فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۲، شماره ۳، بهار ۱٤۰۰ ، ۵۸۷-٦۰۸

مقاله پژوهشی

# تاثیر کاربرد ذرات نانو رس و الیاف پلی پروپیلن بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس جهت استفاده در لایه‌های روسازی راه

سبا غفاری، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.

روزبه دبیری (نویسنده مسئول)، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.

E-mail: rouzbeh_dabiri@iaut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۲۲ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۲٤

## چکیده

*در صورتیکه طرح مسیر راه بگونه‌ای ارائه شده باشد که از مناطقی با لایه‌های خاکی ضعیف و مساله‌دار عبور نماید یا منابع قرضه در فاصله دور از محدوده اجرای پروژه باشد، جهت ساخت لایه‌های روسازی راه و بویژه لایه خاک بستر که بعنوان پی بدنه راه موسوم است بایستی عملیات تثبیت انجام گیرد. روش‌های تثبیت خاک عموما به دو بخش شیمیایی و فیزیکی تقسیم می‌گردد و از مصالح ژئوسنتتیک نیز بدین منظور استفاده می‌شود. امروزه از مواد با اندازه نانو نیز جهت بهسازی خصوصیات ژئوتکنیکی و مقاومتی خاک بهره گرفته می‌شود. هدف از تحقیق حاضر، امکان کاربرد مخلوط ذرات نانو رس و الیاف پلی پروپیلن در خاک رس منطقه جزیره اسلامی در نزدیکی دریاچه ارومیه جهت ساخت لایه‌های روسازی در بدنه راه است. در مرحله اول، ذرات نانو رس با درصدهای ۵ و ۱۰ درصد با خاک مورد مطالعه افزوده شده و عمل آوری به مدت‌های ۷، ۱٤ و ۲۸ روز انجام گرفته است. در مرحله دوم، الیاف پلی پروپیلن با درصدهای ۰/٤، ۰/۸ و ۱/٦ با خاک رس مخلوط گردیده است. در مرحله سوم، مقدار بهینه الیاف پلی پروپیلن با ذرات نانو رس مخلوط شده و سپس به نمونه خاک مورد مطالعه اضافه گردیدند و فرایند عمل آوری مشابه مرحله اول تکرار شده است. جهت انجام تحقیق از آزمون‌های آزمایشگاهی تراکم، تک محوری، برش مستقیم و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) در دو حالت خشک و اشباع براساس استاندارد ASTM استفاده گردیده و میزان درصد تورم در نمونه‌های اشباع اندازه گیری شده است. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد حالت بهینه، ترکیب ۵ درصد نانو رس به همراه ۰/۸ درصد الیاف پلی پروپیلن با مدت زمان عمل آوری ۲۸ روزه است. زیرا این شرایط باعث بهبود شرایط تراکم پذیری، افزایش توانایی باربری، مقاومت برشی و کاهش میزان تورم و افزایش حجم در مصالح بهسازی شده گردیده است.*

**واژه‌های کلیدی**: رس، نانو رس، روسازی راه، الیاف پلی‌پروپیلن، لایه خاک بستر.

## ۱. مقدمه

رو سازی راهها به عنوان بخشی از سازه راه نقش بسیار مهمی در عملکرد و تأمین سطح هموار و ایمن دارد. بنابراین ساخت روسازی‌های با قابلیت باربری و عمر بالا و کیفیت مناسب و نیز نگهداری آنها در شرایط عملکردی مناسب از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در صورتیکه مصالح مناسب برای ساخت لایه‌های بدنه روسازی راه در دسترس نباشد، در آن صورت بایستی مصالح موجود در محدوده اجرای راه را تثبیت نمود. روش‌های مختلفی برای این منظور موجود می‌باشند که شامل روش‌های مکانیکی، شیمیایی هستند. امروزه پیشنهاد می‌شود از مصالح برپایه ذرات نانو[1] استفاده گردد. از سوی دیگر کاربرد مصالح ژئوسنتتیک[2] با توجه به توانایی باربری بالا و مقاومت آنها در برابر شرایط خورندگی محیط و فساد ناپذیری آنها، به عنوان ابزاری جهت تثبیت و بهبود خصوصیات فنی مصالح لایه‌های رو سازی راه، راه آهن و حتی بستر خاک زیر پی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. مصالحی همچون الیاف پلی پروپیلن[3]، الیاف شیشه[4]، ژئوتکستایل[5]، ژئوگرید[6] و ژئوفوم‌ها[7] جزء مصالح ژئوسنتتیک هستند که در کارهای عمرانی بهره گرفته می‌شود. هدف اصلی در تحقیق حاضر، بررسی امکان کاربرد ذرات نانو رس و الیاف پلی‌پروپیلن در تثبیت خاک ریزدانه رسی جهت کاربرد در ساخت لایه‌های رو سازی در بدنه راه و ابنیه‌های ژئوتکنیکی مرتبط با آن است.. در ادامه به مرور ادبیات فنی در زمینه تحقیق پرداخته شده و سپس مراحل مطالعات انجام یافته بیان گردیده است.

## ۲. مرور مطالعات گذشته

چنانکه مشخص است بدنه راه از چهار بخش رویه آسفالت، لایه اساس، لایه زیراساس و خاک بستر تشکیل شده است. اگر در محدوده اجرای بدنه راه و لایه خاک بستر مصالح با کیفیت مناسب موجود نباشد و یا منابع قرضه در فاصله‌ای دور نسبت به محل اجرای پروژه قرار گرفته باشد که سبب افزایش هزینه مصرفی در اجرای راه گردد و یا در صورتیکه امکان تغییر مسیر و طرح هندسی راه موجود نباشد در آن موقع بایستی مصالح موجود را جهت ساخت لایه‌های روسازی تثبیت و اصلاح نمود. روش‌های موجود جهت تثبیت و بهسازی خاک را می‌توان به دو بخش کلی شیمیایی و مکانیکی تقسیم بندی نمود. انتخاب روشهای موجود جهت بهسازی خاک تابع پارامترهای مختلفی همچون نوع خاک، ساختار دانه بندی خاک، مهارت، نوع تجهیزات، مواد مصرفی و هزینه اجرای آنها است. انجمن اداره راه و ترابری آمریکا در سال ۲۰۱۷ [FHWA, 2017]، روش-های مختلف بهسازی خاکها به همراه هزینه اجرای طبق جدول(۱)، ارائه نموده است.

**جدول ۱. مقایسه هزینه های روش های بهسازی خاک [FHWA, 2017].**

| هزینه (دلار) | تکنولوژی | طبقه بندی |
|---|---|---|
| ۰/۵-٤ (هر یک فوت) | پیش بارگذاری، همراه و یا بدون خاکریز | **زهکشی قائم و تحکیم شتاب داده شده** |
| ۷۵-۱۵۰(هر یارد مکعب) | خاکریز با مقاومت فشاری، ژئوفوم، بتن فومی | **خاکریزهای سبک** |
| ۳-۱۵ (هر یارد مکعب) | خاکریزی با مصالح دانه ای، الیاف چوب، سرباره کوره فولاد، خاکستر بادی، الیاف تایر، شیست خاک رسی | **خاکریزی های سبک** |
| ۱۰-۳۰ (هر یارد مکعب) | تراکم دینامیکی عمیق | **تراکم عمیق** |

| | | |
|---|---|---|
| ۵-۹ (هر یک فوت) | تراکم ویبره ای | **تراکم عمیق** |
| ۱۵-۶۰ (هر فوت) | ستون های سنگی | **ستون های مصالح دانه ای** |
| ۹(برای هر فوت مربع)+ هزینه اجرای ستون | خاکریز های تقویت شده با ستون | **خاکریز های تقویت شده با ستون** |
| ۳۰-۸۰ (هر فوت) | ستون ها: غیر فشرده | **خاکریز های تقویت شده با ستون** |
| ۲۰-۱۰۰(هر فوت) | ستون ها: غیر فشرده | **خاکریز های تقویت شده با ستون** |
| ۶۰-۱۲۵ (هر فوت) | مخلوط عمیق (خشک) | **خاک مخلوط** |
| ۱۵-۷۵ (هر یارد مکعب) | اختلاط توده ای | **خاک مخلوط** |
| ۲۰ (هر فوت) | تزریق شیمیایی | **تکنولوژی تزریق** |
| ۷۵-۷۵۰ (هر یارد مکعب) | تزریق به همراه تراکم | **تکنولوژی تزریق** |
| ۵۰-۱۵(هر یارد مکعب) | پر کردن فضاهای خالی | **تکنولوژی تزریق** |
| ۶/۵-۹/۵ (هر فوت مربع) | تثبیت کف | **تکنولوژی تزریق** |
| ۲۵۰-۷۵۰ (هر یارد مکعب) | تزریق جت | **تکنولوژی تزریق** |
| ۲۵-۸۰ (فوت مربع) | تزریق ترک های سنگ | **تکنولوژی تزریق** |
| ۱-۵ (هر یارد مربع) | روش های مکانیکی | **روش های بهسازی روسازی راه** |
| ۲-۵ (هر یارد مربع) | روش های شیمیایی | **روش های بهسازی روسازی راه** |
| ۳-۱۲ (هر فوت) | کنترل رطوبت | **روش های بهسازی روسازی راه** |
| ۲-۱۲ (هر یارد مربع) | خاکریز مسلح | **خاک مسلح** |
| ۳۰-۶۵ (هر فوت مربع) | دیوارهای مسلح انعطاف پذیر | **خاک مسلح** |
| ۳-۲۵(هر فوت مربع) | شیبهای خاکی مسلح شده | **خاک مسلح** |
| ۲۰-۵۰ (هر فوت) | میخکوبی | **خاک مسلح** |

اگرچه امروزه همزمان با دو روش مذکور از مصالح ژئوسنتتیک نیز استفاده می‌گردد. یکی از افزودنی‌های شیمیایی مورد استفاده جهت تثبیت مصالح خاکی ذرات نانو است. مطالعات گسترده‌ای در زمینه اثر نانو ذرات در بهبود پارامترهای مقاومتی خاک صورت گرفته است. نول و همکاران در سال ۱۹۹۲ اثر نانو ذرات سیلیکا را در جهت کاهش نفوذپذیری خاک‌های ماسه‌ای مطالعه نمودند [Noll, Bartlett and Dochat, 1992]. در سال ۱۹۹۳ یونه کورا و میوا با تزریق ذرات نانو سیلیس[۸] مقاومت فشاری و توانایی باربری خاک ماسه‌ای را افزایش دادند[Yonekura and Miwa, 1993]. مرادی و سیدی در سال ۲۰۱۷ و کاکاوند و دبیری 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 [Moradi and Seyedi, 2017; Kakavand and Dabiri;2018]. نانو رس، در واقع 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[Lan and Kaviratna, 1995]. در زمینه کاربرد نانو رس[۹] بمنظور تثبیت خاک‌های ریزدانه، طاها و طاها مشاهده کردند که نانو رس، وزن مخصوص خشک حداکثر خاک را تا حدودی افزایش می‌دهد [Taha and Taha, 2012]. نتایج تحقیقات محمدی و نیازیان نشان داد که افزودن نانو رس به خاک رسی ، موجب افزایش مقاومت برشی ، حد روانی و حد خمیری خاک می‌شود [Mohammadi and Niazian, 2013]. پور واحدی و همکاران در سال ۲۰۱٤ مشاهده نمودند با افزایش نانو رس حد روانی و حد خمیری خاک افزایش می‌یابد [Pourvahedi, Pour Ahmadi andArabani, 2014]. بهاری و شاه نظری در سال ۲۰۱۵ خواص فیزیکی و ژئوتکنیکی خاکهای لای‌دار از نوع MH و ML تثبیت شده با ذرات 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 خاکهای لای دار شده است [Bahari and Shahnazari, 2015]. فخری و همکاران در سال ۲۰۱۵، با افزودن نانو رس خواص هیدورلیکی خاک رس کائولن رو مطالعه نمودند. ایشان مشاهده کردند که با افزودن ۸ ٪ نانو رس به خاک رس کائولن دامنه خمیری و ضریب نفوذپذیری بترتیب ۱۸٤ ٪ افزایش و ۳۰۰ برابر کاهش یافت [Fakhri, Pourhoseini and Ebadi, 2015]. عباسی و فرجاد در سال ۲۰۱۷، اثر ذرات نانو رس را بر روی میزان پتانسیل واگرایی خاک‌های رسی مطالعه نمودند. نتایج نشان دادند که افزودن نانورس به خاک رس واگرا به طور کلی موجب کاهش پتانسیل واگرایی خاک می‌گردد. [Abbasi and Farjad, 2017]. با در نظر گرفتن مطالعات صورت گرفته و جدول (۱) می توان نتیجه گیری نمود کاربرد ذرات نانو و بویژه نانو رس در جهت تثبیت خاکهای رسی از دیدگاه اقتصادی مناسب می باشد. اگرچه آسیاب‌هایی در مقیاس آزمایشگاهی موجود است که می تواند از دانه‌های ریز خاک رس طبیعی، ذرات نانو رس تهیه نمود. امید است در آینده با تولید این نوع دستگاهها در مقیاس صنعتی از میزان قیمت نانو رس های صنعتی بطور جدی کاسته شود.

از سوی دیگر، مصالح ژئوسنتتیک به منظور اصلاح و بهسازی توانایی باربری خاکها و لایه های روسازی راه مطالعات گسترده-ای انجام شده است. به عنوان نمونه به مطالعات آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته توسط محقیق مختلف همچون [Latha and Murthy, 2007; Naeinie and Mirzakhanlari, 2008; Khabiri, 2011; Senthil and Rajkumar, 2012; Sadeghi and Dabiri, 2015; Nazari and Dabiri, 2016; Ghasemvash and Dabiri, 2017] اشاره نمود.

نائینی و ضیایی موید در سال ۲۰۰۹، دهول و همکاران در سال ۲۰۱۱ و اسلامی تبار و دبیری در سال ۲۰۱۷ در تحقیقات خود از لایه ژئوگرید برای بهسازی خاکهای رسی نرم، مخلوط خاک ماسه و رس در حالت اشباع و غیر اشباع جهت کاربرد در بدنه راه بهره گرفتند و مشاهده نمودند شاخص خمیری، تعداد لایه‌های ژئوگرید و نحوه قرارگیری آنها در مصالح بر روی میزان توانایی باربری آنها می‌تواند تاثیر گذار باشد. [Naenie and Moayed, 2009; Dhule et al, 2011; Eslami tabar and Dabiri, 2017].

در زمینه کاربرد الیاف با جنس‌های مختلف بعنوان تقویت کننده و بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاکها تحقیقات مختلفی صورت گرفته است. رانجان و همکاران در سال ۱۹۹٦ و وانگ و همکاران در سال ۲۰۰۰ به ترتیب الیاف پلی‌پروپیلن را در خاکهای ماسه و رس بطور راندوم مخلوط کرده و با استفاده از آزمون سه محوری استاتیکی مورد ارزیابی و آزمایش قرار دادند. ایشان دریافتند که حضور الیاف باعث بهبود خصوصیات رفتاری از جمله پارامترهای ژئوتکنیکی و شکل پذیری شده است [Ranjan, Vasan and Charan, 1996; Wang, Frost and Moyer, 2000]. اسدالهی و دبیری در سال ۲۰۱۷ و صاحبکرم و دبیری در سال ۲۰۱۷، به ترتیب تاثیر

الیاف شـــیشـــه و الیاف پلی‌پروپیلن را بر روی توانایی باربری خاک رس شـــهر تبریز مورد مطالعه قرار دادند. ایشـــان دریافتند افزودن ۰/۸ درصـــد وزنی الیاف شـــیشـــه و پلی‌پروپیلن میزان توانـایی بـاربری خـاک رس را افزایش داده و پـارامترهـای ژئوتکنیکی را بهبود می‌بخشـد [Asadolahi and Dabiri, 2017; Sahebkaram and Dabiri, 2017] [Sahebkaram and Dabiri, 2017]. کـاربرد همزمـان الیاف و مواد افزودنی جهت تثبیت خاک در متحقیقات مختلف مدنظر قرار گرفته اســـت. بطوریکه می‌توان به مطالعه صـــورت گرفته توسط چای و همکاران در سال ۲۰۰٦ اشاره نمود، ایشان تاثیر همزمان آهک و الیاف پلی‌پروپیلن را در بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بدســـت آمده نشـــان داد مخلوط ۳ درصـــد آهک به همراه ۰/٦ ٪ الیاف پروپیلن جهت بهســـازی خاک رس از دیدگاه توانایی باربری و شکل پذیری مناسب است [Chai, Shi, NG and Tang, 2006]. همچنین ساکانتاسکول و جامساوانگ در سال ۲۰۱۲، کاربرد همزمان الیاف پلی پروپیلن و سـیمان را در سـتون های سنگی مورد ارزیابی قرار داد. ایشان مشاهده کردند، افزودن ۲۰ در صد سیمان به همراه ۰/۵ در صد وزنی الیاف پلی‌پروپیلن در سـتون سـنگی سـبب افزایش مقاومت خمشـی در سـتون های ســـنگی می شـــود [Sukantasokl and Jamsawang, 2012]. عبدی و همکاران در ســـال ۲۰۱٦ بطور همزمان تاثیر آهک و ژئوگرید برای تثبیت خاک رس مطالعه نمودند. نتایج نشان داد که افزودن حداقل ۳ در صد آهک به خاک رس باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشـــاری و کاهش نرخ گسیختگی می‌گردد و تسلیح با ژئوگرید نمونه های تثبیت شده تاثیری بر خصوصیات مقاومت فشاری و شکل پذیری نمونه‌ها نداشته است[Abdi and Arjomand, 2016].

با توجه به اینکه قطعه سـوم اتوبان شـهید کلانتری که دو شـهر تبریز و ارومیه را به یکدیگر وصـل می‌نماید از جزیره اسـلامی عبور می‌کند، در این مطالعه سعی شده تاثیر همزمان نانو رس و الیاف پلی‌پروپیلن بر روی خصوصیات و ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک رس منطقه داغ آب که در بخش شرقی جزیره واقع شده جهت کاربرد در ساخت لایه‌های رو سازی راه ارزیابی گردد. با مرور مطالعات گذشته مشاهده می‌شود تحقیقی در زمینه کاربرد همزمان نانو رس و الیاف پلی‌پروپیلن جهت تثبیت خاکهای رسی بمنظور استفاده در ساخت لایه‌های رو سازی انجام یافته که بیان کننده نوع آوری و جدید بودن تحقیق حاضـــر در این زمینه اسـت. در ادامه به مصـالح مصـرفی مورد اسـتفاده، برنامه های آزمایشی و نتایج بدست آمده اشاره می‌گردد.

## ۳. مواد و مصالح

در مطالعه حاضر، خاک رس از منطقه داغ آب در بخش شرقی جزیره اسلامی در نزدیکی دریاچه ارومیه تهیه گردیده که قطعه سوم اتوبان شهید کلانتری از آنجا عبور می‌نماید. نتایج تجزیه شیمیایی خاک رس مورد مطالعه و ترکیب کانی‌های تشکیل دهنده آن با توجه به آزمون XRF انجام یافته در سازمان زمین شناسی شمالغرب کشور در جدول‌های(۲) و(۳) می‌توان مشاهده نمود. بمنظور انجام آزمایشات، 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 که تولید کارخانه کاوا صنعت بوده و مشخصات فنی آن طبق جدول (٤) قابل مشاهده است. همچنین، الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده از کارخانه (Forta-FI HMA) تهیه گردیده است که بمنظور تثبیت رویه‌های آسفالتی در مناطق سرد مورد استفاده قرار می‌گیرد. طول الیاف مورد استفاده برابر ۱۹ میلیمتر است. خصوصیات فنی آن طبق جدول (۵) نشان داده شده است.

**جدول ۲. عناصر شیمیایی خاک رس مورد مطالعه.**

| ترکیبات شیمیایی | درصد وزنی موجود در خاک |
|---|---|
| $SiO_2$ | ۳۶ |
| $Al_2O_3$ | ۹/۵ |
| $Fe_2O_3$ | ۵/۱ |
| $CaO$ | ۱۳ |
| $MgO$ | ۲/۵ |
| $TiO_2$ | ۰/۵۳ |
| $P_2O_5$ | ۰/۱۰ |
| $MnO$ | ۰/۰۷ |
| $Na_2O$ | ۲ |
| $K_2O$ | ۱/۸ |
| $SO_3$ | ۹/۵ |
| سایر | ۱۸/۵ |

**جدول ۳. درصد کانی‌ها در خاک رس مورد مطالعه.**

| عناصر | |
|---|---|
| کوارتز | ۱۵ |
| کلسیت | ٤۰ |
| دولومیت | ۱۰ |
| فلدسپار | ۱۵ |
| هماتیت | ۳ |
| گچ | ۲ |
| میکا | ٦ |
| سایر مواد معدنی رس | ۹ |

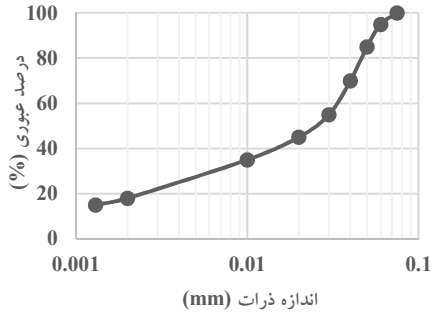
**جدول ٤. مشخصات نانو رس مونت موریونیت مورد استفاده (Kava Sanat).**

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

**جدول ۵. خصوصیات مکانیکی الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده (Forta-FI HMA).**

| توصیف | خصوصیات |
|---|---|
| پلی پروپیلن | مواد |
| ۱/٤۵ | چگالی ویژه |
| ۳۰۰۰ | مقاومت کششی (MPa) |
| ۱۹/۰۵ | طول (mm) |
| عالی | مقاومت در برابر محیط های اسیدی و بازی |
| > ٤۵۰ | دمای تجزیه ( $C^o$) |
| ۱۱ | قطر (micron) |

منحنی دانه بندی مصالح مورد استفاده طبق استاندارد ASTM[۱۰] D421 و ASTM D422 تعیین گردید و در شکل (۱) نشان داده شده است. براساس سیستم طبقه بندی خاکها به روش متحد (unified) خاک رس مورد مطالعه از نوع CL است. خصوصیات خمیری مصالح مورد مطالعه طبق استاندارد ASTM D4318-95a، چگالی ویژه آن براساس استاندارد ASTM D854 ارزیابی شده و در جدول(٦) ارائه شده است. همچنین مقدار PH خاک با توجه به استاندارد ASTM D4972 ارزیابی شده که برابر با ۷/۹ است که بیان کننده شرایط بازی است..




**شکل ۱. منحنی دانه بندی خاک مورد مطالعه.**

**جدول٦. خصوصیات ژئوتکنیکی مصالح مورد مطالعه.**

| رس | خصوصیات ژئوتکنیکی |
|---|---|
| ۲۰ | PI |
| ۲/۵۵ | Gs |

## ٤. برنامه آزمایشگاهی

در این مطالعه، ابتدا ذرات نانو رس به میزان ۵ و ۱۰ درصد با خاک رس مورد مطالعه مخلوط گردید. بدین منظور نمونه‌های مخلوط نانو رس و خاک مورد مطالعه در ظروف پلاستیکی بسته به مدت ۷، ١٤ و ۲۸ روز در شرایط رطوبت بهینه نگهداری شده و فرآیند عمل آوری انجام گرفته است. در مرحله دوم، الیاف پلی پروپیلن با درصدهای ۰/٤، ۰/۸، ۱/٦ با نمونه خاک مورد مخلوط گردیدند. پس از تعیین مقدار تاثیر گذار بهینه الیاف پلی پروپیلن، در گام سوم بطور همزمان اثر مخلوط مقدار بهینه الیاف پلی پروپیلن و ذرات نانو رس بر روی خاک رس مورد مطالعه قرار گرفت و در این شرایط نیز فرآیند عمل آوری مشابه حالت قبل بر روی نمونه‌های تثبیت شده انجام گرفت. جهت ارزیابی خصوصیات رفتاری و ژئوتکنیکی نمونه‌های خاک رس تثبیت شده، آزمون تراکم آزمایشگاهی طبق استاندارد ASTM D698 ، آزمایش مقاومت فشاری تک محوری براساس استاندارد ASTM D2166، آزمون برش مستقیم طبق استاندارد ASTM D3080-11 بر روی نمونه های با ابعاد ۱۰×۱۰ سانتیمتر مربع بصورت کنترل کرنش انجام پذیرفت. بطوریکه

نمونه‌های بهسازی شده پس از اشباع و تحکیم، تحت اثر تنش-های قائم ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال و با سرعت ۰/۰۵ میلیمتر بر دقیقه تحت آزمایش قرار گرفتند. در انتها، به منظور تعیین میزان توانایی باربری نمونه‌های مورد مطالعه جهت کاربرد در ساخت لایه‌های روسازی راه، آزمون نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)[11] مطابق با استاندارد ASTM D1883 در دو شرایط خشک و اشباع و در سه انرژی تراکمی متفاوت (۱۰، ۲۵ و ٥٦ ضربه برای هر لایه) انجام گرفت. بگونه‌ای که مطابق استاندارد سرعت بارگذاری ۱/۲۷ mm/min انتخاب شده و عدد CBR برای نفوذ پیستون به میزان ۲/۵ و ۵ سانتیمتر برآورد گردیده است. در حالت اشباع، همچنین میزان تورم احتمالی ایجاد شده در نمونه‌های خاکی مورد مطالعه حاصل از آزمایش CBR تعیین شده است. برنامه آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی نمونه های مورد مطالعه مطابق جدول(۷) قابل مشاهده است. لازم بذکر است ۲۵٪ از مجموع آزمایش‌های انجام یافته جهت بررسی صحت نتایج بدست آمده دوباره تکرار شده است.

**جدول ۷. برنامه آزمون های صورت گرفته بر روی نمونه‌های مورد مطالعه در تحقیق حاضر.**

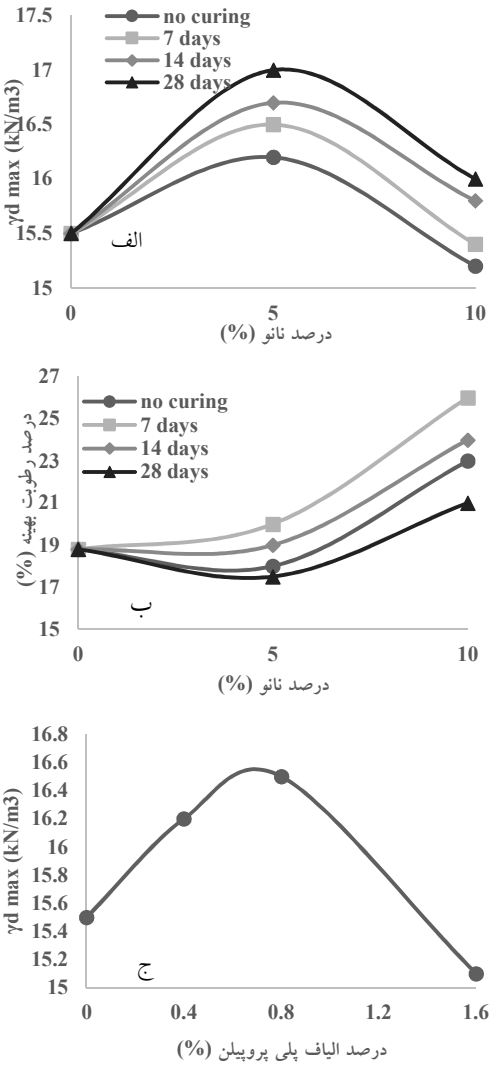
| | برنامه ریزی | | | مصالح | | عمل آوری | | آزمایشات | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ردیف | نام نمونه | ماتریس خاک | درصد نانو رس | درصد الیاف پلی پروپیلن | درصد نانو رس و الیاف پلی‌پروپیلن | ۷، ۱٤ و ۲۸ روز | تراکم | تک محوری | برش مستقیم | (CBR)- خشک و اشباع |
| ۱ | C-0 | رس | ۰ | ۰ | ۰ | – | ❋ | ❋ | ❋ | ❋ |
| ۲ | C-NC5 | رس | ۵ | – | - | * | ❋ | ❋ | ❋ | ❋ |
| ۳ | C-NC10 | رس | ۱۰ | – | - | * | ❋ | ❋ | ❋ | ❋ |
| ٤ | C-FRP0.4 | رس | – | ۰/٤ | - | - | ❋ | ❋ | ❋ | ❋ |
| ۵ | C-FRP0.8 | رس | – | ۰/۸ | - | - | ❋ | ❋ | ❋ | ❋ |
| ٦ | C-FRP1.6 | رس | | ۱/٦ | – | – | ❋ | ❋ | ❋ | ❋ |
| ۷ | C-NC5- FRP0.8 | رس | – | – | ٪ ۰/۸+ ٪۵ | * | ❋ | ❋ | ❋ | ❋ |
| ۸ | C-NC10- FRP0.8 | رس | – | – | ٪ ۰/۸+ ٪۱۰ | * | ❋ | ❋ | ❋ | ❋ |

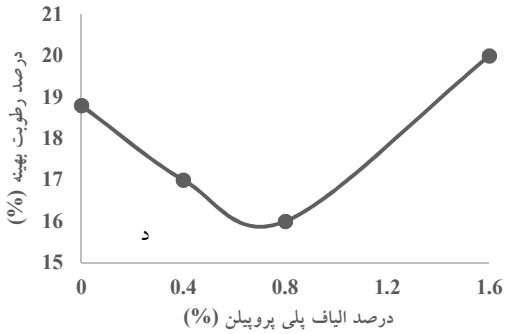
## ۵. نتایج و بحث

### ۵-۱ نتایج حاصل آزمایش تراکم

تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن و نانو رس بر روی نتایج حاصل از آزمون تراکم طبق نمودارهای شکل (۲-الف، ب، ج و د) ارائه شده است. شکل(۲-الف و ب) نشان می‌دهد در حالت عمل آوری نشده زمانیکه ۵٪ نانو رس به خاک رسی اضافه می‌شود وزن مخصوص خشک حداکثر($\gamma_{dmax}$) به مقدار ٤/۵ درصد نسبت به حالت تثبیت نشده افزایش یافته و رطوبت بهینه ۵/۳ درصد کاسته شده است. چنانکه عمل آوری به مدت ۲۸ روز بر روی نمونه-های مخلوط حاوی ۵ ٪ نانو رس انجام می‌گیرد باعث بهبود $\gamma_{dmax}$ به اندازه ۹/۷ درصد و کاهش رطوبت بهینه ۷/۸ درصد شده است. اگرچه افزایش میزان نانو رس سبب کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و افزایش میزان رطوبت بهینه در نمونه های مورد مطالعه در هر دو شرایط عمل آوری شده و عمل آوری نشده گردیده است. از سوی دیگر، هنگامیکه ۰/۸ ٪ وزنی الیاف

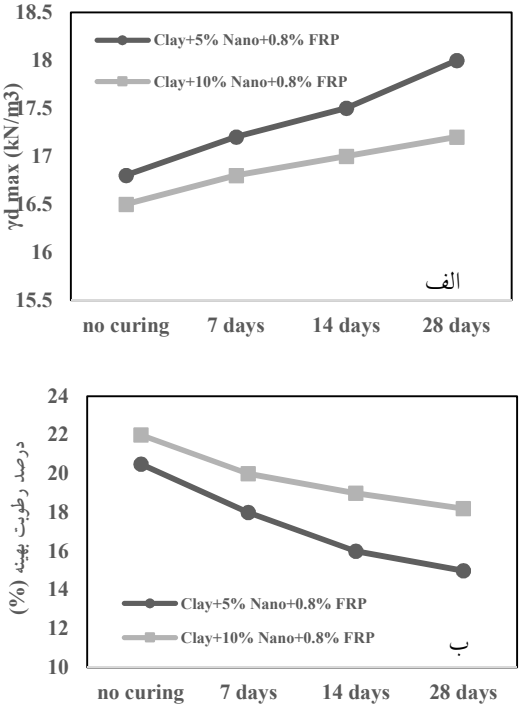
پلی‌پروپیلن به خاک رسی مورد مطالعه مخلوط می‌شود، وزن مخصوص خشک حداکثر به مقدار ٦/٤٥ درصد افزایش و رطوبت بهینه به مقدار ١٥/٧ درصد کاهش می‌یابد. با مقایسه تاثیرگذاری نانو رس و الیاف پلی‌پروپیلن در بهبود شرایط تراکم خاک رس تثبیت شده می‌توان بیان کرد در مدت زمان عمل آوری ٢٨ روزه، مخلوط ٠/٥ ٪ نانو رس نسبت به افزودن ٠/٨ ٪ الیاف پلی پروپیلن باعث افزایش قابل ملاحظه وزن مخصوص خشک حداکثر شده است.




**شکل ٢. تاثیر نانو رس و الیاف پلی‌پروپیلن بطور جداگانه بر روی نتایج آزمون تراکم، الف- تاثیر نانو رس بر روی وزن مخصوص خشک حداکثر، ب- تاثیر نانو رس بر روی رطوبت بهینه، ج- تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر روی وزن مخصوص خشک حداکثر، د- تاثیر الیاف پلی پروپیلن بر روی رطوبت بهینه.**

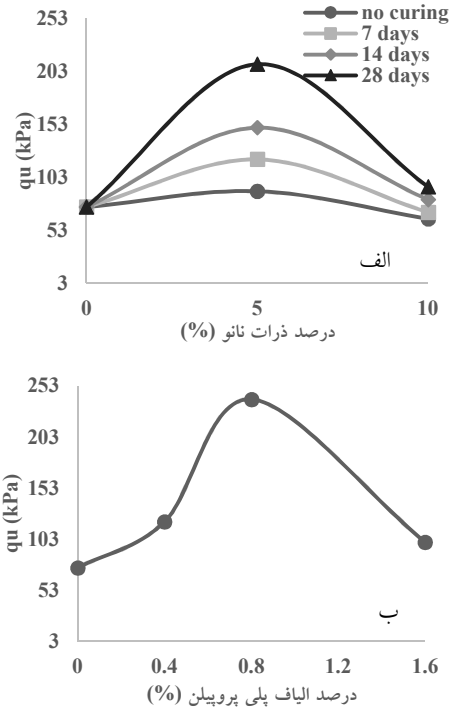
بمنظور بررسی تاثیرگذاری مخلوط نانو رس و الیاف پلی‌پروپیلن بطور همزمان بر روی نتایج آزمون تراکم، مقدار بهینه ٠/٨ ٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ذرات نانو رس با درصدهای مورد مطالعه جهت تثبیت خاک رس ترکیب گردید و فرآیند عمل آوری بر روی آنها انجام گرفت، نتایج بدست آمده طبق شکل(٣- الف و ب) ارائه شده است. با توجه به نمودارها مشاهده می‌شود ترکیب بهینه شامل ٠/٥٪ نانو رس به همراه ٠/٨ ٪ الیاف پلی پروپیلن با مدت زمان عمل آوری ٢٨ روزه بیشترین اثر گذاری را دارد. بطوریکه، مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر را به مقدار ٨/٤ درصد و رطوبت بهینه را ٩/٠٤ درصد نسبت به رس خالص تثبیت نشده افزایش می‌دهد. نتایج بدست آمده نشان دهنده آن است مصالح افزوده شده به خاک رس مورد مطالعه باعث بالا رفتن وزن مخصوص خشک حداکثر ناشی از کاهش یافتن فضای خالی بین ذرات شده است که نتیجه آن کاسته شدن میزان نشست و تغییر شکل در لایه‌های روسازی‌های انعطاف پذیر است.

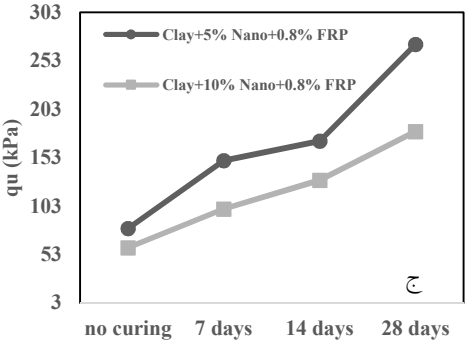



**شکل ۳. تاثیر مخلوط همزمان نانو رس و الیاف پلی‌پروپیلن بر روی نتایج آزمون تراکم ، الف-وزن مخصوص خشک حداکثر، ب-رطوبت بهینه.**

## ۵-۲ نتایج حاصل آزمایش تک محوری

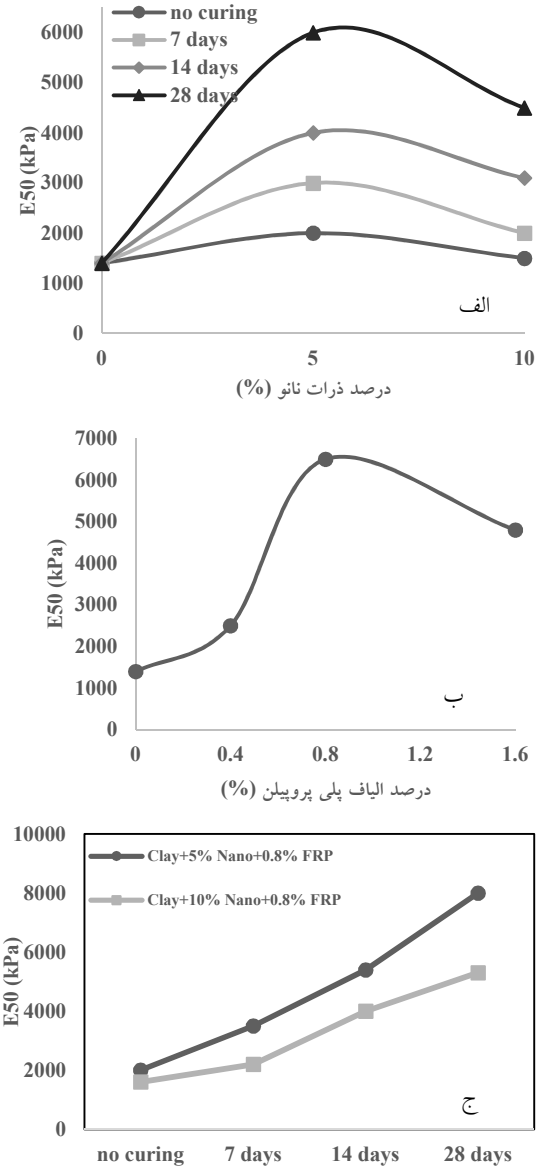
در این بخش نتایج آزمون مقاومت فشاری تک محوری بر روی خاک رس تثبیت شده با الیاف پلی‌پروپیلن و نانو رس بصورت مجزا و مخلوط در شکل(٤-الف، ب و ج) ارائه شده است. همانطور که در شکل(٤-الف) می‌توان مشاهده نمود، درحالت عمل آوری نشده، افزودن ۵ ٪ نانو رس به خاک رس، مقاومت فشاری تک محوری ($q_u$) را ۲۰ درصد افزایش می‌دهد. با عمل آوری ۲۸ روزه بر روی نمونه تثبیت شده با نانو رس به میزان ۵ ٪ مقدار $q_u$ به میزان ۱/۸ برابر نسبت به حالت تثبیت نشده می‌رسد. علت این ایجاد یک ساختار با استخوان بندی قوی ناشی از واکنش پوزولانی بین خاک رس و ذرات نانو رس است. با توجه به شکل(٤-ب) می‌توان دریافت مخلوط کردن ۰/۸ ٪ الیاف پلی پروپیلن در خاک، مقدار مقاومت فشاری تک محوری را ۲/۲ برابر افزایش می‌دهد. در مرحله سوم، هنگامیکه ۰/۸ ٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ذرات نانو رس مخلوط می‌شود طبق شکل (٤-ج) مشاهده می‌شود، مخلوط بهینه ترکیب ۰/۸ ٪ الیاف پلی-پروپیلن به همراه ۵ ٪ نانو رس است. این ترکیب درحالت عمل آوری نشده، سبب افزایش مقاومت فشاری به مقدار ٦/٧ درصد شده و پس از عمل آوری به مدت زمان ۲۸ روزه مقاومت فشاری را ۲/٦ برابر افزایش می‌یابد. این افزایش قابل توجه در مقاومت فشاری تک محوری نمونه تثبیت شده با مخلوط بهینه ناشی از تشکیل ذرات جدید بدلیل واکنش شیمیایی پوزولانی و تغییر ساختار و بافت خاک تثبیت شده است. البته وجود الیاف درتشکیل این ساختار موثر می باشند.






**شکل ٤. تاثیر نانو رس و الیاف پلی پروپیلن بر روی نتایج آزمون مقاومت فشاری تک محوری در لحظه گسیختگی، الف- تاثیر نانو رس ، ب- تاثیر الیاف پلی پروپیلن، ج-تاثیر مخلوط همزمان نانو رس و الیاف پلی پروپیلن.**

بمنظور مطالعه تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن و نانو رس بر روی میزان شکل پذیری نمونه‌ها، با استفاده از منحنی تنش-کرنش بدست آمده از آزمون تک محوری، مدول تغییر شکل سکانت تعیین گردید و در شکل(٥-الف، ب و ج) نمایش داده شده است. طبق شکل(٥- الف) مشاهده می‌گردد، چنانکه نانو رس به خاک رس مورد مطالعه مخلوط می‌شود و فرآیند عمل آوری انجام می‌گیرد بر مقدار مدول سکانت تاثیر می‌گذارد. بطوریکه مخلوط نمودن ٥ ٪ نانو رس به نمونه و عمل آوری به مدت ٢٨ روز، مدول سکانت را ٣/٣ برابر می‌نماید و به عبارتی شکل پذیری را افزایش می‌دهد. در شکل (٥-ب) می‌توان دریافت، افزودن ٠/٨ ٪ الیاف پلی‌پروپیلن مدول سکانت را به مقدار ٣/٦ برابر افزایش می‌دهد. در ادامه، نتایج تاثیر مخلوط همزمان ترکیب نانو رس و الیاف پلی‌پروپیلن بر روی خاک رس را می‌توان در شکل (٥-ج) مشاهده نمود. ترکیب ٠/٨٪ الیاف پلی پروپیلن به همراه ٥ ٪ نانو رس در حالت عمل آوری نشده میزان مدول ساکانت را ٤٢/٨ درصد افزایش داده و در حالت عمل آوری شده به مدت ٢٨ روز، مقدار افزایش ٤/٧ برابر نسبت به شرایط تثبیت نشده است. به عبارت دیگر، ترکیب مذکور سبب افزایش شکل پذیری بیشتر در نمونه بهسازی شده گردیده است.



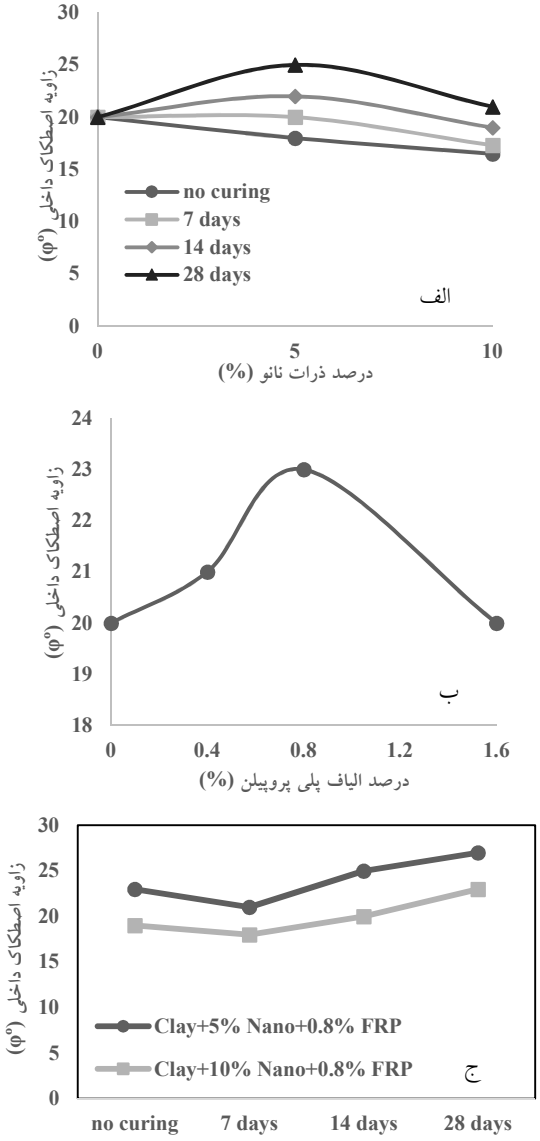

**شکل ٥. تاثیر نانو رس و الیاف پلی پروپیلن بر روی مدول سکانت ($E_{50}$) خاک رس مورد مطالعه، الف- تاثیر نانو رس، ب- تاثیر الیاف پلی پروپیلن، ج-تاثیر مخلوط همزمان نانو رس و الیاف پلی پروپیلن.**

مطابق نمودارهای شکل(٦-الف، ب و ج) مشاهده می‌شود، نانو رس و الیاف پلی‌پروپیلن می‌تواند بر اندازه کرنش محوری در لحظه گسیختگی نمونه‌های خاک رسی تثبیت شده موثر باشد. در شکل (٦-الف) دیده می‌شود، کرنش محوری در لحظه گسیختگی نمونه در حالت عمل آوری نشده با حضور ٥ ٪ نانو

رس ابتدا به مقدار ۱۲/۵ درصد کاهش و سپس با افزایش نانو رس تا ۱۰٪ ، کرنش محوری به مقدار ٦۲/۵ درصد افزایش می-یابد. در شرایط عمل آوری شده، بطورکلی می‌توان دریافت، افزایش مدت زمان عمل آوری باعث کاهش کرنش محوری در نمونه‌های تثبیت شده گردیده است. با در نظر گرفتن نتایج حاصل از آزمایش تک محوری می‌توان بیان نمود مخلوط بهینه در نمونه خاک رس تثبیت شده باعث بالا رفتن شکل پذیری در مصالح گردیده که مانع از وقوع نشست‌های برشی در لایه های روسازی ناشی از بار وسایل نقلیه می گردد.

## ۵-۳ نتایج حاصل آزمایش برش مستقیم

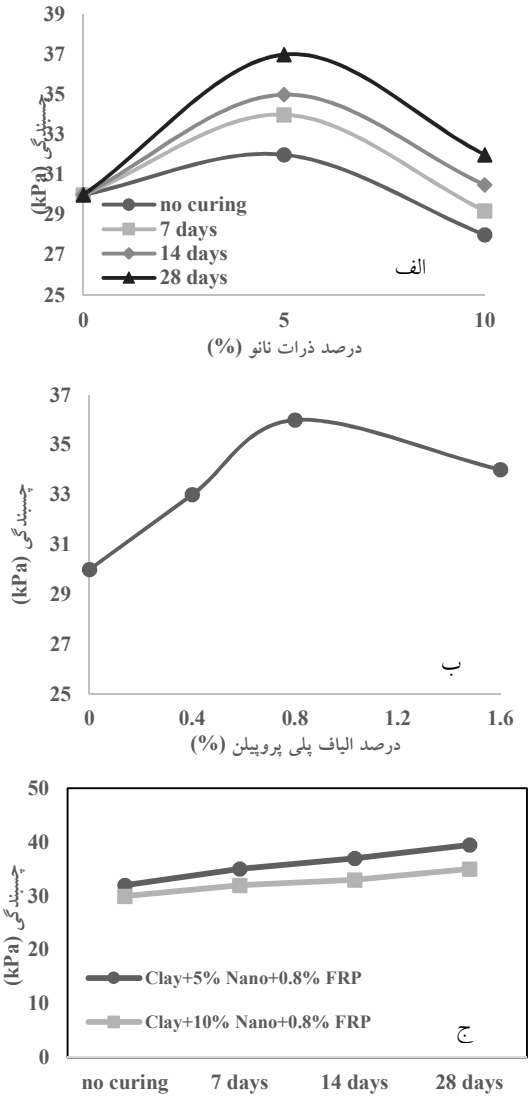
بمنظور بررسی تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن و نانو رس بر روی پارامترهای ژئوتکنیکی و مقاومتی خاک رس مورد مطالعه، آزمون برش مستقیم با سرعت کند تحت تاثیر تنش‌های قائم ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال بعد از عمل آوری به مدت ۷، ١٤ و ۲۸ روز بر روی نمونه‌ها انجام پذیرفت. تغییرات میزان زاویه اصطکاک داخلی در نمودارهای شکل(٦-الف، ب و ج) قابل مشاهده است. در شکل(٦-الف) مشاهده می‌شود در شرایط عمل آوری نشده، افزودن نانو رس به خاک ریزدانه رسی باعث کاهش زاویه اصطکاک داخلی و تماس بین ذرات شده است. با انجام عمل آوری به مدت ۲۸ روز، افزودن ۵ ٪ نانو رس به نمونه میزان زاویه اصطکاک داخلی بین ذرات را ۲۵ درصد افزایش می‌دهد. همانطورکه در شکل (٦-ب) نشان داده شده حضور ۰/۸ ٪ الیاف پلی‌پروپیلن در خاک رس باعث بهبود زاویه اصطکاک داخلی به مقدار ۱۵ درصد شده است. مخلوط همزمان نانو رس و الیاف پلی‌پروپیلن به همراه عمل آوری بر مقدار زاویه اصطکاک داخلی نمونه های تثبیت شده موثر است. با توجه به نمودارهای شکل (٦-ج) مخلوط ۵ ٪ نانو رس به همراه ۰/۸ ٪ الیاف پلی‌پروپیلن باعث بهبود نسبی در زاویه اصطکاک داخلی شده است. در حالت عمل آوری نشده اصطکاک بین ذرات ۱۵ درصد و بعد از گذشت ۲۸ روز عمل آوری مقدار پارامتر مذکور ۳۵ درصد نسبت به خاک رس خالص افزایش یافته است.




**شکل ٦. تاثیر نانو رس و الیاف پلی پروپیلن بر زاویه اصطکاک داخلی ، الف- تاثیر نانو رس، ب- تاثیر الیاف پلی پروپیلن، ج- تاثیر همزمان نانو رس و الیاف پلی‌پروپیلن.**

در نمودارهای شکل(۷-الف، ب و ج) تاثیر نانو رس و الیاف پلی‌پروپیلن بر روی میزان چسبندگی نمونه‌های تثبیت شده نشان داده شده است. در شکل(۷-الف) مشابه با زاویه اصطکاک داخلی، افزودن ۵٪ نانو رس در حالت عمل آوری نشده، میزان

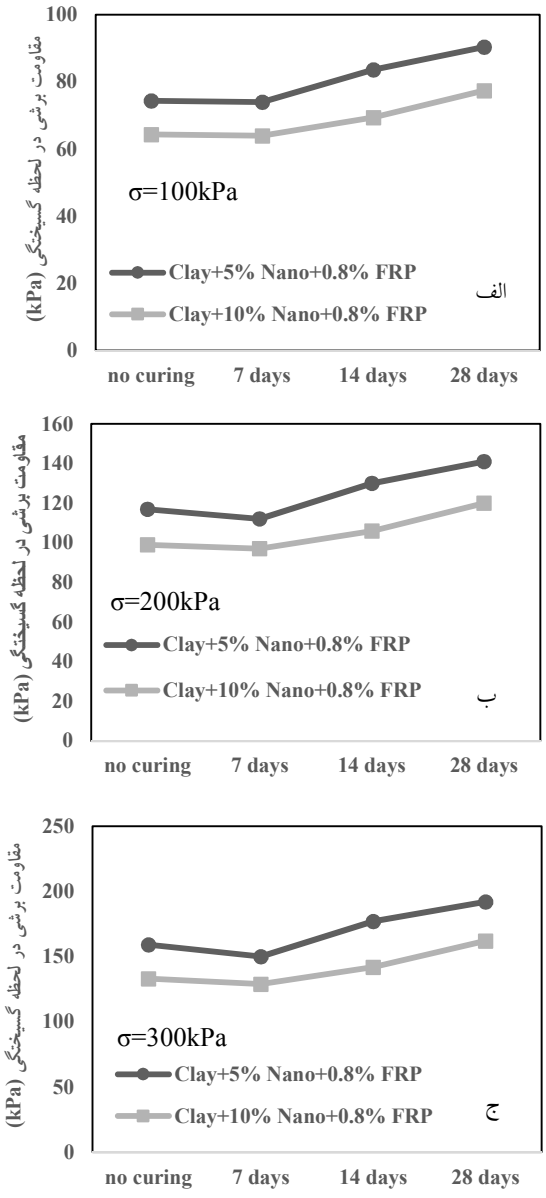
چسبندگی را ٦/٧ درصد و در شرایط عمل آوری شده در مدت زمان ۲۸ روز میزان چسبندگی در نمونه‌های خاکی ۲۳/۳ درصد افزایش داده است. همانطورکه در شکل(۷–ب) ارائه شده، اضافه کردن ۰/۸ ٪ الیاف پلی‌پروپیلن به خاک رس میزان چسبندگی تثبیت شده را ۲۰ درصد بهبود می‌بخشد. تاثیر ترکیب ۰/۸ ٪ الیاف پلی‌پروپیلن به همراه ۵ ٪ نانو رس بر میزان چسبندگی نمونه‌های تثبیت شده طبق نمودارهای شکل (۷–ج) مشاهده می‌گردد. بطوریکه در حالت عمل آوری نشده میزان چسبندگی ٦/٧ درصد و در شرایط عمل آوری ۲۸ روزه مقدار افزایش چسبندگی برابر ۳۲ درصد است.




**شکل ۷. تاثیر نانو رس و الیاف پلی پروپیلن بر چسبندگی، الف– تاثیر نانو رس، ب– تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن، ج–تاثیر همزمان نانو رس و الیاف پلی‌پروپیلن.**

با در نظر گرفتن مقادیر فوق می‌توان نتیجه گیری نمود ذرات نانو رس و الیاف پلی‌پروپیلن بر روی مقادیر مقاومت برشی در لحظه گسیختگی نمونه‌های تثبیت شده خاک رسی موثر است. زمانیکه ۵ ٪ نانو رس افزوده می‌شود و عمل آوری ۲۸ روزه بر روی نمونه‌ها انجام می‌گیرد در تمامی تنش‌های قائم بطور میانگین مقاومت برشی در لحظه گسیختگی ۲٦/۳ ٪ افزایش می‌یابد. از سوی دیگر حضور ۰/۸ ٪ الیاف پلی پروپیلن در خاک رس بطور میانگین مقاومت برشی در لحظه گسیختگی را در تمامی تنش های قائم ۱۷/٤۲ ٪ افزایش می‌دهد.

طبق شکل (۸–الف، ب و ج) مشاهده می‌شود در تمامی مقادیر تنش قائم، ترکیب ۵٪ نانو رس به همراه ۰/۸ ٪ الیاف پلی‌پروپیلن در شرایط عمل آوری نشده مقدار مقاومت برشی در لحظه گسیختگی را بطور میانگین ۱۳/۳ درصد افزایش داده و زمانیکه عمل آوری ۲۸ روزه بر روی نمونه ها انجام می‌گیرد، میزان بهبود مقاومت برشی بطور میانگین برابر ۳۷ ٪ است. از ویژگی‌های ژئوتکنیکی مهم و تاثیرگذار در مصالح لایه‌های روسازی و طراحی بدنه راه بهبود دادن توانایی باربری و مقاومت برشی است. با مرور نتایج بدست آمده از آزمون برش مستقیم می‌توان اشاره کرد مخلوط بهینه مورد استفاده جهت تثبیت خاک رس با توجه تغییر بافت و ایجاد یک استخوان بندی قوی ناشی واکنش پوزولانی سبب ایجاد یک مقاومت برشی مناسب شده است. این شرایط سبب می گردد در صورت استفاده از مصالح تثبیت شده در ساخت لایه‌های روسازی راه از وقوع نشست، تغییر شکل های نامنظم و جمع شدگی در رویه آسفالت جلوگیری نماید.

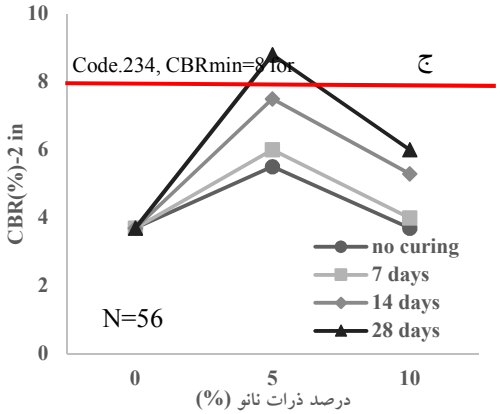



**شکل ۸. تاثیر همزمان نانو رس و الیاف پلی پروپیلن بر مقاومت برشی در لحظه گسیختگی، الف- تنش قائم ۱۰۰ کیلو پاسکال ، ب- تنش قائم ۲۰۰ کیلو پاسکال ، ج-تنش قائم ۳۰۰ کیلوپاسکال.**

## ٤-٥ نتایج حاصل آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)

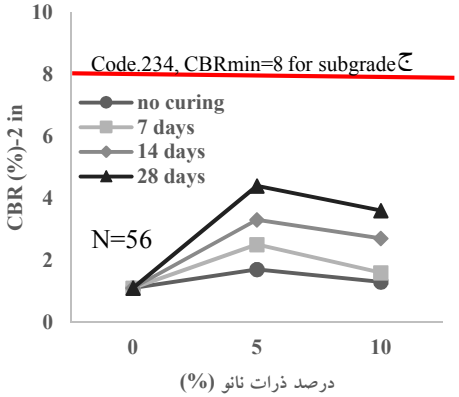
آزمون نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) در دو حالت خشک و اشباع در سه انرژی تراکمی متفاوت (۱۰، ۲۵ و ٥٦ ضربه برا هر لایه) بر روی نمونه‌های تثبیت شده با ذرات نانو رس و الیاف پلی‌پروپیلن در شرایط عمل آوری نشده و عمل آوری شده انجام گردید. اعداد CBR برای میزان نفوذ پیستون به اندازه ۲ اینچ (۵ سانتیمتر) اندازه گیری شده و نتایج برای ٥٦ ضربه برای هر لایه در شکل‌های (۹) و (۱۰) ارائه شده است.

طبق شکل (۹) نتایج بدست آمده بیان کننده آن است در انرژی تراکمی بالا (٥٦ ضربه برای هر لایه) در شرایط عمل آوری ۲۸ روزه، افزودن ۵ درصد نانو رس به خاک مورد مطالعه، طبق نشریه ۲۳٤ سازمان برنامه و بودجه [Code, No.234] مصالح تثبیت شده را جهت احداث لایه خاک بستر آماده می‌نماید. این نتایج ناشی وقوع واکنش سمنتاسیون در خاک رس و تشکیل یک ساختار و بافت جدید می باشد که در نمونه های تثبیت شده تشکیل شده است.



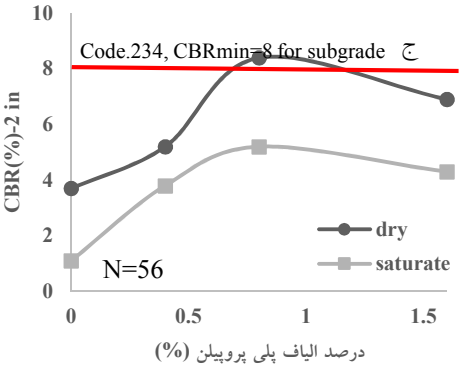

**شکل ۹. تاثیر نانو رس بر نتایج آزمون نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) نمونه های مورد مطالعه در حالت خشک در انرژی تراکمی ٥٦ ضربه برای هر لایه.**

در شرایط بارگذاری اشباع طبق نمودار شکل (۱۰) مشاهده می-شود مخلوط کردن ۵ ٪ نانو رس در خاک رسی مورد مطالعه در هر دو شرایط غیر عمل آوری و عمل آوری شده باعث بهبود مقاومت و باربری خاک تثبیت شده گردیده است ولی طبق نشریه ۲۳٤ مناسب جهت ساخت لایه‌های روسازی راه مناسب ناست.



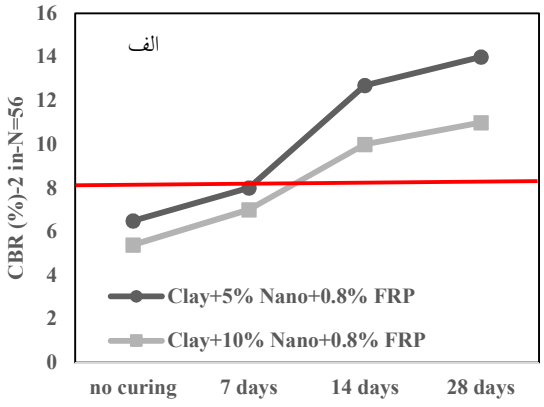

**شکل ۱۰. تاثیر نانو رس بر نتایج آزمون نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) نمونه های مورد مطالعه در حالت اشباع در انرژی تراکمی ٥٦ ضربه برای هر لایه.**

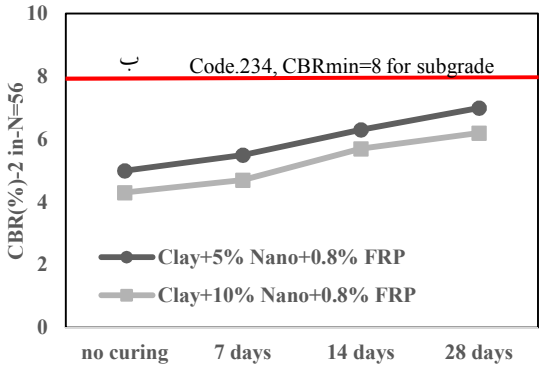
زمانیکه الیاف پلی‌پروپیلن با خاک رس مورد مطالعه مخلوط گردید و نمونه‌های تثبیت شده تحت آزمون نسبت باربری کالیفرنیا در تمامی انرژی‌های تراکمی در دو شرایط خشک و اشباع قرار گرفت و برای انرژی تراکمی بالا طبق نمودار شکل (۱۱) نتایج بدست آمد. با توجه به نمودار می‌توان اشاره کرد در هر دوحالت بارگذاری حضور ۰/۸ ٪ الیاف پلی‌پروپیلن باعث بهبود توانایی باربری گردیده و در انرژی تراکمی بالا (٥٦ ضربه در هر لایه)، مخلوط کردن ۰/۸ درصد وزنی الیاف پلی پروپیلن با خاک رس مورد مطالعه، طبق نشریه ۲۳٤ سازمان برنامه و بودجه مصالح تثبیت شده جهت احداث لایه خاک بستر آماده می‌نماید.




**شکل ۱۱. تاثیر الیاف پلی پروپیلن بر نتایج آزمون نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) نمونه های مورد مطالعه در حالتهای خشک و اشباع در انرژی تراکمی ٥٦ ضربه برای هر لایه.**

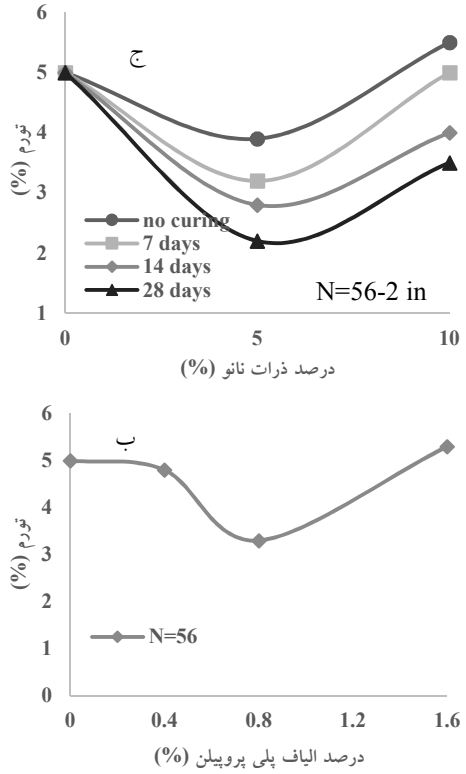
تاثیر همزمان مخلوط الیاف پلی‌پروپیلن و نانو رس بر روی مقدار توانایی باربری خاک رس در شرایط بارگذاری خشک و اشباع بر نتایج آزمون CBR در انرژی تراکمی بالا (٥٦ ضربه برای هر لایه) را می‌توان در نمودارهای شکل(۱۲-الف و ب) مشاهده نمود. چنانکه در شکل(۱۲-الف) مشاهده می‌شود مناسب‌ترین ترکیب مخلوط ۰/۸ درصد الیاف پلی پروپیلن همراه با ۵ درصد نانو رس در نمونه خاک پس از انجام عملیات عمل آوری ۲۸ روزه است. در این شرایط توانایی باربری خاک رس تثبیت شده نسبت به وضعیت تثبیت شده ۲/۷۸ برابر افزایش می‌یابد. این ترکیب بهینه طبق نشریه ۲۳٤ سازمان برنامه و بودجه جهت لایه خاک بستر در بدنه راه مناسب است. همانگونه که در شکل (۱۲-ب) دیده می‌شود در شرایط بارگذاری اشباع، میزان توانایی باربری خاک رس بهسازی شده در هر دو حالت عمل آوری شده و بدون عمل آوری افزایش یافته است ولی برای ساخت لایه خاک بستر طبق نشریه ۲۳٤ کافی ناست.






**شکل۱۲. تاثیر همزمان نانو رس و الیاف پلی‌پروپیلن بر نتایج آزمون نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) نمونه های مورد مطالعه (برای ٥٦ ضربه) ، الف- خشک، ب- اشباع.**

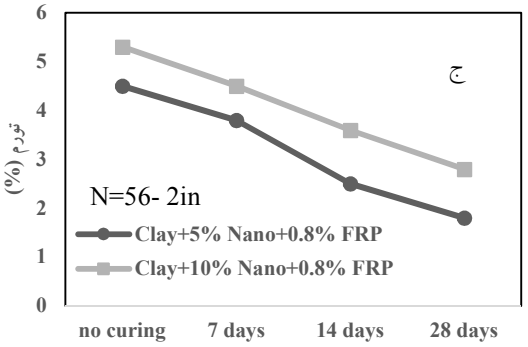
میزان تورم در نمونه‌های تثبیت شده مورد مطالعه حاصل از آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا در شرایط اشباع در میزان نفوذ ۲ اینچ (۵ سانتیمتر) در تمامی سه انرژی تراکمی متفاوت (۱۰، ۲۵ و ٥٦ ضربه برای هر لایه) اندازه گیری گردید و نتایج آن برای انرژی تراکمی بالا (٥٦ ضربه برای هر لایه) در شکل(۱۳) ارائه شده است. زمانیکه به نمونه‌های خاک رسی مورد مطالعه ذرات نانو رس اضافه گردید در شرایط عمل آوری نشده ۵ ٪ نانو رس در نمونه تثبیت شده میزان تورم را ۲۲ درصد کاهش داده است. پس از ۲۸ روز عمل آوری بر روی نمونه‌های تثبیت شده، مشاهده شد کاهش تورم برابر ٥٦ ٪ است. طبق نمودارهای شکل (۱۳–ب) مشاهده می‌شود زمانیکه به نمونه‌های مورد مطالعه ۰/۸ ٪ الیاف پلی پروپیلن افزوده شده مقدار تورم یک روند کاهندگی از خود نشان می‌دهد. میزان کاهش تورم در انرژی تراکمی بالابه میزان ٣٤ درصد بوقوع پیوسته است. با مقایسه نمودارها و نتایج بدست آمده می‌توان دریافت ذرات نانو رس در حالت عمل آوری شده تاثیر ویژه‌ای در مقایسه با الیاف پلی پروپیلن در کاهش پتانسیل تورم در نمونه های تثبیت شده دارند.




**شکل ۱۳. تاثیر نانو رس و الیاف پلی‌پروپیلن بر میزان تورم در انرژی تراکمی بالا (٥٦ ضربه)، الف–تاثیر نانو رس، ب- تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن.**

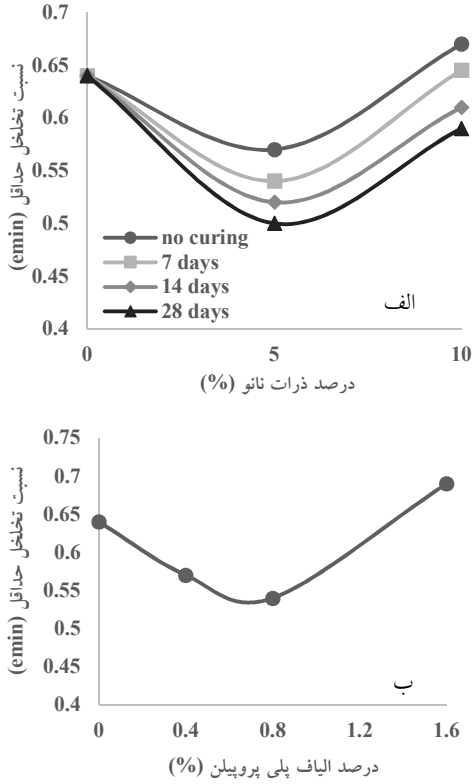
در نمونه‌های خاکی اشباع، مقدار بهینه الیاف پلی‌پروپیلن با ذرات نانو رس بطور همزمان به آن افزوده شد و میزان تورم آن براساس آزمون نسبت باربری کالیفرنیا در تمامی انرژی‌های تراکمی (۱۰، ۲۵ و ٥٦ ضربه در هرلایه) برای میزان نفوذ ۲ اینچ (۵ سانتیمتر) ارزیابی گردید و نتایج آن برای انرژی تراکمی بالا (٥٦ ضربه برای هر لایه) طبق شکل (١٤) ارائه گردید. با توجه به نمودارها ترکیب ۵ ٪ نانو رس به همراه ۰/۸ ٪ الیاف پلی پروپیلن بمنظور کاهش مقدار تورم در نمونه‌های تثبیت شده مناسب است. در شرایط عمل آوری نشده، میزان کاهش تورم برابر با ۱۰ درصد و در حالت عمل آوری ۲۸ روزه مقدار کاهش تورم برابر با ٦٤ درصد است. با مقایسه نتایج بدست آمده مشاهده می‌گردد اختلاط همزمان نانو رس و الیاف پلی پروپیلن تاثیرگذاری بیشتری را در کاهش مقدار تورم در مقایسه با حالت جداگانه

آنها دارد. با توجه به نتایج بدست آماده از تاثیرگذاری ذارت نانو رس و الیاف بر روی پتانسیل تورمی خاک رس مورد مطالعه می‌توان بیان نمود در مناطقی که سطح آب زیرزمینی بالا بوده و خاک رس موجود است از مصالح افزوده شده می‌توان در راستای ساخت لایه‌های روسازی راه جهت جلوگیری از وقوع خرابی ناشی از شرایط یخبندان و ذوب برف در مناطق سردسیر استفاده نمود.




**شکل ١٤. تاثیر همزمان نانو رس و الیاف پلی‌پروپیلن بر میزان تورم نمونه های مورد مطالعه در انرژی تراکمی بالا (٥٦ ضربه برای هر لایه).**

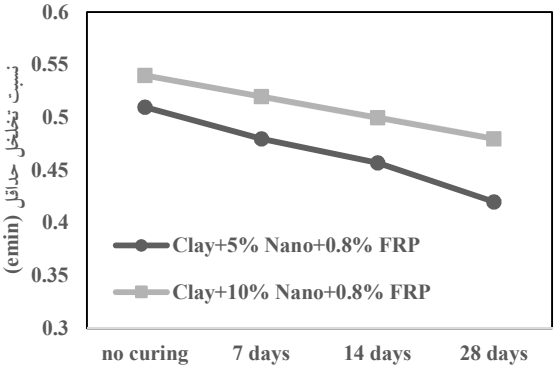
با مرور نتایج بدست آمده از آزمون‌های انجام یافته می‌توان اشاره کرد در شرایط عمل آوری نشده، ۰/۸ ٪ الیاف پلی‌پروپیلن و ۵ ٪ نانو رس در بهسازی حصوصیات ژئوتکنیکی و توانایی باربری خاک رس مورد مطالعه بصورت جداگانه موثر هستند. چنانکه جهت انجام و تکمیل واکنش پوزولان (سمنتاسیون) بین دانه‌های خاک رس و ذرات نانو رس در فرایند عمل آوری بر روی نمونه های تثبیت شده انجام بگیرد، مشاهده شد افزودن ۵ ٪ نانو رس بدلیل سبب تغییر ساختار دانه بندی و ایجاد یک بافت جدید شده که توانایی باربری و مقاومت را در ساختار جدید بالا برده و نتیجه آن کاهش فضای خالی بین ذرات و تماس بیشتر بین که نتیجه آن کاهش پتانسیل تورم بع علت کاهندگی در میزان جذب آب توسط آنها است . همانگونه که در شکل (۱۵-الف) نشان داده شده ۵ ٪ نانو رس در شرایط بدون عمل آوری فضای خالی را ۱۲/۳ درصد کاهش داده و پس از ۲۸ روز عمل آوری مقدار کاهش فضای خالی برابر ۲۳/۱ ٪ است. در شکل (۱۵-ب) می-توان دریافت مخلوط کردن ۰/۸ درصد الیاف پلی پروپیلن سبب کاهش فضای خالی بین ذرات به اندازه تقریبی ۱۷ درصد شده است که در مقایسه با ذرات نانو رس عمل آوری شده دارای مقدار کمتری است.




**شکل ۱۵. تاثیر نانو رس و الیاف پلی‌پروپیلن بر تغییرات نسبت تخلخل حداقل، الف- ذرات نانو رس، ب- الیاف پلی‌پروپیلن.**

همانطور که در شکل (١٦) مشاهده می‌گردد، با اختلاط همزمان ۵ ٪ ذرات نانو رس و ۰/۸ ٪ الیاف پلی‌پروپیلن در شرایط عمل آوری نشده نسبت تخلخل حداقل در مقایسه با شرایط خاک رس خالص ۲۰ درصد کاهش می‌یابد و هنگامیکه فرایند عمل آوری ۲۸ روزه انجام می‌گیرد، نسبت تحلخل حداقل در نمونه‌های مورد مطالعه ۳٤ درصد کاسته شده است. البته ترکیب ۰/۸ درصد الیاف پلی پروپیلن به همراه ۱۰ درصد نانو رس نیز باعث کاهش

فضای خالی بین ذرات شده ولی دارای تاثیرگذاری کمتری است. این شرایط بهترین بیان کننده وضعیت بوجود آمده در ساختار خاک رس تثبیت شده است. زیرا در این حالت واکنش پوزولانی بین ذرات رس و نانو رس ساختار و بافت خک را تغییر داده و ذرات جدیدی درست دانه تری را بوجود آورده و از سوی دیگر قرارگیری الیاف در بین آنها یک استخوان بندی قوی را ایجاد نموده است. که سبب بالا رفتن توانایی باربری و کاهش تورم در مصالح تثبیت شده گردیده است.




**شکل ١٦. تاثیر همزمان نانو رس و الیاف پلی‌پروپیلن بر تغییرات نسبت تخلخل حداقل در نمونه های مورد مطالعه.**

## ٦. جمع بندی و نتیجه گیری

همانطور که در بخش‌های گذشته به آن اشاره گردید، منظور از تحقیق حاضر، بررسی تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن و ذرات نانو رس در بهسازی خاک رس جهت کاربرد در ساخت لایه‌های در بدنه راه است. در نمونه‌های خاکی تثبیت شده مورد مطالعه فرآیند عمل آوری برای مدت زمان‌های ٧، ١٤ و ٢٨ روز انجام گرفته است. نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر نشان می‌دهد، مقدار بهینه ذرات نانو رس(در هر دو حالت عمل آوری نشده و عمل آوری شده ٢٨ روزه) برابر ٥ ٪ است. البته اثرگذاری این مقدار در شرایط عمل آوری بیشتر بوده چنانکه وزن خصوص خشک حداکثر را ٩/٧ درصد، مقاومت فشاری تک محوری را ١/٨ برابر، مدول ساکانت را ٣/٣ برابر، پارامتر ژئوتکنیکی زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی را به ترتیب ٢٨ و ٢٣/٢ درصد ، مقاومت برشی در لحظه گسیختگی را ٢٦/٣ درصد ، عدد CBR را در شرایط خشک ١/٣٧ برابر نسبت به رس خالص افزایش می‌دهد. همچنین این میزان در همان شرایط، مقدار رطوبت بهینه را ٧/٨ درصد و میزان پتانسیل تورم را ٤٣/٦ درصد را کاهش می‌دهد. مقدار بهینه الیاف پلی‌پروپیلن جهت تثبیت و بهسازی خاک رس برابر با ٠/٨ ٪ است. این میزان وزن مخصوص خشک حداکثر را ٦/٤٥ ٪، مقاومت فشاری تک محوری را ٢/٢ برابر، مدول سکانت را ٣/٦ برابر، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی را به ترتیب ١٥ و ٢٠ درصد، مقاومت برشی در لحظه گسیختگی را ١٧/٤٢ درصد، عدد CBR را در شرایط خشک ١/٢٧ برابر نسبت به شرایط تثبیت نشده افزایش داده است. همچنین این میزان در همان شرایط، مقدار رطوبت بهینه را ١٥/٧ درصد، میزان پتانسیل تورم در خاک رس را ٢١/٣ درصدکاسته است.

زمانیکه مقدار بهینه الیاف پلی‌پروپیلن با ذرات نانو رس در خاک رس مورد مطالعه ترکیب می‌شود و فرایند عمل آوری به مدت ٢٨ روز بر روی نمونه‌های تثبیت شده انجام می‌گیرد مشاهده شد مناسب ترین ترکیب ٠/٨ ٪ الیاف پلی پروپیلن به همراه ٥ ٪ نانو رس است. زیرا نتایج نشان داد وزن مخصوص خشک حداکثر را ١٦ درصد، مقاومت فشاری تک محوری را ٢/٦ برابر، مدول سکانت را ٤/٧ برابر، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی را به ترتیب ٣٥ و ٣٣ درصد، مقاومت برشی در لحظه گسیختگی را ٣٧ درصد، عدد CBR را در شرایط خشک ١/١٥ برابر نسبت به شرایط تثبیت نشده افزایش داده است. این ترکیب ، مقدار رطوبت بهینه را ٢٠/٢ درصد، پتانسیل تورم در خاک رس را ٦٢/١ درصد کاهش داده است.

با مقایسه نتایج می‌توان دریافت هنگامیکه ذرات نانو رس به خاک مورد مطالعه افزوده می‌شود، بدلیل خاصیت مونت موریونیتی آن و واکنش سمنتاسیون(پوزولان) در مدت زمان عمل آوری سبب ایجاد یک دانه بندی جدید و یک ساختار قوی شده است. از سوی دیگر افزودن الیاف پلی پروپیلن نیز مزید علت شده و سبب

چسبندگی بیشتر و بالا رفتن اصطکاک بین ذرات و سطح تماس بین ذرات گردیده که نتیجه آن کاهش فضای خالی بین ذرات است. بطوریکه تغییرات نسبت تخلخل حداقل نشان می‌دهد، افزودن ۵ ٪ نانو رس در شرایط عمل آوری نشده و عمل آوری باعث کاهش فضای بین ذرات به ترتیب به میزان ۱۲/۳ و ۲۳/۱ درصد شده است. هنگامیکه ۰/۸ ٪ الیاف پلی پروپیلن اضافه می‌گردد مقدار کاهش برابر با ۱۷ درصد می‌شود. تاثیر همزمان پارامترهای فوق به همراه عمل آوری ۲۸ روزه نسبت تخلخل حداقل به مقدار ۳٤ درصد کاسته است. این روند سبب کاهش جذب آب و پتانسیل تورم در خاک رس مورد مطالعه گشته و از سوی دیگر میزان توانایی و باربری را بگونه‌ای افزایش داده است که خاک رس تثبیت شده را طبق نشریه ۲۳٤ سازمان برنامه و بودجه جهت ساخت لایه خاک بستر آماده می‌نماید. همچنین، نتایج بدست آمده بیان کننده است از ترکیب بهینه برای ساخت ابنیه های ژئوتکنیکی مختلف با راهسازی همچون خاکریزی پشت دیوار حائل، بهسازی پی‌ها نیز بهره گرفت. البته، بدیهی است که قیمت نانو رس صنعتی بسیار گران بوده و مطالعه صورت گرفته در محدوده شرایط آزمایشگاهی است، ولی، آسیاب‌هایی در مقیاس آزمایشگاهی موجود است که می تواند از دانه‌های ریز خاک رس طبیعی، ذرات نانو رس تهیه نمود. امید است در آینده با تولید این نوع دستگاهها در مقیاس صنعتی از میزان قیمت نانو رس های صنعتی بطور جدی کاسته شود. برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌گردد، تاثیر انواع مختلف ذارت نانو به عنوان ماده افزودنی و یا طول و اندازه الیاف در جهت تثبیت مصالح خاکی جهت کاربرد در ابنیه های ژئوتکنیکی مورد ارزیابی قرار گرفته و پاسخ دینامیکی آنها بررسی گردد.

## ۷. پی نوشتها

1- Nano particles
2- Geosynthetic
3- Poly Propylene fiber
4- Glass fiber
5- Geotextile
6- Geogrid
7- Geofoam
8- Nano Silica
9- Nano Clay
10- American Society for testing and materials
11- California Bearing Ratio test (CBR)
12- Swelling

## ۸. مراجع

-Asaddolahi, F. and Dabiri, R. (2017) "Effects of glass fiber reinforced polymer on geotechnical properties of clayey soil", Journal of Structural Engineering and Geotechnics, Vol.7, No.2, pp.73-83.

- ASTM D421-85, (1985) "Dry preparation of soil samples for particle-size analysis and determination of soil constants", Annual Book of ASTM standards.

- ASTM D422-63, (1963) "Standard test method for article-size analysis of soils", Annual book of ASTM standards.

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

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

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

- ASTM-D 698-00, (2000) "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.

- ASTM D2166-16, (2016) “Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil”, Annual book of ASTM standards.

- ASTM D3080-11, (2011) “Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions”, Annual book of ASTM standards.

-ASTM D1883-93, (1993) “Standard test method for CBR (California bearing ratio) of laboratory- compacted soils”, Annual book of ASTM standards.

- Chai, Y., Shi, B., NG, C. W. W. and Tang, C (2006) “Effect of polypropylene fiber and lime admixture on engineering properties of clayed soil”, Engineering Geology, Vol.87, pp.230-240.

-Dhule, S. B., Valunjkar, S. S., Sarkate, S. D. and Korrane S. S (2011) “Improvement of Flexible pavement with use of Geogrid”, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, (EJGE), Vol.16, Bundle C, pp. 269-279.

- FHWA (2017) “Ground modification methods references manual”, Vol.1 and Vol.2, United States Department of Transportation Federation Highway Administration.

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

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

-Khabiri, M. M (2011) “Geosynthetic Material Suitable Depth staying to control failure of pavement rutting”, Advanced Materials Research, Vols. 255-260, pp. 3454-3458.

-Kumar Senthil, P. and Rajkumar, R (2012) “Effect of geotextile on cbr strength of unpaved road with soft subgrade”, Electronic Journal Of Geotechnical Engineering, (EJGE), Vol.17, Bundle J, pp.1355- 1363.

- Lan, T. and Kaviratna P. D. (1995) “Mechanism of clay tactoid exfoliation in epoxy-clay Nano composites”, Chemistry Master, pp. 2144-2150.

-Latha, G. M. and Murthy V. S (2007) “Effects of reinforcement form on the behavior of geosynthetic reinforced sand”, Geotextiles and Geomembranes, Vol.25, No.1, pp.23-32.

-Mohammadi, M. and Niazian, M (2013) “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.

-Naeinie, S. A. and Mirzakhanlari, M (2008) “The effect of geotextile and grading on the bearing ratio of granular soils”, Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE), Vol.13, Bundle J, pp. 1- 10.

- Naeinie, S. A. and Ziyaie Moayed R (2009) “Effect of plasticity index and reinforcement on the CBR value of soft clay”, International Journal of Civil Engineering, Vol.7, No.2, pp.124-130.

-Nazari, R. and Dabiri, R (2016) “Comparison of geotextile layers effects on static and dynamic behavior of pavement”, Journal of Structural Engineering and Geotechniques, Vol.6, No.2, pp. 15-22.

- Noll, M. R., Bartlett, C. and Dochat, T. M (1992) “In situ permeability reduction and chemical fixation using colloidal silica”,

National Outdoor Action Conference, Las Vegas, NV, p.443– 57.

-Sadeghi Azar, K.and Dabiri, R. (2015) “The effects of geotextile layers on bearing capacity of gravel-silt mixture”, Trakya University Journal of Engineering Science, Vol.16, No.2, pp.61-69.

- Sahebkaram, A. A. and Dabiri, R (2017) “Effects of fibers types on improving the bearing capacity of clayey soil”, International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering”, Vol.9, No.1, pp.43-50.

- Sukantasokl, P. and Jamsawang, P. (2012) “Use of steel and polypropylene fibers to improve flexural performance of deep soil-cement column”, Construction Building Material, Vol.29, No.1, pp.201-205.

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

- Wang, Y., Frost, J. D. and Murray, J (2000) “Utilization of recycled fiber for soil stabilization”, Proceedings of the Fiber Society Meeting, May 17-19, Guimaraes, Portugal, pp.59-62.

- Yonekura R. and Miwa, M. (1993) “Fundamental properties of sodium silicate based grout”, Geotechnical Conference, Singapore, pp.439-449.

– اسلامی تبار، فرزانه و دبیری، روزبه (۱۳۹٦) " 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 ۱۳۹٦، ص ٤۳–٦۷.

– ایران، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور (۱۳۹۰) " آئین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران– نشریه شماره ۲۳٤" ، تهران، وزارت راه و شهرسازی.

– بهاری، مرضیه و شاه نظری، علی (۱۳۹٤) " 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.

– پورواحدی، وحید، پور احمدی، وحید و عربانی، مهدی (۱۳۹۳) "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.

– فخری، زینب، پورحسینی اردکانی، رضا و عبادی، تقی (۱۳۹٤) " 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.

– قاسم وش اخیر، سمانه و دبیری، روزبه (۱۳۹۷) " بررسی تاثیر چگونگی استفاده ژئوتکستایل بر بهسازی باربری مخلوط رس–شن در لایه‌های روسازی"، نشریه زمین شناسی مهندسی ، جلد ۱٤، شماره ۳، ص.۵۲۳–۵۵٦

– عباسی، نادر و فرجاد، آرش (۱۳۹٦) " 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.

– عبدی، محمودرضا و ارجمند، محمدعلی (۱۳۸۹) " امکان سنجی بهبود اندرکنش خاک رس– ژئوگرید با بکارگیری لایه-های نازک ماسه‌ای" ، نشریه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد، سال بیست و یکم، شماره ۲، ص ۸۵–۱۰۰.

- مرادی، غلام، سیدی، شیوا (۱۳۹۵) " 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.

سبا غفاری، درجه کارشناسی در رشته عمران – عمران را در سال ۱۳۹٤ از دانشگاه آزاد اسلامی تبریز و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران – ژئوتکنیک را در سال ۱۳۹۷ از دانشگاه آزاد اسلامی تبریز اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان بهسازی و اصلاح خاک است.

روزبه دبیری، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران– عمران را در سال ۱۳۷۹ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران– مهندسی زلزله را در سال ۱۳۸۲ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران اخذ نمود. در سال ۱۳۸۸ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران– ژئوتکنیک از دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان ژئوتکنیک لرزه ای، بهسازی خاک ها، اصلاح مصالح لایه های روسازی راه، ژئوتکنیک زیست محیطی، مهندسی پی و ابنیه های ژئوتکنیکی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار (پایه ۱۲) در دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز است.