مطالعهٔ تأثیر نانو رس و پودر سنگ آهک بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های رسی شرق تبریز

سارا غفاری، روزبه دبیری*

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، گروه مهندسی عمران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۰۹

چکیده

خاک‌های رسی به دلیل کاهش شدید مقاومت و قابلیت افزایش حجم در اثر جذب رطوبت، به عنوان یکی از خاک‌های مسئله‌دار در کارهای مهندسی و عمرانی مطرح می‌باشند. امروزه از نانو مواد همچون نانو رس در جهت بهسازی و تثبیت خاک های رسی استفاده می‌شود. از سوی دیگر، حجم روز افزون نخاله‌های حاصل از تخریب ساختمان‌ها از جمله ذرات و قطعات سنگ مشکلات فراوانی را از نظر زیست محیطی در شهرهای بزرگ به وجود آورده‌اند. هدف از این پژوهش، مطالعه امکان پذیری تاثیر ترکیب ماده افزودنی نانو رس و پودر سنگ آهک در خاک رس کوی نصر شهر تبریز جهت بهبود خـــواص ژئـــوتکنیکی از دیدگاه توانایی باربری و تغییر شکل می‌باشد. در این تحقیق، نانو رس و پودر سنگ آهک در دو حالت جداگانه و ترکیبی با درصدهای ۵ و ۱۰ با خاک رس مخلوط شده‌اند. عمل آوری بر روی نمونه‌های تثبیت شده در مدت زمان ۱۴،7 و۲۸ روزه صورت گرفته است. به منظور ارزیابی میزان تاثیر گذاری مواد مذکور بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک رس آزمون‌های آزمایشگاهی حدود آتربرگ، تراکم، تک محوری، برش مستقیم (تحت اثر تنش‌های قائم ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع) انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد تاثیر همزمان ۵٪ نانو رس به همراه ۱۰ ٪ پودر سنگ آهک در مدت زمان عمل آوری ۷ روزه در شرایط دمای محیط به خاک رس سبب کاهش شاخص خمیری به مقدار ۷۲ ٪ ، بهبود ساختار دانه بندی و کاهش فضای خالی و افزایش مقاومت برشی به میزان ۳۳ ٪ شده است.

واژه‌های کلیدی: رس، بهسازی خاک، نانو رس، پودر سنگ آهک ، ظرفیت باربری.

۱- مقدمه

خاک‌های رسی به دلیل کاهش شدید مقاومت و قابلیت افزایش حجم در اثر جذب آب، به عنوان یکی از خاک‌های مسئله‌دار در کارهای مهندسی و عمرانی مطرح می‌باشد. یکی از راهکارهای کاهش مشکلات مربوط به خاک رس تثبیت با مواد افزودنی است. از عوامل موثر در انتخاب نوع ماده تثبیت کننده، اثرگذاری آن برخصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک مورد نظر در جهت رسیدن به اهداف تثبیت است. امروزه، مطالعات گسترده در زمینه کاربرد نانو مواد در مسائل

* نویسندهٔ مسئول rouzbeh_dabiri@iaut.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.1.0]

مربوط به مهندسی ژئوتکنیک مشاهده می‌شود. یکی از این نوع مواد، نانو رس‌ها می‌باشند. نانو رس‌ها کانی‌هایی در مقیاس نانومتر هستند که از سطح ویژه‌ای در حدود ۷۵۰ مترمربع بر گرم برخوردارند. این مواد اغلب به عنوان پرکننده‌ها در اصلاح خواص پلیمرها به کار گرفته شده‌اند. مزیت‌هایی از قبیل خالص بودن و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا در این کامپوزیت ها باعث شده است تا نانو رس در استحکام پلیمرها نقش زیادی را ایفا کند. مونت موریونیت تنها رس طبیعی است که استفاده از آنها به عنوان یک نانو رس مناسب بیشتر مورد توجه است. از سوی دیگر، حجم روز افزون مواد و زباله‌های شهری به ویژه نخاله‌های حاصل از تخریب ساختمان‌ها و بافت‌های فرسوده شهری مشکلات فراوانی را در شهرهای بزرگ به وجود آورده‌اند. مشکلات زیست محیطی که در اثر دفع غیر اصولی و غیر فنی این مصالح پدید آمده توجه پژوهشگران در راستای بازیافت این مواد را به خود متوجه نموده است. نخاله‌های ساختمانی شهرهای بزرگ نشان می‌دهد که آجر، قطعات و ذرات سنگی، ملات ماسه سیمان و قطعات بتن مواد اصلی تشکیل دهنده آنها هستند. پودر سنگ‌ها از کوبیده شدن انواع کانی‌های معدنی موجود در طبیعت نظیر کربنات کلسیم، سنگ آهک، مرمریت، گرانیک، سنگ آهن, سنگ نقره و غیره تولید می‌شود. قطعات سنگ هم به صورت طبیعی در محیط زیست یافت می‌شود که در اثر گذر زمان از فرسایش سنگ‌های مختلف حاصل شده و همچنین با روش‌های صنعتی توسط دستگاه‌های کوبش سنگ به دست می‌آید. هدف از انجام تحقیق حاضر، امکان ارائه یک راهکار جدید جهت بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ریزدانه رسی در راستای افزایش توانایی باربری در لایه‌های خاکی زیر پی و کاهش میزان تغییر شکل با ترکیب ذرات نانو رس و پودر سنگ آهک بعنوان یکی از انواع نخاله‌های ساختمانی می‌باشد. در این پژوهش خاک رسی منطقه کوی نصر واقع در شرق تبریز مورد مطالعه گرفته شده است.

۲- مرور مطالعات گذشته

همچنان که ذکر شد، بهبود رفتار مهندسی خاک‌های مسأله‌دار در پروژه‌های عمرانی به عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل پیشرو در مهندسی ژئوتکنیک محسوب می‌شود. خاک رس بخش اعظمی از نواحی شرقی و غربی شهر تبریز را در بر می‌گیرد، در اکثر موارد جزء خاک‌های مشکل آفرین می‌باشد. عامل مهم و تعیین کننده در طراحی سازه‌ها بر روی خاک‌های رسی، تغییر شکل پذیری یا نشست و گاهی مقاومت آنها می‌باشد. از این رو، روش‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی به منظور اصلاح و یا تثبیت این نوع از خاک‌ها پیشنهاد می‌گردد. مطالعات گسترده‌ای در زمینه اثر نانو ذرات در بهبود پارامترهای مقاومتی خاک صورت گرفته است. Noll و همکاران در سال ۱۹۹۲ اثر نانو ذرات سیلیکا را در جهت کاهش نفوذپذیری خاک‌های ماسه‌ای مطالعه نمودند[۱]. در سال ۱۹۹۳ Yonekura و Miwa با تزریق ذرات نانو سیلیس مقاومت فشاری و توانایی باربری خاک ماسه‌ای را افزایش دادند[۲]. مرادی و سیدی در سال ۲۰۱۷ [۳] و Kakavand و Dabiri در سال ۲۰۱۸، تاثیر نانو سیلیکای کلوئیدی رو در بهبود و افزایش توانایی باربری خاک‌های مخلوط ماسه- رس به ترتیب تحت شرایط بارگذاری دینامیکی و استاتیکی مطالعه نمودند [٤].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.1.0]

در زمینه کاربرد نانو رس به منظور تثبیت خاک‌های ریزدانه، پور واحدی و همکاران [۵] مشاهده نمودند با افزایش نانو رس حد روانی و حد خمیری خاک افزایش می‌یابد. همچنین بیشتر مقاومت در آزمایش ظرفیت باربری کالیفرنیا را با افزودن ۱/۵ درصد نانو رس به دست آمده بود. بهاری و همکاران [٦] خواص فیزیکی و ژئوتکنیکی خاک‌های لای دار از نوع MH و ML تثبیت شده با نانو رس را مطالعه نمودند. نتایج بدست آمده نشان داد که نانو رس باعث افزایش حد خمیری، حد روانی، ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به میزان قابل توجهی در خاک های لای دار شده است. فخری و همکاران [۷]، با افزودن نانو رس خواص هیدورلیکی خاک رس کائولینیت رو مطالعه نمودند. ایشان مشاهده کردند که با افزودن ۸ ٪ نانو رس به خاک رس کائولینیت دامنه خمیری و ضریب نفوذپذیری آن در مقایسه با خاک رس کائولینیت به ترتیب ۱۸٤ درصد افزایش و ۳۰۰ برابر کاهش یافته است. عباسی و فرجاد [۸]، اثر ذرات نانو رس را بر روی میزان پتانسیل واگرایی خاک‌های رسی مطالعه نمودند. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان دادند افزودن نانو رس به خاک رس واگرا به طور کلی موجب کاهش پتانسیل واگرایی خاک می‌گردد. همچنین مشخص شد زمان عمل آوری نقش قابل ملاحظه‌ای در تثبیت خاک با نانو ذرات رس داشته و برای انجام فعل انفعالات شیمیایی موردنیاز برای تثبیت حدود سه روز زمان لازم است. Taha و Taha [۹] مشاهده کردند که نانو رس، وزن مخصوص خشک حداکثر خاک را تا حدودی افزایش می‌دهد. این در حالی است که رطوبت بهینه را کمی کاهش می‌دهد. همچنین با افزایش مقدار نانو رس مصرفی در خاک رس، کرنش انبساطی و انقباضی خاک کاهش می‌یابد، ولی با افزایش بیشتر از حد نانو رس، باعث افزایش کرنش انبساطی و انقباضی خواهد شد. نتایج تحقیقات Mohammadi و Niazian [۱۰] نشان داد افزودن نانو رس به خاک رسی، موجب افزایش مقاومت برشی، حد روانی و حد خمیری خاک می‌شود. از سوی دیگر، کاربری نخاله‌های ساختمانی بازیافت شده به عوامل زیادی نظیر حجم، ترکیب نخاله، ماشین آلات بازیافت نخاله، میزان تقاضا، کیفیت مصالح تولیدی دارد. امروزه کاربرد بیشتر مصالح بازیافتی در دو زمینه می‌باشد که یکی در زمینه تولید بتن[۱۱] و دیگری در زمینه تولید آجر و بلوک های بتنی می‌باشد [۱۲]. در مورد بهره‌گیری از مصالح بازیافتی در اکثر کشورهای توسعه یافته نظیر آلمان، هلند و بلژیک و نروژ تحقیقات زیادی صورت گرفته است و همچنین استانداردهای ویژه‌ای برای استفاده از این مصالح تدوین شده است[۱۳ و ١٤]. در زمینه کاربرد مصالح بازیافتی در زمینه تثبیت خاک می‌توان به مطالعات صورت گرفته توسط Ahmed و همکاران [۱۵] اشاره نمود. ایشان تحقیقاتی را بر روی گچ بازیافتی که از ضایعات گچ تخت های بدست می‌آید، انجام دادند ضایعات گچ تخته‌ای از جمله ضایعاتی است که به تازگی در ژاپن برای بهبود زمین در پژوهش های مختلف از جمله سدها و بزرگراه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵ و ١٦]. البته استفاده از آن در بهبود زمین، مشکلاتی جدی را به همراه دارد که مربوط به حلالیت گچ است. Demirel اثرهای استفاده از ضایعات گرد و غبار سنگ مرمر را به عنوان ماسه ریزدانه بر روی خواص مکانیکی بتن مورد مطالعه قرار داد. ایشان مشاهده نمود که افزودن ضایعات گرد و غبار سنگ مرمر به عنوان جایگزین مصالح ریزدانه، تأثیرات به سزایی را در مقاومت فشاری آنها دارد. گرد و غبار سنگ مرمر از تولید سنگ مرمر حاصل می‌شود و در مقیاس بزرگ، ایجاد آلودگی زیست محیطی می‌کند. بنابراین می‌توان برای جلوگیری از آلودگی محیط زیست (به خصوص در مناطق با تولید بیش از حد سنگ مرمر و برای مصرف منابع طبیعی کمتر)، از این ضایعات در بتن با مقاومت طبیعی به عنوان یک جایگزین برای دانه‌های بسیار ریز جهت ساخت روسازی راه با کاربرد بتن غلتکی استفاده نمود. Bolouri Bazaz و Zanjani [۱۷] مصالح بازیافتی ترکیبی از آجر و ملات ماسه سیمان را جهت کاربرد در لایه‌های روسازی راه مورد مطالعه قرار دادند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.1.0]

نتایج مطالعات نشان داد که مصالح بازیافتی باعث بهبود توانایی باربری مصالح مورد استفاده در لایه‌های روسازی گردیده است. همچنین در مورد کاربرد بتن بازیافتی در احداث لایه‌های روسازی راه نیز مطالعات مختلفی انجام گرفته است[۱۸]. آین و همکاران[۱۹] مطالعه‌ای را در این زمینه انجام دادند. نتایج بدست آمده نشان داده است مصالح لایه‌های روسازی بهسازی شده با کاربرد بتن بازیافتی دارای میزان توانایی باربری طبق نشریه ۲۳٤ سازمان برنامه و بودجه می‌باشند. Bandra و همکاران [۲۰] همچنین مطالعه‌ای را در مورد تاثیر مصالح بازیافتی همچون غبار کوره سیمان، غبار کوره آهک، خاکستر بادی و ذرات ریز بتن را بر روی مصالح احداث لایه روسازی فرودگاه انجام دادند. آنها مشاهده کردند که استفاده ۸٪ غبار کوره سیمان، ٦٪ غبار کوره آهک و ترکیب ۵٪ غبار کوره آهک و ۱۵٪ خاکستر بادی می‌تواند جهت بهسازی مصالح مناسب باشد. روحبخشان و کلانتری [۲۱] مطالعاتی را در زمینه امکان بهسازی خاک رس با استفاده از آهک و پودر ضایعات سنگی انجام دادند. ایشان دریافتند در زمان‌های عمل آوری مختلف، افزودن پودر ضایعات سنگی و آهک سبب افزایش مقدار مقاومت فشاری تا ٦ درصد پودر ضایعات سنگی و ۷ درصد آهک و افزایش مقدار نسبت باربری کالیفرنیا تا ٦ درصد پودر ضایعات سنگی و ۹ درصد آهک شده است و برای درصدهای بیشتر، مقادیر مقاومت فشاری و نسبت باربری کالیفرنیا کاهش می‌یابد. محمدی و دبیری [۲۲]، در مطالعه‌ای تاثیر سنگدانه آجر رسی بر روی میزان توانایی باربری خاک رسی را به منظور کاربرد در لایه‌های روسازی بررسی نمودند. نتایج به دست آمده نشان داد افزودن سنگدانه‌های آجر رسی به خاک رسی به طور محدود سبب تغییر ساختار و بافت نمونه‌ها از حالت ریزدانه به سمت درشت دانه شده است. به طوری که افزودن ۳۰ درصد سنگدانه آجری در خاک رس، سبب افزایش میزان توانایی باربری، کاهش میزان تورم و افزایش نفوذپذیری شده و با توجه به نتایج امکان کاربرد مصالح مخلوط در لایه‌های روسازی خاک بستر و زیراساس موجود می‌باشد. با توجه به تحقیقات صورت گرفته مشاهده می‌شود، اثرگذاری ترکیب نانو رس به همراه پودر سنگ آهک در جهت بهسازی رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های رس مورد استفاده قرار نگرفته است.

۳- مواد و مصالح

چنان که در بخش‌های گذشته به آن اشاره گردید، هدف از تحقیق حاضر بررسی امکان تثبیت و بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی و رفتار خاک رسی با ترکیب ذرات نانو رس و پودر سنگ آهک جهت افزایش توانایی باربری و کاهش میزان نشست و تغییر شکل می‌باشد. در این مطالعه، خاک رس با خواص خمیری بالا از منطقه کوی نصر در شرق شهر تبریز تهیه شد. نتایج تجزیه شیمیایی خاک رس مورد مطالعه و ترکیب کانی‌های تشکیل دهنده آن با توجه به آزمون XRF انجام یافته در سازمان زمین شناسی شمال غرب کشور در جدول‌های (۱) و(۲) ارائه شده است. نانو رس، نانو ذرات معدنی سیلیکاتی هستند که به شکل لایه‌ای بوده که ابعاد آنها بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر می‌تواند متغیر باشد. با روش‌های مختلف فاصله بین ذرات ورقه‌ای رس از یکدیگر افزایش یافته و نانو رس بوجود می‌آید که دارای سطح ویژه‌ای ۷۰۰ تا ۸۰۰ متر مربع بر گرم است. این سطح بزرگ سبب می‌شود همواره اندرکنش شدیدی بین نانو رس و محیط اطرافش داشته باشد[۲۳]. در تحقیق حاضر، از نانو رس پودری شکل به رنگ زرد و هیدورفیلیک به عنوان ماده افزودنی استفاده شد. نانو رس مورد کاربرد، از نوع مونت موریونیت اصلاح شده با Na^+ بوده و بر پایه خاصیت غیرخمیری می‌باشد که تولید کارخانه کاوا صنعت با نام تجاری (Kava clay 15) [۲٤] است. مشخصات فنی آن طبق جدول (۳) قابل مشاهده

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.1.0]

است. پودر سنگ آهک خالص مورد استفاده از کارخانه سنگاب آذرشهر تهیه شده است. در این مطالعه، پودر سنگ‌های آهک پس از آسیاب کردن در دستگاه لس آنجلس دانه بندی شده و اندازه ذرات به منظور تاثیر گذاری بیشتر در نمونه‌های تثبیت شده بین ۰/۴۲۵ تا ۰/۳ میلیمتر انتخاب شدند(رد شده از الک شماره ۴۰ و مانده روی الک شماره ۵۰). تصاویر مصالح مورد استفاده در این پژوهش در شکل (۱-الف، ب و ج) ارائه شده است.



شکل ۱: مصالح مورد استفاده در تحقق حاضر: الف- خاک رس، ب- پودر سنگ آهک ، ج- نانو رس.

جدول ۱: خصوصیات شیمیایی و درصد کانی خاک رسی مورد مطالعه.

ترکیبات شیمیایی	درصد وزنی موجود در خاک
SiO_2	۵۳
Al_2O_3	۲۸
Fe_2O_3	۰/۶۵
CaO	۱/۳
MgO	۰/۵
TiO_2	۰/۰۴
Na_2O	۰/۱
K_2O	۰/۲
SO_3	۵/۲
سایر	۱۱/۱

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.1.0]

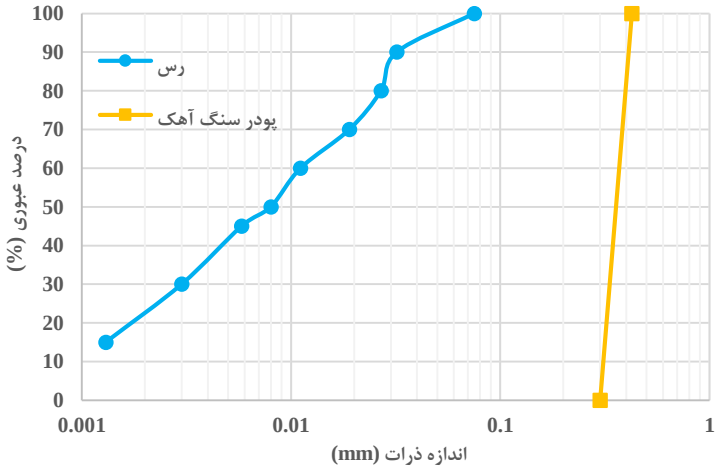
جدول ۲: درصد کانی‌ها در خاک رس مورد مطالعه.

عناصر	درصد وزنی
کوارتز	۲۲
کلسیت	٤۱
دولومیت	۱۳
فلدسپار	۸
هماتیت	۳
گچ	٤
سایر مواد معدنی رس	۷

جدول ۳: مشخصات نانو رس مونت موریونیت مورد استفاده (Kava clay 15).

مشخصات	نوع/ مقدار
پایه	مونت موریونیت
رنگ	زرد
اندازه ابعاد ذرات	۲۵µm
چگالی	۲g/cc
فاصله بین لایه ای	۳۲ انگستروم
رطوبت	کمتر از ۲ درصد

منحنی دانه بندی مصالح طبق استاندارد ASTM D421 [۲۵] و ASTM D422 [۲٦] تعیین گردیده و در شکل (۲) نشان داده شده است. بر اساس سیستم طبقه بندی خاک‌ها به روش متحد (Unified)، خاک رس مورد مطالعه از نوع CH بوده و پودر سنگ آهک نیز از نوع SP می‌باشد. خصوصیات خمیری مصالح، چگالی ویژه و مقدار pH مصالح مورد مطالعه به ترتیب طبق استانداردهای ASTM D4318 [۲۷]،ASTM D854 [۲۸] و ASTM D4972 [۲۹] ارزیابی شده و مقادیر آنها در جدول(٤) ارائه شده است.



شکل ۲: منحنی دانه بندی مصالح مورد استفاده در تحقیق حاضر.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.1.0]

جدول٤: خصوصیات ژئوتکنیکی مصالح مورد مطالعه.

خصوصیات ژئوتکنیکی	رس	پودر سنگ آهک
PI (%)	٣٦	–
Gs	٢/٦٥	٢/٦٢
pH	٧/٦	٧

٤- برنامه‌های آزمایشگاهی

در این تحقیق، به منظور بررسی تاثیر ترکیب پودر سنگ آهک و نانو رس بر بهسازی رفتار ژئوتکنیکی خاک رس، ابتدا نانو رس به مقادیر ٥٪ و ١٠٪ وزنی با خاک رس مخلوط گردید. به منظور آماده سازی نمونه‌های مخلوط بصورت یکنواخت و همگن جهت ارزیابی پارامترهای ژئوتکنیکی، از استاندارد ASTM C305 [٣١] استفاده شد. بطوری که ابتدا ذارت نانو رس و آب (با توجه به مقدار رطوبت بهینه) با یکدیگر در داخل مخلوط کن، مخلوط شدند و سپس اندکی صبر شده تا مقداری آب توسط ذرات نانو جذب شده تا بتواند چسبندگی بهتری با خاک پیدا بکند. در ادامه ذرات خاکی مخلوط مورد مطالعه در حالت خشک به طور آرام به آن افزوده گردید. طبق استاندارد ٣٠ ثانیه عملیات مخلوط متوقف شده تا مصالح رطوبت را جذب نمایند. درانتها، عملیات مخلوط کردن مصالح خاکی و ذرات نانو رس به مدت ٣٠ ثانیه با دور کند، ١٥ ثانیه تمیزکاری و ٦٠ ثانیه با دور متوسط انجام گرفت. در مرحله بعدی همین روند برای مخلوط‌های پودر سنگ آهک + خاک رس و پودر سنگ آهک + نانو رس + خاک رس تکرار شد. با توجه به استاندارد ASTM C618 [٣٠] هنگامی که میزان مجموع مخلوط‌های عناصر $SiO_2+Al_2O3+Fe_2O_3$ حداقل برابر ٧٠٪ و SO_3 حداکثر برابر ٤٪ باشد رفتار پوزولانی و سیمنتاسیون مشاهده می‌گردد. براساس جدول (١) خاک رس مورد مطالعه دارای خاصیت پوزولانی است. بنابراین، نمونه‌های مخلوط نانو رس و رس در ظروف پلاستیکی بسته به مدت ٧، ١٤ و ٢٨ روز در شرایط رطوبت بهینه نگهداری شده و عمل آوری انجام گرفته است. در مرحله دوم، پودر سنگ آهک با درصدهای ٥٪ و ١٠٪ به خاک رس افزوده شده است. سپس خاک رس، نانو رس و پودر سنگ آهک بطور همزمان با همان درصدهای مشابه مخلوط شده و فرآیند عمل آوری در مدت زمان‌های ذکر شده انجام یافته است. در این پژوهش، برای ارزیابی تاثیر مصالح افزوده شده بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس، آزمون های آزمایشگاهی حدود آتربرگ طبق استاندارد ASTM D4318 [٢٧] ، تراکم آزمایشگاهی براساس استاندارد ASTM D698 [٣٢]، مقاومت فشاری تک محوری براساس استاندارد ASTM D2166 [٣٣] و آزمون برش مستقیم طبق استاندارد ASTM D3080 [٣٤] بر روی نمونه‌های با ابعاد ١٠×١٠ سانتیمتر مربع به صورت کنترل کرنش انجام پذیرفت. بطوری که ابتدا نمونه‌ها با رطوبت بهینه تهیه و پس از اشباع و تحت تنش های تحکیم، تحت اثر تنش‌های قائم ١، ٢ و ٣ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و با سرعت ٠/٠٥ میلیمتر بر دقیقه آزمایش انجام گرفت. برنامه آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی نمونه های مورد مطالعه مطابق جدول (٥) است. شایان ذکر است که ٢٥٪ از مجموع آزمایش‌های انجام یافته جهت بررسی صحت نتایج بدست آمده دوباره تکرار شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.1.0]

جدول ۵: برنامه آزمون های صورت گرفته بر روی نمونه‌های مورد مطالعه در تحقیق حاضر.

برنامه ریزی			مصالح			عمل آوری			آزمایشات					
ردیف	نام نمونه	ماتریس خاک	درصد نانو رس	درصد پودر سنگ آهک	درصد نانو رس و پودر سنگ آهک	۷ روز	۱۴ روز	۲۸ روز	حدود آتربرگ	چگالی ویژه	تراکم	تک محوری	برش مستقیم
۱	C-0	رس	۰	۰	۰	-	-	-	*	*	*	*	*
۲	C-NC5	رس	۵	-	-	*	*	*	*	*	*	*	*
۳	C-NC10	رس	۱۰	-	-	*	*	*	*	*	*	*	*
٤	C-LS5	رس	-	۵	-	-	-	-	*	*	*	*	*
۵	C-LS10	رس	-	۱۰	-	-	-	-	*	*	*	*	*
٦	C-NC5-LS5	رس	-	-	٪۵+٪۵	*	*	*	*	*	*	*	*
۷	C-NC5-LS10	رس	-	-	٪۱۰+٪۵	*	*	*	*	*	*	*	*
۸	C-NC10-LS5	رس	-	-	٪۵+٪۱۰	*	*	*	*	*	*	*	*
۹	C-NC10-LS10	رس	-	-	٪۱۰+٪۱۰	*	*	*	*	*	*	*	*

۵- نتایج و بحث

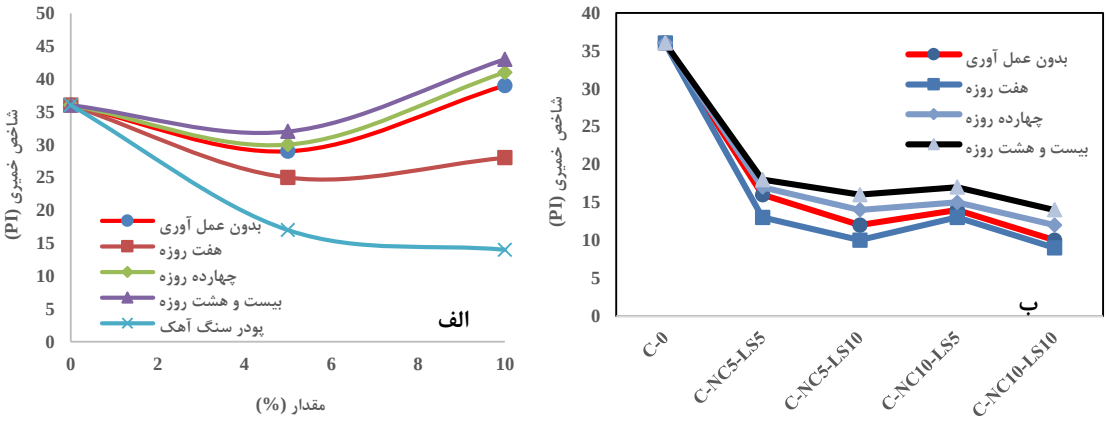
۵-۱- نتایج حاصل از آزمایش حدود آتربرگ

نتایج حاصل از تاثیر نانو رس و پودر سنگ آهک بر خصوصیات خمیری خاک رس در شکل (۳ – الف و ب) می‌توان مشاهده کرد. با توجه به نمودارهای شکل (۳–الف) دیده می‌شود، هنگامی که نانو رس به خاک رس افزوده می‌شود، در شرایط بدون عمل آوری با افزودن ۵ ٪ نانو رس، شاخص خمیری ابتدا کاهش و سپس با افزایش درصد نانو رس به ۱۰٪ شاخص پلاستیسیته خاک رس روندی رو به بالا را طی می‌نماید. هنگامی که هفت روز از عمل آوری مخلوط نانو رس و خاک رس گذشت، مشاهده گردید شاخص خمیری تا حدودی نسبت به حالت رس خالص کاهش یافته است. اگرچه با افزایش مدت زمان عمل آوری شاخص خمیری یک روند افزایشی را به نمایش می‌گذارد. با توجه به این که پایه نانو رس مورد استفاده در این مطالعه دارای پایه غیر خمیری است، در درصدهای پایین (یعنی ۵ ٪) تاثیر کاهنده بر روی شاخص خمیری داشته ولی با افزایش درصد حضور یک روند صعودی در آن مشاهده می‌گردد که ناشی از عدم تغییر بافت خاک و افزایش میزان جذب آب توسط ذارت خاک رس است که مشابه با مطالعات انجام یافته بهاری و همکاران [٦] و فخری و همکاران [۷] می‌باشد. از سوی دیگر، با افزودن پودر سنگ آهک به خاک رس، شاخص خمیری کاهش یافت. نمودارهای شکل (۳–ب) نشان می‌دهند، هنگامی که نانو رس و پودر سنگ آهک بطور همزمان به خاک رس افزوده می‌گردد در حالت بدون عمل آوری سبب می‌شود خاصیت خمیری خاک رس تثبیت شده کاهش یابد. اگرچه مدت زمان عمل آوری نیز تاثیر گذار بوده و در حالت کلی باعث کاهش خاصیت خمیری با شدت بیشتر شده است، ولی مخلوط ۵٪ نانو رس با همراه ۱۰٪ پودر سنگ آهک در مدت عمل آوری ۷ روز شاخص خمیری خاک

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.1.0]

مخلوط را به مقدار ۷۲ ٪ نسبت به خاک رس خالص کاهش داده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد، افزودن نانو رس و پودر سنگ آهک بطور جداگانه به خاک رس مورد مطالعه سبب بوجود آمدن واکنش شیمیایی مناسب در راستای تغییر بافت خاک نشده و بطوریکه با افزایش درصد حضور آنها به ترتیب شاخص خمیری افزایش و کاهش یافته است. اما در شرایطی که ۵ ٪ نانو رس و ۱۰ ٪ پودر سنگ آهک همزمان با خاک رس مخلوط می‌شود و یک فرآیند عمل آوری ۷ روزه صورت می‌گیرد، بدلیل غالب شدن واکنش شیمیایی تجمع-تراکم آنی و سمنتاسیون بین ذرات سنگ آهک و خاک رس و همراهی ذرات نانو رس ساختار و بافت خاک رس تغییر یافته و خاصیت تورمی و جذب آب کاهش می‌یابد.



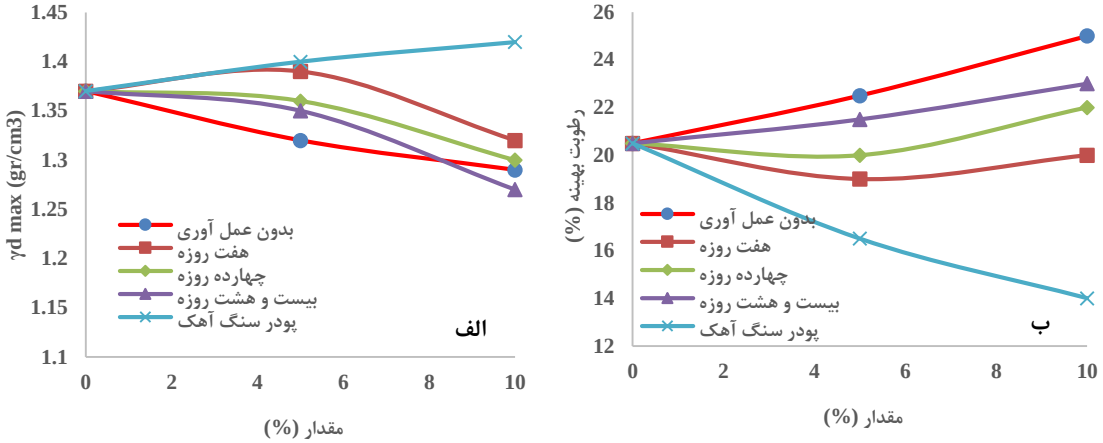
شکل ۳: تاثیر نانو رس و پودر سنگ آهک بر روی شاخص خمیری خاک رس مورد مطالعه، الف- بطور جداگانه، ب- بطور همزمان.

۵-۲- نتایج حاصل از آزمایش تراکم

تأثیر افزودنی‌های نانو رس و پودر سنگ آهک بر روی نتایج حاصل از آزمون تراکم خاک رس مورد مطالعه در نمودارهای شکل‌های (٤- الف و ب) و (۵- الف وب) ارائه شده است. با توجه به شکل (٤-الف) دیده می‌شود در شرایط بدون عمل آوری، با افزایش میزان نانو رس مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر (γ_{dmax}) کاهش یافته و در مدت عمل آوری ۷ روزه، مشابه مطالعات صورت گرفته توسط Taha and Taha [۹] هنگامی که ۵٪ نانو رس به خاک رس افزوده می‌شود، مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر (γ_{dmax}) به میزان ۱/۱ درصد روند صعودی طی نموده ولی با افزایش مقدار نانو رس تا ۱۰٪ وزن مخصوص خشک حداکثر کاسته شده است. در مدت زمان های عمل آوری ١٤ و ۲۸ روزه نیز با افزایش مقدار نانو رس، مقدار γ_{dmax} روندی رو به پایین طی می‌نماید. از سوی دیگر با افزودن پودر سنگ آهک به خاک رس، مقدار (γ_{dmax}) بهبود یافته و با حضور ۱۰٪ پودر سنگ، مقدار آن ۲/٤ درصد افزایش می‌یابد. همان طور که در شکل (٤-ب) نشان داده شده هنگامی که عمل آوری صورت نمی‌گیرد، بطور مشابه با افزایش نانو رس مقدار رطوبت بهینه نیز افزایش می‌یابد. با مقایسه تاثیر مدت زمان عمل آوری دیده می‌شود، هنگامی که نانو رس به خاک رس مخلوط می‌گردد و به مدت ۷ روز عمل آوری می‌شود، مقدار رطوبت بهینه در حضور ۵٪ نانو رس به بیشترین کاهش

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.1.0]

خود به میزان ۷/۳۱ درصد می‌رسد که با مطالعات انجام یافته توسط Taha and Taha [۹] انطباق دارد. با افزایش مدت زمان عمل آوری، همزمان با بالا رفتن درصد نانو رس، مقدار رطوبت بهینه خاک مخلوط نیز افزایش می‌یابد ولی نسبت به خاک رس خالص کمتر است. برخلاف تاثیرگذاری نانو رس، با افزایش پودر سنگ آهک در خاک رس، مقدار رطوبت بهینه کاهش یافته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد، افزودن ۵ ٪ نانو رس سبب بهبود حرکت ذرات خاک رس روی یکدیگر شده و فضای خالی بین آنها را کاهش داده است. همچنین بدلیل آن که ذرات نانو دارای پایه غیر خمیری هستند، در نتیجه میزان جذب آب توسط ذرات خاک رس افزایش یافته و باعث افزایش رطوبت بهینه شده است. از سوی دیگر، افزودن پودر سنگ آهک بدلیل درشت بودن ذرات باعث تراکم پذیری بیشتر در خاک رس شده است که این روند تا حدودی مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر را افزایش و مقدار رطوبت بهینه را کاهش داده است.

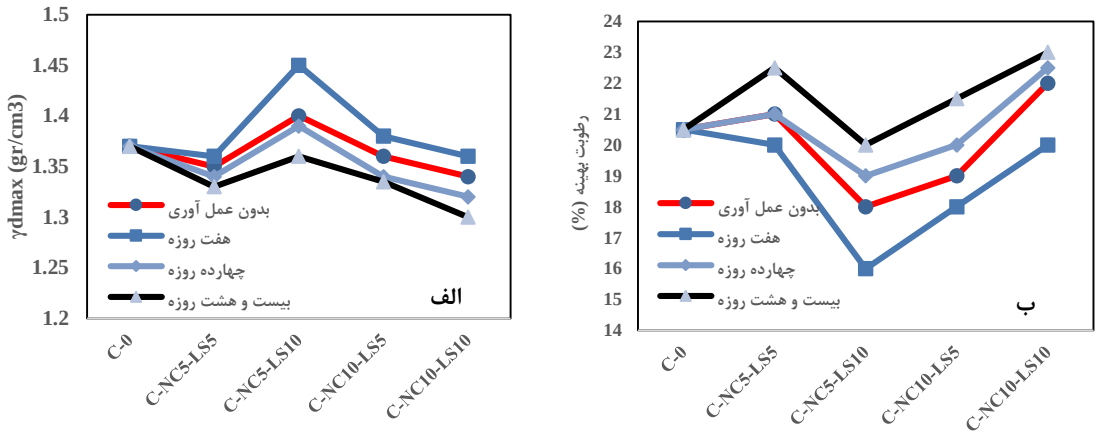


شکل ٤: تأثیر نانو رس و پودر سنگ آهک بر روی نتایج آزمون تراکم خاک رس مورد مطالعه، الف- وزن مخصوص خشک حداکثر، ب- رطوبت بهینه.

زمانی که نانو رس و پودر سنگ آهک همزمان با خاک رس افزوده می‌شود، تاثیر گذاری آنها بر نتایج آزمون تراکم را طبق نمودارهای شکل (۵-الف و ب) می‌توان مشاهده نمود. در مدت زمان عمل آوری ۷ روزه مخلوط ۵٪ نانو رس و ۱۰٪ پودر سنگ آهک سبب افزایش مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر به مقدار ۳/۲۹ درصد نسبت به خاک رس خالص می‌شود (شکل ۵-الف). همچنین، این شرایط طبق شکل (۵-ب) در تغییرات رطوبت بهینه خاک مخلوط نیز مشاهده می‌شود. بطوری که همان مقدار نانو رس و پودر سنگ آهک باعث کاهش میزان رطوبت بهینه به مقدار ۲۲٪ نسبت به رس خالص می‌شود. با توجه به نمودارها می‌توان دید، در حالت کلی افزایش مدت زمان عمل آوری در تمامی ترکیبات سبب کاهش وزن مخصوص و افزایش رطوبت بهینه گردیده است. در شرایطی که ۵ ٪ نانو رس و ۱۰ ٪ پودر سنگ آهک همزمان با خاک رس مخلوط می‌شود و عمل آوری بمدت ۷ روزه انجام می‌گیرد، حضور ذرات سنگ آهک بدلیل ایجاد واکنش شیمیایی تجمع- تراکم آنی و پوزولانی با ذرات خاک رس و تغییر ساختار و بافت خاک از ریزدانه به سمت درشت دانه و حضور ذرات نانو رس بعنوان روان کننده حرکت ذرات بر روی یکدیگر و کاهش فضای خالی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.1.0]

بین ذرات مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر را افزایش و مقدار رطوبت بهینه به علت کاهش جذب آب کاسته می‌شود.

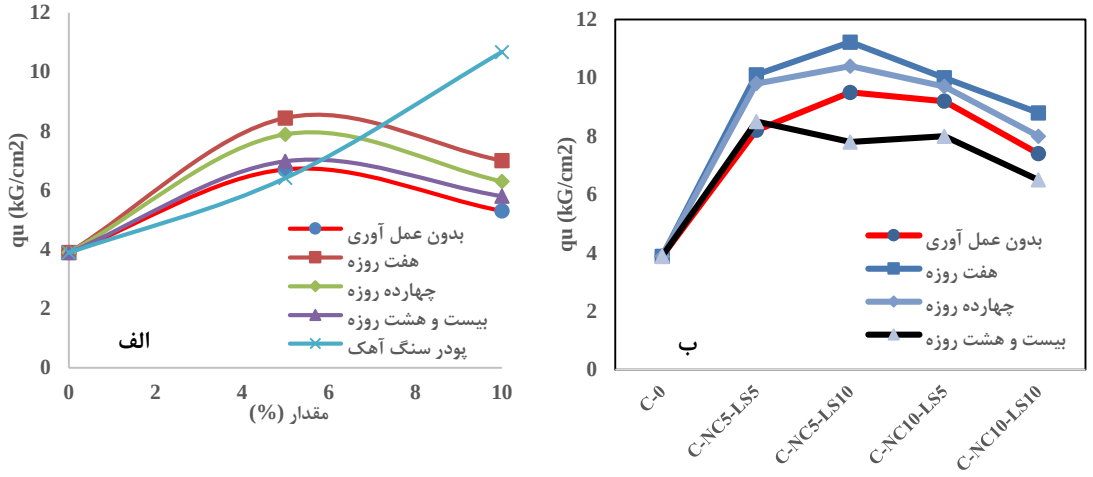


شکل ٥: تاثیر همزمان نانو رس و پودر سنگ آهک بر روی نتایج آزمون تراکم خاک رس مورد مطالعه، الف- وزن مخصوص خشک حداکثر، ب- رطوبت بهینه.

٥-٣- نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

تأثیر نانو رس و پودر سنگ آهک بر روی نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری تک محوری نمونه خاک رس تثبیت شده در شکل (٦-الف وب) ارائه شده است. در شکل (٦-الف) مشاهده می‌شود در حالتی که عمل آوری صورت نگرفته، با افزودن ٥٪ نانو رس به خاک رس، مقاومت فشاری در لحظه گسیختگی (q_u) به مقدار ٧٢٪ افزایش یافته و در شرایطی که عمل آوری بر روی نمونه‌های تثبیت شده انجام گیرد، مقدار q_u در مدت زمان عمل آوری ٧ روزه و با حضور ٥٪ نانورس به بهینه ترین اندازه می‌رسد. در این شرایط مقاومت فشاری در لحظه گسیختگی نسبت به حالت رس خالص نزدیک به ٢/٢ برابر افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، با افزودن پودر سنگ آهک به خاک رس، مقاومت فشاری تک محوری در لحظه گسیختگی نسبت به رس خالص ٢/٧٤ برابر شده که نسبت به خاک رس تثبیت شده با نانورس دارای میزان قابل توجهی است. همچنین، با توجه به نمودارهای شکل (٦-ب) مشاهده می‌گردد ترکیب ٥٪ نانورس و ١٠٪ پودر سنگ آهک در مدت زمان عمل آوری ٧ روزه بهترین نتیجه را از نقطه نظر باربری ارائه نموده است. به گونه‌ای که مقاومت فشاری در لحظه گسیختگی در نمونه تثبیت شده به میزان ٢/٩ برابر افزایش می‌دهد.

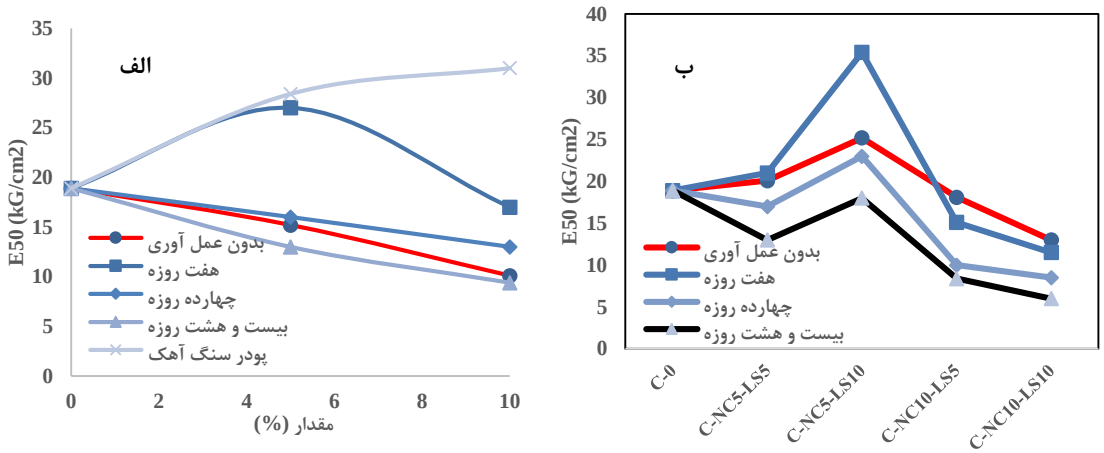
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.1.0]



شکل ٦: تاثیر نانو رس و پودر سنگ آهک بر روی نتایج آزمون مقاومت فشاری تک محوری خاک رس مورد مطالعه، الف- بطور جداگانه، ب- بطور همزمان.

در ادامه جهت بررسی و ارزیابی اثر نانو رس و پودر سنگ آهک بر میزان شکل پذیری نمونه‌ها، با استفاده از منحنی تنش- کرنش حاصل از آزمون مقاومت فشاری تک محوری، مدول تغییر شکل سکانت نمونه ها (E_{50}) تعیین گردید و در شکل (۷-الف و ب) نمایش داده شده است. نمودارهای شکل (۷-الف) نشان می‌دهد در حالت عمل آوری نشده، با افزایش مقدار نانو رس در خاک رس، مقدار مدول سکانت و شکل پذیری کاهش یافته و در صورتی که عمل آوری صورت گیرد، مشاهده می‌شود افزودن ۵٪ نانو رس در مدت زمان عمل آوری ۷ روزه سبب بالا رفتن شکل پذیری و مدول سکانت به مقدار ٤٣ ٪ شده است. با افزایش مدت زمان عمل آوری به ١٤ و ٢٨ روز مشاهده شد مقدار مدول سکانت تقریبا نزدیک به خاک رس تثبیت نشده و حتی کمتر از آن گردید. همچنین پودر سنگ آهک بر روی میزان مدول سکانت تاثیر گذار بوده و با افزایش درصد حضور آن شکل پذیری نسبت به حالت رس خالص به مقدار ٦٤ ٪ افزایش یافته است. همان گونه که در شکل (۷-ب) می‌توان دید، مخلوط همزمان نانو رس و پودر سنگ آهک در خاک رس می‌تواند بر ویژگی شکل پذیری و مدول سکانت تاثیر گذار باشد. بطوری که ۵٪ نانو رس به همراه ۱۰٪ پودر سنگ آهک به نمونه خاک رس افزوده شود و به مدت ۷ روز عمل آوری انجام یابد افزایش در مدول سکانت و شکل پذیری به مقدار ۸۷٪ به وقوع می‌پیوندد. در ادامه مطالعات مشاهده شد افزایش مدت زمان عمل آوری و ترکیبات مختلف نانو رس و پودر سنگ آهک تاثیر قابل توجهی بر روی شکل پذیری نداشته و حتی باعث کاهش آن نسبت به حالت تثبیت نشده گردیده است.

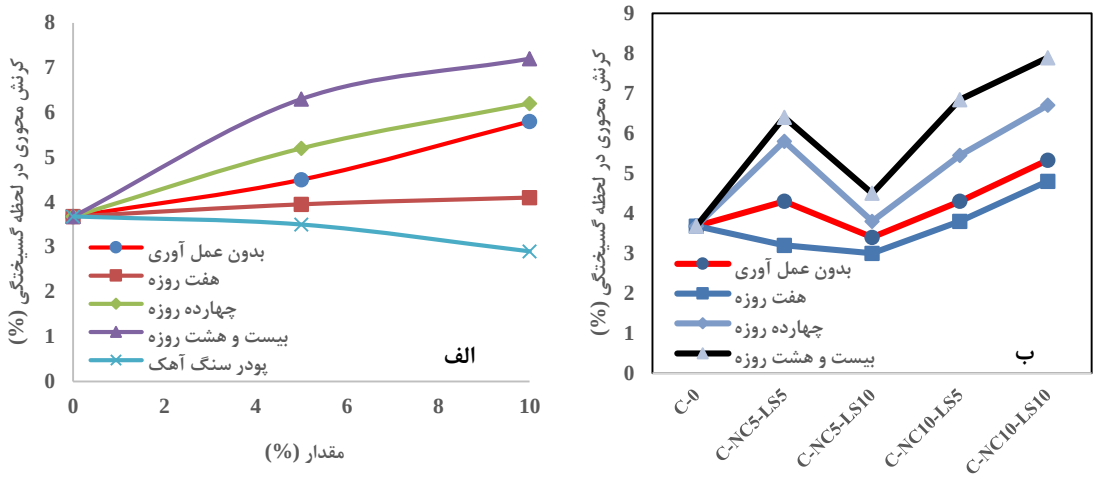
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.1.0]



شکل ۷: تاثیر نانو رس و پودر سنگ آهک بر روی مدول سکانت و شکل پذیری خاک رس مورد مطالعه، الف- بطور جداگانه، ب- بطور همزمان.

میزان تغییرات کرنش محوری در لحظه گسیختگی نمونه‌های خاک رسی بهسازی شده با نانو رس و پودر سنگ آهک در نمودارهای شکل (۸-الف و ب) نشان داده شده است. همان گونه که در شکل (۸-الف) می‌توان مشاهده نمود، اگر عمل آوری بر روی نمونه‌های تثبیت شده صورت نگیرد، همزمان با افزودن نانو رس، میزان کرنش محوری در لحظه گسیختگی خاک رس تثبیت شده افزایش می‌یابد. در صورتی که با انجام عمل آوری بر روی نمونه‌ها مشاهده شد در مدت زمان عمل آوری ۷ روزه مقدار کرنش محوری در لحظه گسیختگی در نمونه‌های تثبیت شده نسبت به خاک رس خالص کاسته می‌شود. ولی با افزایش مدت زمان عمل آوری کرنش محوری در لحظه گسیختگی با بالا رفتن میزان نانو رس یک روند افزایشی را طی می‌نماید. اگرچه، افزودن پودر سنگ آهک به خاک رس سبب یک رفتار ترد و شکننده می‌شود، بطوری که با افزایش حضور پودر سنگ آهک در خاک رس ، کرنش محوری در لحظه گسیختگی کاهش می‌یابد. طبق نمودارهای شکل (۸-ب) می‌توان دریافت، زمانی که نانو رس و پودر سنگ آهک به طور همزمان با درصد مختلف با خاک رس مخلوط می‌شود، درصورت عدم انجام عمل آوری، مخلوط ۵٪ نانو رس به همراه ۱۰٪ پودر سنگ آهک در نمونه تثبیت شده دارای کمترین کرنش محوری در لحظه گسیختگی است. زمانی که عمل آوری انجام پذیرد، در مدت زمان هفت روزه ترکیب ۵٪ نانو رس به همراه ۱۰٪ پودر سنگ آهک باعث رفتار ترد و شکننده شده و کمترین میزان کرنش محوری در نمونه تثبیت شده ایجاد می‌گردد. در ادامه، با افزایش مدت زمان عمل آوری در حالت عمومی در تمامی ترکیبات میزان کرنش محوری نسبت به حالت تثبیت نشده خاک رس خالص افزایش می‌یابد. نتایج بدست آمده حاصل از آزمایش تک محوری با توجه به مکانیسم رفتاری و تغییری که در ساختار و بافت خاک تثبیت شده بوجود آورده و در نتایج حاصل از آزمایش تراکم مشاهده شده قابل تایید می‌باشد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.1.0]



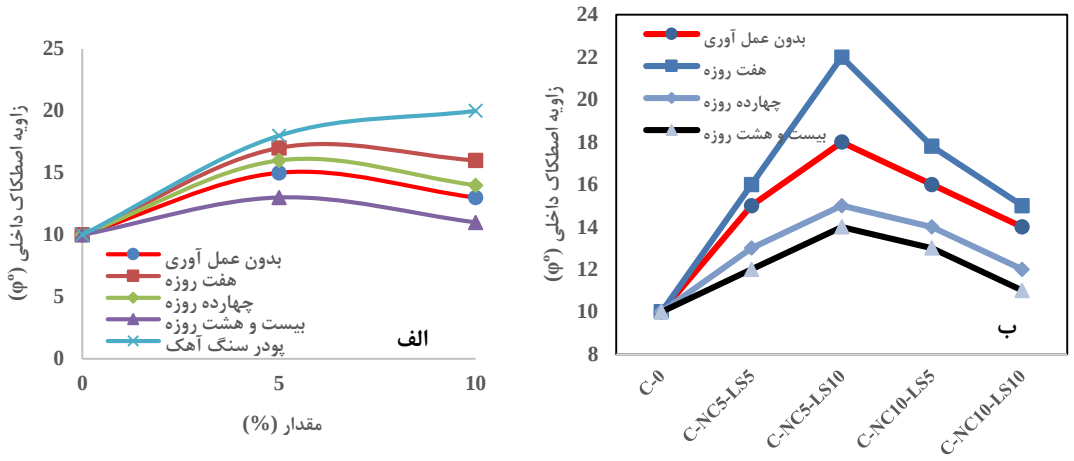
شکل ۸: تاثیر نانو رس و پودر سنگ آهک بر روی کرنش محوری در لحظه گسیختگی خاک رس مورد مطالعه، الف- بطور جداگانه، ب- بطور همزمان.

٥-٤- نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم

به منظور بررسی تأثیر نانو رس و پودر سنگ آهک بر روی پارامترهای ژئوتکنیکی و مقاومتی خاک رس مورد مطالعه، آزمون برش مستقیم تحت تنش‌های قائم ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع انجام گرفت. تغییرات میزان زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های تثبیت شده در شکل (۹-الف و ب) را می توان مشاهده نمود. در شکل(۹-الف) دیده می‌شود زاویه اصطکاک داخلی نمونه خاک رس زمانی که عمل آوری انجام نیافته با افزودن ۵٪ نانورس به مقدار ۵۰٪ نسبت به رس خالص افزایش می‌یابد. بعد از آنکه عمل آوری بر روی نمونه‌ها تثبیت شده صورت گرفت مشاهده می‌شود افزودن ۵٪ نانو رس در مدت زمان عمل آوری ۷ روزه سبب افزایش زاویه اصطکاک داخلی به مقدار ۷۵٪ نسبت به رس خالص شده است و نتایج بدست آمده مشابه با مطالعات انجام یافته توسط Niazian and Mohammadian [۱۰] می باشد. همچنین افزایش پودر سنگ آهک به طور قابل توجه باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی به مقدار ۸۰٪ برابر نسبت به حالت تثبیت نشده گردیده است. نمودارهای شکل (۹-ب) نشان می‌دهند مخلوط همزمان پودر سنگ آهک و نانو رس به همراه عمل آوری باعث تغییر در میزان زاویه اصطکاک داخلی نمونه های خاک رس تثبیت شده است. در شرایطی عدم عمل آوری، افزودن ۵٪ نانو رس به همراه ۱۰٪ پودر سنگ آهک زاویه اصطکاک داخلی را به مقدار ٦۰٪ افزایش داده است. با انجام عملیات عمل آوری مشاهده شد، بعد از ۷ روز ترکیب نانورس و پودر سنگ آهک باعث افزایش قابل توجه زاویه اصطکاک داخلی به مقدار ۱/۲ برابر شده است. اگرچه با افزایش مدت زمان های عمل آوری دیده شد همان مخلوط مشابه مقدار زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های تثبیت شده را افزایش داده ولی نسبت به حالت عمل آوری نشده مقادیر کمتری را ارائه نموده است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان بیان نمود، ذرات نانو رس با توجه به پایه غیر خمیری با قرارگیری در بین ذرات رس سبب لغزش راحت گردیده بطوری که با افزایش حضور آنها زاویه اصطکاک داخلی در نمونه مخلوط کاهش می‌یابد و حتی این روند با افزایش مدت زمان عمل آوری ١٤ و ٢٨ روزه تشدید می‌شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.1.0]

از سوی دیگر، افزودن ذرات سنگ آهک بدلیل درشت بودن ذرات نسبت به خاک رس با افزایش حضور باعث بالا رفتن میزان زاویه اصطکاک داخلی در نمونه مخلوط گردیده است. زمانی که ۵ ٪ نانو رس و ۱۰ ٪ پودر سنگ آهک بطور همزمان به خاک رس افزوده می‌شوند واکنش پوزولانی بین ذرات سنگ آهک و خاک رس بعد از مدت زمان عمل آوری ۷ روزه باعث بوجود آمدن ذرات درشت تر و یک اسکلت قوی بین ذرات تازه تشکیل یافته شده است که نتیجه آن بالا رفتن محسوس زاویه اصطکاک داخلی شده است. اگرچه، با افزایش مدت زمان عمل آوری و حضور ذرات نانو رس بر پایه غیر خمیری سبب کاهش نسبی در زاویه اصطکاک داخلی نمونه مخلوط گردیده است.

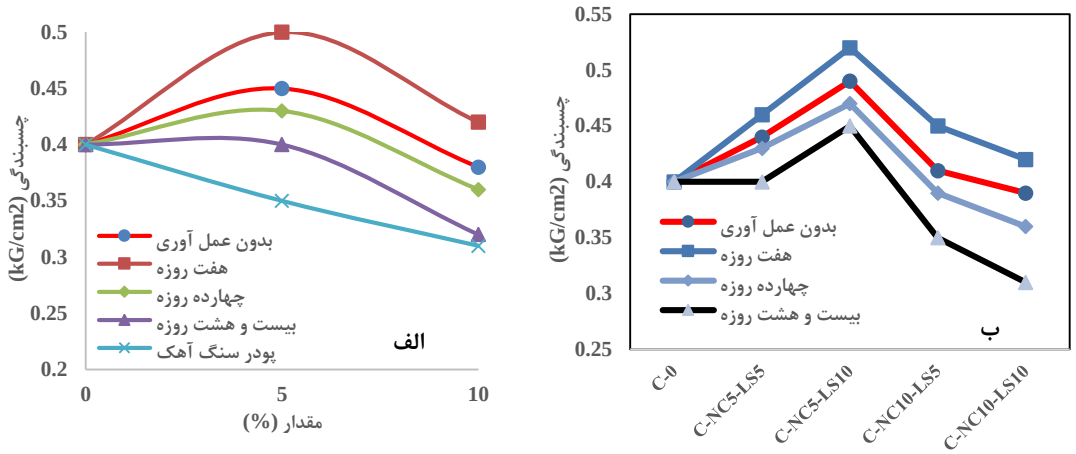


شکل ۹: تاثیر نانو رس و پودر سنگ آهک بر روی زاویه اصطکاک داخلی خاک رس مورد مطالعه، الف- بطور جداگانه، ب- بطور همزمان.

تغییرات چسبندگی نمونه‌های خاک رس تثبیت شده با پودر سنگ آهک و نانورس در شکل (۱۰-الف و ب) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۰-الف) دیده می‌شود در شرایط عدم عمل آوری، افزودن ۵٪ نانورس باعث بهبود چسبندگی به مقدار ۱۲/۵ ٪ می‌شود. هنگامی که عمل آوری بر روی نمونه‌های بهسازی شده با نانورس انجام گرفت مشاهده شد، نمونه خاک رسی حاوی ۵٪ نانو رس با مدت زمان عمل آوری ۷ روزه میزان چسبندگی خاک را به طور قابل ملاحظه به مقدار ۲۵ ٪ افزایش داده است که Niazian and Mohammadi [۱۰] نیز همین روند را مشاهده نمودند. البته طبق شکل (۱۰-الف) دیده می‌شود افزایش درصد پودر سنگ آهک باعث کاهش چسبندگی نمونه تثبیت شده گردیده است. بطوری که میزان چسبندگی بطور میانگین به مقدار ۱۷/۵ درصد نسبت به خاک رسی خالص کاهش یافته است. ترکیب نانو رس و پودر سنگ آهک به همراه عمل آوری بر روی پارامتر ژئوتکنیکی چسبندگی می‌تواند تاثیر گذار باشد. مطابق شکل (۱۰-ب) در حالت عمل آوری نشده، مخلوط ۵٪ نانو رس به همراه ۱۰٪ پودر سنگ آهک مقدار چسبندگی خاک را به مقدار ۲۲/۵ درصد افزایش داده است. در صورتی که، با ۷ روز عمل آوری بر روی نمونه خاک رس تثبیت شده با همان مخلوط مشابه مشاهده شد مقدار چسبندگی به مقدار ۳۰٪ نسبت به حالت رس خالص و به مقدار ٦/۱۲ درصد نسبت به حالت تثبیت شده و بدون عمل آوری بهبود یافته است. اگرچه در ادامه مشاهده شد با

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.1.0]

افزایش مدت زمان عمل آوری میزان چسبندگی در نمونه خاک رس بهسازی شده در حالت کلی نسبت به شرایط خالص و عمل آوری نشده کاهش یافته است. نتایج بدست آمده بیان کننده آن است در حالت کلی ذرات نانو رس و پودر سنگ آهک به تنهایی باعث کاهش میزان چسبندگی نمونه مخلوط گردیدند. ولی با مخلوط همزمان ۵ ٪ نانو رس و ۱۰ ٪ پودر سنگ آهک با فرآیند عمل آوری ۷ روزه با توجه به دلایل ذکر شده در بخش گذشته میزان چسبندگی در نمونه تثبیت شده افزایش یافته است.

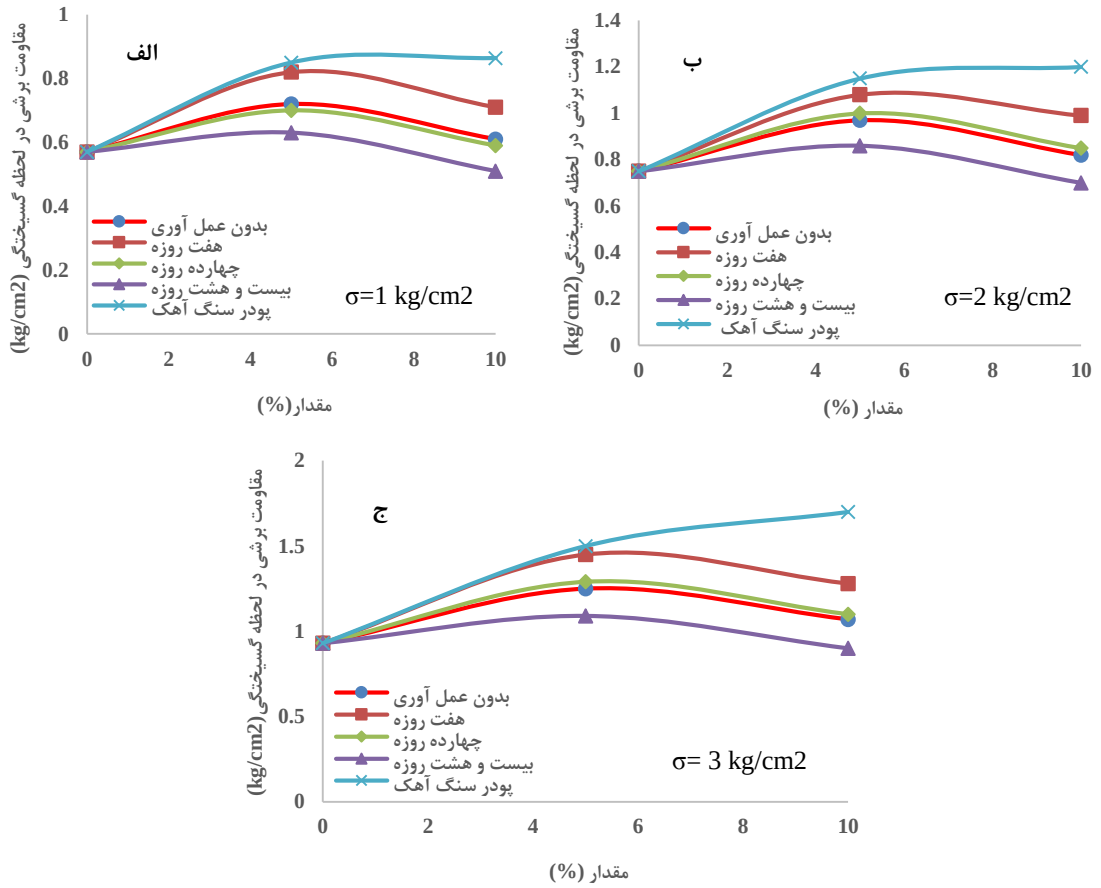


شکل ۱۰: تاثیر نانو رس و پودر سنگ آهک بر روی چسبندگی خاک رس مورد مطالعه، الف- بطور جداگانه، ب- بطور همزمان.

میزان تغییرات مقاومت برشی در لحظه گسیختگی نمونه‌های خاک رس تثبیت شده با نانو رس و پودر سنگ آهک در شکلهای (۱۱-الف، ب و ج) و (۱۲-الف، ب و ج) ارائه شده است. با مشاهده نمودارهای شکل (۱۱- الف، ب و ج) می‌توان دید، در تمامی شرایط عمل آوری و غیر عمل آوری، مقدار ۵٪ نانو رس (مشابه با مطالعه صورت گرفته توسط Niazian and Mohammadi [۱۰]) و ۱۰٪ پودر سنگ آهک بطور جداگانه سبب بهبود و افزایش مقاومت برشی در لحظه گسیختگی نمونه‌های خاکی رس شده است. این روند در تمامی مقادیر تنش های قائم قابل مشاهده می باشد. این میزان افزایش در حالت عمل آوری نشده برای ۵٪ نانو رس بطور میانگین برابر ۳۰٪ و برای پودر سنگ آهک برابر ٦٤/٧ درصد نسبت به خاک رس خالص است.

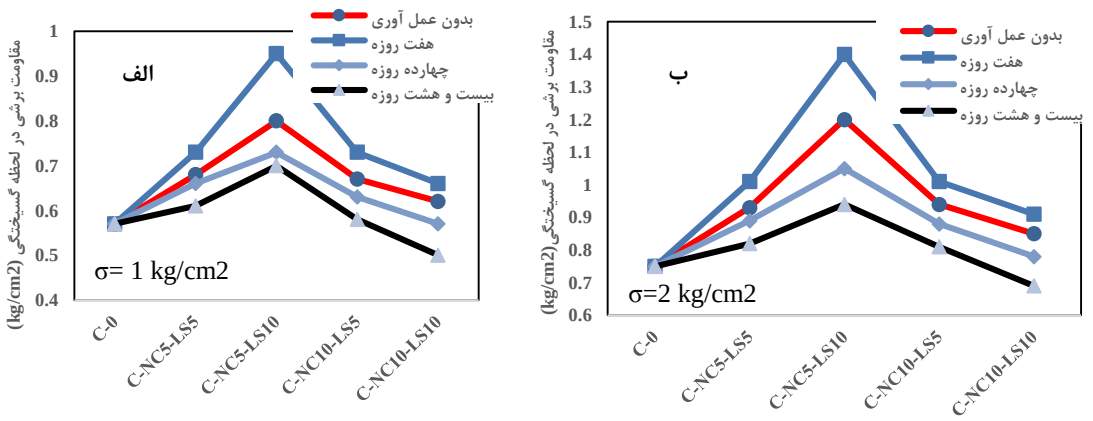
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.1.0]

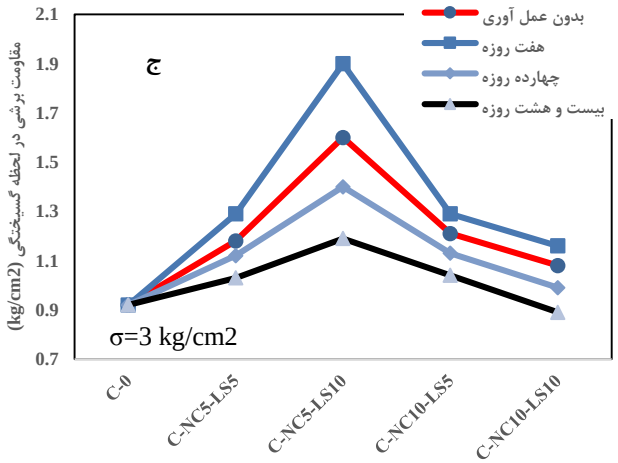


شکل ۱۱: تاثیر نانو رس و پودر سنگ آهک بطور جداگانه بر روی مقاومت برشی در لحظه گسیختگی خاک رسی مورد مطالعه، الف- σ=1 kg/cm^2، ب- σ=2 kg/cm^2، ج- σ=3 kg/cm^2.

مطابق شکل (۱۲-الف، ب و ج) مشاهده می‌شود، مخلوط ۵٪ نانو رس به همراه ۱۰٪ پودر سنگ آهک بر مقاومت برشی در لحظه گسیختگی بطور قابل ملاحظه‌ای تاثیرگذار می‌باشد. بطوری که این مخلوط در دو حالت غیر عمل آوری و عمل آوری ۷ روزه سبب افزایش مقاومت برشی در لحظه گسیختگی به ترتیب بطور میانگین ۵۸ ٪ و ۸۶/۵ درصد نسبت به حالت رس خالص تثبیت نشده گردیده است. این روند بیان کننده بهبود رفتار خاک رس تثبیت شده می‌باشد.



[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.1.0]



شکل ۱۲: تاثیر مخلوط نانو رس و پودر سنگ آهک بر روی مقاومت برشی در لحظه گسیختگی خاک رسی مورد مطالعه، الف- σ=1 kg/cm^2، ب- σ=2 kg/cm^2، ج- σ=3 kg/cm^2

میزان تاثیرگذاری نانو رس و پودر سنگ آهک بر روی میزان افزایش مقاومت برشی در لحظه گسیختگی نمونه‌های خاک رسی تثبیت شده مطابق جدول (٦) است. بر این اساس، هنگامی که ۱۰٪ پودر سنگ آهک به خاک رس افزوده می‌گردد در تمامی مقادیر تنش‌های قائم به طور میانگین ٦٤/٣ درصد میزان مقاومت برشی را نسبت به رس خالص افزایش داده است. در شرایطی که نانو رس اضافه می‌شود و عمل آوری بر روی نمونه‌های تثبیت شده صورت گرفته دیده می‌شود، مخلوط کردن ۵٪ نانو رس به همراه ۷ روز عمل آوری در تمامی تنش‌های قائم بطور میانگین ۳۳٪ مقاومت برشی را افزایش داده است. بنابراین می‌توان نتیجه گیری کرد، پودر سنگ آهک تاثیر بیشتری نسبت به نانو رس در افزایش مقاومت برشی در لحظه گسیختگی دارد.

جدول(٦): میزان تاثیر نانو رس و پودر سنگ آهک بطور جداگانه بر مقاومت برشی در لحظه گسیختگی نمونه-های خاک رس مورد مطالعه در مقایسه با حالت تثبیت نشده

تنش	σ =1 kg/cm2			
مصالح	نانو رس			پودر سنگ آهک
عمل آوری	۷ روزه	١٤ روزه	٢٨ روزه	--
۵	٪٤٣	٪٢٢	٪١٠	٪٤٩
١٠	٪٢٤	٪٣/٥	-٪١٠	٪٥١
تنش	σ =2 kg/cm2			
مصالح	نانو رس			پودر سنگ آهک
عمل آوری	۷ روزه	١٤ روزه	٢٨ روزه	--
۵	٪٤٤	٪٣٣	٪١٥	٪٥٣
١٠	٪٣٢	٪١٣	-٪٦/٦	٪٦٠
تنش	σ =3 kg/cm2			
مصالح	نانو رس			پودر سنگ آهک
عمل آوری	۷ روزه	١٤ روزه	٢٨ روزه	--
۵	٪٥٦	٪٣٨	٪١٧	٪٦١
١٠	٪٣٧	٪١٨	-٪٣/٢	٪٨٢

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.1.0]

از سوی دیگر، هنگامی که پودر سنگ آهک و نانو رس بطور همزمان با خاک رس مخلوط می‌شوند مشاهده گردید که افزودن همزمان ۱۰٪ پودر سنگ آهک به همراه ۵٪ نانو رس به نمونه خاک مورد مطالعه و عمل آوری آن به مدت ۷ روز سبب بهبود مقاومت برشی در لحظه گسیختگی نمونه تثبیت شده به بیشترین میزان گردیده است (جدول ۷). مقاومت برشی در اثر تمامی تنش‌های قائم بطور میانگین به میزان ۸۳/۳ درصد افزایش یافته است. با مقایسه نتایج بدست آمده در جدول‌های (٦) و (۷) می‌توان دریافت مخلوط ۱۰٪ پودر سنگ آهک به همراه ۵٪ نانو رس بالاترین تاثیر را در مقایسه با پودر سنگ آهک و نانو رس به تنهایی دارد.

جدول(۷): میزان تاثیر مخلوط نانو رس و پودر سنگ آهک بطور همزمان بر مقاومت برشی در لحظه گسیختگی نمونه‌های خاک رس مورد مطالعه در مقایسه با حالت تثبیت نشده

تنش	**σ =1 kg/cm2**		
عمل آوری	۷ روزه	١٤ روزه	۲۸ روزه
C-NC5-LS5	٪۲۸	٪۱۵/۷	٪۷
C-NC5-LS10	٪٦٦	٪۲۸	٪۲۲
C-NC10-LS5	٪۲۸	٪۱۰/۵	٪۱
C-NC10-LS10	٪۱٦	٪۰	-٪۱۲
تنش	**σ =2 kg/cm2**		
عمل آوری	۷ روزه	١٤ روزه	۲۸ روزه
C-NC5-LS5	٪۳٤	٪۱۸/٦	٪۹/۳
C-NC5-LS10	٪۸٦	٪٤۰	٪۲۵
C-NC10-LS5	٪۳٤	٪۱۷/۳	٪۸
C-NC10-LS10	٪۲۱	٪٤	-٪۸
تنش	**σ =3 kg/cm2**		
عمل آوری	۷ روزه	١٤ روزه	۲۸ روزه
C-NC5-LS5	٪٤۰	٪۲۱	٪۱۲
C-NC5-LS10	٪۹۸	٪۵۲	٪۲۹
C-NC10-LS5	٪٤۰	٪۲۳	٪۱۳
C-NC10-LS10	٪۲٦	٪۷/٦	-٪۳/۲

در حالت کلی، نتایج بدست آمده را می‌توان بدین ترتیب تفسیر نمود، از یک سو پودر سنگ آهک مانند یک خاک دانه‌ای عمل می‌کنند و می‌توانند بر رفتار ذرات خاک رس تاثیر گذار باشند. البته، اضافه شدن رس یا لای به مصالح دانه‌ای در درصدهای مختلف می‌تواند بطور اساسی رفتار خمیره (ماتریس) مصالح دانه‌ای و رس را تغییر دهد. در شرایطی که ریزدانه موجود نباشد. مصالح دانه‌ای بخوبی با یکدیگر تماس دارند و می‌توانند نیرو را منتقل کنند. هنگامی که میزان درصد ریزدانه افزایش می‌یابد، در این حالت ریزدانه‌ها فضای خالی بین مصالح دانه‌ای را پر می‌کنند و باعث کاهش تخلخل و دانسیته نسبی می‌شوند بدون آنکه در باربری شرکت داشته باشند تا اینکه کاملا فضای خالی بین مصالح دانه‌ای را پر می‌کنند. به این مقدار ریزدانه، ریزدانه حدی می‌گویند. با افزایش مقدار ریزدانه مشاهده می‌گردد که مصالح

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.1.0]

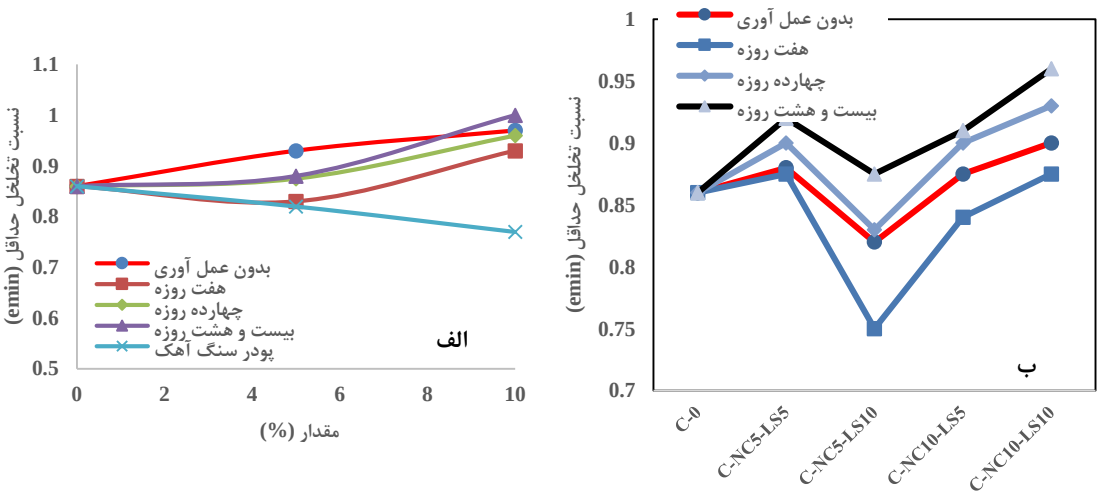
دانه‌ای بیشتر از یکدیگر جدا می‌شوند و ذرات ریزدانه نقش مهمتری را ایفا می‌کنند. قابل ذکر است که مقدار حدی ریزدانه به دانه بندی خاک اصلی و خصوصیات ریزدانه بستگی دارد. در حالتی که ریزدانه‌ها به طور فعال در باربری نقشی ندارند و کاملاً در فضاهای خالی بین مصالح دانه‌ای قرار گرفته‌اند و تخلخل کلی نمونه را کاهش می دهند با افزایش مقدار ریزدانه به تدریج مصالح دانه‌ای را از هم جدا می‌کنند. با در نظر گرفتن حجم دانه های ریز (fc) به عنوان فضای خالی می توان نسبت تخلخل دانه‌ای درشت را بصورت زیر تعیین نمود[۳۵].

$$e_s = \frac{e + fc}{1 - fc} \qquad (۱)$$

در رابطهٔ فوق، e_s نسبت تخلخل دانه‌ای نامیده می شود. در حالتی که دانه های ریز فضای خالی بین دانه‌های درشت را کاملاً پر کرده‌اند بطوری که دانه‌های درشت با یکدیگر تماس ندارند. به عبارت دیگر، دانه‌های درشت به صورت غوطه ور میان دانه‌های ریز قرار دارند و نمی‌توانند با یکدیگر در باربری ماتریس نقش دا شته با شند، بلکه تنها به عنوان انتقال دهنده نیرو بین دانه‌های ریز اطراف خودشان کار می‌کنند. در این شرایط حجم دانه‌های درشت برابر صفر در نظر گرفته می شود. در این حالت پارامتری تحت عنوان نسبت تخلخل بین دانه های ریز قابل معرفی است که با استفاده از رابطه زیر قابل تعیین است:

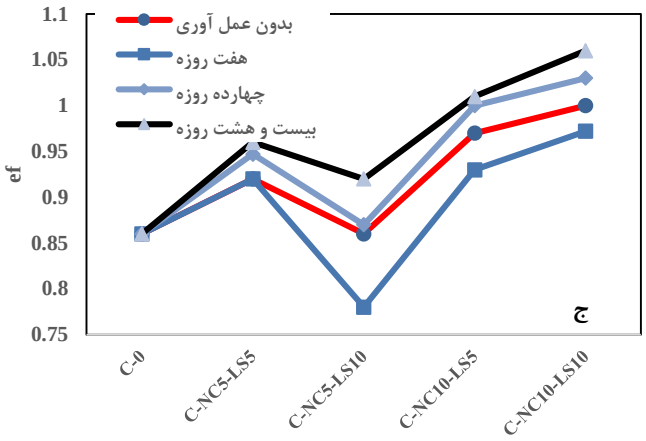
$$e_f = \frac{e}{fc} \qquad (۲)$$

در رابطه فوق، e_f نسبت تخلخل بین دانه‌های ریزدانه نامیده می شود. حال در صورتی که ریزدانه‌های موجود در خاک از جنس رس باشند علاوه بر آنکه به عنوان پرکننده در بافت خاک عمل می‌کند، می‌تواند با القاء چسبندگی به خاک بافت آن را یکپارچه تر سازند. تغییرات ایجاد شده در ساختار و بافت خاک رس برحسب نسبت تخلخل حداقل (e_{min}) و نسبت تخلخل بین دانه‌ای (e_f) در اثر افزودن نانو رس و پودر سنگ آهک و عمل آوری‌های صورت گرفته را طبق نمودارهای شکل (۱۵- الف، ب و ج) مشاهده نمود.



[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.1.0]



شکل ۱۵: تاثیر نانو رس و پودر سنگ آهک بر روی نسبت تخلخل حداقل خاک رس مورد مطالعه، الف- بطور جداگانه، ب- بطور همزمان، ج- تاثیر نانو رس و پودر سنگ آهک بطور همزمان بر نسبت تخلخل بین دانه‌ای (e_f).

همان طور که در شکل (۱۵-الف) دیده می‌شود، خاک رس در شرایط طبیعی خود دارای فضای خالی بالا می‌باشد. زمانی که پودر سنگ آهک افزوده می‌شود، نسبت تخلخل حداقل خاک رس تثبیت شده یک روند کاهشی را طی می‌نماید. به گونه‌ای که حضور ۱۰٪ پودر سنگ آهک سبب کاهش نسبت تخلخل حداقل به میزان ۱۰٪ نسبت به حالت رس خالص می‌گردد. این شرایط بیان کننده آن است که پودر سنگ آهک سبب تغییر ساختار و بافت خاک تثبیت شده به گونه‌ای گردیده که باعث افزایش تراکم پذیری و تماس بیشتر ذرات به یکدیگر، کاهش میزان جذب رطوبت و بهبود توانایی باربری شده است. ولیکن، وقتی نانو رس با خاک رس اضافه شود و در صورتی که عمل آوری انجام نگیرد، با افزایش درصد نانو رس درصد فضای خالی و نسبت تخلخل حداقل افزایش می‌یابد و خاک تثبیت شده سست تر می‌شود. این شرایط بیان کننده آن است اگر فرصتی برای بوجود آمدن واکنش شیمیایی بین عناصر موجود در خاک رس و نانو رس داده نشود، تغییرات مناسب در جهت افزایش توانایی باربری روی نخواهد و به گونه‌ای که مشاهده گردید حتی سبب افزایش خاصیت خمیری می‌گردد. از سوی دیگر، زمانی که عمل آوری به دلیل عناصر مستعد موجود در خاک رس جهت انجام واکنش سمنتاسیون و پوزولان در نمونه‌های خاکی مخلوط رس و نانو رس صورت می‌گیرد، دیده می‌شود مدت زمان ۷ روز عمل آوری در دمای محیط بیشترین تاثیر در کاهش فضای خالی بین ذرات و تغییر ساختار خاک رسی تثبیت شده را دارد. بطوری که افزودن ۵٪ نانو رس به خاک مورد مطالعه میزان فضای خالی بین ذرات رو به مقدار ۳٪ کاهش می‌دهد. اگر چه با افزایش مدت زمان عمل آوری، حضور نانو رس سبب بالا رفتن فضای خالی بین ذرات خاک و سست شدن ساختار خاک مورد مطالعه می‌گردد. به بیان دیگر، بالا رفتن مدت زمان باربری در جهت تثبیت خاک ریزدانه با نانو رس مناسب نمی باشد. با مقایسه این شرایط می‌توان اشاره کرد، پودر سنگ آهک نسبت به نانو رس دارای تاثیر بسزایی در کاهش فضای خالی بین ذرات و درنتیجه بالا رفتن توانایی باربری خاک رس تثبیت شده دارد. زمانی که نانو رس و پودر سنگ آهک بطور هم زمان با خاک رس مخلوط می‌شود و عمل آوری برروی آنها انجام می‌یابد بدلیل واکنش تجمع- تراکم آنی و سمنتاسیون (پوزولان) بین پودر سنگ آهک و خاک رس در اثر فرآیند عمل آوری ۷ روزه باعث بوجود آوردن تشکیل یک ساختار و بافت جدید با ذرات درشت تر و یک استخوان

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.1.0]

بندی قوی بوجود آورده است. تغییرات نسبت تخلخل حداقل و نسبت تخلخل بین دانه‌ای بوجود آمده در نمونه‌های خاکی تثبیت شده را می‌توان در شکل‌های (۱۵–ب وج) مشاهده نمود. مشابه به حالت قبل، زمانی که عمل آوری انجام نمی‌گیرد، افزودن همزمان ۵٪ نانو رس و ۱۰٪ پودر سنگ آهک سبب کاهش فضای خالی بین ذرات به میزان ۳/٤ درصد می‌گردد. لیکن، زمانی که عمل آوری بر روی نمونه‌های خاکی بهسازی شده مورد انجام می‌گیرد، می‌توان دید که ۷ روز عمل آوری برای نمونه تثبیت شده با ۵٪ نانو رس و ۱۰٪ پودر سنگ آهک سبب کاهش قابل ملاحظه فضای خالی بین ذرات به مقدار ۱۳٪ شده است. این شرایط بیان کننده آن است ذرات نانو رس یک سطح تماس لغزش مناسبی را برای ساختار جدید ایجاد شده بوجود می آورد. این روند سبب تراکم پذیری بیشتر بین ذرات تازه تشکیل یافته شده است که این روند بطور کامل در شکل (۱۵–ج) قابل مشاهده است.

٦- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به این که گستره‌ای وسیعی از شهر تبریز بر روی خاک‌های رس واقع شده است، هدف اصلی در تحقیق حاضر امکان تثبیت خاک‌های رسی با استفاده از مخلوط نانو رس و پودر سنگ آهک از دیدگاه بهبود ظرفیت باربری و کاهش تغییر شکل پذیری می‌باشد. نتایج مطالعه نشان می‌دهد بهینه ترین حالت ترکیب ۵ ٪ نانورس با ۱۰ ٪ پودر سنگ آهک با مدت زمان عمل آوری ۷ روزه در شرایط دمای محیط می‌باشد. دلایل آن را می‌توان بصورت زیر بیان نمود:

الف– نانو رس و پودر سنگ آهک بر خصوصیات خمیری خاک رس اثر گذار است. مخلوط همزمان ۵ ٪ نانو رس و ۱۰ ٪ پودر سنگ آهک به همراه عمل آوری به مدت ۷ روز سبب کاهش شاخص خمیری به مقدار ۷۲ ٪ نسبت به خاک رس شده است. در همان شرایط، مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر به مقدار ۳/۲۹ درصد افزایش یافته و باعث کاهش میزان رطوبت بهینه به مقدار ۲۲٪ نسبت به رس خالص شده است.

ب– ترکیب ذکر شده با همان فرآیند و مدت زمان عمل آوری، میزان مقاومت فشاری در لحظه گسیختگی در نمونه تثبیت شده به میزان ۲/۹ برابر افزایش داده و باعث رفتار ترد و شکننده شده و کمترین میزان کرنش محوری در نمونه تثبیت شده ایجاد می‌نماید.

ج– مخلوط بهینه سبب شده است زاویه اصطکاک داخلی در نمونه خاک رس تثبیت شده به مقدار ۱/۲ برابر افزایش یافته و پارامتر چسبندگی به مقدار ۳۰٪ نسبت به حالت رس خالص و به مقدار ٦/۱۲ درصد نسبت به حالت تثبیت نشده و بدون عمل آوری بهبود یافته است.

با توجه به نتایج به دست آمده ترکیب همزمان نانو رس و پودر سنگ آهک همراه عمل آوری در زمان مناسب جهت بهسازی رفتار خاک رس مناسب می‌باشد. با توجه به نوع کانی‌های موجود در خاک رس امکان ایجاد واکنش پوزولانی در اثر افزودن پودر سنگ آهک موجود بوده و باعث بهبود ساختار، بافت خاک و استخوان بندی قوی بین ذرات تازه تشکیل یافته می‌شود. از سوی دیگر، وجود ذرات نانو رس با پایه غیر خمیری در مقدار محدود باعث بوجود آمدن یک سطح تماس مناسب بمنظور نزدیک ذرات به یکدیگر و کاهش فضای خالی بین آنها می شود که نتیجه این دو روند بهبود نسبی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس می‌باشد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.1.0]

۷- منابع

1. Noll M. R.; Bartlett C.; Dochat T. M.; “In Situ Permeability Reduction and Chemical Fixation Using Colloidal Silica”, National Outdoor Action Conference, Las Vegas, NV, p.443– 57, 1992.

2.Yonekura R.; Miwa M.; “Fundamental Properties of Sodium Silicate Based Grout”, Geotechnical Conference, Singapore, p.439–449, 1993.

۳. مرادی، غ.، سیدی، ش. "*ارزیابی تغییرات ریزساختاری و پارامترهای مقاومتی ماسه‌های سیلتی تثبیت شده با نانو کلوئید سیلیکا* " ، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، جلد ٤٦، شماره ٤، زمستان ۱۳۹۵، ص ۷۷-۹۰، (۱۳۹۵)

4. Kakavand A.; Dabiri R.; “Experimental study of applying colloidal Nano Silica in improving sand-silt mixtures”, International Journal of Nano Dimension, Vol.9, No.4, p.357-373, 2018.

۵. پورواحدی، و.، پور احمدی، و. و عربانی، م. " *مطالعه آزمایشگاهی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رسی تثبیت شده با ذرات نانو* " ، اولین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، دانشگاه شهید رجایی، تهران، ایران، ص ۱-۸، (۱۳۹۳).

٦. بهاری، م.، شاه نظری، ع. " *بررسی آزمایشگاهی تثبیت بستر خاکی ریزدانه با استفاده از نانو رس* " ، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال ۱۹، شماره ۷۲، ص ۱۰۷-۱۱۳، (۱۳۹٤).

۷. فخری، ز.، پورحسینی اردکانی، ر. و عبادی، ت. " *بهبود خواص هیدرولیکی خاک رس کائولینیت با افزودن نانو رس* " ، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی عمران و محیط زیست امیرکبیر، دوره ٤۷، شماره ۳، ص ۳۷-٤٤، (۱۳۹٤).

۸. عباسی، ن.، فرجاد، آ. " *بررسی امکان استفاده از نانو ذرات رس برای کنترل پتانسیل واگرایی خاکهای رسی* " ، تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ٤۸، شماره ۳، مهر و آبان ۱۳۹٦، ص ۵۱۵-۵۲٤، (۱۳۹٦)

9. Taha M. R.; Taha O. M. E.; “Influence of Nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior”, Journal of Nanoparticle Research, Vol.14, No.10, p.1190, 2012.

10. Mohammadi M.; Niazian M.; “Investigation of Nano-clay effect on geotechnical properties of Rasht clay”, International Journal of Advanced Scientific and Technical Research, Vol.3, No.3, p.37-46, 2013.

11. Chi Sun P.; Dixon C.; “Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick”, Construction and Building Materials, Vol.20, p.569-577, 2006.

12. Akash R.; Kumar N. J.; Sudhir M.; “Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete”, Resources Conservation and Recycling, Vol.50, p.71-81, 2007.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.1.0]

13. Rockliff D.; “European standards for unbound mixtures – A status report”, unbound aggregates in road construction, A. R. Dawson editor, Balkema A. A. Pub. , Proceedings of the 5th International Symposium on Unbound Aggregates in Roads (UNBAR 5), Nottingham, U. K., 2000.

14. Kazmee H.; Tutumluer E.; “Evaluation of Aggregate Subgrade Materials used As Pavement Subgrade/Granular Sub base”, Research Report FHWA-ICT-15-013, University of Illinois Urbana, Champaign, 2015.

15. Ahmed A.; Ugai K.; Kamei T.; “Investigation of Recycled Gypsum in Conjunction with Waste Plastic Trays for Ground Improvement”, Journal of Construction and Building Materials, Vol.25, No.1, p.208–217, 2011.

16. Ahmed A.; Ugai K.; Kamei T.; “Application of Gypsum Waste Plasterboard and Waste Plastic Trays to Enhance the Performance of Sandy Soil”, Proceedings of Geo-Shanghai 2010 International Conference, Shanghai, China, No.207, p.165–173, 2010.

17. Demirel B.; “The Effect of the Using Waste Marble Dust as Fine Sand on the Mechanical Properties of the Concrete”, International Journal of the Physical Sciences, Vol. 5, No.9, p.1372–1380, 2010.

18. Bolouri Bazaz J.; Zanjani M. M.; “Evaluation of Construction Waste Material Strength for using in Pavement”, Journal of Transportation Research, Vol.7, No.2, p.119-133, 2010.

۱۹. آین، و.، نصرآزادانی، م.، خاوندی، ع. ، امین فر، م. و علیزاده صومعه، ج. "*بررسی آزمایشگاهی استفاده از بتن بازیافت شده در لایه زیراساس روسازی راه*"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد ٤٤، شماره ٤، زمستان ۱۳۹۳، ص. ۱-۱۳، (۱۳۹۳)

20. Bandra N.; Binoy T. H.; Aboujrad H. S.; Sato J.; “Pavement Subgrade Stabilization using Recycled Materials”, Proceeding Airfield and Highway Pavements conference, Florida University, ASCE, pp.605-616, 2015.

۲۱. روح‌بخشان، آ.، کلانتری، ب. "*تثبیت خاک رس با آهک و پودر ضایعات سنگی*"، نشریه علمی- پژوهشی امیرکبیر، مهندسی عمران و محیط زیست، دوره ٤٨، شماره ٤، زمستان ۱۳۹۵، ص ٤۲۹-٤۳۸، (۱۳۹۵).

۲۲. محمدی، غ.، دبیری، ر. "*مطالعه کاربرد سنگدانه های آجر رسی در بهسازی لایه های روسازی راه*"، نشریه جاده، در مرحله چاپ، (۱۳۹۷).

23. Lan T.; Kaviratna P. D.; “Mechanism of clay tactoid exfoliation in epoxy-clay Nano

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.1.0]

composites", Chemistry Master, pp. 2144-2150, 1995.

24. Kava Sanat Payvar Company, www.kavasanat.ir.

25. ASTM D421-85; "Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants", Annual book of ASTM standards, 1985.

26. ASTM D422-63; "Standard Test Method for article-Size Analysis of Soils", Annual book of ASTM standards; 1963.

27. ASTM D 4318-95a; "Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index for soils", Annual book of ASTM standards; 1995.

28. ASTM D 854-02; "Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer", Annual book of ASTM standards; 2002.

29. ASTM-D 4972; "Standard test method for PH of soils", Annual book of ASTM standards, 1995.

30. ASTM C618-01; "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolana for Use as Mineral Admixture", Annual book of ASTM standards, 2001.

31. ASTM C305-14; "Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency". Annual book of ASTM standards, 2016.

32. ASTM-D 698-00; "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3))", Annual book of ASTM standards, 2000.

33. ASTM D2166-16; "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil", Annual book of ASTM standards; 2016.

34. ASTM D3080-11; "Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions", Annual book of ASTM standards, 2011.

۳۵. اسلامی تبار، ف.، دبیری، ر. "*تاثیر جانمایی ژئوگرید در بهسازی خاک مخلوط ماسه-رس جهت استفاده در لایه‌های روسازی*" ، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال نهم، ویژه نامه روسازی، زمستان ۱۳۹۶، ص ۴۳-۶۷، (۱۳۹۶).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.1.0]