# تأثیر افزودن نانورس روی رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه نرم

علیرضا طبرسا؛ دانشگاه گلستان، گرگان

**تاریخ: دریافت** ۹۵/۰۵/۰۵ **پذیرش** ۹۵/۱۱/۱۶

## چکیده

با توجه به گسترش بسیار زیاد خاک‌های مسئله‌دار در ایران، اصلاح و به‌سازی این قبیل خاک‌ها به‌عنوان امری اجتناب‌ناپذیر نقش بسیار مهمی در پروژه‌های عمرانی دارد. 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 شبکهٔ سد بوستان گنبد و اینچه‌برون واقع در استان گلستان انتخاب شد. به‌منظور بررسی تأثیر به‌سازی خاک‌های مذکور با کمک نانورس، آزمایش‌های مختلف ژئوتکنیکی از قبیل حدود اتربرگ، تراکم استاندارد، مقاومت فشاری تک‌محوری، سه‌محوری تحکیم نیافته زهکشی نشده و تحکیم مضاعف انجام گرفت. نتایج آزمایش‌ها حاکی از نقش بسیار مهم نانورس بر خواص خمیری، مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری خاک بوده است. هم‌چنین با توجه به اهمیت نوع خاک می‌توان دریافت که در اثر افزودن نانورس به خاک‌های بررسی شده پتانسیل رمبندگی نمونه‌ها بسیار محسوس کاهش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی**: نانورس، رمبندگی، به‌سازی، خاک‌های ریزدانه

* **نویسنده مسئول** a.tabarsa@gu.ac.ir

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

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.3.2 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.225 ]

## مقدمه

خاک همواره به‌عنوان 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 تغییر شکل 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 آن اشاره کرد. براساس پژوهش‌های کلمنس و فینبار [۱]، راجرز و همکاران [۲] و گائو [۳] خاک‌های رمبنده در سطح‌های وسیعی در حدود ۱۷ درصد ایالات متحده، ۱۷ درصد اروپا و ۱۵ درصد روسیه و سیبری و بخش‌های عظیمی از چین توزیع شده‌اند. تجربیات حاصل از بررسی‌های ژئوتکنیکی انجام شده در مناطق مختلف ایران بیان‌گر وجود خاک‌های رمبنده در بسیاری از دشت‌های پوشیده از رسوبات بادرفتی مانند گرگان، مغان، ساوه، مناطق مرکزی و دشت‌های جنوب شرقی کشور و در امتداد رشته کوه‌های البرز و زاگرس است [٤]. عوامل مختلفی بر میزان رمبندگی خاک‌ها تأثیر دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به مشخصات هیدرولیکی و تنش اشاره کرد [۵]. خاک‌های رمبنده در اثر مرطوب شدن، نشست‌های زیادی می‌کند به‌طوری‌که طبق پژوهش‌های انجام شده مقدار نشست می‌تواند به ۲ الی ٦ درصد ضخامت لایه خاک نیز برسد [٦]. در صورت شناسایی نکردن این نوع خاک‌ها، اگر سازه‌ای روی آن‌ها احداث شود، سازه احداث شده در صورت اشباع شدن و تغییرات رطوبت خاک دچار آسیب و زیان می‌شود. در این رابطه استفاده از عناصر کمکی در تقویت و اصلاح خاک از زمان‌های گذشته مورد توجه بشر بوده است. به‌طوری‌که با پیدایش مصالح جدید و نیاز انسان به پروژه‌های مختلف عمرانی موجب شده تا زمینه و بستر مناسبی برای کشف روش‌های نوین در علم مهندسی ژئوتکنیک خصوصاً روش‌های به‌سازی و اصلاح

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.3.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.225 ]

خواص مهندسی خاک فراهم شود و متعاقباً تئوری خاک مسلح و روش‌های مرتبط با آن دارای اهمیت شایانی شود. در این راستا محققان به استفاده از نانومواد در به‌سازی خاک‌های ضعیف توجه کرده‌اند به‌طوری‌که در دهۀ گذشته استفاده از نانوتکنولوژی رشد چشم‌گیری در بسیاری از علوم داشته است [۷]. در این خصوص استفاده از نانومواد در مهندسی ژئوتکنیک کاربرد بسیار زیادی پیدا کرده است. نتایج بررسی‌های مختلف نشان داده است که با افزایش درصد نانوسیلیس مقاومت فشاری و ضریب نفوذپذیری خاک به‌ترتیب افزایش و کاهش یافته و هم‌چنین باعث تغییر رفتار نمونه‌های خاک از حالت الاستیک به الاستوپلاستیک می‌گردد [۸]، [۹]، [۱۰].

تایپودیا و همکاران [۱۱] به بررسی تأثیر نانوذرات دی‌کلرید کلسیم، اکسیدکلسیم و نیترات‌پتاسیم روی خواص خاک پرداختند. نتایج آن‌ها حاکی از افزایش مقاومت برشی، کاهش نفوذپذیری و کاهش تراکم پذیری تحت افزودن نانوذرات بوده است. طاها و طاها [۱۲] 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 [۱۳] 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 بررسی‌های مختلف نشان داده است که با افزودن نانومواد، حدود اتربرگ خاک نیز افزایش می‌یابد [۱٤]، [۱۵]. 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 [۱٦]. با توجه به اهمیت بررسی‌های ژئوتکنیک زیست‌محیطی و تأثیر شیرابه‌ها در طراحی مدفن بهداشتی زباله‌ها، پژوهش‌*ای* 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

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.3.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.225 ]

خاک شده و به‌عبارت 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 [۱۷]، [۱۸]. با توجه به اهمیت به‌سازی خاک‌های مسئله‌دار 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 [۱۹]. بهاری و شاه‌نظری [۲۰] 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.

با توجه به گسترش خاک‌های رمبنده در ایران و اهمیت به‌سازی آن‌ها و نیز مشاهده خرابی‌های گسترده کانال‌های اصلی شبکه سد بوستان گنبد واقع در شمال شرقی استان گلستان ناشی از نشست‌های زیاد خاک منطقه، در این تحقیق سعی شده است تا تأثیر اضافه کردن مقادیر مختلف نانوذرات رس بر رفتار خاک‌های ریزدانه ضعیف با کمک پژوهش‌های آزمایشگاهی بررسی شود و تأثیر پارامترهای مختلف در مکانیسم به‌سازی بررسی و ارزیابی شود.

## مصالح و روش‌های انجام آزمایش

### ۱. مشخصات خاک‌های استفاده شده

با توجه به اهمیت موضوع و امکان استفاده عملی از نتایج و دستاوردهای این تحقیق در پروژه‌های عمرانی و نیز با توجه به بازدیدها و بررسی میدانی صورت گرفته، مشاهده شد که در بخش‌های عظیمی از کانال‌های اصلی شبکه سد بوستان گنبد واقع در شمال شرقی استان گلستان به علت شرایط ژئوتکنیکی خاص منطقه، نشست‌های زیاد و غیر یک‌نواخت خاک در اطراف کانال ناشی از آبگیری در زمان بهره‌برداری رخ داده‌است که این عامل باعث بروز ترک‌های

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.3.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.225 ]

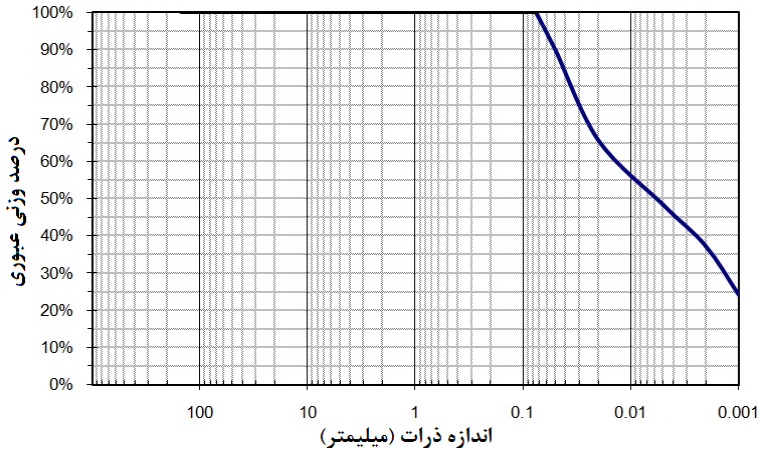
زیاد در پوشش بتنی کانال و خاک زیرین و اطراف دیوارها شده که در نهایت موجب تخریب بخش‌های عظیمی از کانال‌های مذکور شد. از این‌رو، به‌منظور بررسی تأثیر به‌سازی خاک در شرایط میدانی، همهٔ آزمایش‌ها و بررسی‌های ژئوتکنیکی روی نمونه‌های خاک واقع در محل کانال‌های مذکور تحت استانداردهای معتبر انجام شد. در این ارتباط تعدادی گمانه‌ی صحرایی به‌منظور شناخت خاک در دیواره‌ها و کف کانال مورد نظر حفاری شد. طی حفر گمانه‌های اکتشافی، با توجه به تغییرات لایه‌های مشاهده شده، از اعماق و لایه‌های مختلف برای انجام آزمون‌های آزمایشگاهی و شناسایی خاک نمونه‌برداری شده است. هم‌چنین نمونه‌های دست نخورده نیز به‌وسیله نمونه‌گیر شلبی برای انجام آزمایش‌های لازم انتخاب شد. شکل ۱ کانال‌های بررسی شده را نشان می‌دهد.

**شکل ۱. نمایی از محدودهٔ آزمایش خاک واقع در کانال‌های اصلی شبکه سد بوستان گنبد و خرابی‌های رخداده شده در آن**

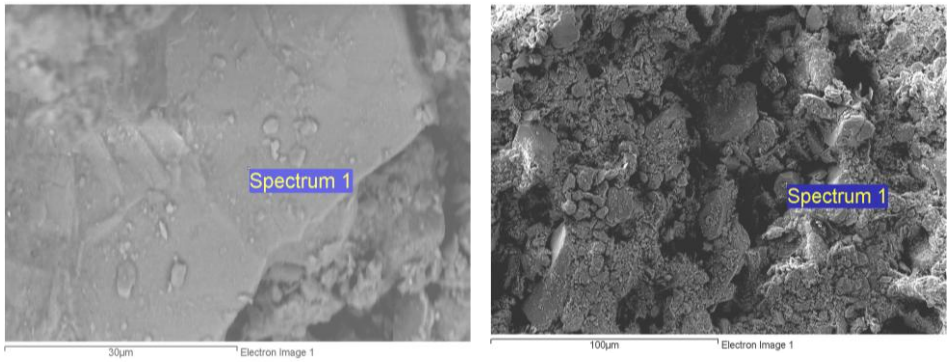
هم‌چنین به‌منظور بررسی اثر نوع خاک در مکانیسم به‌سازی، آزمایش‌ها روی خاک دیگری واقع در منطقه اینچه‌برون در شمال استان گلستان نیز انجام شد. برای شناخت و تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک‌های استفاده شده در تحقیق، آزمایش‌های مختلفی از قبیل دانه‌بندی و هیدرومتری، حدود اتربرگ، وزن مخصوص ویژه و تراکم استاندارد خاک تحت استانداردهای معتبر انجام شد. به‌عنوان نمونه شکل ۲ بیان‌گر منحنی دانه‌بندی خاک شبکه سد بوستان گنبد است. با توجه به اهمیت تأثیر بافت و کانی‌شناسی خاک‌های بررسی شده در

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.3.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.225 ]

مکانیسم به‌سازی، شکل ۳ نتایج آزمایش‌های میکروسکوپی الکترونی (SEM) را نشان می‌دهد. هم‌چنین در جدول ۱ خلاصه مشخصات خاک‌های آزمایش شده آورده شده است.




**شکل ۲. منحنی دانه‌بندی خاک منطقهٔ شبکه سد بوستان گنبد**




**(ب)** **(الف)**

**شکل ۳. نتایج آزمایش SEM خاک‌های مورد آزمایش**
**الف) منطقه اینچه برون، ب)شبکه سد بوستان گنبد**

### ۲. نانومواد استفاده شده

نانوذره استفاده شده در این تحقیق به‌منظور به‌سازی خاک، نانورس بوده که از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان به نام تجاری Clay montmorillonite K (10) تهیه شده است. در این ارتباط مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانورس مورد استفاده در جدول‌های ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.3.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.225 ]

**جدول ۱. مشخصات خاک‌های استفاده شده**

| نام خاک / ویژگی خاک | شبکه سد بوستان گنبد | منطقه اینچه برون |
|---|---|---|
| نام خاک در طبقه‌بندی متحد | CL-ML | CL-ML |
| وزن مخصوص ویژه ذرات خاک | ۲/۵٤ | ۲/۵۵ |
| حد خمیری (درصد) | ۱٦ | ۱۸ |
| حد روانی(درصد) | ۲۲ | ۲۳ |
| شاخص خمیری (درصد) | ٦ | ۵ |
| عبوری از الک ۲۰۰ (درصد) | ۹۵ | ۸٦ |
| اندازه متوسط دانه‌ها ($D_{50}$) (میلی‌متر) | ۰/۰۰٦ | ۰/۰٤ |
| رطوبت بهینه (درصد) | ۱۵ | ۱٦ |
| وزن مخصوص خشک ماکزیمم (گرم بر سانتمیتر مکعب) | ۱/۵٤ | ۱/٦۰ |

**جدول ۲. مشخصات فیزیکی نانورس استفاده شده**

| ویژگی‌ها | مقدار | واحد سنجش |
|---|---|---|
| نام علمی | مونتموریلونیت | کانی رسی |
| چگالی | ۳۰۰ تا ۳۷۰ | $kg/m^3$ |
| اندازه ذرات | ۱ تا ۲ | nm |
| مساحت سطح ویژه | ۲۲۰–۲۷۰ | $m^2/g$ |
| مقدار هدایت الکتریکی | ۲۵ | MV |
| ضریب تبادل یونی | ٤۸ | Meg/100g |
| فاصلهٔ خالی بین ذرات | ٦۰ | A° |
| رنگ | زرد | – |
| رطوبت | ۱ تا ۲ | ٪ |

**جدول۳. درصد اکسیدهای تشکیل‌دهندهٔ شیمیایی نانورس استفاده شده**

| $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | MgO | CaO | $Na_2O$ | $K_2O$ | $TiO_2$ | LOI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۵۰/۹۵ | ۱۹/٦۰ | ۵/٦۲ | ۳/۲۹ | ۱/۹۷ | ۰/۹۸ | ۰/۸٦ | ۰/٦۲ | ۱۵/٤۵ |

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.3.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.225 ]

## بررسی‌های آزمایشگاهی

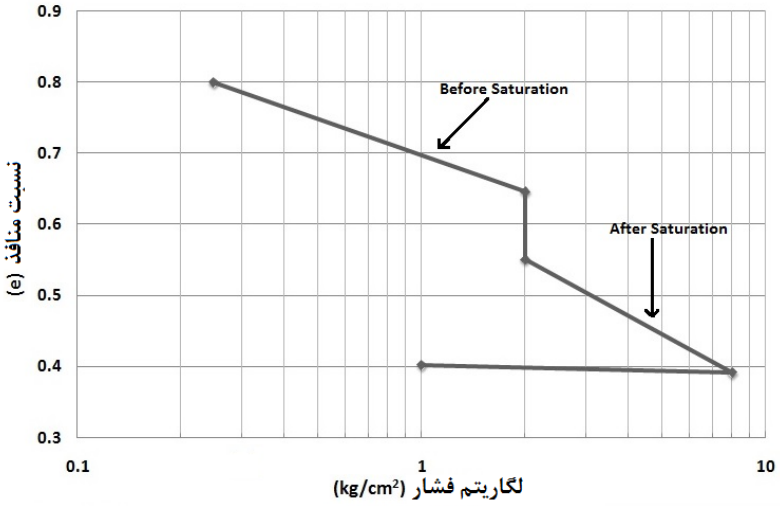
### ۱. آماده‌سازی نمونه‌ها

به‌منظور بررسی تأثیر افزودن نانورس بر مکانیسم به‌سازی خاک‌های بررسی شده، با توجه به وزن خشک نمونه‌ها، مقادیر مختلف ۰/۵، ۱، ۲ و ۳ درصد نانورس به‌صورت وزنی به خاک مورد نظر اضافه شد. با توجه به امکان استفاده از نتایج عملی تحقیق، شیوه انتخاب شده در خصوص اختلاط مصالح مصرفی در آزمایشگاه، متناسب با شرایط اجرا در پروژه‌های عمرانی در نظر گرفته شد. برای تهیهٔ نمونه یک‌نواخت، بعد از مشخص شدن مقادیر وزنی به تفکیک مصالح مورد نظر، مقادیر مختلف وزنی نانورس به‌صورت تدریجی همراه با اضافه کردن آب تحت شرایط رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک ماکزیمم به خاک اضافه شد. بعد از هم‌زدن اولیه با روش دستی، عمل اختلاط با کمک هم‌زن ماشینی با سرعت کم به‌طوری‌که سبب جداسازی نمونه‌های افزودنی نشود به‌منظور حصول یک نمونه همگن و یک‌نواخت برای ساخت نمونه‌های مورد نیاز در آزمایش‌های مختلف ادامه یافت. بعد از اختلاط کامل ذرات ریز نانورس با خاک و آب، به‌دلیل زمان‌بر بودن جذب رطوبت ذرات رسی در فرایند به‌سازی شیمیایی خاک، نمونه‌ها در ظرف دربسته به‌مدت ۱٦ ساعت نگه‌داری شدند [۲۱].

### ۲. مراحل انجام آزمایش

با توجه به ضرورت به‌سازی و اصلاح خاک‌های ریزدانه نرم و ضعیف، ابتدا پتانسیل رمبندگی خاک منطقهٔ بررسی شده با کمک آزمایش تحکیم مضاعف طبق استاندارد مربوط انجام پذیرفت. در این آزمایش نمونه خاک در دستگاه اودئومتر قرار گرفته و فشار قائم تا رسیدن به فشارهای احتمالی واقعی افزایش داده می‌شود. در اثر این بارگذاری نمونه اشباع شده و تغییر شکل خاک در اثر فرونشست ثبت می‌شود. قابل ذکر است که در این آزمایش فشارهای قائم ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۲ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع در حالت رطوبت طبیعی بارگذاری شده و سپس تحت فشارهای ۲، ٤ و ۸ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع در حالت اشباع نمونه‌ها تحکیم پیدا کرده و آن‌گاه باربرداری تا فشار ۱ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع انجام شده است. (شکل ٤).

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.3.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.225 ]




**شکل ٤. منحنی تحکیم مضاعف نمونه خاک شبکه سد بوستان گنبد**

با توجه به نتایج آزمایش مذکور و بررسی معیارهای مختلف رمبندگی خاک می‌توان دریافت که خاک منطقه دارای پتانسیل رمبندگی بوده است، به‌طوری‌که با توجه به بازدیدهای میدانی و صحرایی صورت گرفته از منطقهٔ بررسی شده، تخریب کانال‌های آب و پوشش بتنی آن گواه این ادعا است. هم‌چنین در این راستا نتایج معیارهای جنینگز و نایت [۲۲] و استاندارد ASTM [۲۳] بهترین تطابق را با خاک‌های آزمایش شده نشان داد به‌طوری‌که طبق جدول ٤ و نتایج حاصل از آزمایش مذکور، میزان پتانسیل رمبندگی نمونه‌های خاک آزمایش شده بین ٦ تا ٦/٢ درصد تعیین شد که بیان‌گر درجهٔ رمبندگی با شدت متوسط تا نسبتاً شدید است.

**جدول ٤. طبقه‌بندی پتانسیل رمبندگی [۲۳]**

| درجهٔ رمبندگی | میزان پتانسیل رمبندگی (درصد) |
|---|---|
| ندارد | ۰ |
| اندک | ۰/۱ تا ۲ |
| متوسط | ۲/۱ تا ٦ |
| نسبتا شدید | ٦/۱ تا ۱۰ |
| شدید | بزرگ‌تر از ۱۰ |

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.3.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.225 ]

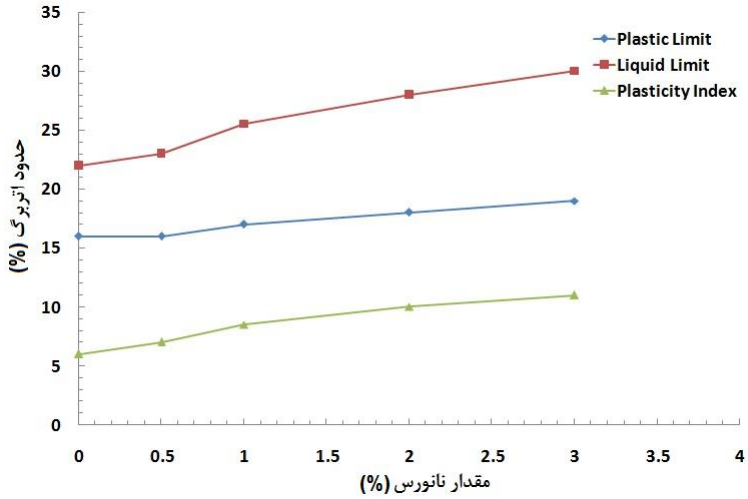
در نهایت بعد از تعیین پتانسیل رمبندگی خاک، آزمایش‌های مختلفی از قبیل حدود اتربرگ، تراکم استاندارد، مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت فشاری سه‌محوری و تحکیم مضاعف روی نمونه‌های معمولی و به‌سازی شده با مقادیر مختلف نانورس انجام شد که در ادامه به آن می‌پردازیم.

## ارائه و بررسی نتایج به‌دست آمده از آزمایش روی نمونه‌های اصلاح شده

### ۱. آزمایش‌های حدود اتربرگ

این آزمایش به‌منظور تعیین پلاستیسیته و خواص خمیری نمونه‌های بررسی شده انجام شده است. با افزودن نانورس به خاک مشاهده می‌شود که حد روانی و حد خمیری نمونه‌ها مطابق شکل ۵ به‌تدریج زیاد می‌شود که نتیجه آن افزایش شاخص خمیری نمونه‌های به‌سازی شده با نانورس است. به‌عنوان نمونه با افزودن ۲ درصد نانورس به خاک، شاخص خمیری نمونه‌های شبکه سد بوستان حدود ۸۰ درصد زیاد خواهد شد. با افزایش خصوصیات خمیری خاک‌های آزمایش شده در اثر افزودن نانورس، تحمل خاک در برابر تغییر شکل‌های بزرگ به‌دلیل تغییر رطوبت ازدیاد یافته و در نتیجه خطر ترک‌خوردگی کاهش و این عامل منجر به کاهش ضریب نفوذپذیری می‌شود که این تغییر رفتار در پوشش کانال‌های آب‌بند نقش بسیار مهمی دارد [۲٤]. در این ارتباط علت افزایش شاخص خمیری نمونه‌ها را می‌توان به تمایل نمونه‌ها به افزایش حجم آب بیش‌تر در اثر افزودن نانورس و ازدیاد بار الکتریکی ناشی از فعل و انفعالات شیمیایی و تأثیر آن بر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک اشاره کرد. هم‌چنین می‌توان گفت که علت افزایش حد روانی و حد خمیری وجود رطوبت در انباشتگی‌های نانومواد بوده است که این رطوبت در خواص خمیری خاک نقشی نداشته و فقط در گرم‌خانه حذف شده و سطح ویژه بسیار بزرگ آن‌ها باعث ایجاد فعل و انفعالات بین ذره‌ای گسترده‌تری در خاک می‌شود [۲۵]، [۲٦]. هم‌چنین نتایج نشان دادند که در مقادیر بیش‌تر از ۲ درصد نانورس، میزان تغییرات شاخص خمیری آن‌چنان محسوس و چشم‌گیر نیست.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.3.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.225 ]



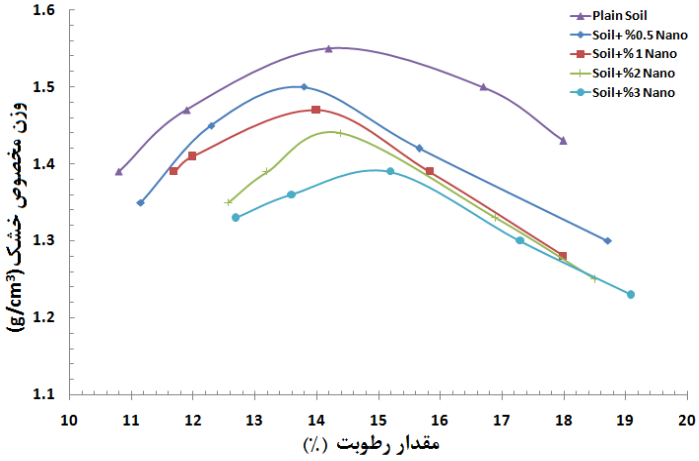

**شکل ۵. تأثیر افزودن نانورس بر حدود اتربرگ خاک شبکه سد بوستان گنبد**

## ۲. آزمایش‌های تراکم استاندارد

نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که با افزودن مقادیر مختلف نانورس به خاک‌های آزمایش شده، وزن مخصوص خشک ماکزیمم و درصد رطوبت بهینه نمونه‌ها به‌ترتیب کاهش و افزایش یافته که علت افزایش وزن مخصوص خشک نمونه‌ها را می‌توان به جای‌گزینی ذرات ریز نانو با دانسیته کم‌تر با خاک مرتبط دانست. هم‌چنین به‌دلیل تمایل نمونه‌ها به جذب آب بیش‌تر ناشی از افزایش سطح ویژه خاک در اثر افزودن نانورس، درصد رطوبت بهینه نمونه‌ها زیاد شده است. با افزایش درصد نانورس به‌دلیل تغییر ساختار خاک و تمایل زیاد نمونه‌ها به جذب آب بیش‌تر، درصد رطوبت بهینه نمونه‌ها زیاد شده است. چنان‌که در شکل ٦ نشان داده شده، می‌توان گفت در مقادیر راست رطوبت بهینه به‌علت تغییر ساختمان خاک، با افزایش درصد مقادیر نانورس تغییرات وزن مخصوص خشک نمونه‌ها در مقایسه با مقادیر رطوبت کم‌تر از رطوبت بهینه، خیلی محسوس نیست. در این رابطه نتایج نشان دادند که در اثر افزودن ۳ درصد نانورس به خاک شبکه بوستان، وزن مخصوص خشک ماکزیمم و رطوبت بهینه نمونه‌ها به‌ترتیب حدود ۱۰ و ۷ درصد کاهش و افزایش یافته است. هم‌چنین تأثیر افزودن نانورس بر مشخصات تراکمی خاک منطقه اینچه‌برون در جدول ۵ نشان داده شده است. در

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.3.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.225 ]

این ارتباط می‌توان گفت در مقادیر کم نانورس، نرخ کاهشی وزن مخصوص خشک ماکزیمم نمونه‌ها در مقایسه با مقادیر زیاد نانورس بیش‌تر است. با توجه به تأثیر نسبتاً کم افزودن نانورس بر مقادیر مذکور، خصوصیات تراکمی نمونه‌ها آن‌چنان دست‌خوش تغییر نشده است.




**شکل ٦. تأثیر افزودن نانورس بر منحنی تراکم خاک شبکه سد بوستان گنبد**

**جدول۵. تأثیر افزودن نانورس بر خصوصیات تراکمی خاک اینچه‌برون**

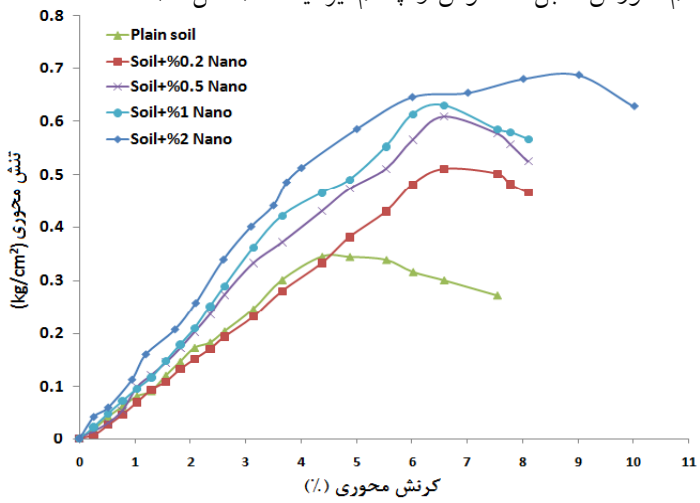
| مقدار رطوبت بهینه (درصد) | وزن مخصوص خشک ماکزیمم (گرم بر سانتیمتر مکعب) | مقدار نانورس (درصد) |
|---|---|---|
| ١٦/١ | ١/٦٢ | ٠ |
| ١٦/٣ | ١/٥٣ | ٠/٥ |
| ١٦/٧ | ١/٥٠ | ١ |
| ١٧/١ | ١/٤٥ | ٢ |
| ١٧/٠ | ١/٤٠ | ٣ |

### ۳. آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری

آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری به‌منظور ارزیابی خواص مقاومتی خاک‌های معمولی و به‌سازی شده کاربرد زیادی دارد. به‌طوری‌که در این تحقیق خاک با درصدهای وزنی مختلف نانو شامل ۰/۲، ۰/۵، ۱ و۲ درصد خاک خشک تهیه و آزمایش شد. نتایج حاکی از افزایش مقاومت فشاری محصور نشده در نمونه‌های تثبیت شده با نانو بوده است. هم‌چنین می‌توان

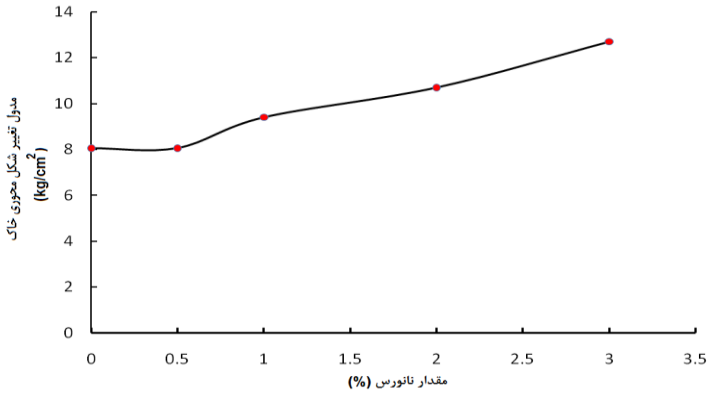
[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.3.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.225 ]

گفت با افزودن نانو به خاک کرنش در لحظه گسیختگی به‌علت افزایش خواص خمیری، تغییر بافت خاک، کاهش نسبت منافذ نمونه‌ها و پیوند بهتر بین ذرات خاک بیش‌تر شده که این مهم پیش‌تر در نتایج بررسی‌های گذشته مشاهده شد. هم‌چنین مشاهده می‌شود با افزودن بیش‌تر نانورس، نرخ تغییرات مقاومت دارای شیب ملایمی است. با افزودن نانورس به خاک به‌دلیل فعل و انفعالات شیمیایی، چسبندگی و پیوند بین ذرات و کاهش خلل و فرج خاک مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌ها زیاد می‌شود. هم‌چنین می‌توان گفت با افزودن نانورس به خاک کرنش در لحظه گسیختگی به‌علت افزایش خواص خمیری و تغییر بافت خاک بیش‌تر می‌شود. چنان‌که شکل ۷ نشان می‌دهد به‌عنوان نمونه در اثر افزودن ۱ درصد نانورس به خاک شبکه سد بوستان گنبد، مقاومت فشاری ماکزیمم نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های خاک معمولی حدود ۷۷ درصد افزایش یافته است. هم‌چنین مشاهده می‌شود با افزایش مقادیر بیش‌تر نانورس، میزان تغییرات مقاومت شیب ملایمی دارد و نتایج حاکی از افزایش مدول تغییر شکل به‌دست آمده از نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های به‌سازی شده با مقادیر مختلف نانورس در مقایسه با خاک معمولی است. شایان ذکر است میزان تغییرات این مدول در نمونه‌های خاک حاوی مقادیر کم نانورس، قابل محسوس و چشم‌گیر نیست (شکل ۸ ).




**شکل ۷. منحنی آزمایش تک‌محوری نمونه‌های خاک معمولی و به‌سازی شده با نانورس در شبکه سد بوستان گنبد**

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.3.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.225 ]



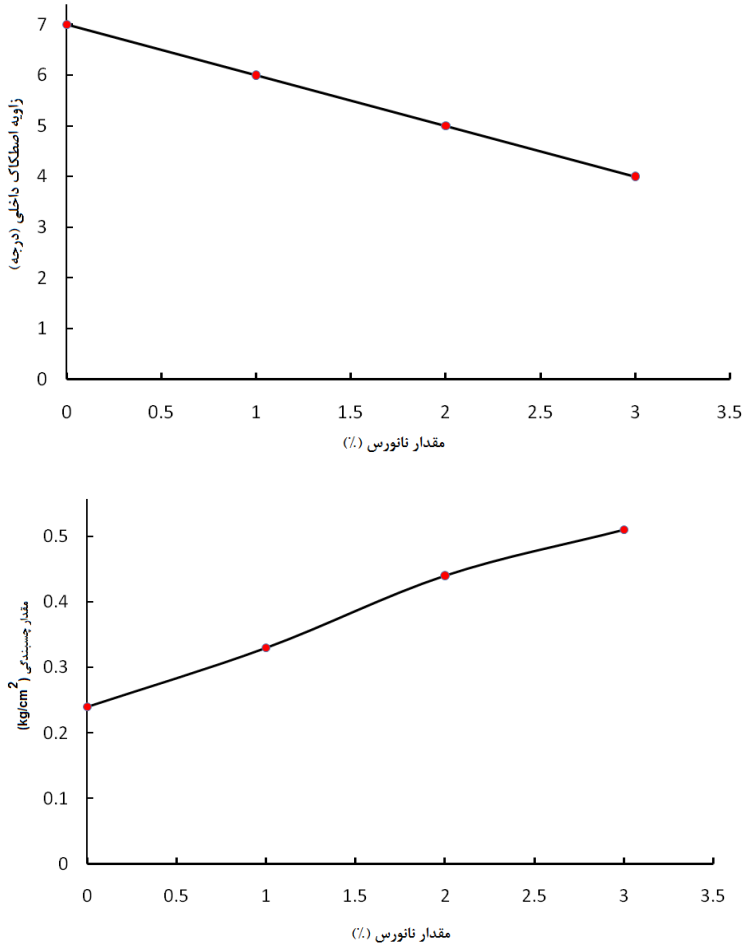

**شکل ۸. تأثیر افزودن نانورس بر مدول تغییر شکل محوری نمونه‌های خاک شبکه سد بوستان گنبد**

## ٤. آزمایش‌های مقاومت فشاری سه‌محوری

برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک در شرایط اعمال فشارهای جانبی، آزمون مقاومت فشاری سه‌محوری بر نمونه‌های خاک معمولی و به‌سازی شده با مقادیر مختلف نانورس تحت تنش‌های همه جانبه ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال در شرایط تحکیم نیافته زهکشی نشده (UU) انجام گرفت. علت انتخاب این نوع بارگذاری را می‌توان به شرایط زهکشی خاک منطقه و بررسی آبگیری کانال بررسی شده بلافاصله بعد از ساخت و عدم امکان خروج آب حفره‌ای با توجه به پوشش بتنی محافظ کانال مرتبط دانست. شایان ذکر است با توجه به نتایج مذکور خاک مورد نظر مقاومت برشی پایینی دارد. با توجه به نتایج آزمایش خاک محل دارای چسبندگی زهکشی نشده معادل ۰/۲٤ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع و زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک معادل ۷ درجه است. هم‌چنین نتایج آزمایش مذکور بر نمونه‌های به‌سازی شده با ۱، ۲ و ۳ درصد نانورس حاکی از افزایش محسوس مقدار چسبندگی و کاهش نسبتاً کم زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک است (شکل ۹). به‌عبارت دیگر، دلیل افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها ناشی از افزودن ذرات نانورس را می‌توان به اندرکنش و پیوند بین دانه‌ها ناشی از حضور ذرات نانو در بافت خاک مرتبط دانست که این مطلب پیش‌تر در نتایج تحقیقات گذشته نیز اشاره شده است [۱۵]. شایان ذکر است میزان افزایش چسبندگی در مقایسه با

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.3.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.225 ]

کاهش زاویهٔ اصطکاک داخلی نمونه‌های به‌سازی شده محسوس‌تر و چشم‌گیر است که این موضوع با نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری نیز تطابق خوبی نشان داده است.



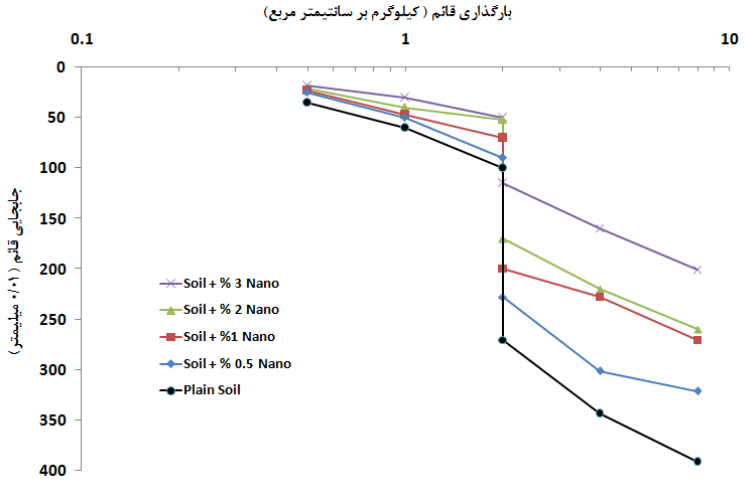

**شکل ۹. تأثیر افزودن نانورس بر پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ها در شبکه سد بوستان گنبد**

## ۵. آزمایش‌های تحکیم مضاعف

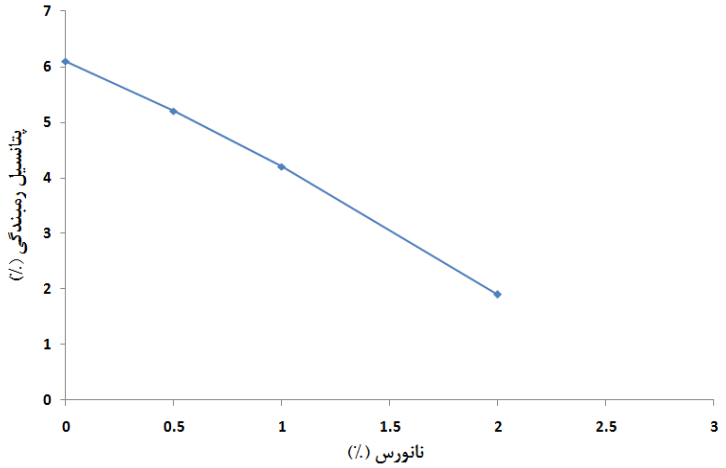
با توجه به خرابی‌های رخ‌داده در محدودهٔ بررسی شده و لزوم بررسی تأثیر نانورس بر پتانسیل رمبندگی خاک، آزمایش‌های تحکیم مضاعف به‌منظور تعیین تغییر شکل‌پذیری نمونه‌ها

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.3.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.225 ]

معمولی و تثبیت شده با نانورس تحت فشارهای مختلف انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند به‌دلیل تغییر ماهیت ساختار خاک و پرشدن منافذ موجود نمونه‌ها با ذرات ریزنانو و امکان بهتر قفل و بست بین ذرات با افزودن نانورس باعث کاهش پتانسیل رمبندگی نمونه‌ها شده است به‌طوری‌که به‌عنوان نمونه در اثر افزودن ۲ درصد نانورس به خاک پتانسیل رمبندگی نمونه‌ها حدود ٤۰ درصد کاهش می‌یابد (شکل‌های ۱۰ و ۱۱).



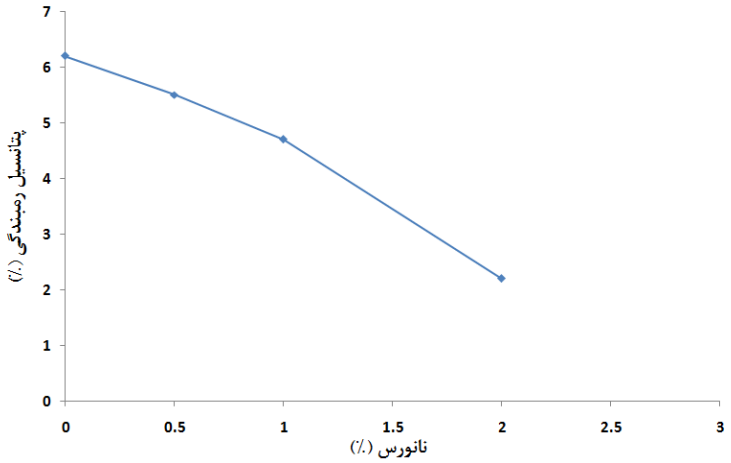

شکل ۱۰. تأثیر افزودن نانورس بر مشخصات تحکیمی نمونه‌های **خاک شبکه سد بوستان گنبد**




شکل ۱۱. تأثیر افزودن نانورس بر پتانسیل رمبندگی نمونه‌های **خاک شبکه سد بوستان گنبد**

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.3.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.225 ]

هم‌چنین نتایج آزمایش‌های انجام شده در خاک اینچه‌برون، حاکی از تأثیر مهم افزودن نانورس بر خصوصیات تحکیمی نمونه‌های آزمایش است که با توجه به نتایج مذکور، پتانسیل رمبندگی نمونه‌های به‌سازی شده با مقادیر مختلف نانورس مطابق شکل ۱۲ به‌دست آمده است.



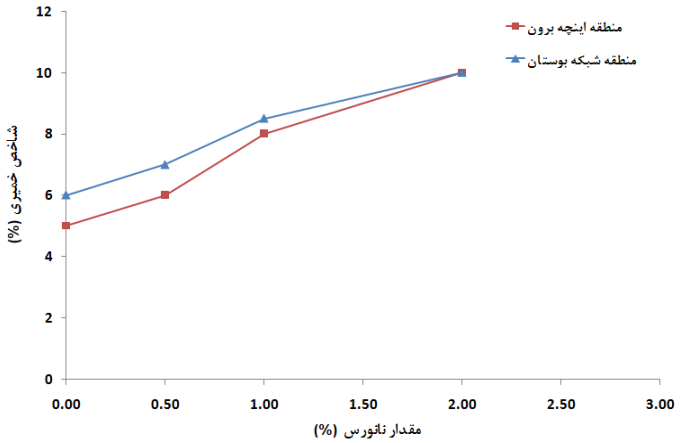

شکل ۱۲. تأثیر افزودن نانورس بر پتانسیل رمبندگی نمونه‌های **خاک اینچه‌برون**

## ٦. تأثیر نوع خاک

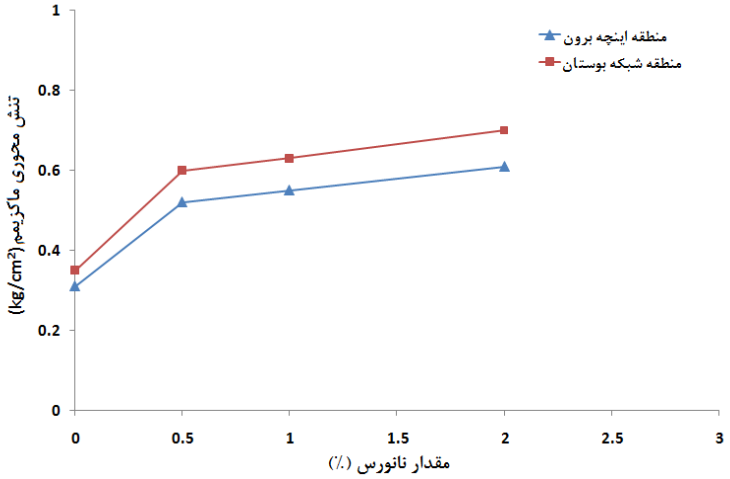
نتایج آزمایش‌های انجام شده بر نمونه‌های خاک منطقه اینچه‌برون و شبکه سد بوستان گنبد نشان می‌دهد که به‌دلیل ریزدانه‌تر بودن خاک شبکه سد بوستان گنبد، تأثیر افزودن نانورس بر شاخص خمیری نمونه‌ها و هم‌چنین مقاومت فشاری نمونه‌ها بیش‌تر است. در این راستا شکل‌های ۱۳ و ١٤ مؤید این مطلب است.

هم‌چنین نتایج آزمایش‌های تحکیم مضاعف نشان دادند که در خاک شبکه سد بوستان گنبد، پتانسیل رمبندگی نمونه‌ها ناشی از افزودن نانورس به‌دلیل بالابودن درصد ریزدانه رسی و شاخص خمیری آن و چسبندگی و پیوند بهتر بین ذرات خاک- نانورس در مقایسه با خاک منطقهٔ اینچه برون کاهش بیش‌تری یافته است.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.3.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.225 ]




شکل ۱۳. تأثیر نوع خاک بر شاخص خمیری نمونه‌ها ناشی از افزودن نانورس




شکل ١٤. تأثیر نوع خاک بر مقاومت فشاری محوری ماکزیمم نمونه‌ها ناشی از افزودن نانورس

## نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش‌های انجام شده بر خاک‌های بررسی شده نشان دادند که افزودن نانورس تأثیر بسیار مهمی بر خواص خمیری، مقاومتی، تغییر شکل‌پذیری، نمونه‌ها و پتانسیل رمبندگی دارند. به‌طوری‌که با افزودن نانورس به خاک، شاخص خمیری نمونه‌ها زیاد شده به‌طوری‌که

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.3.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.225 ]

در اثر افزودن ۲ درصد نانورس به خاک‌های بررسی شده، شاخص خمیری نمونه‌ها به‌طور متوسط حدود ۹۰ درصد زیاد می‌شود. هم‌چنین با افزودن نانورس به خاک، ضمن افزایش درصد رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص خشک ماکزیمم نمونه‌ها، موجب افزایش محسوس مقاومت فشاری ماکزیمم نمونه‌ها می‌شود. با توجه به اهمیت پتانسیل رمبندگی خاک‌های بررسی شده و خرابی‌های رخ داده ناشی از آن و لزوم به‌سازی آن‌ها، نتایج پژوهش‌ها نشان دادند که در اثر مقادیر کم نانورس به خاک‌های بررسی شده، پتانسیل رمبندگی نمونه‌ها کاهش چشم‌گیری می‌یابند. تأثیر نانورس بر خواص ژئوتکنیکی خاک‌ها تابع نوع خاک، دانه‌بندی و خواص خمیری آن‌ها بوده است به‌طوری‌که تأثیر مکانیسم به‌سازی ناشی از افزودن نانورس در افزایش خواص مقاومتی و کاهش پتانسیل رمبندگی در خاک شبکه سد بوستان گنبد در مقایسه با خاک منطقهٔ اینچه‌برون به مراتب بیش‌تر است.

## قدردانی

شایان ذکر است که این مقاله بخشی از یافته‌های پروژه تحقیقاتی ملی تحت عنوان "بررسی و امکان‌سنجی تثبیت خاک با استفاده از نانوتکنولوژی و ارائه راهکارهای کاربردی در اراضی زهدار گلستان" با کد پروژه GLD- 92021 است که با حمایت مالی شرکت آب منطقه‌ای گلستان صورت گرفته است. نویسنده صمیمانه از حمایت‌های مالی و معنوی شرکت آب منطقه‌ای گلستان تقدیر و تشکرمی‌کند.

## منابع

1. Clemence S. P, Finbarr A. O., "Design considerations for collapsible soils", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Vol.107 (1981) 305-317.
2. Rogers C. D. F., Dijkstra T. A., "Smalley I. J., "Hydro consolidation and subsidence of loess: studies from China, Russia", North America and

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.3.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.225 ]

Europe: in memory of Jan Sajgalik, Eng. Geol. Vol. 37 (2) (1994) 83-113.

3. Gao G., "The distribution and geotechnical properties of loess soils", lateritic soils and clayey soils in China, Eng, Geol. Vol. 42 (1) (1996) 95-104.

٤. رحیمی ح.، عباسی ن.، "مهندسی ژئوتکنیک، خاک‌های مشکل آفرین"، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ دوم (۱۳۹۵).

5. Langroudi A. A., Jefferson I., Ohara-Dhand K., Smalley I., "Micromechanics of quartz sand breakage in a fractal context", Geomorphology Vol. 211 (2014) 1-10.

6. Beckwith C., Hansen, L. A., "Identification and characterization of the collapsible alluvial soils of the western United States", Foundation Engineering, Current Principles and Particles, ASCE, (1989) 143-160.

7. Wilson, M. A., Tran N. H., Milev A. S., Kannangara G. S., Volk H., Lu G. Q., "Nanomaterials in soils", Geoderma Vol. 146 (1) (2008) 291-302.

8. Persoff P., Apps J., Moridis G., Whang J. M., "Effect of dilution and contaminants on strength and hydraulic conductivity of sand grouted with colloidal silica gel, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Vol.125 ( 6) (1999) 461-469.

9. Gallagher P. M., Lin Y., "Column testing to determine colloidal silica transport mechanisms", Proceedings Sessions of the Geo-Frontiers Congress of Innovations in Grouting and Soil Improvement, Texas Vol.162 (2005) 1-10.

10. Burton C., Axelsson M., Gustafson G., "Silica sol for rock grouting: laboratory testing of strength, fracture behavior and hydraulic

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.3.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.225 ]

conductivity", Tunneling and Underground Space Technology (2009) 603-607.

11. Taipodia J., Dutta J., Dey A.K., "Effect of nanoparticles on properties of soil, Proc", of Indian Geotechnical Conference, December, Kochi (2011).
12. Taha M. R., Taha O. E., "Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior", Journal of Nanoparticle Research Vol. 14(10) (2012) 1-13.
13. Majeed Z. H., Taha M. R., Jawad I. T., "Stabilization of soft soil using nanomaterils", Research Journal of Appiled Sience, Engineering and Technology Vol. 8(4) (2014) 503-509.
14. Zhang G., Geraine J. T., Whittle A. J., Ladd C. C., "Index properties of a highly weathered old alluvium", Geotechnique Vol. 54 (7) (2004) 441-451.
15. Khalid N., Mukri M., Kamarudin F., "Effect of nanoclay in soft soil stabilization", Springer Science Business Media Singapore (2015) 905-914.
16. Padidar M., Jalalian A., Abdouss M., Najafi P., Honarjoo N., Fallahzade J., "Effect of nanoclay on soil erosion control", NANOCON2014, 5-7 November, Brno, Czech Republic (2014).
17. Kananizadeh N., Ebadi T., Khoshniat S. A., Mousavirizi S. E., "The positive effects of nanoclay on the hydraulic conductivity of compacted Kahrizak clay permeated with landfill leachate", Clean–Soil, Air, Water Vol.39 (7) (2011) 605-611.

۱۸. اوحدی و.، چوبچیان ا.، "رفتار ژئوتکنیک زیست محیطی مونتموریلونیت اصلاح شده با کاتیون در جذب آلاینده سرب"، مجلهٔ علمی پژوهشی عمران تربیت مدرس، دورهٔ دهم، شمارهٔ دوم (۱۳۸۹).

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.3.2 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.225 ]

19. Iranpour B., Haddad A., "The influence on nanomaterials on collapsible soil treatment", Engineering Geology Vol. 205(2016) 40-53.

۲۰. بهاری م.، شاه‌نظری ع.، "بررسی آزمایشگاهی تثبیت بستر خاکی ریزدانه با استفاده از نانورس"، مجلهٔ علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی- علوم آب و خاک، سال نوزدهم، شمارهٔ هفتاد و دوم (۱۳۹٤).

21. Baziar M. H., Ghazi H., Mirkazemi S. M., "Effect of nanoclay on engineering properties of soil", Forth International Congress of Geotechnical Engineering and Soil Mechanics, Tehran, Iran (2010).

22. Jennigs J. R., Knight K., "A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure", Proc. 6th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Durban, South Africa (1975) 99-105.

23. ASTM, "Standard Test Method for Measurement of Collapse Potential Soils" ASTM D 5333-03, Annual Book of ASTM Standard, Phiadelphia (2003).

۲٤. فخری ز.، پورحسینی اردکانی ر.، عبادی ت.، "بهبود خواص هیدرولیکی خاک رس کائولینیت با افزودن نانورس"، مجلهٔ علمی پژوهشی عمران و محیطزیست امیرکبیر، دورهٔ چهل و هفتم، شمارهٔ سوم (۱۳۹٤).

25. Lan T., Kaviratna P. D., "Mechanism of clay tactiod exfoliation in epoxy-clay nanocomposites", Chem. Master (1995) 2144-2150.

26. Mitchel J. K., Soga K., "Fundamental of Soil Behavior", John Wiley and Sons, Third Edition, (2005).

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

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.3.2 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.225 ]