فصلنامه علمی پژوهشی زمین‌شناسی محیط‌زیست،
سال پانزدهم، شماره ۵۶، پاییز ۱۴۰۰

# کاربرد مواد نانو در بهبود رفتار کانیکی خاک‌های مسئله‌دار در راه‌سازی از جنبه‌های ژئوتکنیکی و زیست‌محیطی

سروه محمدی[۱*]، ابوالفضل سلطانی[۲]

۱- دانشجوی ارشد ژئوتکنیک، ؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟، ایران.
۲- دانشیار گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، لویزان، تهران، ایران
* نویسنده مسئول مکاتبات: Servehmoh@yahoo.com

## چکیده

**در این تحقیق به بررسی اثر مواد نانو بر رفتار مکانیکی خاک‌های مسئله دار واقع در بستر راه و نحوه بهسازی آنها پرداخته می‌شود. انواع خاک‌های مسئله‌دار معرفی می‌شود و تأثیر انواع مختلف مواد نانو بر بهسازی این نوع خاک‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. خاک‌های مسئله‌دار شامل خاک‌های نرم و شل، خاک‌های انبساطی، خاک‌های رمبنده، خاک‌های مستعد روانگرایی و خاکریزها است که مشکلاتی که این نوع خاک‌ها در اجرای راه ایجاد می‌کنند نیز بررسی می‌شود. از جمله مواد نانو که در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد می‌توان به مواد نانو فلزی، سرامیکی، نیمه هادی، پلیمری، نانو سیلیس، نانو رس، نانو سیلیکا کلوییدی، الیاف پلی پروپیلن و نانو ذرات سیلیکا اشاره کرد. روش‌های نوین بهسازی براساس مطالعات سال‌های اخیر جمع‌آوری شده است و سعی بر آن شده است که مروری کامل بر مطالعات پیشین بر روی تأثیر مواد نانو بر روی خاک‌های مسئله‌دار و بستر راه‌ها صورت پذیرد که راهنمای محققین در سال‌های آتی باشد.**

**واژگان کلیدی: بهسازی خاک، خاک‌های مسئله‌دار، راهسازی، مواد نانو**

## مقدمه

در مهندسی ژئوتکنیک خاک‌های مسئله‌دار از دیدگاه درجه پایداری، برای ساختن راه‌ها مناسب نیستند. بسیاری از آنها باعث خطرات لغزش، ریزش، خزش، ناامنی جاده‌ها و مخاطرات زیست محیطی می‌شوند و باید با انجام تغییراتی در آنها، به‌منظور فعالیت‌های راهسازی و عمرانی آماده‌سازی شوند. یکی از راهکارهای مناسب در مواجهه با خاک‌های نامناسب در مهندسی ژئوتکنیک، تغییر خصوصیات خاک محل پروژه برای رسیدن به استحکام مورد نظراست که به بهسازی یا اصلاح خاک شاخته می‌شود. اصلاح خاک به مجموعه عملیاتی اطلاق می‌شود که باعث حذف برخی رفتارهای نامناسب خاک و یا تحمیل رفتارهای مناسب به آن خواهد شد. ولی استفاده از نانوذرات سبب کاهش آسیب‌های ساختاری خاک (ترکیب شیمیایی) و کاهش عوامل مخرب زیست محیطی می‌شود. همچنین، استفاده از آن در بهسازی خاک، سبب کنترل خواص مقاومتی، جلوگیری از هدر رفتن و فرسایش خاک، جلوگیری از تشکیل ریزگردها و آلودگی‌های اتمسفریک، کاهش مصرف سیمان و متعاقباً کاهش تولید $CO_2$ و اثر گرمای گلخانه‌ای زمین خواهد شد.

در هنگام وقوع زلزله و استقرار شهرک‌ها بر روی خاک‌های مسئله‌دار و مشکلات فراوان دیگری از این قبیل، اطلاع از روانگرایی خاک خصوصیات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی محل انجام پروژه را امری اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. در سال‌های اخیر، رشد جمعیت و افزایش تقاضا برای تهیه مسکن و توسعه صنعت ساختمان، با توجه به ساخت‌وساز در شهرهای بزرگ، بدون رعایت مسائل زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، مشکلات فنی و مهندسی زیادی را به همراه داشته که یکی از مهم‌ترین آنها خاک‌های مسئله‌دار است. بهسازی خاک، در تمامی مسائل مهندسی خاک و به‌خصوص در شرایط ضعیف بودن آن مطرح است. این عمل به منظور اصلاح کاربرد مهندسی خاک برای دستیابی به اهداف مختلف انجام می‌شود. انتخاب روش بهسازی خاک به صورت طبقه‌بندی شده، امر مشکلی است. روش‌های بهسازی متعددی جهت خاک زیر پی از جمله عبور از اثرهای خاک ضعیف با استفاده از پی‌های عمیق، برداشت خاک ضعیف و جایگزینی با مصالح پرکننده مهندسی و بهسازی خواص خاک در محل وجود دارد. انتخاب

روش‌های بهسازی بستگی به عوامل متعددی از جمله نوع خاک، درصد ریزدانه (لای و مقدار رس)، مساحت و عمق بهسازی، مقاومت و تراکم‌پذیری خاک مورد نظر، ضوابط نشست، دسترسی به مهارت‌های فنی، نوع تجهیزات، مصالح و هزینه بهسازی دارد.

## ۱- معرفی خاک‌های مسئله‌دار

### ۲-۱ خاک‌های نرم و شل

خاک رس به دلیل مقاومت و ظرفیت باربری کم و رفتار نامناسب و قابلیت تورم در حضور آب، یکی از خاک‌های مسئله‌دار در پروژه‌ها به خصوص راه‌سازی و سدسازی است. یکی از راه‌کارهای کاهش مشکلات مربوط به خاک رس، تثبیت خاک است. تثبیت خاک یک اصطلاح رایج برای هر نوع روش فیزیکی، شیمیایی یا بیولوژیکی، یا هر ترکیبی از این روش‌ها برای بهبود خصوصیات معینی از یک خاک طبیعی است تا اهداف مهندسی پیش‌بینی شده برای دوره عمر یک سازه مهندسی را به خوبی تأمین نماید.

### ۲-۲ خاک‌های مستعد روانگرایی (Lequifaction)

ماسه‌های ریزدانه و لایه‌ایی هستند که از تراکم کمی برخوردار بوده است و معمولا به حالت اشباع می‌باشند. در صورتی که این خاک‌ها تحت‌تأثیر بارگذاری لرزشی، مانند زمین لرزه‌های طبیعی یا زمین لرزه‌های القایی قرار گیرند، خاک به سرعت متراکم می‌شود. متراکم شدن سریع باعث افزایش ناگهانی فشار آب بین ذره‌ای می‌گردد که در نتیجه آن مقاومت برشی به سرعت کاهش می‌یابد، تا حدی که گاه مقاومت برشی به صفر رسیده و خاک مانند مایعات جریان می‌یابد. از ویژگی عمده این نوع خاک‌ها، مقاومت کم و ناپایداری حجمی آنها می‌باشد. برای نمونه خاک‌هایی مثل ماسه و لای‌های شل، رس‌های نرم با رطوبت بالا و خاک‌های آلی را می‌توان نام برد. از ویژگی‌های این خاک‌ها رطوبت زیاد و تحکیم عادی یافته آنها می‌باشد. روانگرایی ماسه و لای را که از تراکم کمی برخوردارند، می‌توان از گروه این دسته دانست.

### ۲-۳ خاک‌های انبساطی

این خاک‌ها جزو گروه خاک‌های رسی است و معمولاً مخلوطی از کانی‌های رسی و غیررسی محسوب می‌شود. مشخصات ژئوتکنیکی این خاک‌ها توسط بخش رسی آنها کنترل می‌شود. این گروه از خاک‌ها دارای مقدار قابل توجهی کانی مونتمور یونیت هستند که با آب‌گیری متورم شده‌اند و بر اثر از دست دادن آب منقبض می‌شود. تغییر حجم این خاک‌ها بر اثر تغییرات رطوبت یکی از مهم‌ترین مسایل و مشکلاتی است که مهندسان با آن روبرو هستند، به نحوی که شاید بتوان این پدیده را مشکل جهانی به حساب آورد. رس‌ها معمولاً اندازه کلوئیدی (۰/۰۰۰۱ میلی متر) دارند؛ پس سطح مخصوص آنها بسیار زیاد بوده است و قادرند سطح زیادی آب را به خود جذب کنند. آب و هوا و اقلیم، یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار روی خاک‌های منبسط شونده است، زیرا در مناطق مرطوب که سطح ایستایی آب نزدیک زمین است، این مشکل کمتر دیده می‌شود. در مناطق خشک که سطح ایستایی آب، پایین است و تاثیر کمی روی رطوبت خاک در نواحی سطحی دارد. این خاک‌ها را می‌توان به طریقی عمل آورد که تغییرات حجمی آن محدود شود؛ مثال از طریق کنترل رطوبت و یا تثبیت با مواد افزودنی.

### ۲-۴ خاک‌های رمبنده یا فروریزشی

خاک همواره به عنوان یکی از مصالح اصلی پروژه‌های عمرانی از زمان‌های گذشته مورد توجه انسان بوده است و با پیشرفت علوم، پژوهش‌های مختلفی از سوی محققان بر رفتار خاک و خواص مهندسی مرتبط با آن انجام گرفته است. در طبیعت خاک‌هایی وجود دارد که با کوچک‌ترین تغییری در ساختار و بافت آن تحت شرایط مختلف محیطی یا بارگذاری، منجر به وقوع تغییرشکل و نشست‌های زیادی گشته که در نتیجه این عامل، سبب کاهش مقاومت و پیوند بین ذرات خاک می‌شود. به این قبیل خاک‌ها، خاک‌های مسئله‌دار گفته می‌شود. از مهم‌ترین این خاک‌ها می‌توان به خاک‌های رمبنده اشاره کرد. خاک‌های رمبنده بیشتر در نواحی گرم و خشک یافت می‌شوند و از خصوصیات مهم این نوع خاک‌ها می‌توان به تخلخل زیاد، وزن مخصوص کم و چسبندگی ناچیز آنها اشاره کرد (طبرسا، ۱۳۹۶). خاک‌های رمبنده معمولا ساختار باز دارند و پیوند بین ذرات آنها ضعیف است. این خاک‌ها به صورت سست رفتار کرده و در صورت اشباع شدن بدون تغییر در بار وارده و یا قرار گرفتن تحت نیروی ارتعاشی نشست زیادی می‌کنند و ظرفیت باربری آنها به شدت کاهش می‌یابد. به منظور مقابله با خاک‌های رمبنده محل پروژه و بهسازی آن، روش‌های

گوناگون از جمله جلوگیری از مرطوب شدن خاک، تراکم خاک، جایگزینی مصالح، استفاده از پی‌های عمیق، تثبیت با مصالح درشت دانه، تثبیت با آهک، تثبیت با سیمان، و نیز تثبیت با سیمان همراه با مصالح دانه‌ای ارزیابی می‌شوند و بهترین روش باتوجه به مشخصات سایت، ویژگی‌های سازه‌های احداثی و ملاحظات اجرایی و اقتصادی انتخاب شده است.

### ۲-۵ خاکریزها

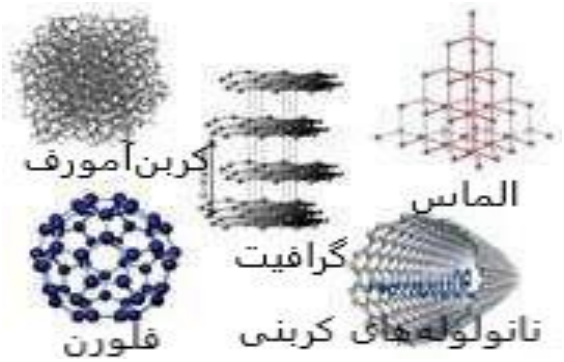
باتوجه به اینکه در حاشیه مناطق شهری نیاز به زمین جهت انجام فعالیت‌های عمرانی شهری، غیرقابل‌اجتناب است، ممکن است زمین‌هایی نیز مورد استفاده قرار بگیرند که قبلاً به عنوان مکانی برای دفن زباله مورد استفاده قرار می‌گرفتند. زباله‌های مختلف ممکن است ناشی از حفاری‌های شهری و غیرشهری، ضایعات ساختمانی، پسماندهای صنعتی و معدنی، آلودگی‌های نفتی و زباله‌های شهری (زباله‌های‌تر و خشک روزمره، لوازم قدیمی، قطعات خودروهای فرسوده و...) باشند. گاهی به این نوع خاک، خاک دستی نیز اطلاق می‌شود. مشکل عمده این نوع خاک‌ها، انباشتن این مصالح بدون در نظر گرفتن تمهیدات خاصی جهت تجزیه یا تحکیم زباله‌هاست، که با الیه‌ای خاک به ضخامت ۰/۶ تا ۲ متر، سطح آنها را می‌پوشانند. مشکلات مهمی از جمله ضعف باربری، تغییرات حجم و ناپایداری داخلی بعد از بارگذاری این نوع خاک‌ها بروز پیدا می‌کند. گاهی نشست بعضی خاکریزهای شنی حدودا ۲/۵ ٪ ارتفاع، خاک‌های ماسه ای حدودا ۵ ٪ ارتفاع و خاک‌های ریزدانه حدودا ۱۰٪ ارتفاع است.

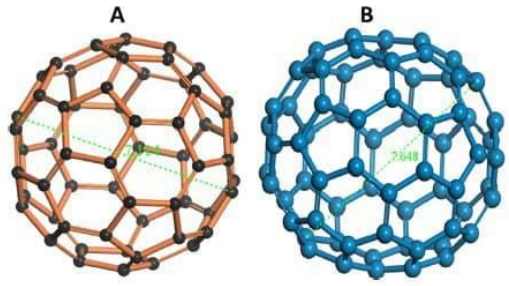
## ۳- معرفی انواع مواد نانو در بهسازی خاک

در این بخش به معرفی انواع مواد نانو که در بهسازی خاک مصرف می‌شوند و چگونگی تأثیر هر کدام بر بهسازی پرداخته می‌شود.

### ۳-۱ موادنانو مبتنی بر کربن

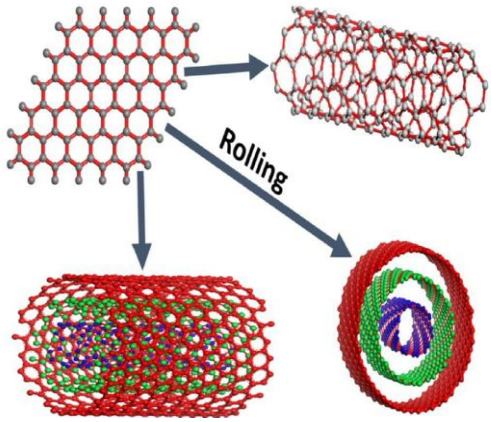
کربن در طبیعت دارای پنج آلوتروپ است شامل الماس، گرافیت، نانولوله، کربن بی‌شکل (آمورف) و فولرن که همگی جامد می‌باشند (شکل۱). فولرن‌ها و نانولوله‌های کربنی دو طبقه اصلی نانوذرات مبتنی بر کربن را تشکیل می‌دهند (شکل ۱، A,B). فولرن‌ها حاوی مواد نانو هستند که از قفس توخالی کروی مانند اشکال آلوتروپیک کربن ساخته شده‌اند. این مواد به‌دلیل هدایت الکتریکی، استحکام بالا، ساختار، میل الکترون و تطبیق‌پذیری علاقه تجاری قابل توجهی ایجاد کرده‌اند[3]. ورق‌های نورد شده می‌توانند به صورت تک، دو یا چند دیواری باشند، بنابراین به ترتیب به‌عنوان نانولوله‌های کربنی تک جداره ، دو جداره یا چند جداره نام‌گذاری شده‌اند. این نانو لوله‌های کربنی به‌طور گسترده‌ای با رسوب مواد اولیه کربن به‌ویژه کربن‌های اتمی سنتز می‌شوند، از گرافیت توسط لیزر یا با قوس الکتریکی روی ذرات فلزی بخار می‌شوند. اخیراً، این نانو لوله‌های کربنی از طریق روش رسوب شیمیایی بخار سنتز شده‌اند. این مواد به دلیل ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی منحصر به فرد خود، نه تنها در شکل بکر بلکه در نانوکامپوزیت‌ها برای بسیاری از کاربردهای تجاری مانند پرکننده‌ها[4] جاذب‌های گاز کارآمد برای اصلاح محیط زیست [5]، و به‌عنوان محیط پشتیبانی برای کاتالیزورهای معدنی و آلی مختلف [6] استفاده می‌شوند.




**شکل ۱- متداول‌ترین آلوتروپ‌های نانوکربن: کربن‌آمورف، گرافیت، الماس، فلورن، نانولوله‌های کربنی**

**A و B به‌ترتیب فولرن C60 (A) و C70 (B)**




**شکل ۲ – نورد لایه گرافیت به نانو لوله‌های تک‌جداره و چندجداره**

### ۳-۲ نانوذرات فلزی

نانوذرات‌های فلزی کاملاً از مواد اولیه فلزات ساخته می‌شوند. با توجه به خصوصیات رزونانس پلاسمون موضعی، این نانوذرات دارای ویژگی‌های نوری الکتریکی منحصر به فردی هستند. نانوذرات فلزات قلیایی و نجیب یعنی Cu، Ag و Au دارای یک نوار جذب گسترده در منطقه قابل مشاهده طیف الکترومغناطیسی خورشیدی هستند. سنتز کنترل جنبه، اندازه و شکل نانوذرات فلزی در مواد پیشرفته امروزی مهم است[7]. به‌دلیل خواص نوری پیشرفته، نانوذرات فلزی در بسیاری از مناطق تحقیقاتی کاربردهایی پیدا می‌کنند. پوشش مواد نانو طلا به طور گسترده‌ای برای نمونه‌برداری از میکروسکوپ الکترونی روبشی، برای تقویت جریان الکترونیکی استفاده می‌شود، که به دریافت تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با کیفیت بالا کمک می‌کند.

### ۳-۳ نانوذرات سرامیکی

نانوذرات سرامیکی جامدات غیرفلزی معدنی هستند که از طریق حرارت و خنک‌سازی پی در پی سنتز می‌شوند. آنها را می‌توان به‌صورت‌های بی‌شکل، چندبلوری، متراکم، متخلخل یا توخالی یافت[8]. بنابراین، نانوذرات سرامیکی به دلیل استفاده در کاربردهایی مانند کاتالیز، فوتوکاتالیز، تجزیه نوری رنگ‌ها و برنامه‌های تصویربرداری مورد توجه محققان قرار می‌گیرند.

### ۳-۴ نانوذرات نیمه هادی

مواد نیمه‌رسانا دارای خواصی بین فلزات و غیر فلزات هستند. بنابراین، به دلیل این ویژگی کاربردهای مختلفی در ادبیات پیدا کرده‌اند[9]. نانوذرات نیمه رسانا دارای باندهای وسیع هستند. بنابراین، با تنظیم باند پهن تغییرات قابل توجهی در خواص آنها ایجاد می‌شود. بنابراین، آنها مواد بسیار مهمی در فوتوکاتالیز، طیف نوری و عکسبرداری دستگاه‌های الکترونیکی هستند[10]. به عنوان مثال، انواع نانوذرات نیمه‌هادی در کاربردهای تقسیم آب به دلیل موقعیت باند مناسب و نوار بند بسیار کارآمد هستند [11].

### ۳-۵ نانوذرات‌های پلیمری

نانوذرات پلیمری معمولاً نانوذراتی مبتنی بر ارگانیک هستند و یک اصطلاح ویژه نانوذرات پلیمر برای آن استفاده شده است. آنها عمدتاً نانو کره و یا نانوکپسول شکل هستند [12]. آنها اولین ذرات ماتریسی هستند که جرم کلی آنها به طور کلی جامد است و سایر مولکول‌ها در مرز بیرونی سطح کروی جذب می‌شوند. در حالت دوم، جرم جامد به طور کامل درون ذره محصور شده است[13].

### ۳-۶ نانوذراتی مبتنی بر چربی

این نانوذرات دارای گروه‌های چربی هستند و به‌طور مؤثر در بسیاری از کاربردهای زیست پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌طور کلی، یک نانوذرات چربی به صورت کروی با قطر ۱۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر است. مانند نانوذرات پلیمری، نانوذراتی لیپیدی دارای هسته جامد ساخته شده از لیپید هستند و ماتریس آنها حاوی مولکول‌های چربی دوست محلول است[14]. سورفکتانت‌ها یا امولسیفایرها هسته خارجی این نانوذرات را تثبیت کردند[15]. نانوتکنولوژی لیپیدی یک زمینه خاص است که بر طراحی و سنتز NPsهای لیپیدی برای کاربردهای مختلف مانند حامل‌های دارو و تحویل و انتشار RNA در درمان سرطان تمرکز دارد[17][16].

### ۳-۶ نانو لوله کربنی

یک نانو لوله کربنی از گرافن (قوی‌ترین ماده شناخته شده جهان) ساخته می‌شود. گرافن یک صفحه فوق‌العاده نازک از اتم‌های کربن است که به صورت دوبعدی‌های شش ضلعی «لانه زنبوری» قرار گرفته است. گرافن وقتی به درون لوله

می‌غلتد، نانولوله کربنی را تشکیل می‌دهد که الیافی ۱۰۰ برابر قوی‌تر از فولاد و شش برابر سبک تر از نانو لوله کربنی [18] درست می‌شود. به دلیل خاصیت الاستیک فوق‌العاده بالا و نسبت ابعاد بالا، به عنوان فیلر و تقویت‌کننده فلز برای بهبود مقاومت مواد استفاده می‌شود. علاوه براین، نانولوله‌ها می‌توانند به عنوان ماده فیلر در دانه‌های سیمان برای متراکم‌تر ساختن کامپوزیت‌ها عمل کنند[19]. بنابراین، تقویت‌کننده‌های نانو لوله کربنی توانایی تولید کامپوزیت‌های به‌طور قابل توجهی قوی‌تر و سخت‌تر در مقایسه با الیاف تقویت‌کننده سنتی را دارند. با افزودن ۰/۰۲ درصدنانو لوله کربنی مقاومت فشاری ملات سیمان متاکائولین را ۱۱ درصد بهبود بخشید [20]. در بخش بهبود خاک، شن و ماسه رسی مخلوط با دامنه ۳ تا ۵٪ نانو لوله کربنی نسبت به وزن خاک، مقاومت فشاری خاک حدود ۱۲۰٪ افزایش یافته‌است. بنابراین، مقادیر بسیار کمی از نانو لوله کربنی می‌تواند رفتار مقاومتی خاک را به میزان قابل توجهی بهبود بخشد. بعلاوه، نانو لوله کربنی ضمن افزایش انسجام بین دانه‌های خاک، زاویه اصطکاک را کاهش می‌دهند. بااین‌حال، همچنین نگرانی فزاینده‌ای وجود دارد که این نانومواد جدید ممکن است اثرات منفی یا ناخواسته ای روی ارگانیسم ها و محیط داشته باشد. برای آب‌های زیرزمینی، نانو لوله کربنی‌ها در جذب آلودگی از آب به دلیل ساختار خالی نانومتر و سطح ویژه عظیم آن استفاده می‌شود [22] ,[21]. اما مطالعات اخیر نشان داد که نانومواد کربن تأثیر کمی بر اثر میکروارگانیسم‌های خاک دارند. ازاین‌رو، اعتبار و امکان‌پذیری نانو لوله کربنی‌ها که به عنوان ماده تقویت‌کننده در خاک استفاده می‌شود، در نظر گرفته شده است [24] ,[23].

### ۳-۷ سیلیس کلوئیدی

سیلیس کلوئیدی یک پراکندگی آبی از ذرات میکروسکوپی سیلیس است که از محلول‌های اشباع اسید سیلیکیک تولید می‌شود. اندازه ذرات به طور کلی بین ۷ تا ۲۲ نانومتر است. سیلیس کلوئیدی غیرسمی است، از نظر بیولوژیکی و شیمیایی بی‌اثر است و از ویژگی‌های دوام بسیار خوبی برخوردار است.

ژلاسیون فرآیندی است که به موجب آن یک محلول سیلیس کلوئیدی به یک جامد ژل مانند تبدیل می‌شود. این روند می‌تواند با کاهش نیروهای دافعه به صورت کنترل شده القا شود [25]. ذرات سیلیس کلوئیدی به ساختارهای زنجیره‌ای و سپس به شبکه‌های سه بعدی یکنواخت تبدیل می‌شوند و تا زمان کامل شدن فرآیند ژل شدن به تجمع ادامه می‌دهند. زمان ژل سیلیس کلوئیدی به عنوان مقدار زمانی بین اختلاط و تشکیل ژل سفت و محکم تعریف می‌شود. این به سرعت برهم کنش ذرات بستگی دارد، که به چندین متغیر از جمله درصد سیلیس در محلول، اندازه ذرات سیلیس و قدرت یونی، pH و دمای محلول مربوط است [27] ,[26]. مطالعات نشان داده است که سیلیس کلوئیدی می‌تواند به طور مؤثر مقاومت فشاری شن و ماسه را افزایش دهد و مقاومت فشاری غیرقابل محدود شن و ماسه دوغاب شده با سیلیس کلوئیدی با افزایش درصد سیلیس کلوئیدی به صورت خطی افزایش می‌یابد [28]. ماسه‌های تثبیت شده با سیلیس کلوئیدی به‌میزان ۱۰ و ۲۰ درصد، دارای مقاومت فشاری محصور نشده بین ۱۵۸ تا ۳۱۷ کیلو پاسکال نشان دادند. روندهای مشابهی در مطالعات به دست آمد که نشان داد پایه مقاومت فشاری نامحدود نمونه‌های بهبودیافته با ۵ -۲۰٪ سیلیس کلوئیدی از ۳۲ تا ۲۲۲ کیلوپاسکال متغیر است[29]. علاوه براین، برای کاهش خطر مایعات کلوئیدی، روش استفاده از سیلیس [30] پیشنهاد شد و بهبود مقاومت در برابر مایعات توسط سیلیس کلوئیدی با روش‌های مختلف مانند تحقیقات آزمایشگاهی، آزمون‌های مدل و آزمون‌های صحرایی کامل تأیید شد. همچنین، خصوصیات تغییر شکل مختلف بین نمونه‌های ماسه تحت عمل‌آوری و تحت بارگذاری چرخه‌ای مشاهده شد. نمونه‌های عمل‌آوری نشده در طی چند چرخه بارگیری اضافی فرو ریخت در حالی که نمونه‌های تزریق شده در طی بارگذاری چرخه‌ای فشار کمی را تجربه کردند و دست‌نخورده باقی ماندند [31]. رابطه بین چگالی ژل، ویسکوزیته و زمان ژل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و فرآیند تزریق سیلیس کلوئیدی برای بررسی تغییر شکل مقاومت کامپوزیت، مخلوط نانوماسه تحت بارگذاری چرخه‌ای در آزمایشات مدل تحریک شد. در همین حال، برای تأیید اعتبار عملی تزریق سیلیس کلوئیدی و کاهش خطر روانگرایی، آزمایش صحرایی در مقیاس کامل انجام شد[32].

### ۳-۸ بنتونیت

بنتونیت عمدتاً از مونت موریلونیت تشکیل شده است. نانو بنتونیت یک ماده معدنی رسی فرآوری شده است که در اثر

هوازدگی خاکستر آتشفشانی ایجاد می‌شود. نانو بنتونیت از خلوص بالاتری نسبت به بنتونیت طبیعی برخوردار است [33] و همچنین خاصیت جذب رطوبت و تورم را دارد [34]. هنگامی که در یک محیط آبی غوطه‌ور می‌شود، نانو بنتونیت پراکنده می‌شود و محلول‌های ژلاتینی یا معلق را تشکیل می‌دهد که دارای ویسکوزیته، تیکسوتروپی و روانکاری بالا هستند [35]. به دلیل این ویژگی‌ها از بنتونیت به عنوان افزودنی سیال حفاری برای بهبود خواص گل حفاری و کاهش اتلاف مایع به تشکیل سنگ استفاده شده است. علاوه براین، استفاده از سوسپانسیون بنتونیت تصفیه‌شده برای دوغاب سازی نفوذ برای اصلاح مایع منافذ بین دانه‌های شن برای بهبود مقاومت در برابر مایعات نیز بررسی شده است. ثابت شده است که سوسپانسیون‌های بنتونیت ۱۰٪ به عنوان ژل تشکیل می‌شوند که با واکنش الاستیک حتی در سویه‌های بزرگ مشخص می‌شود و این تیکسوتروپی ژل به بهبود مقاومت در برابر مایعات کمک می‌کند[36]. برای کاهش تنش عملکرد اولیه و گرانروی سوسپانسیون بنتونیت که می‌تواند به بهبود امکان نفوذ دوغاب کمک کند، می‌توان ۰/۵-۲ py پیرو فسفات سدیم را اضافه کرد تا اصلاح شود [38] ,[37]. با استفاده از نرم افزار FLAC، اثر تعدیل و کنترل روانگرایی سوسپانسیون بنتونیت را تأیید و در ادامه دامنه تقویت را ارائه داد.[39]. در تولید فولاد به روش احیا مستقیم، پودر سنگ آهن ابتدا باید به گندله تبدیل شود تا سپس در کوره‌های مخصوص احیا گردیده و به آهن اسفنجی تبدیل گردد. در مرحله تولید گندله، نرمه سنگ آهن با مش ۳۲۵ یا ابعاد (۴۵ میکرون) به همراه آب و مواد افزودنی مثل: هیدواکسید کلسیم یا شیر آهک، بنتونیت، و انواع چسب‌های آلی و معدنی (نشاسته، سیمان...) مخلوط شده و توسط دستگاه گندله‌ساز چرخانده می‌شود تا گندله‌های مورد نظر ساخته شود.

### ۳-۹ لاپونیت

لاپونیت یک نانوذره سیلیکات لایه‌ای مصنوعی با ضخامت ۱ نانومتر و قطر ۲۵ نانومتر است که تقریبا ۱۰ برابر کوچکتر از بنتونیت است. لاپونیت از یک صفحه مصنوعی نانوذرات سیلیکات، با ساختارهای لایه‌ای از دو لایه چهار ضلعی و یک هشت ضلعی، شبیه ساختار مونتموریلونیت طبیعی ساخته شده است [40]. این می‌تواند به سرعت در آب در ساختار دانه‌های شکل صفحه دیسک پراکنده شود و یک سوسپانسیون شفاف بی‌رنگ ایجاد کند. از آن‌جا که برخی از یون‌های دو ظرفیتی منیزیم در سطح ذرات با ظرفیت یون لیتیوم جایگزین می‌شوند، سطح آن بارهای منفی زیادی منتشر می‌کند. هیدروکسیدهای موجود در لبه مانند $Mg-OH$ و $S-OH$ مقدار کمی بار مثبت را برای پروتون می‌گیرند. لاپونیت در آب نامحلول است و برخی از مواد معلق پس از مدتی ته‌نشین شده و حالت جامد خود را از دست می‌دهند[41]. این مطالعه نشان داد که وقتی قدرت یونی کم است، دافعه الکترواستاتیک بین ذرات رخ می‌دهد، و سیستم در حالت شیشه‌ای متقابل استثنا است. وقتی قدرت یونی زیاد است، لایه دوتایی الکتریکی روی سطح ذرات فشرده می‌شود، فاصله برهم‌کنش الکترواستاتیک کاهش می‌یابد و فاصله بین ذرات کوتاه می‌شود و یک ژل پیوند متقابل فیزیکی ایجاد می‌کند[42]. به دلیل خاصیت رئولوژیکی خوب ژل شفاف همراه با مقیاس اندازه کوچک آن، لاپونیت می‌تواند مقاومت در برابر روان شدن شن مایع را بهبود بخشد و از خواص مواد و هدایت بهتری نسبت به نانو بنتونیت برخوردار است[38]، [43]. تصاویری مستقیم از ساختار سیستم های تعلیق شن و ماسه -لاپونیت ارائه داد و ساختار سلولی کشیده آنها را برجسته کرد که بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی مقیاس کل آنها تأثیر می‌گذارد.

### ۳-۱۰ نانوسیلیس

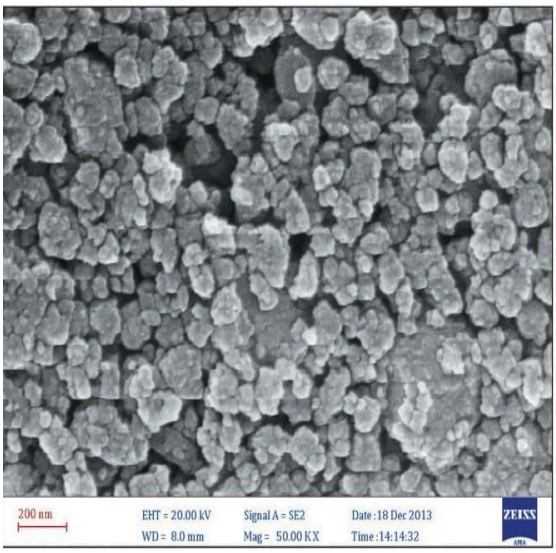
خاک نقش مهمی در ساختار هر سازه‌ای دارد و با گذشت زمان نیاز به بهسازی خاک‌های ضعیف از بدیهی‌ترین قسمت‌های پروژه‌های عمرانی تبدیل شده است. به منظور بهبود خواص مکانیکی روش‌های بهسازی مختلفی در دسترس است، که بعضی از این روش‌ها علیرغم مزایای محدودشان باعث پدیدار شدن مسائل زیست‌محیطی می‌شوند. در این مطالعه برای بهسازی خاک روش رسوب میکروبی کلسیم کربنات به کار گرفته شده است، که یک روش بهسازی پایدار و دوستدار محیط زیست می‌باشد.

برای بهسازی خاک روش رسوب میکروبی کلسیم کربنات به کار گرفته شده است، که یک روش بهسازی پایدار و دوستدار محیط زیست می‌باشد. در این روش، اوره موجود در محیط به وسیله باکتری اسپوروسارسینا یوریا هیدرولیز شده و به وسیله شبکه‌ای از واکنش‌های بیوشیمیایی رسوب کلسیم کربنات شکل گرفته و باعث افزایش مقاومت خاک می‌گردد. عوامل مورد بررسی در این مطالعه، شامل غلظت

مواد واکنش‌دهنده، زمان عمل‌آوری، تغییرات درصد سیلت بر رفتار خاک ماسه سیلتی و احتمال سازگاری باکتری با نانو سیلیس بودند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد، که پارامترهای مقاومت برشی توسط تاثیر توأمان باکتری و نانوسیلیس در این مطالعه بهبود یافت. میزان چسبندگی در خاک ماسه‌ای از ۱ به ۱۸۶ kPa و زاویه اصطکاک خاک به حدود ۶/۳۵ درجه رسید، که در مقایسه با ماسه بهسازی نشده حدود ۱۲٪ افزایش یافت. در نمونه‌های ماسه سیلتی، مقاومت پیک نمونه‌ها بیشتر شد و در طول عمل‌آوری ۷ روزه کرنش لحظه گسیختگی در مقایسه با عمل‌آوری ۱۴ و ۲۸ روزه بیشتر بوده، در حالی که مقاومت پیک نمونه‌ها اختلاف قابل ملاحظه‌ای نداشتند. بنابراین می‌توان گفت فعل و انفعالات شیمیای خاک و باکتری در طول عمل‌آوری ۷ روزه بهترین تأثیر را بر رفتار منحنی تنش-کرنش داشت.

### ۳-۱۱ نانوذرات کائولینیت

جهت تهیه نانوکائولینیت از روش مکانیکی آسیاب گلوله‌ای استفاده شده است و پودر اولیه کائولینیت به مدت ۱۰ ساعت در دستگاه پلانتری بال میل(Planetary Ball Mill) خرد شده و به مقیاس نانومتر (کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر) در آمده است که تصاویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی از نانوذرات مؤید این مطلب است. سپس نانوذرات به دست آمده با نسبت‌های متفاوتی از وزن خاک با خاک رسی ترکیب شده و میزان تغییر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک قبل و بعد از اضافه کردن نانوذرات توسط آزمایش‌های تراکم، برش مستقیم و کاساگرانده مورد تحقیق قرار گرفت و میزان بهینه افزودن نانوذرات به دست آمد. نتایج نشان داد که حدود روانی و خمیری خاک‌رسی با افزایش میزان نانوذرات به ترکیب خاک افزایش می‌یابد؛ ولی از آنجایی که آهنگ افزایش حد خمیری نسبت به حد روانی بیشتر است؛ شاخص خمیری کاهش می‌یابد که نتیجه‌ای مطلوب در مهندسی ژئوتکنیک جهت اجرای پروژه‌های عمرانی است. همچنین با توجه به نتایج آزمایش تراکم، وزن واحد حجم خاک‌رسی تا حد خاصی از افزودن نانوکائولینیت افزایش می‌یابد و بعد از آن حد دچار کاهش می شود. میزان چسبندگی خاک‌رسی نیز با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش برش مستقیم تا افزودن حد مشخصی از نانوذرات افزایش یافته و بعد از آن حد تغییر چندانی نمی کند. نتایج آزمایشات نشان دادند که ترکیب شیمیایی نانوذرات حاصل از روش آسیاب گلوله‌ای مشابه ترکیب شیمیایی پودر مادر است و تغییری نمی‌یابد [44].




**شکل۳ - تصویر میکروسکوپ الکترونی نانوکائولینیت تهیه شده از روش آسیاب گلوله‌ای**

### ۳-۱۲ نانو رس

با توجه به پیشرفت علم نانوتکنولوژی در مهندسی ژئوتکنیک، در این تحقیق سعی شده است تا تأثیر اضافه کردن مقادیر مختلف نانوذرات رس بر رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه ضعیف با کمک تحقیقات آزمایشگاهی بررسی شود. در این تحقیق نمونه‌های مختلف خاک از منطقه شبکه سد بوستان گنبد و اینچه‌برون واقع در استان گلستان انتخاب شد. به‌منظور بررسی تأثیر بسازی خاک‌های مذکور با کمک نانورس، آزمایش‌های مختلف ژئوتکنیکی از قبیل حدود اتربرگ، تراکم استاندارد، مقاومت فشاری تک‌محوری، سه‌محوری تحکیم‌نیافته زهکشی‌نشده و تحکیم مضاعف انجام گرفت. نتایج آزمایش‌ها حاکی از نقش بسیار مهم نانورس بر خواص خمیری، مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری خاک بوده است. هم چنین با توجه به اهمیت نوع خاک می‌توان دریافت که در اثر افزودن نانورس به خاک‌های بررسی شده پتانسیل رمبندگی نمونه‌ها بسیار محسوس کاهش می‌یابد[45].

در این مطالعات به بررسی تأثیر نانوذرات دی کلرید کلسیم، اکسید کلسیم و نیترات پتاسیم روی خواص خاک پرداختند.

نتایج آنها حاکی از افزایش مقاومت برشی، کاهش نفوذپذیری و کاهش تراکم‌پذیری تحت افزودن نانوذرات بوده است[46]. تأثیر افزودن انواع مختلف نانوذرات شامل نانو آلومینیوم، نانو مس و نانو رس را بر رفتار تورمی و انقباضی خاک‌های مختلف ریزدانه بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که افزودن نانو رس دارای تأثیر نامحسوسی روی مقادیر رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک ماکزیمم نمونه‌ها بوده است و همچنین با افزودن نانورس شاخص خمیری و حد انقباض خاک زیاد می‌شود. نتایج پژوهش‌های مجید و همکاران [47] نشان داد که افزودن نانومواد به خاک منجر به کاهش حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری نمونه‌ها شده است. همچنین با توجه به اهمیت تأثیر بهسازی بر خواص خمیری خاک‌های ریزدانه در این زمینه نتایج بررسی های مختلف، (نشان داده است که با افزودن نانومواد، حدود اتربرگ خاک نیز افزایش می‌یابد [49] ,[48]. تأثیر افزودن نانورس بر کنترل فرسایش خاک‌ها بررسی شده است. در این خصوص نتایج حاکی از بهبود کنترل فرسایش خاک در اثر افزودن نانورس است [50]. با توجه به اهمیت بررسی‌های ژئوتکنیک زیست محیطی و تأثیر شیرابه‌ها در طراحی مدفن بهداشتی زباله‌ها، پژوهش‌های جامعی در این زمینه انجام شده است. نتایج این پژوهش‌ها نشان داده است که با افزودن نانورس به خاک در اثر نفوذ شیرابه‌ها به خاک زیرین، مقادیر فلزات سنگین جذب خاک شده و به عبارت دیگر تأثیر افزودن نانورس، ضمن کاهش نفوذپذیری مخلوط، موجب کاهش غلظت فلزات سنگین و جذب آلاینده‌ها و بهبود عملکرد زیست‌محیطی می‌شود همچنین افزودن نانورس موجب کاهش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک نیز شده است.[51] با توجه به اهمیت بهسازی خاک‌های مسئله دار و لزوم تقویت آنها و ارزیابی رفتار آنها ناشی از تثبیت و اصلاح خواص خاک، تأثیر افزودن نانومواد مختلف از قبیل نانوسیلیس، نانوآلومینیوم، نانورس و نانومس بر خواص ژئوتکنیکی خاک‌ها بررسی شده است. نتایج حاصل از این پژوهش‌ها حاکی از تأثیر بسیار مهم نانوذرات بر رفتار رمبندگی خاک‌ها بوده است [52]. در این مطالعات با انجام آزمایش‌های ژئوتکنیکی مختلف دریافتند که در اثر افزودن نانورس به نمونهٔ خاک آزمایش شده از بستر کانال بند انحرافی گنج‌افروز، پایداری و استحکام خاک بیشتر شده و مشکلات ناشی از فرسایش بستر و همچنین حمل مصالح قرضه برای زیرسازی کانال وجود نخواهد داشت.

**۳– ۱۳ نانوذرات سیلیکا و سیمان**

نتایج بدست آمده مؤید آن است که در مصالح رسی حاوی فلز سنگین با شرایط کانی‌ساخت مشابه کائولینیت، امکان تراوش آلودگی حتی در غلظت‌های کم آلاینده وجود دارد و نیازمند تدابیر لازم برای پاکسازی است. افزودن سیمان به کائولینیت، قابلیت نگهداشت فلز سنگین را به شدت افزایش داده؛ اگرچه آزمایش TCLP نشان داد آبشویی این نمونه‌ها نیز سبب بازگشت مجدد تا ۳۰٪ آلاینده جذب شده به سیال منفذی می‌گردد. همچنین مشخص شد اندرکنش سیمان با فلز نیکل، فرآیند جامدشدگی ذرات را مختل کرده که در نتیجه آن، بهبود مشخصات ژئومکانیکی خاک تا ۴ برابر کاهش می‌یابد.

مشاهده شد که ترکیب سیمان ـ نانو سیلیکا در مقایسه با سیمان، حدود ۶۰٪ از توانایی بیشتری در غیرمتحرکسازی آلاینده برخوردار است و ضمن افزایش ۴۰ درصدی مقاومت فشاری، تا دو برابر قابلیت فشردگی مصالح را کمتر می‌کند. براساس نتایج حاصل از آزمایش‌های فیزیکی ـ مکانیکی، طیف‌های XRD و تصاویر میکروسکوپ الکترونی، علت عملکرد بهتر ترکیب سیمان ـ نانو سیلیکا ناشی از رشد بیشتر (به‌طور متوسط حدود ۴۲ درصد) و سریعتر مواد سیمانی (خصوصاً ژل) CSH، کاهش اثر مخرب تشکیل رسوب فلز سنگین بر واکنش‌های هیدراتاسیون و افزایش تراکم ساختار ارزیابی شد. در مجموع یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد با مدنظر قرار دادن ضوابط EPA، حدود ۰/۵ درصد سیمان به ازای هر سانتی‌مول بر کیلوگرم غلظت نیکل و حدود یک ماه نگهداری، برای پاکسازی ایمن خاک لازم است که در حضور نانوذرات سیلیکا، مصرف سیمان(تا ۳۵٪) و زمان عمل‌آوری (تا سه برابر) کاهش خواهد یافت.

**نتیجه‌گیری**

طبق مطالب ذکر شده در این تحقیق که چکیده‌ای از تحقیقات پیشین بود می‌توان نتایج زیر را استخراج کرد.

۱–مواد نانو به دلیل اندازه کوچک خود دارای سطح ویژه وسیعی هستند که آنها را برای کاربردهای مختلف مناسب می‌کند. علاوه بر این، ویژگی‌های نوری نیز در آن اندازه غالب هستند، که اهمیت این مواد را در کاربردهای فتوکاتالیستی بیشتر می‌کند. تکنیک‌های سنتزی می‌توانند برای کنترل ریخت‌شناسی، اندازه و

خواص مغناطیسی نانوذرات مفید باشند. اگرچه نانوذرات برای بسیاری از کاربردها مفید هستند.

۲-ریزساختار، گروه‌های عملکردی سطح، استحکام پیوند و رئولوژی سوسپانسیون‌های نانوذرات، عوامل اصلی مؤثر بر بهبود خاک هستند. بهبود در استحکام – قدرت خاک براساس نانومواد فقط باعث ایجاد اختلال جزئی در زمین می شود، سازگار با محیط زیست است و در مقایسه با روش‌های تزریق سنتی، مقرون به صرفه است.

۳-افزودن نانورس تأثیر بسیار مهمی بر خواص خمیری، مقاومتی، تغییر شکل‌پذیری، نمونه‌ها و پتانسیل رمبندگی دارند. به‌طوری که با افزودن نانورس به خاک، شاخص خمیری نمونه‌ها زیاد شده و در اثر افزودن ۲ درصد نانورس به خاک‌های بررسی شده، شاخص خمیری نمونه‌ها به طور متوسط حدود ۳۵ درصد زیاد می‌شود.

۴-مقاومت فشاری محدود نشده و حداکثر چگالی خشک با افزایش محتوای نانومواد تا رسیدن به یک درصد افزایش می‌یابد و پس از آن مقاومت کاهش خواهد یافت. بنابراین، اضافه کردن ذرات ریزتر مانند نانومواد، حتی در دوزهای پایین، می‌تواند خواص خاک را بهبود بخشد.

۵-مواد کلسیم دار پایدارساز: Calcium Stabilized (Materials = CSM) موادی هستند که خواص پوزولانی از خود نشان می‌دهند. این مواد با مکانیزم‌های مختلف فیزیکوشیمیایی مانند نقش فیلری، واکنش‌های هیدراسیون، تبادل کاتیونی، لخته‌سازی، واکنش پوزولانی و کربناسیون رفتار مواد سیمانی و مقاومت خاک‌های ضعیف را بهبود می‌بخشند.

## منابع


[1] غ. ج. س. و. ب. فاطمه, "ارزیابی فرآیند تثبیت خاک رس و خاکهای مسئله دار با مصالح سنتی," ۱۳۹۴.

[2] ط. علیرضا, "تأثیر افزودن نانورس روی رفتار ژئوتکنیکی خاک های ریزدانه نرم".

[3] A. Astefanei, O. Núñez, and M. T. Galceran, "Characterisation and determination of fullerenes: a critical review," *Anal. Chim. Acta*, vol. 882, pp. 1–21, 2015.

[4] K. Saeed and I. Khan, "Preparation and characterization of single-walled carbon nanotube/nylon 6, 6 nanocomposites," *Instrum. Sci. Technol.*, vol. 44, no. 4, pp. 435–444, 2016.

[5] J. M. Ngoy, N. Wagner, L. Riboldi, and O. Bolland, "A CO2 capture technology using multi-walled carbon nanotubes with polyaspartamide surfactant," *Energy Procedia*, vol. 63, pp. 2230–2248, 2014.

[6] L. F. Mabena, S. S. Ray, S. D. Mhlanga, and N. J. Coville, "Nitrogen-doped carbon nanotubes as a metal catalyst support," *Appl. Nanosci.*, vol. 1, no. 2, pp. 67–77, 2011.

[7] E. C. Dreaden, A. M. Alkilany, X. Huang, C. J. Murphy, and M. A. El-Sayed, "The golden age: gold nanoparticles for biomedicine," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 41, no. 7, pp. 2740–2779, 2012.

[8] W. Sigmund *et al.*, "Processing and structure relationships in electrospinning of ceramic fiber systems," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 89, no. 2, pp. 395–407, 2006.

[9] S. Ali *et al.*, "Electrocatalytic performance of Ni@ Pt core–shell nanoparticles supported on carbon nanotubes for methanol oxidation reaction," *J. Electroanal. Chem.*, vol. 795, pp. 17–25, 2017.

[10] S. Sun, C. B. Murray, D. Weller, L. Folks, and A. Moser, "Monodisperse FePt nanoparticles and ferromagnetic FePt nanocrystal superlattices," *Science (80-. ).*, vol. 287, no. 5460, pp. 1989–1992, 2000.

[11] T. Hisatomi, J. Kubota, and K. Domen, "Recent advances in semiconductors for photocatalytic and photoelectrochemical water splitting," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 43, no. 22, pp. 7520–7535, 2014.

[12] M. Mansha, I. Khan, N. Ullah, and A. Qurashi, "Synthesis, characterization and visible-light-driven photoelectrochemical hydrogen evolution reaction of carbazole-containing conjugated polymers," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 16, pp. 10952–10961, 2017.

[13] J. P. Rao and K. E. Geckeler, "Polymer nanoparticles: preparation techniques and size-control parameters," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 36, no. 7, pp. 887–913, 2011.

[14] M. K. Rawat, A. Jain, and S. Singh, "Studies on binary lipid matrix based solid lipid nanoparticles of repaglinide: in vitro and in vivo evaluation," *J. Pharm. Sci.*, vol. 100, no. 6, pp. 2366–2378, 2011.

[15] S. Mashaghi, T. Jadidi, G. Koenderink, and A. Mashaghi, "Lipid nanotechnology," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 14, no. 2, pp. 4242–4282, 2013.

[16] M. Gujrati, A. Malamas, T. Shin, E. Jin, Y. Sun, and Z.-R. Lu, "Multifunctional cationic lipid-based nanoparticles facilitate endosomal escape and reduction-triggered cytosolic siRNA release," *Mol. Pharm.*, vol. 11, no. 8, pp. 2734–2744, 2014.

[17] A. Puri *et al.*, "Lipid-based nanoparticles as pharmaceutical drug carriers: from concepts to clinic," *Crit. Rev. Ther. Drug Carr. Syst.*, vol. 26, no. 6, 2009.

[18] K. P. Chong, "Nano science and engineering in mechanics and materials," in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2003, vol. 3719, pp. 273–281.

[19] B. Fakhim, A. Hassani, A. Rashidi, and P. Ghodousi, "Predicting the impact of multiwalled carbon nanotubes on the cement hydration products and durability of cementitious matrix using artificial neural network modeling technique," *Sci. World J.*, vol. 2013, 2013.

[20] M. Arabania, A. K. Haghib, and Y. Moradic, "Evaluation of mechanical properties improvement of clayey sand by using carbon nanotubes," in *Proceedings of the 4th International Conference on Nanostructures (ICNS4), Kish Island, Iran*, 2012, pp. 12–14.

[21] C. Lu, Y.-L. Chung, and K.-F. Chang, "Adsorption of trihalomethanes from water with carbon nanotubes," *Water Res.*, vol. 39, no. 6, pp. 1183–1189, 2005.

[22] S. Li, T. A. Anderson, M. J. Green, J. D. Maul, and J. E. Cañas-Carrell, "Polyaromatic hydrocarbons (PAHs) sorption behavior unaffected by the presence of multi-walled carbon nanotubes (MWNTs) in a natural soil system," *Environ. Sci. Process. Impacts*, vol. 15, no. 6, pp. 1130–1136, 2013.

[23] Z. Tong, M. Bischoff, L. Nies, B. Applegate, and R. F. Turco, "Impact of fullerene (C60) on a soil microbial community," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 41, no. 8, pp. 2985–2991, 2007.

[24] A. Johansen *et al.*, "Effects of C60 fullerene nanoparticles on soil bacteria and protozoans," *Environ. Toxicol. Chem. An Int. J.*, vol. 27, no. 9, pp. 1895–1903, 2008.

[25] G. Dietler, C. Aubert, D. S. Cannell, and P. Wiltzius, "Gelation of colloidal silica," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 57, no. 24, p. 3117, 1986.

[26] Y.-L. Liu, C.-Y. Hsu, W.-L. Wei, and R.-J. Jeng, "Preparation and thermal properties of epoxy-silica nanocomposites from nanoscale colloidal silica," *Polymer (Guildf).*, vol. 44, no. 18, pp. 5159–5167, 2003.

[27] J. E. Martin, J. P. Wilcoxon, D. Schaefer, and J. Odinek, "Fast aggregation of colloidal silica," *Phys. Rev. A*, vol. 41, no. 8, p. 4379, 1990.

[28] P. Persoff, J. Apps, G. Moridis, and J. M. Whang, "Effect of dilution and contaminants on sand grouted with colloidal silica," *J. Geotech. geoenvironmental Eng.*, vol. 125, no. 6, pp. 461–469, 1999.

[29] T. Kodaka, Y. Ohno, and T. Takyu, "Cyclic shear characteristics of treated sand with colloidal silica grout," in *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2005, pp. 401–404.

[30] P. M. Gallagher, "Passive site remediation for mitigation of liquefaction risk." Virginia Tech, 2000.

[31] P. M. Gallagher, A. Pamuk, and T. Abdoun, "Stabilization of liquefiable soils using colloidal silica grout," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 19, no. 1, pp. 33–40, 2007.

[32] M. Mollamahmutoglu and Y. Yilmaz, "Pre-and post-cyclic loading strength of silica-grouted sand," *Proc. Inst. Civ. Eng. Eng.*, vol. 163, no. 6, pp. 343–348, 2010.

[33] Z. Darvishi and A. Morsali, "Synthesis and characterization of Nano-bentonite by sonochemical method," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 18, no. 1, pp. 238–242, 2011.

[34] M. I. Abdou, A. M. Al-Sabagh, and M. M. Dardir, "Evaluation of Egyptian bentonite and nano-bentonite as drilling mud," *Egypt. J. Pet.*, vol. 22, no. 1, pp. 53–59, 2013.

[35] A. Teplitskiy, R. Gee, and R. Kourmaev, "Application of physical-chemical properties of bentonite utilized in construction, as viewed through the TRIZ prism," *TRIZ Journal,( www. trizjournal. com/archives/2005/10/05. pdf*, 2005.

[36] C. S. El Mohtar, J. Clarke, A. Bobet, M. Santagata, V. Drnevich, and C. Johnston, "Cyclic response of a sand with thixotropic pore fluid," in *Geotechnical earthquake engineering and soil dynamics IV*, 2008, pp. 1–10.

[37] D. A. Rugg, J. Yoon, H. Hwang, and C. S. El Mohtar, "Undrained shearing properties of sand permeated with a bentonite suspension for static liquefaction mitigation," in *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*, 2011, pp. 677–686.

[38] C. S. El Mohtar, A. Bobet, M. C. Santagata, V. P. Drnevich, and C. T. Johnston, "Liquefaction mitigation using bentonite suspensions," *J. Geotech. geoenvironmental Eng.*, vol. 139, no. 8, pp. 1369–1380, 2013.

[39] A. F. Witthoeft, M. C. Santagata, and A. Bobet, "Numerical study of the effectiveness of bentonite treatment for liquefaction mitigation," in *GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering*, 2012, pp. 1958–1967.

[40] M. Kroon, W. L. Vos, and G. H. Wegdam, "Structure and formation of a gel of colloidal disks," *Phys. Rev. E*, vol. 57, no. 2, p. 1962, 1998.

[41] P. Levitz, E. Lecolier, A. Mourchid, A. Delville, and S. Lyonnard, "Liquid-solid transition of Laponite suspensions at very low ionic strength: Long-range electrostatic stabilisation of anisotropic colloids," *EPL (Europhysics Lett.*, vol. 49, no. 5, p. 672, 2000.

[42] H. Tanaka, J. Meunier, and D. Bonn, "Nonergodic states of charged colloidal suspensions: Repulsive and attractive glasses and gels," *Phys. Rev. E*, vol. 69, no. 3, p. 31404, 2004.

[43] A. El Howayek, A. Bobet, C. T. Johnston, M. Santagata, and J. V Sinfield, "Microstructure of sand-laponite-water systems using cryo-SEM," in *Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability*, 2014, pp. 693–702.

[44] X. Li, S. Majdi, J. Dunevall, H. Fathali, and A. G. Ewing, "Quantitative measurement of transmitters in individual vesicles in the cytoplasm of single cells with nanotip electrodes," *Angew. Chemie*, vol. 127, no. 41, pp. 12146–12150, 2015.

[45] D. A. K. Taipodia J., Dutta J., "Effect of nanoparticles on properties of soil, Proc," 2011.

[46] M. R. Taha and O. M. E. Taha, "Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior," *J. Nanoparticle Res.*, vol. 14, no. 10, pp. 1–13, 2012.

[47] Z. H. Majeed, M. R. Taha, and I. T. Jawad, "Stabilization of soft soil using nanomaterials," *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 4, pp. 503–509, 2014.

[48] G. Zhang, J. T. Germaine, A. J. Whittle, and C. C. Ladd, "Index properties of a highly weathered old alluvium," *Geotechnique*, vol. 54, no. 7, pp. 441–451, 2004.

[49] N. Khalid *et al.*, "Effect of nanoclay in soft soil stabilization," in *InCIEC 2014*, Springer, 2015, pp. 905–914.

[50] M. Padidar, A. Jalalian, M. Abdouss, P. Najafi, N. Honarjoo, and J. Fallahzade, "Effect of nanoclay on soil erosion control," *NaniCon. Brno. Czesh Republic, EU*, 2014.

[51] X. Kong and M. M. Ohadi, "Applications of micro and nano technologies in the oil and gas industry-an overview of the recent progress," 2010.

[52] B. Iranpour, "The influence of nanomaterials on collapsible soil treatment," *Eng. Geol.*, vol. 205, pp. 40–53, 2016.

[53] بهاری, شاه‌نظری and علی, "بررسی آزمایشگاهی تثبیت بستر خاکی ریزدانه با استفاده از نانورس," *علوم آب و خاک (Isfahan Univ. Technol.*, vol. 19, no. 72, pp. 107–114, 2015.

# ??????

**Sarveh Mohammadi [1]* , Abolfazl Soltani[2]**

1- Master Student in Geotechnics ???????????
2- Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, 1678815811, Lavizan, Tehran, Iran
* Corresponding Author: Servehmoh@yahoo.com

**Abstract**
??????????????????????????????????????

**Keywords:** Sprawl, Environmental impacts, Brownfield, Redevelopment, Marginalization