به استثناء ترکیب ۵ درصد نانورس و ۰/۲۵ درصد نانوسیلیکا، در سایر موارد میزان تورم‌پذیری خاک تغییر چندانی نمی‌یابد و خاک از نظر تورم‌پذیری در گروه خاک‌های با تورم کم تا متوسط قرار می‌گیرد. از این‌رو، با توجه به این خصوصیات، ترکیب ۵ درصد نانورس و ۱ درصد نانوسیلیکا و هم‌چنین ۲/۵ درصد نانورس و ۰/۲۵ درصد نانوسیلیکا به‌عنوان ترکیب بهینه نانوذرات پیشنهاد می‌شود، که با در نظر گرفتن سایر پارامترهای مقاومتی خاک می‌توان ترکیب بهینه را تعیین کرد.

تأثیر هیبرید نانوذرات بر مقاومت برشی

نتایج مربوط به آزمایش برش مستقیم نمونه‌های به‌سازی شده با هیبرید نانوذرات در شکل ۱۰ ارائه شده است. با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده بر نمونه‌های به‌سازی شده با هریک از نانوذرات به‌صورت مجزا، می‌توان تأثیر هم‌زمان این نانوذرات بر خواص یک‌دیگر و هم‌چنین خاک بررسی شده را مشاهده کرد. به‌طوری‌که ترکیب بهینه هیبرید برای



شکل ۹. تأثیر هیبرید نانوذرات برحدود اتربرگ

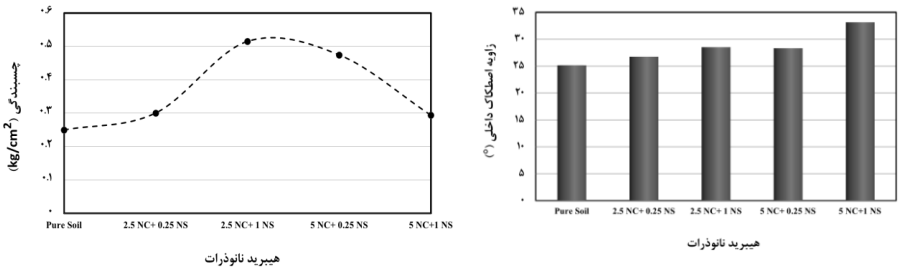
افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک، شامل ۵ درصد نانورس و ۱ درصد نانو سیلیکا این پارامتر را تا ۳۲ درصد افزایش داده است. این درحالی است که زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک به‌سازی شده با ۵ درصد نانورس نسبت به خاک خالص تغییر نیافته و هم‌چنین زاویهٔ

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.5.9]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.703]

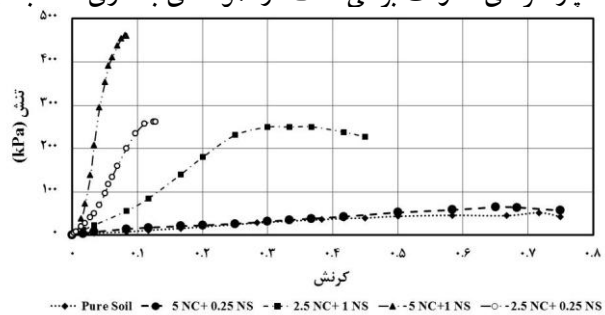
اصطکاک داخلی خاک به‌سازی شده با ۱ درصد نانوسیلیکا ۸ درصد افزایش داشته است. در مورد پارامتر چسبندگی نیز بیش‌ترین افزایش مربوط به‌ترکیب ۲/۵ درصد نانورس و ۱ درصد نانوسیلیکا است که موجب افزایش ۱۰۶ درصدی چسبندگی خاک شده است. درحالی که این پارامتر در خاک به‌سازی شده با ۲/۵ درصد نانورس با ۵۰ درصد افزایش و در خاک به‌سازی شده با ۱ درصد نانوسیلیکا با کاهش ۲٤ درصدی همراه بوده است.

تأثیر هیبرید نانوذرات بر مقاومت فشاری محصور نشده

بررسی ترکیبات متفاوت نانوذرات بیان‌گر افزایش چشم‌گیر مقاومت فشاری به‌میزان ۷۸۵ درصد در نمونه به‌سازی شده با هیبرید متشکل از ۵ درصد نانورس و ۱ درصد نانوسیلیکا است که با کاهش ٦۰ درصدی نشست نیز همراه است (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). لازم به ذکر است مقاومت فشاری در نمونه به‌سازی شده با ۵ درصد نانورس ۱۲۰ درصد و در نمونه به‌سازی شده با ۱ درصد نانوسیلیکا ٦۲۰ درصد نسبت به خاک خالص افزایش یافته است.

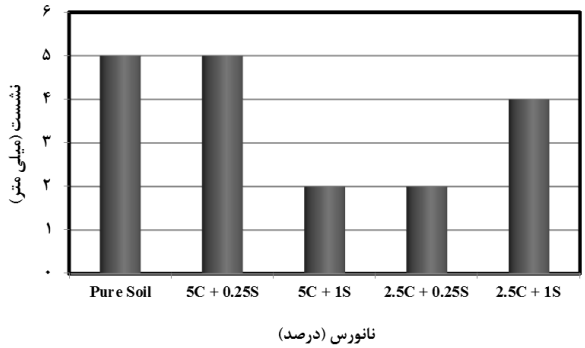


شکل ۱۰. مقایسهٔ پارامترهای مقاومت برشی خاک در نمونه‌های به‌سازی شده با هیبرید نانوذرات



شکل ۱۱. بررسی پارامتر مقاومت فشاری در نمونه‌های به‌سازی شده با مقادیر متفاوت هیبرید نانوذرات

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.5.9]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.703]



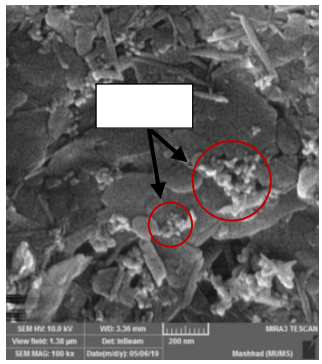
شکل ۱۲. تغییرات نشست‌پذیری خاک در نمونه‌های به‌سازی شده با مقادیر متفاوت هیبرید نانوذرات

رفتار نانوذرات در میکروسکوپ الکترونی

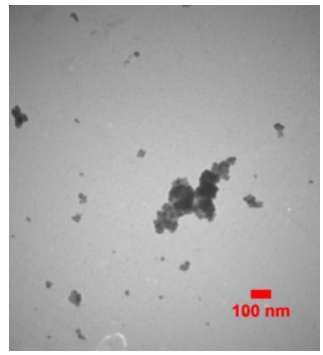
در این پژوهش برای بررسی پراکنش نانوذرات در خاک بررسی شده، خاک در چهار حالت خالص، به‌سازی شده با نسبت‌های بهینه نانورس، نانوسیلیکا و هیبرید نانوذرات با استفاده از میکروسکوپ الکترونی بررسی شد. در شکل ۱۳ الف تصاویر مربوط به میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) ذرات نانوسیلیکا نمایش داده شده است که به‌صورت خوشه‌ای مشاهده می‌شوند و در شکل ۱۳ ب تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) از ذرات نانوسیلیکا و پراکنش این ذرات در خاک نشان داده شده است. مشاهده این تصاویر گویای پراکنش ذرات نانوسیلیکا در خاک است.

در شکل ١٤ الف ب نیز تصاویر مربوط به میکروسکوپ الکترونی نانورس و پراکنش این ذرات در خاک مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است به‌دلیل رسی بودن نوع خاک و هم‌چنین کوچک بودن ابعاد نانورس (۱ تا ۲ نانومتر) مشاهدهٔ ذرات نانورس و تفکیک آنها درون خاک چندان آسان نیست. با این حال نتایج به‌دست آمده از پارامترهای مقاومتی خاک پس از افزودن نانورس و نانوسیلیکا حاکی از حضور و پراکنش مناسب این ذرات درون خاک است. هم‌چنین در شکل ۱۵ الف و ب به‌ترتیب تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه خاک خالص و به‌سازی شده با ترکیب بهینه نانوذرات نمایش داده شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

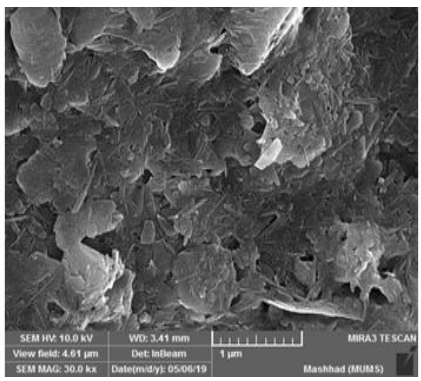


ب

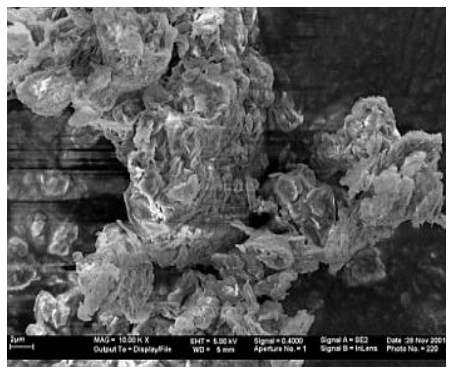


الف

شکل ۱۳ الف) نانوسیلیکا در زیر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) ب) خاک به‌سازی شده با نانوسیلیکا زیر میکروسکوپ الکترونی عبوری (SEM)



ب

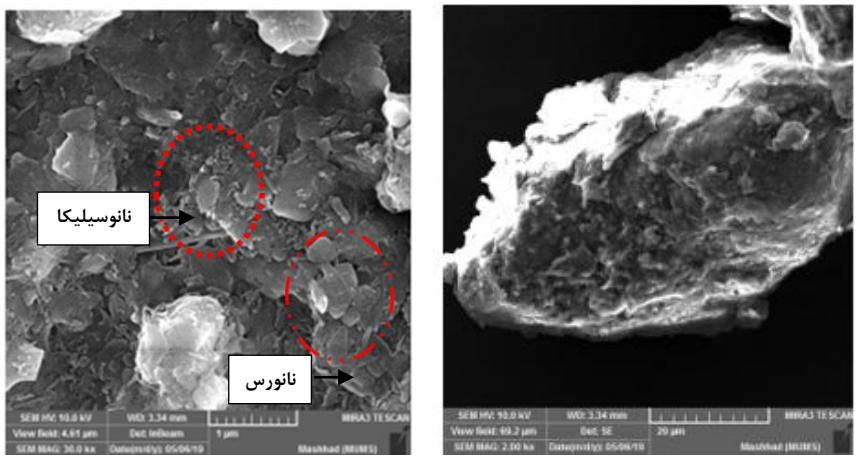


الف

شکل ١٤. الف) نانورس و ب) خاک به‌سازی شده با نانورس زیر میکروسکوپ الکترونی (SEM

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.5.9]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.703]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.5.9]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.703]



ب الف

شکل ۱۵. الف) خاک خالص و ب) خاک به‌سازی شده با هیبرید نانوذرات زیر میکروسکوپ الکترونی (SEM)

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به‌منظور دست‌یابی به ترکیب جدیدی از نانوذرات رس و سیلیکا برای افزایش مقاومت فشاری خاک سیلتی- رسی اطراف حرم مطهر رضوی، بررسی‌های آزمایشگاهی روی ترکیبات متفاوتی از نسبت‌های بهینه نانوذرات رس و سیلیکا انجام شد. نتایج آزمایش‌ها بیان‌گر افزایش واکنش بین دانه‌های خاک با افزودن نانوذرات و تأثیر هم‌افزایی این نانوذرات بر خواص مکانیکی و مقاومتی خاک است.

۱. بررسی نتایج آزمایش حدود اتربرگ در نمونه‌های خاک به‌سازی شده در راستای این پژوهش نشان می‌دهد افزودن نانوذرات رس، سیلیکا و نسبت‌های بهینه هیبرید نانوذرات رس و سیلیکا به‌منظور افزایش پارامترهای مقاومتی خاک، شاخص تورم‌پذیری خاک را تغییری نمی‌دهد.

۲. به‌سازی خاک اطراف حرم مطهر رضوی با استفاده از هیبرید نانوذرات رس و سیلیکا و بررسی نتایج آزمایش‌های مقاومت برشی، بیان‌گر تأثیر هم‌افزایی قابل توجه این نانوذرات بر افزایش پارامترهای مقاومت برشی است. به‌طوری‌که هیبرید نانوذرات

ساخته شده از ۲/۵ درصد نانورس و ۱ درصد نانوسیلیکا موجب افزایش ۱۰۶ درصدی چسبندگی خاک و هم‌چنین هیبرید ۵ درصد نانورس و ۱ درصد نانوسیلیکا سبب افزایش ۳۲ درصدی زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک در راستای این پژوهش شده است.

۳. بررسی نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده بیان‌گر افزایش ۱۳٤ درصدی مقاومت فشاری نمونه‌های خاک به‌سازی شده با ۲/۵ درصد نانورس و افزایش ٦۲۰ درصدی نمونه‌های به‌سازی شده با ۱ درصد نانوسیلیکا است. ترکیب بهینهٔ هیبرید نانوذرات ساخته شده برای افزایش مقاومت فشاری خاک بررسی شده در این پژوهش ۵ درصد نانورس و ۱ درصد نانوسیلیکا است که موجب افزایش چشم‌گیر مقاومت فشاری به میزان ۷۸۵ درصد و کاهش نشست‌پذیری خاک به‌میزان ٦۰ درصد نسبت به خاک خالص شده است.

٤. بررسی‌های آزمایشگاهی آزمایش میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های خاک اطراف حرم مطهر رضوی در شرایط خالص و به‌سازی شده با نانورس و نانوسیلیکا و هیبرید نانوذرات ساخته شده بیان‌گر حضور این ذرات در خلل و فرج موجود در پروفیل خاک به‌سازی شده است. از طرفی زیاد بودن سطح ویژه نانوذرات موجب افزایش اندرکنش دانه‌های خاک شده و تأثیر این نانوذرات در فرآیند به‌سازی و افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های خاک به‌سازی شده با این مواد، در نتایج آزمایش‌های نمونه‌های خاک بررسی شده مشاهده می‌شود.

با توجه به این که نانورس، نانوسیلیکا و هیبرید نانوذرات ساخته شده حاصل فرآوری خاک هستند علاوه بر سازگاری مناسب با محیط‌های خاکی، در رفع مشکلات زیست محیطی نیز بسیار تأثیرگذار است. به‌علاوه با توجه به حجم کم استفاده شده نانورس، نانوسیلیکا و هیبرید نانوذرات ساخته شده و افزایش مقاومت فشاری و کاهش نشست‌پذیری خاک در راستای این پژوهش، استفاده از این نانوذرات به‌صورت برجا و با استفاده از خاک محل پروژه، موجب کاهش قابل توجه هزینه و زمان اجرای پروژه می‌شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.5.9]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.703]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.5.9]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.703]

منابع

1. Tavenas F., Leroueil S., La Rochelle P., Roy M., "Creep behaviour of an undisturbed lightly overconsolidated clay", Can. Geotech. J., Vol. 15, No. 3 (1978) 402-423.
2. Simpson B., Tatsuoka F., "Geotechnics: the next 60 years", Geotechnique, Vol. 58, No. 5 (2008) 357-368.
3. Shukla S., Sivakugan N., Das B., "Fundamental concepts of soil reinforcement-an overview", Int. J. Geotech. Eng., Vol. 3, No. 3 (2009) 329-342, Jul.
4. Onyelowe K. C., Duc B. V., "Durability of nanostructured biomasses ash (NBA) stabilized expansive soils for pavement foundation", Int. J. Geotech. Eng., (2018) 1-10.
5. Kuo W.-T., Lin K.-L., Chang W.-C., Luo H.-L., "Effects of nano-materials on properties of waterworks sludge ash cement paste", J. Ind. Eng. Chem., Vol. 12, No. 5 (2006) 702-709.
6. Abbasi N., Farjad A., Sepehri S., "The Use of Nanoclay Particles for Stabilization of Dispersive Clayey Soils", Geotech. Geol. Eng., Vol. 36, No. 1 (2018) 327-335.
7. Tabarsa A., Latifi N., Meehan C. L., Manahiloh K. N., "Laboratory investigation and field evaluation of loess improvement using nanoclay–A sustainable material for construction", Constr. Build. Mater., Vol. 158 (2018) 454-463.
8. Kananizadeh N., Khoshniat A., "Behavior of nanoclay as an additive in order to reduce Kahrizak landfill clay permeability", in Proceeding of 2nd International Conference on Environmental Science and Technology (2011) 26-28.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.5.9]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.703]

9. Ghazi H., Baziar M. H., Mirkazemi S. M., "Assess of the improvement of the behavior of soil strength in the presence of nanoscale additive", Assas J. Sci. Technol., (2011) 45-50.
10. Bahari M., Nikookar M., Arabani M., Haghi A. K., Khodabandeh H., "Stabilization of silt by nanoclay", in Proc. of 7th National Congress on Civil Engineering (2013) 7-8.
11. Nikookar M., Bahari M., Nikookar H., Arabani M., "The Strength Characteristics of Silty Soil Stabilized Using Nano Clay", Proc. of 7th Symposium on Advances in Science & Technology (2012).
12. Fazeli A., Johari A., Davoodi F., "Rehabilitation of Collapsible soil with nanoclay", in 8th National Congress on Civil Engineering (2014).
13. Hosseini S. J., Tabarsa A., "Effect of Adding Nanoclay on the Mechanical Behaviour of Fine-grained Soil Reinforced with Polypropylene Fibers", Vol. 5, No. 2 (2015) 59-67.
14. Iranpour B., Hadad A., "The influence of Nano-materials on collapsible soil treatment The in fl uence of nanomaterials on collapsible soil treatment", Eng. Geol., Vol. 205, No. January 2019, (2016) 40-53.
15. Baziar M. H., Ghazi H., Mirkazemi S. M., "Effect of nanoclay on engineering properties of soil", in Forth International Congress of Geotechnical Engineering and Soil Mechanics, Tehran, Iran (2010).
16. Butrón C., Axelsson M., Gustafson G., "Silica sol for rock grouting: Laboratory testing of strength, fracture behaviour and hydraulic conductivity", Tunn. Undergr. Sp. Technol., Vol. 24, No. 6 (2009) 603-607.
17. Bahmani S. H., Huat B. B. K., Asadi A., Farzadnia N., "Stabilization of residual soil using SiO2 nanoparticles and cement", Constr. Build.

Mater., Vol. 64 (2014) 350-359.

18. Changizi F., Haddad A., "Strength properties of soft clay treated with mixture of nano-SiO2 and recycled polyester fiber", J. Rock Mech. Geotech. Eng., Vol. 7, No. 4 (2015) 367-378.
19. Yusefi E., Ghafuri M., Lashkaripour G., Talebian S. L., "Investigation of clay minerals in soil of Mashhad City according to its Atterberg limits", in 05th Iranian Conference of Engineering Geology (2007).
20. Hafezi Moghaddas N., Ghazi A., "Geotechnical Zonation and evaluation of ultimate bearing capacity of Mashhad city", in 05th Iranian Conference of Engineering Geology (2007).
21. Liu C., Evett J. B., "Soil properties: testing, measurement and evaluation", Prentice-Hall, Inc. (1984).
22. Chen F. H., "Foundations on expansive soils", Vol. 12. Elsevier (2012).
23. Zhang G., "Soil nanoparticles and their influence on engineering properties of soils", in Advances in Measurement and Modeling of Soil Behavior (2007) 1-13.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.5.9]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.703]