



## بررسی اثرات روش‌های اختلاط متفاوت بر پتانسیل رմبندگی خاک‌های بهسازی شده با نانورس و نانوسیلیس

عبدالرضا فاضلی<sup>۱</sup>، فرشاد داودی<sup>۲</sup>، علی جوهری<sup>۳</sup>

۱-استادیار گروه عمران دانشگاه خلیج فارس بوشهر

۲-دانشجوی کارشناسی ارشد گروه عمران دانشگاه خلیج فارس بوشهر

۳-استادیار دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی شیراز

afazeli@pgu.ac.ir

### خلاصه

خاک‌های رմبنده به شکل‌های مختلفی در طبیعت یافت می‌شوند. این خاک‌ها در حالت نیمه اشباع مقاومت ظاهری نسبتاً زیادی دارند اما به‌هنگام جذب آب و اشباع شدن، ناگهان کاهش حجم و نشست زیادی از خود نشان می‌دهند و موجبات آسیب رساندن به سازه و تاسیسات به‌کاررفته در آن را فراهم می‌کنند. با توجه به اثبات کارایی نانورس در بهسازی خاک‌های رմبنده و نظر به این که یکی از اساسی‌ترین مسائل تاثیرگذار بر تغییرات پتانسیل رմبندگی، نحوه اختلاط خاک و نانوذرات می‌باشد، ضرورت استفاده از یک روش اختلاط مناسب جهت رسیدن به مقدار بهینه نانوذره-ی مصرفی مشخص می‌گردد. در این تحقیق اثرات دو روش اختلاط خشک و تر، بر تغییرات پتانسیل رմبندگی خاک بهسازی شده با نانورس بررسی شده است. همچنین مقایسه‌ای بین عملکرد نانورس و نانوسیلیس، صورت گرفته است. نتایج به‌دست آمده حاکی از برتری روش اختلاط تر به هنگام استفاده از نانورس و وقوع تورم به‌هنگام استفاده از نانوسیلیس می‌باشد.

کلمات کلیدی: خاک رմبنده، بهسازی، نانورس، نانوسیلیس، روش اختلاط

### ۱. مقدمه

خاک‌های رմبنده از نقطه نظر زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، در زمره‌ی خاک‌های مسئله‌دار قرار دارند و وجود آن‌ها به شکل‌های مختلفی از جمله مخروط افکنه، رسوبات جریانی انباشته شده، نهشته‌های وزنی و رسوبات بادرفتی در پنج قاره‌ی جهان گزارش شده است [۱]. با توجه به این که این خاک‌ها عمدتاً در مناطق خشک و نیمه خشک یافت می‌شوند و ایران نیز جزء این گونه مناطق به حساب می‌آید، خاک‌های رմبنده به خصوص در نواحی مرکزی و شرقی آن گسترش دارند [۲].

در مواجهه با این گونه خاک‌های مسئله‌دار که در حالت نیمه اشباع مقاومت ظاهری نسبتاً زیادی دارند اما به‌هنگام جذب آب و اشباع شدن ناگهان کاهش حجم زیادی از خود نشان می‌دهند و در نتیجه موجبات آسیب رساندن به سازه و تاسیسات به‌کار رفته در آن را فراهم می‌کنند، سه راه محتمل به نظر می‌رسد؛ (۱) تغییر مکان ساخت و ساز، (۲) جایگزینی خاک نامطلوب محل با خاک و مصالح مناسب و (۳) بهسازی خاک موجود. با توجه به گسترش نسبتاً وسیع خاک‌های رմبنده و لزوم طراحی سدها، کانال‌های آبیاری و سایر ابنیه‌های فنی در این مناطق و نیز با توجه به توسعه‌ی شهرنشینی و لزوم گسترش برخی شهرهای بزرگ و احداث مناطق مسکونی، لوله‌های آب و فاضلاب و ... روی این خاک‌ها، ضرورت بررسی خاک‌های رմبنده و بهسازی آن‌ها اهمیت دوچندان می‌یابد [۳].

محققین مختلفی در زمینه‌ی روش‌های بهسازی خاک‌های رմبنده مطالعاتی را انجام داده‌اند. گیسیس و بارا در سال ۱۹۶۷ تحقیقاتی را در زمینه‌ی استفاده از دوغاب رس و تزریق آن به توده لس انجام دادند [۴]. بل در سال ۱۹۹۳ استفاده از قیر و مخلوط‌های شیره‌ای سیمان و آهک را برای تثبیت لس‌ها به‌ویژه در ارتباط با احداث جاده‌ها پیشنهاد کرد [۵]. الوجی در سال ۲۰۰۱ تحقیقاتی را در زمینه‌ی کنترل نشست و افزایش ظرفیت باربری خاک-های رմبنده با استفاده از ژئوگرید انجام داد [۶]. محمدعلی‌زاده رفیع در سال ۲۰۰۹ تزریق دوغاب آهک به منظور اصلاح خاک موجود در مسیر راه آهن سمنان- دامغان را پیشنهاد نمود [۷]. فاضلی و همکاران در سال ۲۰۱۴ کارایی نانورس در بهسازی خاک‌های رմبنده را بررسی کردند [۸].



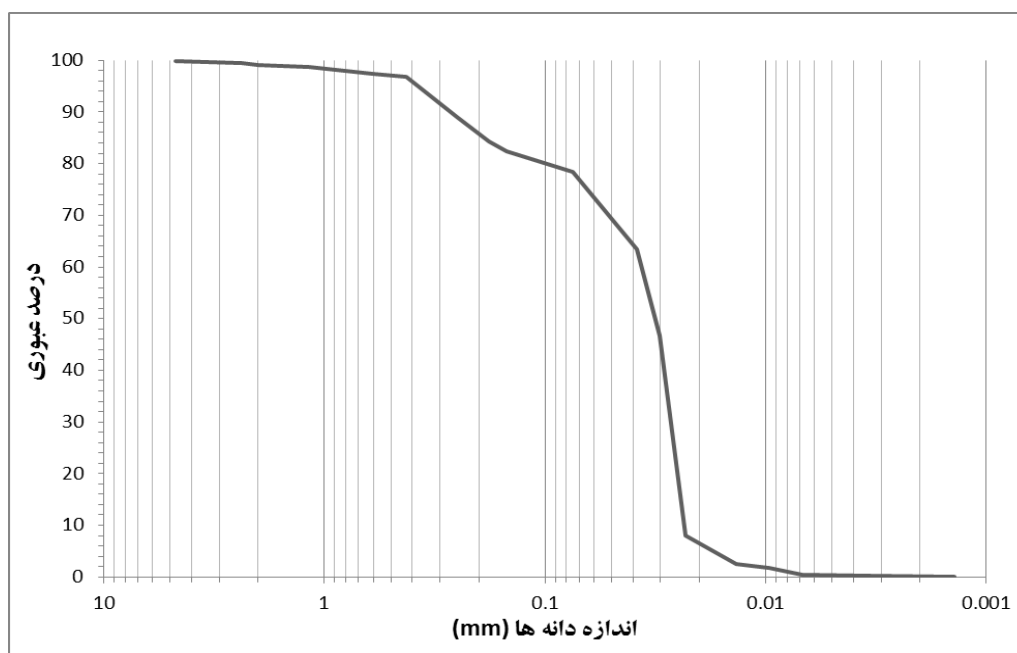
با توجه به اثبات کارایی نانورس در بهسازی خاک‌های ربنده و نظر به این که یکی از اساسی‌ترین مسائل تأثیرگذار بر تغییرات پتانسیل ربندگی در مواردی که از نانوذرات بهره گرفته می‌شود، نحوه‌ی اختلاط خاک و نانوذرات می‌باشد، ضرورت استفاده از یک روش اختلاط مناسب جهت رسیدن به مقدار بهینه‌ی نانوذره‌ی مصرفی مشخص می‌گردد. بدین منظور در این مقاله سعی شده‌است که اثرات نانورس بر تغییرات پتانسیل ربندگی خاک منطقه‌ی سیوند فارس با استفاده از یک روش اختلاط خشک و یک روش اختلاط تر بررسی شود و نتایج به‌دست آمده از این روش‌ها و روش اختلاط به‌کاربرده شده توسط فاضلی و همکاران [۸]، با نتایج کاربرد نانوسیلیس مقایسه گردد.

## ۲. مواد و مصالح مورد استفاده

برای انجام آزمایش، از خاک ربنده‌ی منطقه‌ی سیوند فارس، واقع در ۱۰۰ کیلومتری شمال شرق شیراز، به صورت دست خورده نمونه‌برداری شده است. پس از انجام آزمایش‌های پایه‌ی مکانیک خاک، مشخصات خاک به دست آمد و مطابق با سیستم طبقه‌بندی متحد، نوع آن ML تعیین گردید. منحنی دانه بندی خاک در شکل ۱ و مشخصات کلی آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات خاک مورد استفاده

رطوبت طبیعی (%)	چگالی ویژه دانه های جامد	حد خمیری	حد روانی	وزن مخصوص خشک حداکثر (gr/cm <sup>3</sup> )	رطوبت بهینه (%)
۳/۱۸	۲/۶۱	۲۷	۳۴	۱/۵۸	۱۶/۵



شکل ۱- منحنی دانه بندی خاک مورد بررسی

نانورس‌ها در حقیقت ترکیبی از سیلیکات‌های معدنی هستند. حداقل یکی از ابعاد این مواد پولکی شکل در حد نانومتر می‌باشد. این مواد از منظر نوع کانی به چندین دسته، از جمله نانورس مونتموریلونیت، نانورس کائولینیت و... طبقه‌بندی می‌شوند [۹]. با توجه به این که این ذرات در مقیاس نانو به کار می‌روند، مقدار کمی از آن‌ها، تأثیرات قابل توجهی بر ویژگی‌های خاک می‌گذارد. در این پژوهش از پودر نانورس مونت موریلونیت ساخت شرکت سیگما آلد ریچ کشور آلمان جهت بهسازی خواص خاک استفاده شده است. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نانورس به‌کاررفته در جدول ۲ نشان داده شده‌است.



نانوسیلیس در واقع همان دی‌اکسیدسیلیس با فرمول شیمیایی  $\text{SiO}_2$  و ابعاد خیلی ریز (در مقیاس نانو) است که دارای سطح مخصوص بسیار زیاد و قدرت واکنش بالا در مجاورت با آب می‌باشد [۱۰]. به منظور مقایسه‌ی نتایج کاربرد نانوسیلیس با نانورس، از سوسپانسیون نانوسیلیس تولیدی شرکت مولدان نانو پارسیان یزد بهره گرفته شده است که ویژگی‌های آن در جدول ۳ ملاحظه می‌گردد.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و مکانیکی پودر نانورس

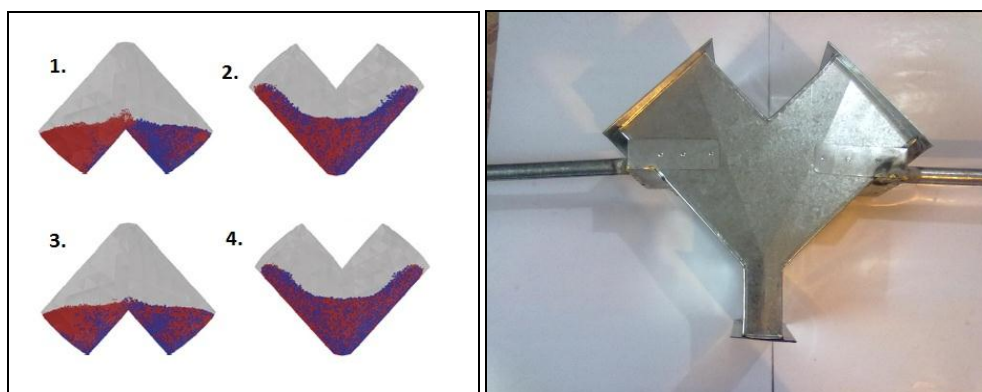
PH	اندازه ذرات (nm)	چگالی ( $\text{gr/cm}^3$ )	سطح ویژه ( $\text{m}^2/\text{gr}$ )	رطوبت (%)	رنگ	نوع کانی
۷/۳-۷/۶	۱-۲	۲-۵	۵۰۰-۷۵۰	۱-۲	کرم رنگ	مونت‌موریلونیت

جدول ۳- مشخصات سوسپانسیون نانوسیلیس

حلال	میانگین اندازه ذرات (nm)	غلظت (ppm)	رنگ	فرمول شیمیایی
آب	۱۰	۵۰۰۰۰	بی رنگ (شفاف)	$\text{SiO}_2$

### ۳. روش کار

جهت آماده‌سازی نمونه‌ها از دو روش اختلاط خشک و تر استفاده شده است. در هر دو روش ابتدا کلوخه‌های خاک موردنظر به کمک چکش لاستیکی خرد شدند. سپس خاک از الک ۴۰ عبور داده شد و در آون، خشک گردید. به منظور اختلاط خشک از روش‌های مخلوط‌کن شکل ۷ [۱۱] و آسیاب گلوله (بال میل) [۱۲]، استفاده شده است. بدین منظور دستگاه مخلوط‌کن شکل ۷، با ابعادی مطابق با نسبت‌های مخلوط‌کن پترسون-کلی [۱۱]، همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، ساخته شد. خاک خشک شده در آون به همراه نانورس به درون دستگاه مذکور ریخته و به مدت ۲۰ دقیقه با سرعت ۶۵ دور در دقیقه، دوران یافت. پس از آن، مخلوط به دست آمده به همراه ساچمه‌های پلاستیکی، به درون محفظه‌ی دستگاه آسیاب گلوله ریخته شد و به مدت ۳۰ دقیقه با سرعت ثابت ۵۰ دور در دقیقه دوران یافت. در واقع این روش، مشابه روش مورد استفاده‌ی فاضلی و همکاران [۸] می‌باشد، با این تفاوت که به منظور حصول اطمینان از ثابت بودن سرعت دوران، دستگاهی به شرحی که در شکل ۳ ملاحظه می‌گردد، ساخته شده و مورد استفاده قرار گرفته است. این دستگاه به کمک دوران محفظه با سرعت زاویه‌ای ثابت به وسیله‌ی پیچ‌گوشی الکتریکی تعبیه شده در پشت محفظه، مخلوط همگن تری را به دست می‌دهد.

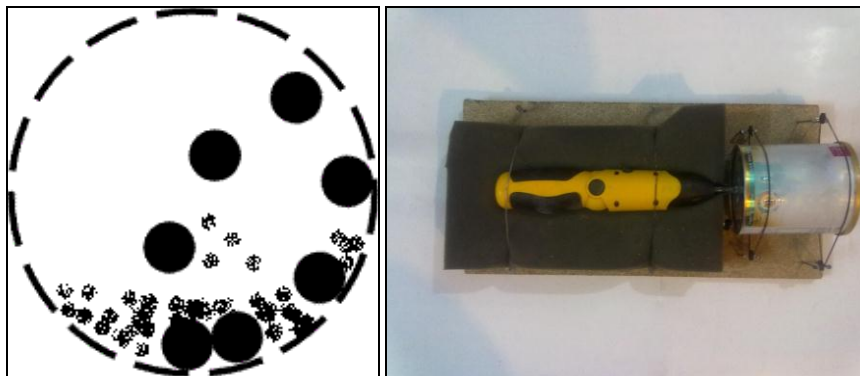


شکل ۲- دستگاه مخلوط‌کن شکل ۷ ساخته شده و عملکرد آن

به منظور اختلاط تر از روش غرقاب کردن استفاده شده است. روش اختلاط به این صورت می‌باشد که ابتدا با یک غلظت بسیار کم (در حدود ۱۰۰۰۰ ppm)، سوسپانسیون نانورس ساخته می‌شود. برای ساختن سوسپانسیون، از هم‌زن هیدرومتری به مدت یک ساعت، جهت عمل‌آوری مناسب استفاده می‌شود. در واقع هر چه مدت زمان هم‌زدن مخلوط و سرعت آن افزایش یابد، پایداری بیشتری حاصل می‌گردد. بلافاصله پس از اتمام عمل‌آوری، سوسپانسیون به خاک خشک شده اضافه و غرقاب شدن صورت می‌گیرد تا ذرات نانورس در تمام نقاط خاک، پراکنده شوند. در نهایت مخلوط



حاصل در آون خشک می‌گردد تا خاک مورد نظر جهت انجام آزمایش، فراهم شود. لازم به ذکر است که نمونه‌های مخلوط شده با نانوسیلیس نیز با روش فوق تهیه گردیده، با این تفاوت که از سوسپانسیون ساخت کارخانه استفاده شده است. در شکل ۴، مراحل روش اختلاط تر، نشان داده شده است.



شکل ۳- دستگاه آسیاب گلوله ساخته شده و عملکرد آن



شکل ۴- مراحل روش اختلاط تر

در این تحقیق، ۱۲ نمونه ساخته شده که روش اختلاط و درصد نانوذرات به کاررفته در آن‌ها، در جدول ۴ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که منظور از درصد نانوذرات به کاررفته در نمونه‌های ساخته شده به روش اختلاط تر، وزن نانوذره موجود در سوسپانسیون، مستقل از مقدار حلال می‌باشد. برای ساخت نمونه‌های آزمایش تحکیم مضاعف، از روش تراکم استاتیکی استفاده شده است. با توجه به این که بیشترین پتانسیل رهمبندی در ناحیه‌ی خشک منحنی تراکم اتفاق می‌افتد، بنابراین نمونه‌ها با رطوبت ۱۱ درصد و وزن مخصوص خشک ۱/۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب ساخته شدند. بدین منظور درصد رطوبت لازم به هر کدام از نمونه‌ها اضافه شد و پس از اختلاط کامل و به دست آمدن ظاهری همگن، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در یک نایلون سربسته، به منظور همگن شدن و به تعادل رسیدن کامل رطوبت آن‌ها، نگهداری گردیدند. در آخرین گام به منظور بازسازی نمونه‌ها، مقدار ۶۳ گرم از مخلوط‌های آماده شده توزین گردید و در دو مرحله در رینگ تحکیم با قطر ۵ سانتی‌متر و ضخامت ۲ سانتی‌متر ریخته شد و به صورت استاتیکی متراکم گردید.

جدول ۴- نمونه‌های ساخته شده جهت انجام آزمایش

نام نمونه	روش اختلاط	نانوذره به کاررفته	درصد نانوذره	نام نمونه	روش اختلاط	نانوذره به کاررفته	درصد نانوذره
A	-	بدون نانوذره	۰	C1	تر	نانورس	۱
B1	خشک	نانورس	۵	C2	تر	نانورس	۳
B2	خشک	نانورس	۱۰	C3	تر	نانورس	۵
B3	خشک	نانورس	۱۵	D1	تر	نانوسیلیس	۱
B4	خشک	نانورس	۱۸	D2	تر	نانوسیلیس	۳
B5	خشک	نانورس	۲۰	D3	تر	نانوسیلیس	۵



در نهایت آزمایش تحکیم مضاعف براساس استاندارد ASTM-D5333 انجام شد. در این آزمایش، نمونه‌ها از تنش ۵ کیلوپاسکال تا تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال، با گام‌های یک‌ساعته، بارگذاری گردیدند. پس از گذشت یک ساعت از اعمال تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال، نمونه‌ها اشباع شده و به مدت ۲۴ ساعت به حال خود رها شدند و در این مدت نشست‌ها یادداشت گردیدند. پس از جمع‌آوری داده‌ها، پتانسیل رմبندگی با استفاده از رابطه‌ی ۱ اندازه‌گیری شد و درجه رմبندگی نمونه‌ها با استفاده از جدول ۵ مشخص گردید [۱۳].

$$I_e = \left[ \frac{d_f - d_i}{h_0} \right] \times 100 \quad (1)$$

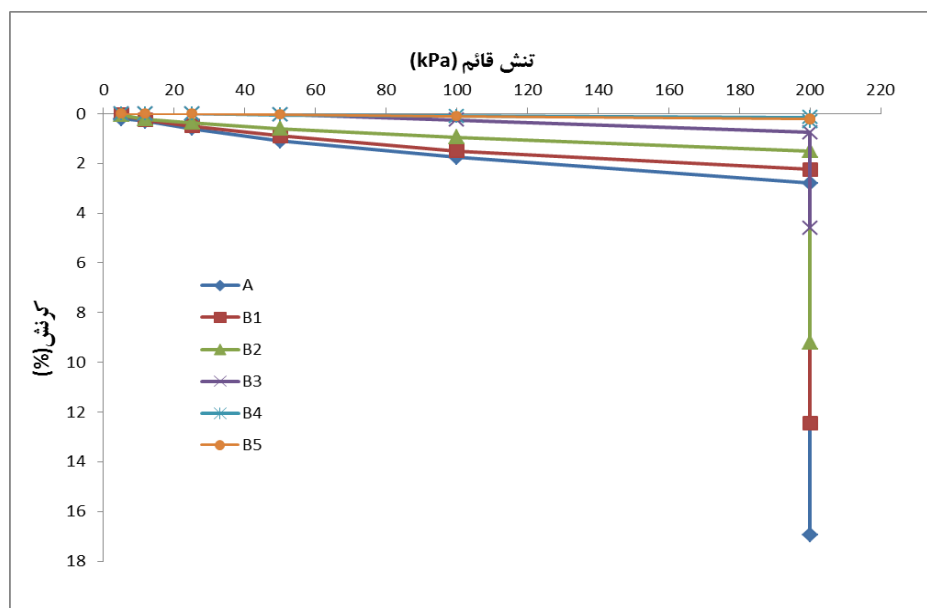
در رابطه‌ی فوق  $h_0$  ارتفاع اولیه‌ی نمونه،  $d_i$  قرائت گیج در تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال قبل از اشباع کردن نمونه و  $d_f$  قرائت گیج در تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال بعد از اشباع کردن نمونه می‌باشد.

جدول ۵- جدول استاندارد ASTM-D5333 جهت تعیین وضعیت رմبندگی

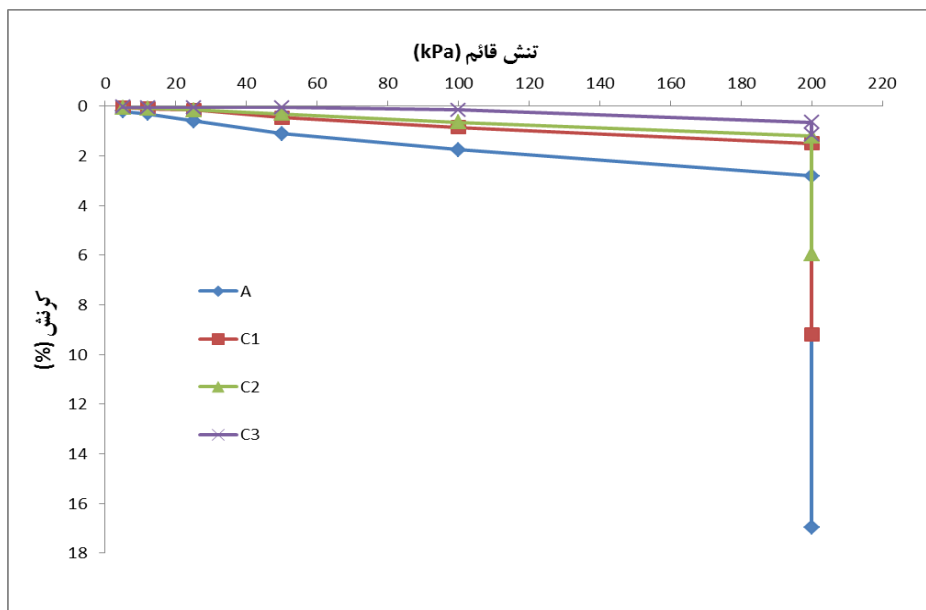
درجه رմبندگی	بدون مشکل	اندک	متوسط	نسبتا شدید	شدید
شاخص رմبندگی (درصد)	۰	۲-۰/۱	۶-۲/۱	۱۰-۶/۱	۱۰ <

#### ۴. نتایج

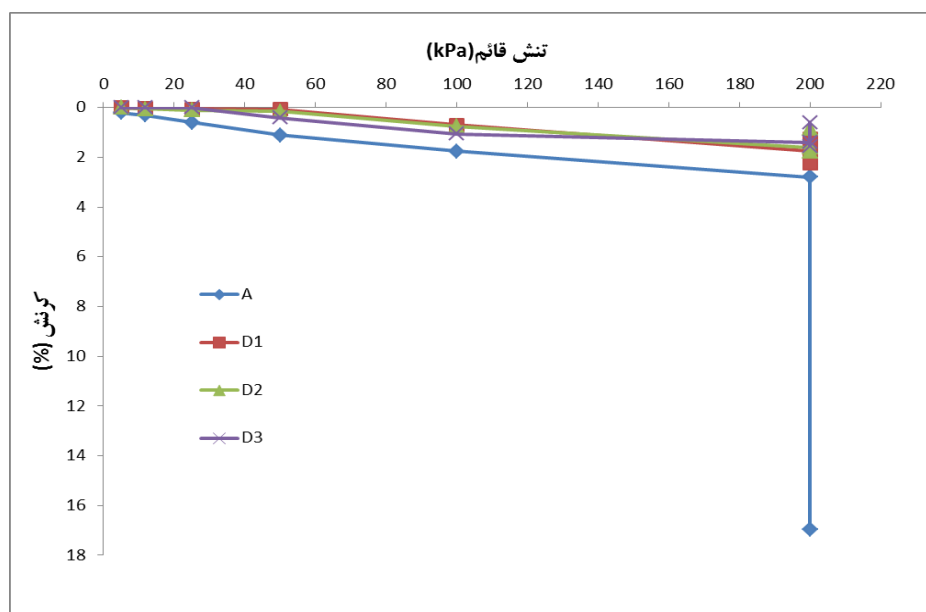
پس از انجام آزمایش به روش اختلاط خشک، مشخص شد که بهبود رմبندگی خاک در جایی بین ۱۵ و ۲۰ درصد نانورس مصرفی اتفاق می‌افتد. به همین دلیل یک نمونه دیگر با استفاده از ۱۸ درصد پودر نانورس ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. نمودار تغییرات کرنش بر حسب تنش سربار قائم، برای روش اختلاط خشک در شکل ۵، برای روش اختلاط تر با استفاده از سوسپانسیون نانورس در شکل ۶ و برای همین روش با استفاده از سوسپانسیون نانوسیلیس در شکل ۷ نشان داده شده‌است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، با افزایش درصد نانورس و نانوسیلیس، همانند روش اختلاط مورد استفاده‌ی فاضلی و همکاران [۸]، کرنش قبل از اشباع شدن کاهش یافته‌است. همچنین در نمونه‌های ساخته شده با استفاده از نانورس، هم با روش اختلاط تر و هم با روش اختلاط خشک، کرنش بعد از اشباع شدن در تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال به نسبت روش مورد استفاده‌ی فاضلی و همکاران [۸]، کاهش بیشتری داشته و این کاهش در روش اختلاط تر محسوس تر بوده‌است. اما در نمونه‌های ساخته شده با استفاده از نانوسیلیس، بعد از اشباع شدن در تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال، نمونه‌ها بر خلاف انتظار دچار اندکی تورم شده‌اند. این تورم احتمالا به دلیل واکنش شیمیایی نانوسیلیس با ذرات خاک می‌باشد. لازم به ذکر است که با افزایش درصد نانوسیلیس میزان تورم افزایش می‌یابد.



شکل ۵ - نمودار تغییرات کرنش بر حسب تنش سربار قائم برای نمونه‌های ساخته شده با نانورس به روش اختلاط خشک



شکل ۶- نمودار تغییرات کرنش برحسب تنش سربار قائم برای نمونه‌های ساخته شده با نانورس به روش اختلاط تر



شکل ۷- نمودار تغییرات کرنش برحسب تنش سربار قائم برای نمونه‌های ساخته شده با نانوسیلیس به روش اختلاط تر

اگر یک منحنی به نقاط نمودار تغییرات شاخص رمبندگی برحسب درصد نانورس مصرفی در حالت خشک و تر برازش شود، به ترتیب روابط ۳ و ۴ که روابطی تقریبی برای به دست آوردن پتانسیل رمبندگی برحسب درصد نانورس به کاررفته در خاک می‌باشند، به دست می‌آید. لازم به ذکر است که این روابط برای حالتی که وزن مخصوص خشک برابر با  $1/45$  گرم بر سانتی‌متر مکعب و رطوبت ۱۱ درصد می‌باشد، به دست آمده است. با مقایسه‌ی روابط به دست آمده با رابطه‌ی ارائه شده توسط فاضلی و همکاران [۸] (رابطه‌ی ۲)، ملاحظه می‌گردد که درجه منحنی از ۳ به ۲ در هر دو حالت اختلاط خشک و تر، کاهش یافته است. ضمناً در حالت اختلاط خشک تقعر منحنی رو به پایین است، در حالی که در حالت اختلاط تر تقعر منحنی رو به بالا می‌باشد و این خود مؤید این قضیه است که در حالت اختلاط تر با صرف درصد به مراتب کمتر نانورس وضعیت رمبندگی بهبود پیدا می‌کند. در واقع در روش اختلاط مورد استفاده‌ی فاضلی و همکاران [۸]، با صرف ۲۰ درصد نانورس به صورت پودر، در روش اختلاط خشک



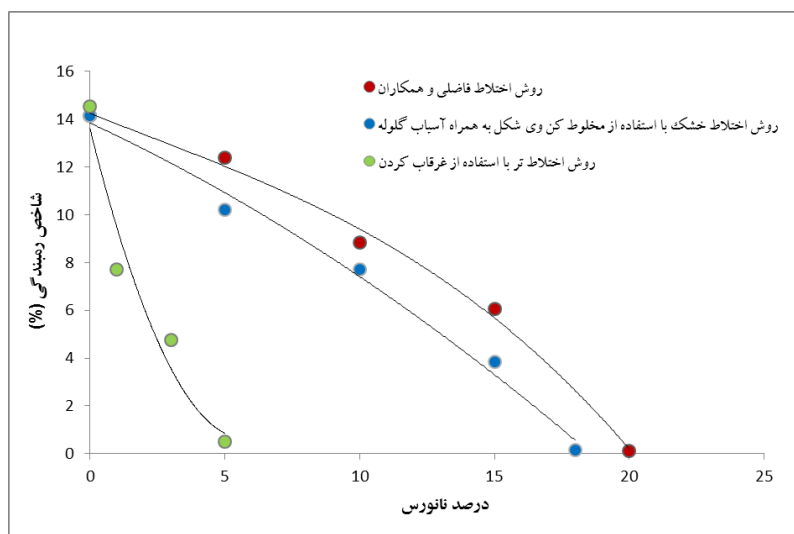
توضیح داده شده در این پژوهش با صرف ۱۸ درصد نانورس به صورت پودر و در روش اختلاط تر به صورت غرقاب کردن، با صرف تنها ۵ درصد نانورس به صورت سوسپانسیون، مشکل رهمبندگی خاک تقریباً به طور کامل برطرف می شود. مقایسه هر سه روش در شکل ۸ نشان داده شده است.

$$I_e = -0.001 NCC^3 + 0.005 NCC^2 - 0.45 NCC + 14.2, \quad \gamma_d = 14.5 \text{ g/cm}^3, w = 11\% \quad (2)$$

$$I_e = -0.012 NCC^2 - 0.5 NCC + 13.8, \quad \gamma_d = 14.5 \text{ g/cm}^3, w = 11\% \quad (3)$$

$$I_e = 0.4 NCC^2 - 4.5 NCC + 13.6, \quad \gamma_d = 14.5 \text{ g/cm}^3, w = 11\% \quad (4)$$

در روابط فوق  $I_e$  شاخص رهمبندگی و  $NCC$  میزان نانورس به درصد می باشد.



شکل ۸ - منحنی برازش شده به نقاط نمودار شاخص رهمبندگی بر حسب درصد نانورس برای روش های اختلاط متفاوت

## ۵. نتیجه گیری

با توجه به اثبات کارایی نانورس در بهسازی خاک های رهمبده، در این پژوهش سعی شد روش های متفاوت اختلاط خاک و نانورس بررسی شود و با نتایج به دست آمده از کاربرد سوسپانسیون نانوسیلیس مقایسه گردد. پس از ساخت نمونه ها با روش های اختلاط متفاوت و انجام آزمایش روی آن ها، نتایج حاصل گردید که به شرح زیر می باشد:

- ۱- کرنش قبل از اشباع شدن در تمامی نمونه های ساخته شده با استفاده از نانورس و نانوسیلیس کاهش یافته است.
- ۲- کرنش بعد از اشباع شدن در تنش ۲۰۰ کیلو پاسکال، در نمونه های ساخته شده با نانورس، هم با روش اختلاط خشک و هم با روش اختلاط تر کاهش یافته است. مقایسه کاهش کرنش بعد از اشباع در سه روش اختلاط تر، اختلاط خشک به روش توضیح داده شده در مقاله و روش مورد استفاده فاضلی و همکاران [۸]، نشان می دهد که روش اختلاط تر به نسبت سایر روش ها کاهش محسوس تری داشته و بدین ترتیب در کاهش پتانسیل رهمبندگی موثرتر بوده است.
- ۳- در نمونه های ساخته شده با استفاده از نانوسیلیس، بعد از اشباع شدن در تنش ۲۰۰ کیلو پاسکال، نمونه ها دچار اندکی تورم شده اند. این تورم احتمالاً به این دلیل رخ داده است که نانوسیلیس به صورت واکنش شیمیایی با ذرات خاک اثر خود را نشان می دهد.
- ۴- در روش اختلاط مورد استفاده فاضلی و همکاران [۸]، با صرف ۲۰ درصد وزن خاک، پودر نانورس، در روش اختلاط خشک به کار برده شده در این پژوهش با صرف ۱۸ درصد نانورس به صورت پودر و در روش اختلاط تر به صورت غرقاب کردن، با صرف تنها ۵ درصد وزن خاک، نانورس موجود در سوسپانسیون، مشکل رهمبندگی خاک تقریباً به طور کامل برطرف شده است.



## ۶. مراجع

1. Lutenegeger, A.J. and Hallberg, G.R. (1988), " Stability of loess," Engineering Geology, 25(2), pp 247-261.
۲. قبادی، م.ح. و فریدونی، د. (۱۳۸۹)، " پراکنندگی خاک های رمنده در ایران و روش های بهسازی آن ها، " بیست و هشتمین گردهمایی علوم زمین، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
3. Derbyshire, E. (2001), " Geological hazards in loess terrains with particular reference to the loess regions of china," Earth-Science Reviews, 54(1), pp 231-260.
4. Gibbs, H.J. and Bara J.P. (1967), " Stability problems of collapsing soils," Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 93, pp 572-594.
5. Bell, F.G. (1992), " Engineering properties of soils and rocks (3<sup>rd</sup> Edn)," U.K. Butterworth-Heinemann Ltd, pp 345.
6. Alawaji, H. (2001), " Settlement and bearing capacity of geogrid-reinforced sand over collapsible soil," Geotextiles and geomembranes, 19(2), pp 75-88.
۷. محمدعلی زاده رفیع، ب. (۱۳۸۸)، " اصلاح خاکهای رمنده به روش تزریق (مطالعه موردی راه آهن سمنان - تهران)، " پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین.
۸. فاضلی، ع. جوهری، ع. و داودی، ف. (۱۳۹۲)، " مطالعه‌ی موردی بهسازی خاک‌های رمنده با استفاده از نانورس، " هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.
۹. فخری، ز. پورحسینی، ر. و فخری، م.ح. (۱۳۹۱)، " بررسی تأثیر نانورس بر خصوصیات ژئوتکنیکی پایه ای خاک رس کائولینیت، " نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
۱۰. خسته‌بند، ح. سهرابی، م.ر. و صمیمی، ع. (۱۳۸۸)، " بررسی اثر نانوسیلیس بر خواص مکانیکی بتن سبک، " هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
11. Lemieux, M. Léonard, G. Doucet, J. Leclair, L.A. Viens, F. Chaouki, J. and Bertrand, F. (2008), " Large-scale numerical investigation of solids mixing in a V-blender using the discrete element method," Powder Technology, 181 (2), pp 205-216.
12. German, R.M. (1994), " Powder metallurgy science," Metal Powder Industries Federation Princeton, 2th Edition.
13. ASTM D 5333-92. (2002), " Standard test method for measurement of collapse potential of soils," Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, 4, pp 1197-1199.