

بررسی اثر ترکیبی از سیمان و نانوسیلیس بر روی مقاومت برشی خاک ماسه‌ای بابلسر

عیسی شوش پاشا^{۱*}، مجتبی عباسی^۲، هادی نجف نیا^۳

^۱ دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، مازندران، ایران
^۲ دانشکده عمران، موسسه آموزش عالی صنعتی مازندران، مازندران، ایران
^۳ دانشکده عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴ بهمن ۱۳۹۴
بازنگری: ۱۳ آذر ۱۳۹۵
پذیرش: ۱۰ بهمن ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۱۷ بهمن ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

به‌سازی خاک
مقاومت برشی
نانوسیلیس
سیمان
ماسه بابلسر

چکیده: در بسیاری از موارد خاک طبیعی محل مقاومت لازم را نداشته و نیاز به به‌سازی دارد. از جمله این روش‌ها، اصلاح خاک با استفاده از مواد افزودنی است. در این روش خصوصیات مهندسی خاک با مخلوط شدن با یک یا چند ماده دیگر ارتقاء می‌یابد. نانوسیلیس که یک پوزولان بسیار فعال جهت انجام واکنش‌های سیمانی شدن است، نیز می‌تواند به عنوان تثبیت کننده در نظر گرفته شود. در این تحقیق به بررسی تاثیر ترکیبی از سیمان و نانو سیلیس بر مقاومت برشی خاک ماسه‌ای بابلسر در فواصل زمانی ۷ و ۲۸ روزه پرداخته شده است. آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های حاوی ۴، ۶ و ۸ درصد وزن خشک ماسه، سیمان و ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد وزنی سیمان، نانوسیلیس در تراکم ۹۸ درصد ترتیب داده شده است. نتایج نشان داد که افزودن نانوسیلیس به سیمان تا ۳۰ درصد جایگزینی با سیمان، باعث افزایش ۲ برابری مقاومت برشی نمونه‌ها، نسبت به نمونه‌هایی که فقط از سیمان استفاده شده است می‌شود و با افزایش بیش از این مقدار مقاومت برشی نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

۱- مقدمه

اصلاح پارامترهای رفتاری خاک‌های مختلف یکی از مسائل مهم پیش روی پژوهشگران در مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد. اضافه نمودن پاره‌ای از افزودنی‌ها به خاک، به عنوان یکی از روش‌های موثر در بهبود برخی از مشخصه‌های رفتاری خاک مانند رابطه‌ی تنش-کرنش-مقاومت، نفوذپذیری و خودترمیمی، به ویژه در بعضی از سازه‌های ژئوتکنیکی نظیر سدهای خاکی، خاکریزهای جاده‌ها، شیروانی‌های مصنوعی، مراکز دفن زباله همواره مد نظر بوده است. افزودنی‌های متداول همچون سیمان، آهک، کلسیم کلرید، خاکستر بادی، قیر، انکلوژیون‌های پلیمری و غیره در مطالعات سایر پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته است [۱ و ۲].

تثبیت شیمیایی بوسیله سیمان جزء موارد استفاده شده برای بهبود کارایی خاک است. مطالعات و تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از سیمان بعنوان یک ماده تثبیت کننده صورت گرفته است [۳ و ۴]. نتایج تحقیقات محققان نشان می‌دهد که افزودن سیمان به خاک سبب افزایش سختی و رفتار شکننده خاک و بهبود خصوصیات مهندسی آن می‌شود. بهبود خصوصیات

مهندسی خاک‌های تثبیت شده با سیمان اساساً به علت سخت شدن سیمان در نتیجه هیدراتاسیون سیمان و تشکیل مواد سیمانی اضافی بین سیمان هیدراته شده و ذرات رس موجود در خاک است [۵].

از سوی دیگر اگرچه صنعت سیمان مدرن‌ترین فناوری‌ها را برای کاهش آلودگی به کار می‌گیرد، با این حال مراحل مختلف تولید سیمان و حمل و نقل آن همچنان سهم عمده‌ی در آلودگی محیط زیست دارد. تحقیقات انجام گرفته نشان می‌دهد که برای تولید یک تن سیمان در ایران به طور متوسط ۰/۶۵۵ تن گاز گلخانه‌ای CO₂ و برای تولید یک تن کلینکر بطور متوسط ۰/۷۹ تن گاز گلخانه‌ای CO₂ تولید و انتشار می‌یابد [۶].

بنابراین بهینه‌سازی ترکیب سیمان به گونه‌ای که کمترین میزان انرژی برای تولید آن مصرف شود و کمترین لطمه به منابع طبیعی وارد شود و در نهایت بهترین کارایی ممکن از آن گرفته شود، به عنوان یک هدف اصلی مطرح می‌گردد [۷].

از اینرو پیدا کردن جایگزین مناسب برای سیمان مصرفی در پروژه‌های عمرانی می‌تواند به عنوان یکی از بهترین راهکارها جهت حفاظت از محیط زیست باشد. در این میان، پوزولان‌ها که از دیرباز به عنوان جایگزین و مکمل سیمان در ساخت و سازها مورد استفاده قرار گرفته‌اند، می‌توانند

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Shooshpasha@nit.ac.ir

مشکلات مربوط به محدودیت تولید را تا میزان زیادی حل نمایند. پوزولان‌ها توانسته‌اند از طریق جایگزینی با سیمان ضمن صرفه جویی در مصرف انرژی مورد نیاز در تولید سیمان و کاهش انتشارات آلاینده، مقاومت فشاری و دوام آن‌ها را نیز افزایش دهند [۸-۱۱].

استفاده از نانوسیلیس که یک پوزولان بسیار فعال است، می‌تواند به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی، گزینه‌ای درخور توجه برای کاهش مصرف سیمان باشد.

نانوسیلیس به‌عنوان یک پوزولان بسیار فعال جهت انجام واکنش‌های سیمانی شدن باعث افزایش چشمگیر مقاومت نمونه‌ها می‌شود از این جهت اضافه کردن نانوسیلیس به خاک نیز می‌تواند به‌عنوان تثبیت کننده در نظر گرفته شود [۱۲].

مواد در محدوده‌ی نانو اغلب رفتار فیزیکی بسیار متفاوتی با اتم‌های و مواد توده‌ای از خود نشان می‌دهند. خصوصیات مواد نانو مقیاس را نمی‌توان ضرورتاً با توجه به ویژگی‌های مواد در مقیاس‌های بزرگتر پیش‌بینی کرد. تغییرات مهم در رفتار مواد نه تنها با تغییرات مداوم رفتاری مواد در اندازه‌های کوچک، بلکه در اثر ظهور پدیده‌های جدیدی نظیر محدودیت اندازه‌ی کوانتومی، ترابری شبه‌موجی و غلبه‌ی پدیده‌های سطحی صورت می‌گیرد [۲].

اگر چه تحقیقات محدودی به منظور ارزیابی مزیت‌های افزودن گونه‌هایی از نانو ذرات به خاک انجام شده است، اما خلا بزرگی در انجام آزمایش‌های تجربی و داده‌های عملی در این زمینه، به چشم می‌خورد. نانو موادی که غالباً برای تغییر خواص ژئوتکنیکی استفاده می‌شود، نانو ذرات سیلیکا می‌باشد که بر خواص تحکیمی، نفوذپذیری و شاخص‌های مقاومتی خاک تاثیرگذار می‌باشد.

بنابراین در این تحقیق به بررسی تأثیر ترکیبی از سیمان و نانوسیلیس به‌عنوان یک پوزولان بسیار فعال جهت انجام واکنش‌های سیمانی شدن بر تراکم و مقاومت برشی خاک ماسه‌ای بابلرس با استفاده از آزمایش مقاومت برشی (برش مستقیم) پرداخته شده است. جهت نیل به این هدف، در این مقاله ابتدا مروری بر مطالعات پیشین انجام گرفته و سپس برنامه آزمایشگاهی شرح داده شده و نتایج آن مورد بحث قرار گرفته است.

۲- مطالعات پیشین

اولین کاربرد نانوتکنولوژی در مصالح ساخت و ساز به میانه دهه ۱۹۹۰ بر می‌گردد. از آن زمان تا کنون مطالعات بسیاری در زمینه استفاده از نانو ذرات یا نانوتکنولوژی در بسیاری از شاخه‌های ساخت و ساز (از جمله تکنولوژی بتن) انجام گرفته است و در این میان سهم مهندسی ژئوتکنیک بسیار اندک بوده است [۱۳].

یونکورا و میوا^۱ در سال ۱۹۹۲، از نانو ذرات سیلیکا برای افزایش مقاومت فشاری ماسه بهره گرفتند. نتایج بررسی ایشان افزایش مقاومت فشاری را

1 Yonekura and Miwa

با افزایش نانو سیلیس نشان داد [۱۴]. گالاقر و میچل^۲، مطالعاتی در زمینه تاثیر دوغاب نانوسیلیس بر پتانسیل روانگرایی و رفتار سیکلیک ماسه سست اشباع انجام داده‌اند. آن‌ها در راستای بررسی این موضوع که نانو سیلیس چه مقدار مقاومت را بالا برده و کرنش را کاهش می‌دهد، آزمایش سه محوری سیکلیک بر روی ماسه سست اشباع با افزودن ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی نانو سیلیس انجام دادند. نتایج حاکی از آن بود که رفتار خاک با نانو سیلیس باعث افزایش قابل توجه مقاومت خاک ماسه‌ای سست در برابر تغییرات بارگذاری لرزه‌ای کاهش می‌دهد. زمانی که هدف محدود کردن کرنش‌ها باشد، درصد وزنی نانوسیلیس می‌تواند تثبیت کافی با سطح کرنش قابل قبول را تامین کند. البته بیش از ده درصد وزنی نانوسیلیس کرنش را بیشتر محدود می‌کند، اما صرفه اقتصادی ندارد [۱۵].

تایپودیا و همکاران^۳ در سال ۲۰۱۱ میلادی، به بررسی تاثیر نانوذرات دی‌کلریدکلسیم، اکسید کلسیم و نیتراک پتاسیم بر خصوصیات خاک پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودن نانوذرات به خاک سبب افزایش مقاومت برشی، کاهش نفوذپذیری و کاهش تراکم پذیری خواهد شد. همچنین استفاده از این نانوذرات سبب کاهش نسبت میرایی و افزایش مدول برشی خاک خواهد شد که به معنی کاهش استعداد روانگرایی خاک‌های غیر چسبنده می‌باشد [۱۶].

محمدزاده و همکاران، نیز به بررسی تاثیر نانورس بر پارامترهای ژئوتکنیکی ماسه‌ی رس‌دار پرداختند. آزمایش‌های حدود اتربرگ^۴ و برش مستقیم به منظور بررسی تاثیر نانو رس به میزان ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی نمونه، بر خواص شاخص خاک ماسه‌ای رس‌دار با نسبت ۸۰ درصد ماسه ساحل انزلی و ۲۰ درصد رس کائولینیت انجام گرفت. نتایج حکایت از کاهش دامنه خمیری و بهبود مقاومت برشی خاک در حضور نانو ذرات می‌باشد [۱۷].

جانعلیزاده و همکاران در سال ۲۰۱۴، به بررسی اثر مشترک سیمان و نانو سیلیس بر روی مقاومت تک محوری ماسه بابلرس پرداختند. نتیجه آزمایش‌های آن‌ها افزایش مقاومت تک محوری نمونه‌های حاوی نانوسیلیس نسبت به نمونه‌های بدون نانو سیلیس را نشان داد. که بیشترین افزایش مقاومت تک محوری در طرح ۳ درصد نانو سیلیس بود [۱۸].

صدر جمالی و همکاران در سال ۲۰۱۵، به بررسی اصلاح پارامترهای مقاومت برشی خاک با استفاده از مواد افزودنی در شرایط آزمایشگاهی پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که تاثیر افزایش استفاده از نانو سیلیکا از سایر مواد بیشتر بوده و مقدار بهینه استفاده از نانو سیلیکا ۴ درصد است [۱۹].

۳- برنامه آزمایشگاهی

در این مقاله برای مطالعه اثرات نانوسیلیس بر مقاومت برشی ماسه‌های سیمانی، پارامترهای مقدار سیمان و نانوسیلیس، تنش سربار و زمان عمل‌آوری مدنظر قرار گرفته است. در جدول ۱ متغیرهای مربوط به آماده‌سازی نمونه‌ها

2 Gallagher and Mitchel

3 Taipodia et al.

4 Atterberg

جدول ۲: مشخصات فیزیکی ماسه بابلسر

Table 2. Physical properties of Babolsar sand

ویژگی	استاندارد	مقدار
G_s	ASTM-D854-92	۲/۷۲
e_{max}	ASTM-D4253-4	۰/۸۶
e_{min}	ASTM-D4253-4	۰/۵۸
$D_{50}(mm)$		۰/۲۴
C_U	ASTM-C136	۲/۱۳
C_C		۱/۳
Soil name	ASTM D2487	Sp

جدول ۳: مشخصات شیمیایی ماسه بابلسر [۲۵]

Table 3. Chemical properties of Babolsar sand

ترکیب	درصد وزنی
Na_2O	۱/۳۷
MgO	۳/۳۵
Al_2O_3	۷
SiO_2	۴۲/۸
So_3	۰/۲۱
K_2O	۱/۳۴
Fe_2O_3	۳/۷۱
CaO	۲۳/۳
L.O.I	۱۵/۶۹
TiO_2	۰/۷۹
P_2O_5	۰/۲
etc	۰/۲۴

و آزمایش برش مستقیم ارائه شده است. لازم به ذکر است که به دلیل اینکه نانوسیلیس یک ماده پوزولانی بوده و افزایش مقاومت پوزولانی یک فرآیند زمان بر است زمان عمل آوری ۲۸ روزه انتخاب گردیده است.

جدول ۱: متغیرهای ملاحظه شده

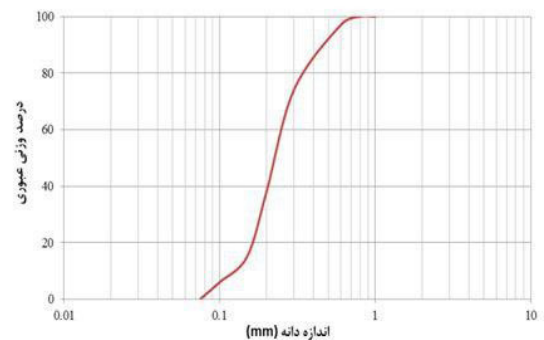
Table 1. The studied variables

متغیرها	تعداد سطوح	توضیحات
نوع خاک پایه	۱	ماسه بد دانه بندی شده بابلسر
نوع سیمان	۱	سیمان پرتلند تیپ II نکاء
مقادیر سیمان	۳	۴، ۶، ۸ درصد وزن خشک ماسه
نوع نانو	۱	نانوسیلیکا
مقادیر نانو سیلیس	۳	۵۰، ۳۰، ۱۰ درصد وزن سیمان (جایگزینی)
تنش سربار	۳	۱۰، ۲۰ و ۴۰ کیلو نیوتن
اندازه نمونه ها	۱	۱۰۰ م م (طول و عرض) 30×30 م م (ارتفاع) متراکم شده در سه لایه
زمان عمل آوری	۲	۷ و ۲۸ روزه

۴- مصالح مورد استفاده

۴-۱ ماسه

با توجه به نهشته های ماسه ای فراوان در سواحل دریای خزر در این پژوهش از ماسه ساحلی بابلسر استفاده شده است. ماسه بابلسر از نوع ماسه بد دانه بندی شده بوده که اندازه متوسط دانه های آن حدوداً ۰/۲۴ میلی متر مطابق با استاندارد ASTM-C136 [۲۰] می باشد (شکل ۱). وزن مخصوص خشک بیشینه و کمینه ماسه بابلسر به ترتیب مقادیر ۱/۷۷ و ۱/۴۹ تن بر مترمکعب ASTM-D4253-4 [۲۱ و ۲۲] و چگالی دانه های جامد آن ۲/۷۲ مطابق با استاندارد ASTM-D854-92 [۲۳] بدست آمده است (جدول ۲). علت بالا بودن چگالی دانه های جامد، وجود درصدی از مصالح اکسید آهن و سایر مصالحی چون نیکل و کبالت است [۲۴].



شکل ۱: منحنی دانه بندی ماسه بابلسر

Fig.1. Grain size distribution of the Babolsar sand

۴-۲- سیمان

در این پژوهش، سیمان پرتلند تیپ II کارخانه نکاء در استان مازندران مورد استفاده قرار گرفته است. مصرف ویژه آن در محل‌هایی که حرارت هیدراسیون متوسط برای آنها ضرورت داشته و حمله سولفات‌ها به آنها در حد متوسط بوده می‌باشد. سطح آن ۳۰۶۰ گرم بر سانتیمتر مربع مخصوص ویژه است. جدول مشخصات شیمیایی سیمان نکا در (جدول ۴) آمده است.

جدول ۴: مشخصات شیمیایی سیمان نکاء

Table 4. Chemical properties of Neka cement

درصد	ترکیب شیمیایی	درصد	ترکیب شیمیایی
۶۴/۰۷	Cao	۲۱/۲۵	Sio ₂
۱/۲۰	Mgo	۴/۹۵	Al ₂ O ₃
۲/۰۴	So ₃	۳/۱۹	Fe ₂ O ₃
۰/۳۸	Na ₂ O	۰/۶۳	K ₂ O

۴-۳- نانوسیلیس

نانو سیلیس استفاده شده در این مطالعه به شکل پودر سفید رنگ می‌باشد، مشخصات نانو سیلیس مصرفی در جدول ۵ آورده شده است. نانو سیلیس مصرفی آمورف و دارای سطح ویژه بالایی بوده و به شدت تمایل به واکنش دارد.

جدول ۵: مشخصات فیزیکی نانو سیلیس

Table 5. Physical properties of nanosilica

درجه خلوص	%۹۸
میانگین اندازه ذرات	۲۰-۳۰ نانومتر
مساحت سطح ویژه	193m ² /g
چگالی	7/1 gr/cm ³

۵- روند آزمایش تراکم ASTM D 698 -07E1

آماده‌سازی نمونه در اسرع وقت پس از اتمام مخلوط و آزمایش بر اساس استاندارد ASTM D 698 -07E1 انجام شد [۲۶]. در هر طرح، در مجموع پنج نمونه برای به دست آوردن رطوبت مطلوب برای تراکم استفاده گردید. مقادیر مختلف ماسه، سیمان و نانو سیلیس خشک شده در گرم‌خانه بر اساس درصد‌های بیان شده برای هر نمونه جمعاً به میزان ۳ کیلوگرم جدا شد و با رطوبت نسبتاً کم مخلوط شده و مخلوط در قالب پروکتور استاندارد با استفاده از چکش ۲/۵ کیلوگرم با سقوط آزاد از فاصله ۳۰ سانتیمتر متراکم شد. تراکم در ۳ لایه، هر لایه با ۲۵ ضربه متراکم و سطح خاک روی قالب بدون اعمال

فشار صاف شده است. پایه برداشته شد و خاک و قالب وزن شدند نمونه رطوبت از بالا، وسط و پایین از خاک گرفته شده است. این روش تا زمانی که وزن خاک در قالب از حداکثر مقدار عبور و شروع به کاهش می‌کند تکرار شد.

۶- روش ساخت نمونه‌ها

جهت آماده‌سازی نمونه ابتدا به مدت ۳۰ دقیقه نانو سیلیس را با ماسه به صورت خشک به وسیله همزن برقی با سرعت پایین به طوری که سبب جداسازی نانو سیلیس به شکل غبار نگردد مخلوط کرده، سپس سیمان به مخلوط اضافه می‌گردد و به مدت ۱۵ دقیقه اختلاط ادامه می‌یابد. سپس آب مقطر را به مخلوط نانو سیلیس، ماسه و سیمان اضافه کرده و به مدت ۳۰ دقیقه فرآیند اختلاط را با همزن برقی ادامه داده تا بتوان به نمونه‌های همگن رسید. در پایان، مخلوط یکنواخت و بدون کلوخه خواهیم داشت. روش انجام آزمایشات مطابق با استاندارد ASTM D 3080 [۲۷] بوده که بر این اساس خاک مورد استفاده برای آماده‌سازی نمونه‌ها باید به اندازه‌ای باشد که بتوان حداقل سه نمونه مشابه برای یک حالت مشخص آماده نمود. به منظور و امکان استفاده از نتایج در مقاصد علمی و کاربردهای مهندسی ساخت تمامی نمونه‌ها به ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر × ۱۰۰ میلی‌متر و با ضخامت ۲۰ میلی‌متر به شیوه کوبش مرطوب صورت گرفته است. برای حصول تراکم یکنواخت در ارتفاع و هنگام ساخت تمامی نمونه‌ها از روش تراکم کاهش یافته‌اند [۲۸]، در سه لایه استفاده شده است. ضمناً برای اتصال بهتر بین لایه‌های مختلف، سطح لایه‌های کوبیده شده قبلی پس از رسیدن به ارتفاع مورد نظر شیار زده می‌شود تا درگیری مناسب‌تری با خاک لایه بعدی در محل فصل مشترک آنها ایجاد شود. پس از ساخت نمونه‌های مناسب برای آزمایش برش مستقیم و ممانعت از تغییرات زیاد درصد رطوبت قبل از آزمایش، هر یک از نمونه‌ها را به‌طور جداگانه در کیسه‌های نایلونی قرار داده و با توجه به برنامه زمان‌بندی تحت آزمایش قرار داده شدند (شکل ۲).



شکل ۲: مراحل ساخت و عمل آوری نمونه‌ها

Fig. 2. Steps of preparation and curing of samples

۷- روند آزمایش برش مستقیم

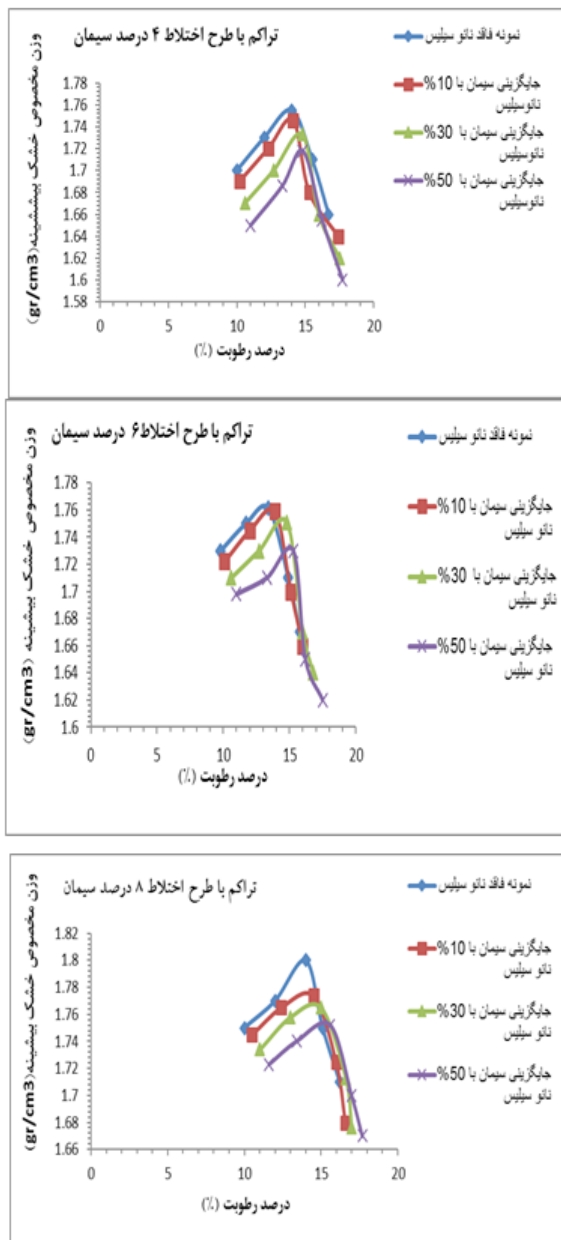
آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌ها در فواصل زمانی ۷ و ۲۸ روزه بر اساس استاندارد ASTM D 3080 صورت گرفت. برای این منظور ۱۰۰ نمونه اصلی و کنترلی بر اساس استانداردهای موجود ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. در این تحقیق میزان تنش نرمال اعمالی در همه آزمایش‌های انجام شده برابر ۱۰، ۲۰ و ۴۰ کیلوگرم می‌باشد. این آزمایش‌ها بر اساس روش کنترل کرنش و در حالت زهکشی شده انجام گرفته است.

۸- نتایج آزمایش تراکم

نتایج آزمایش تراکم برای بدست آوردن بیشترین وزن مخصوص خشک نانو سیلیس در برابر درصد رطوبت برای مخلوط سیمان-ماسه و مخلوط ماسه-سیمان-نانو سیلیس در شکل ۳ نشان داده شده است، و ارائه نتایج اثرات سیمان بر بیشترین وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه با مخلوط ماسه و سیمان آورده شده است.

در نمودارهای مربوط به شکل ۳ می‌توان دید که، وزن مخصوص خشک بیشینه مخلوط ماسه-سیمان، با افزایش مقدار سیمان از ۴ تا ۸ درصد به میزان ۳ درصد افزایش پیدا می‌کند. این افزایش برای مخلوط ماسه-سیمان در آزمایش پرکتور استاندارد می‌تواند نشان دهنده حضور وسیع اجزاءدانه‌ای (سنگدانه‌ها) با وزن مخصوص بالا باشد. بالاتر بودن وزن دانه‌های جامد سیمان (G_s) نسبت به ماسه نیز مزید بر علت است. همچنین افزایش سیمان از ۴ تا ۸ درصد باعث کاهش رطوبت بهینه به مقدار ۴ درصد می‌شود که این کاهش رطوبت برای سیمان‌های با درصد بالا محسوس‌تر است و این مطلب را می‌توان با توجه به ارتباط مستقیمی که بین عمل هیدراتاسیون و میزان سیمان وجود دارد توجیه نمود. به عبارت دیگر با افزایش میزان سیمان، عمل هیدراتاسیون که منجر به کاهش رطوبت می‌شود، نیز افزایش می‌یابد.

با بررسی شکل ۳ مربوط به اثرات نانو سیلیس بر وزن مخصوص خشک، معلوم می‌شود که با افزایش مقدار نانو سیلیس به مخلوط ماسه-سیمان وزن مخصوص خشک بیشینه، نسبت به حالتی که فقط از سیمان استفاده شده به طور متوسط ۲/۴ درصد کاهش می‌یابد. به طور کلی از این جهت نانو سیلیس، دارای مزیت‌های کمتری نسبت به سیمان است، و با افزایش مقدار نانو سیلیس وزن مخصوص مخلوط کاهش می‌یابد که این موضوع ناشی از تخلخل (فضای خالی) ایجاد شده درون سنگ دانه‌های درشت و اجزاء نانو سیلیس است. در مورد رطوبت بهینه نیز می‌توان مشاهده کرد که با افزایش نانو سیلیس درصد رطوبت بهینه، به دلیل اینکه نانو سیلیس دارای سطح مخصوص ویژه زیاد و نیازمند رطوبت بیشتر برای عمل هیدراتاسیون است، به طور میانگین ۸/۸ درصد نسبت به نمونه‌هایی که فقط از سیمان استفاده شده است، افزایش می‌یابد.



شکل ۳: نتایج آزمایش تراکم برای طرح اختلاط‌های مختلف

Fig. 3. The results of compaction tests for different cases

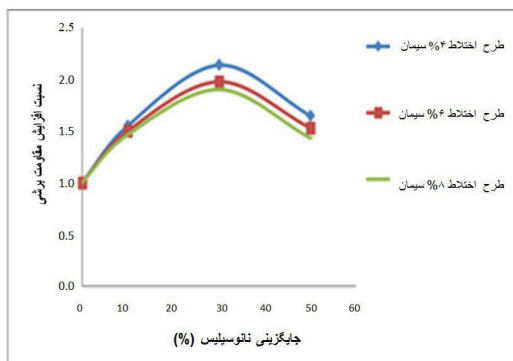
۹- تحلیل نتایج آزمایش برش مستقیم

همانگونه که نمودارهای شکل ۴-الف و ب، حاصل از آزمایش برش مستقیم نشان می‌دهد، با افزایش میزان سیمان، از ۴ تا ۸ درصد جایگزینی مقاومت برشی نمونه‌ها ۶۷٪ افزایش می‌یابد که این امر ناشی از افزایش پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، بدلیل تکمیل واکنش‌های شیمیایی سیمان می‌باشد. همچنین افزودن نانو سیلیس به سیمان تا ۳۰ درصد جایگزینی با سیمان باعث افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های بدون نانو سیلیس (نمونه‌هایی که فقط از سیمان استفاده شده است) می‌شود، در این تحقیق افزایش ۳۰ درصدی جایگزینی نانو سیلیس درصد بهینه جهت



شکل ۴: ب) نمودار تغییرات مقاومت برشی بر حسب جایگزینی نانو سیلیس پس از ۲۸ روز عمل آوری

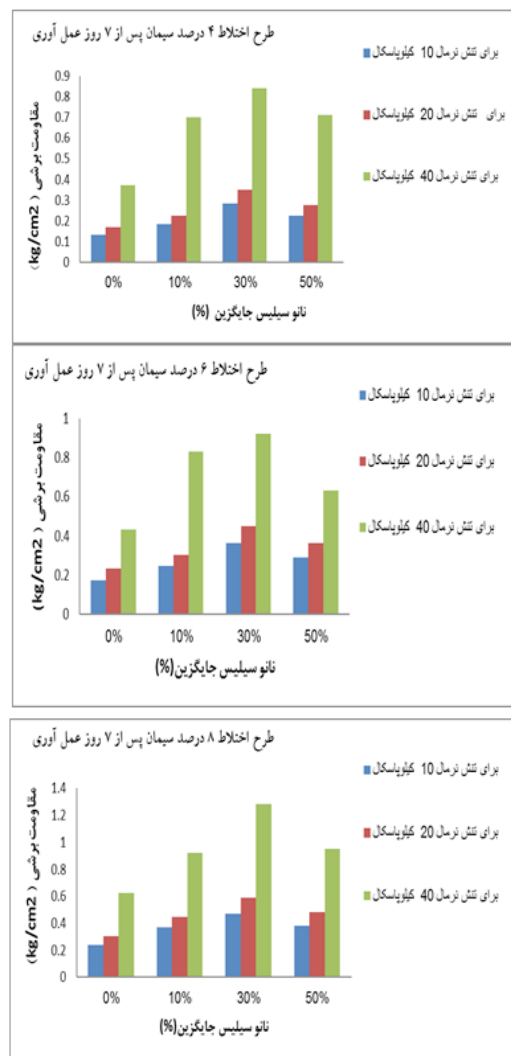
Fig. 4. b) Variation of shear strength with nanosilica after 28 days of curing



شکل ۵: تغییرات نسبت مقاومت برشی بر حسب درصدهای جایگزینی نانو سیلیس

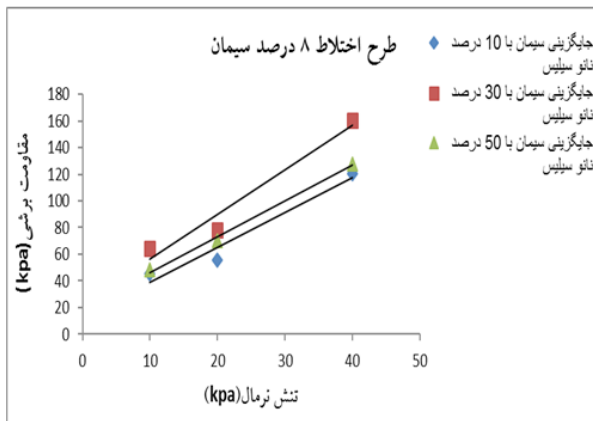
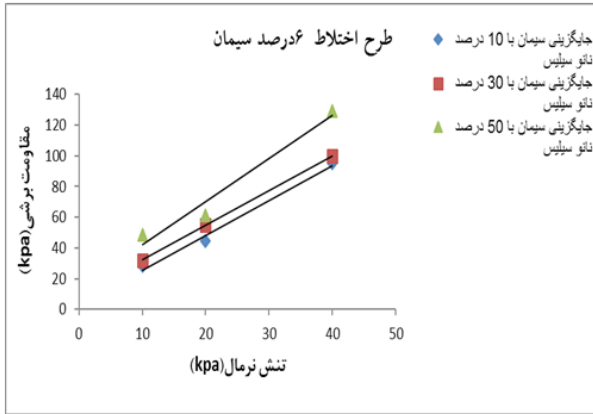
Fig. 5. Variation of shear strength ratio with nanosilica content

افزایش مقاومت برشی است. در این درصد، به طور متوسط شاهد افزایش ۲ برابری مقاومت نمونه‌ها هستیم (شکل ۵). واکنش پوزولانی بین نانو سیلیس با آهک آزاد شده در خلال فرآیند هیدراسیون، کلسیم-سیلیکات-هیدرات بیشتری تولید می‌کند که این مساله خود باعث بهبود خصوصیات مکانیکی خاک می‌شود. همچنین در مقیاس نانو، به دلیل نسبت سطح به حجم زیاد، ظرفیت تبادل کاتیونی بالایی وجود دارد، بنابراین برهم‌کنش آن‌ها با دیگر ذرات بسیار فعالانه می‌باشد، بطوریکه در مدت زمان اندکی بعد از برهم‌کنش، تاثیر معناداری روی رفتار فیزیکی-شیمیایی و خواص مهندسی خاک مشاهده می‌شود. از طرف دیگر با افزایش درصد جایگزینی نانو از ۳۰ درصد مقاومت نمونه‌ها سیر نزولی دارد، که این امر می‌تواند ناشی از کلوخه شدن ذرات نانو با یکدیگر باشد. چرا که با افزایش ذرات نانو که سطح مخصوص بالایی دارند، در یک حجم ثابت ذرات بیشتری قرار می‌گیرند.



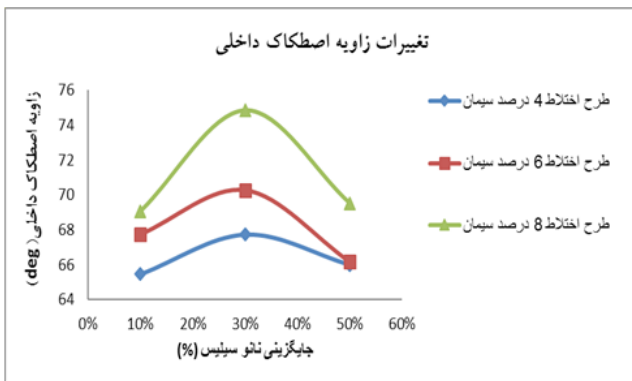
شکل ۴: الف) نمودار تغییرات مقاومت برشی بر حسب جایگزینی نانو سیلیس پس از ۷ روز عمل آوری

Fig. 4. a) Variation of shear strength with nanosilica after 7 days of curing



شکل ۷: پوش گسیختگی موهر کولمب

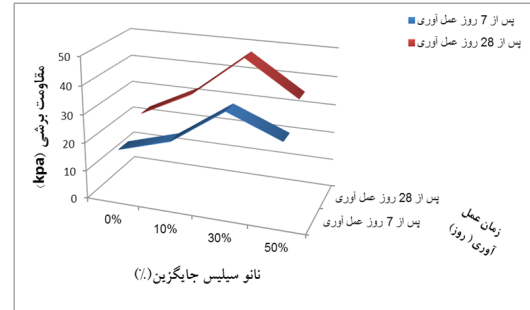
Fig. 7. Mohr-Coulomb failure envelope



شکل ۸: تغییرات زاویه اصطکاک داخلی با درصدهای مختلف جایگزینی نانو سیلیس

Fig. 8. Variation of internal friction angle with nanosilica content

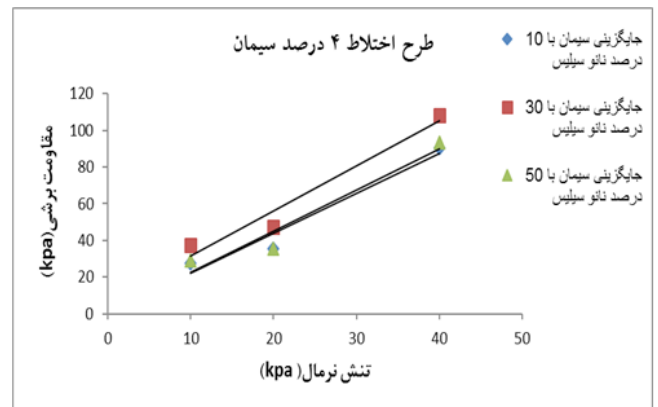
نکته قابل توجه دیگر تاثیر زمان عمل آوری بر افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها است (شکل ۶)، این افزایش مقاومت می‌تواند ناشی از تولید ژل‌های سیلیکاتی حاصل از واکنش سیلیس با سیمان و آب که فرایندی زمان بر است باشد.

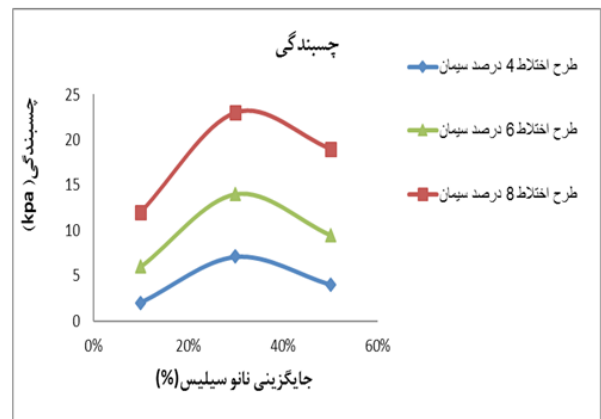
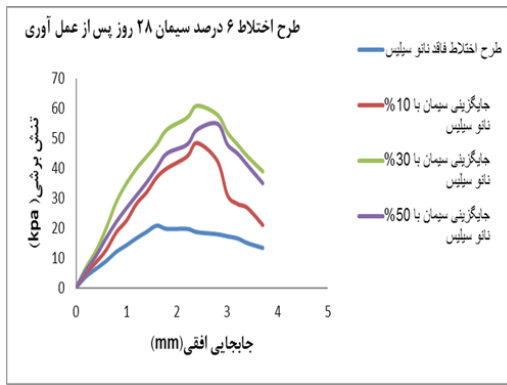


شکل ۹: نمودار تاثیر زمان عمل آوری بر مقاومت برشی نمونه‌ها

Fig. 6. The effect of curing time on the shear strength of samples

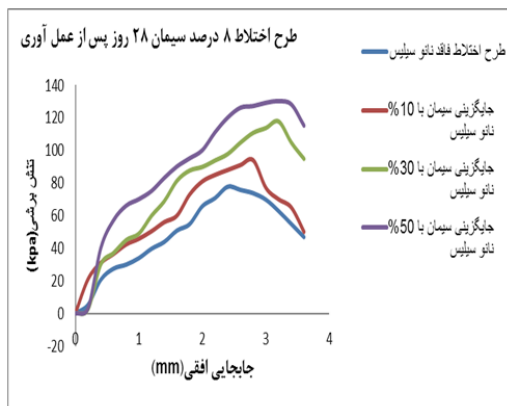
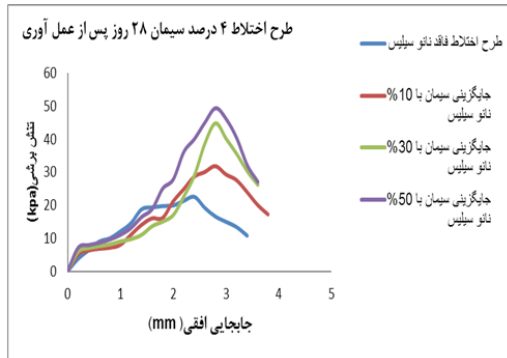
در ادامه با رسم نمودار پوش موهر-کلمب، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی حاصله از نتایج آزمایش برش مستقیم به صورت نمودارهای شکل ۷، ۸، و شکل ۹ قابل ارائه هستند. همانگونه که نمودار شکل ۸ و شکل ۹ نشان می‌دهد، افزایش مقاومت برشی در این تحقیق بیشتر ناشی از افزایش پارامتر چسبندگی بوده بطوریکه میزان تغییرات این پارامتر در طرح اختلاط‌های مختلف تا ۲/۵ برابر نسبت به حالت نمونه‌های بدون نانو سیلیس افزایش پیدا می‌کند، که این امر ناشی از واکنش بین سیلیس با اکسید کلسیم سیمان و در نتیجه افزایش چسبندگی می‌باشد. در حالیکه تغییرات زاویه اصطکاک داخلی چشمگیر نبوده و در طرح اختلاط‌های مختلف، بصورت میانگین ۵ درجه است.





شکل ۹: تغییرات چسبندگی با درصد های مختلف جایگزینی نانوسیلیس

Fig. 9. Variation of cohesion with nanosilica content



شکل ۱۰: تغییرات تنش برشی بر حسب جابجایی افقی

Fig. 10. Variation of shear stress with horizontal displacement

مقایسه منحنی‌های تغییرات تنش برشی بر حسب جابجایی افقی (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که با افزایش درصد نانو ذرات سیلیس در نمونه‌ها کرنش متناسب با مقاومت بیشینه افزایش می‌یابد. در حقیقت رفتار نمونه‌ها از حالت شکننده خارج می‌شود، به عبارت دیگر افزایش نانو ذرات موجب نرم‌تر شدن رفتار نمونه‌ها می‌شود.

۱۰- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی تاثیر ترکیبی از نانوسیلیس و سیمان بر روی تراکم و مقاومت برشی خاک ماسه‌ای بابلسر پرداخته شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که:

۱. افزایش سیمان باعث بالا رفتن وزن مخصوص خشک و کاهش رطوبت بهینه، به ترتیب به میزان ۳ و ۴ درصد می‌شود. و این امر بدلیل حضور وسیع اجزاء دانه‌ای (سنگدانه‌ها) با وزن مخصوص بالا و همچنین ارتباط مستقیمی که بین عمل هیدراسیون و میزان سیمان وجود دارد می‌باشد.
۲. افزایش نانو سیلیس به مخلوط ماسه-سیمان سبب کاهش وزن مخصوص، به طور متوسط بمقدار ۲/۴ درصد و افزایش میانگینی ۸/۸ درصد رطوبت بهینه، نسبت به نمونه‌هایی که فقط از سیمان استفاده شده است می‌گردد.
۳. نتایج آزمایش برش مستقیم نشان داد که، با افزایش میزان سیمان مقاومت برشی نمونه‌ها ۶۷٪ افزایش می‌یابد.
۴. افزودن نانوسیلیس به ترکیب ماسه-سیمان تا میزان ۳۰ درصد جایگزینی باعث افزایش مقاومت برشی ۲ برابری نمونه‌ها شده و این درصد بهینه برای اختلاط سیمان با نانوسیلیس است.
۵. همچنین ترکیب نانوسیلیس با سیمان بر روی پارامتر چسبندگی موثرتر بوده بگونه‌ای که بطور متوسط افزایش ۲/۵ برابری این پارامتر نسبت به حالتی که تنها از سیمان استفاده شده است ملاحظه می‌شود. و میزان تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در طرح

اختلاط‌های مختلف کم بوده و بصورت میانگین ۵ درجه است. علاوه بر این نتایج نشان داد که مدت زمان عمل‌آوری و تنش ۶ نرمال اعمالی نیز در افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها موثر است. نکته حائز اهمیت دیگر این است که افزایش نانو ذرات موجب نرم‌تر شدن رفتار نمونه‌ها می‌گردد. بنابراین، جهت رسیدن به یک مقاومت مشخص، استفاده از نانو سیلیس می‌تواند ضمن رسیدن به مقاومت مورد نظر تا حد قابل توجهی مصرف سیمان مصرفی را کاهش، و بدنبال آن اثرات مخرب زیست محیطی تولید سیمان را کاهش دهد.

- [14] Yonekura, R., Miwa, M. (1993). "Fundamental properties of sodium silicate based grout." Proceedings of the 11th Southeast Asia Geotechnical Conference, Singapore: 439-444
- [15] Gallagher, P. M., Mitchel, J. K., Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior on loose sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 22 (2002) 1017-1026.
- [16] Taipodia, J., Dutta, J., Dey, A.K., Effect of nano particles on properties of soil. Proceedings of Indian Geotechnical Conference, December 15-17, (2011) Kochi.
- [17] Mohamadzadeh Sani, A., Arabani, M., Haghi, A.K., Chenari, R.J., Effect of nanoclay additive on the geotechnical properties of silty sands. in: Proc. of 4th International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics, Tehran, (2010) (In Persian).
- [18] Janalizadeh Choobbasti, A., Vafaei, A., Soleimani Kutanaei, S., Evaluation of the combined effect of cement and nanosilica on the strength of Caspian sea sand. 1st National Conference on Geotechnical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, (2013) (In Persian).
- [19] Sadrjamali, M., Athar, S. M., Negahdar, A., Modifying soil shear strength parameters using additives in laboratory condition. *Curr World Environ* 10(1) (2015) 120-130.
- [20] Annual Book of ASTM Standards, Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken. (2012)
- [21] Annual Book of ASTM Standards, Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken. (2012)
- [22] Annual Book of ASTM Standards, Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken. (2012)
- [23] Annual Book of ASTM Standards, Standard test for specific gravity of soil solids by water pycnometer. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken. (2012)
- [24] Noorzad, R., The behavioral characteristics of geotextile-reinforced sand. Ph.D. thesis, Sharif University, Tehran, (2000) (In Persian).
- [25] Sadaghiani, M., Nasr, M., A study on the effect of concentration on the permeability and physical and mechanical behavior of injected sand with silicate grout. 4th National Congress on Civil Engineering, (2008) (In Persian).
- [1] Dermatas, D., Meng, X.G., Utilization of fly ash for stabilization /solidification of heavy metal contaminated soils. *Engineering Geology* 70: (2003) 377-394.
- [2] Gutierrez, M. S., Nano-geomechanics potential applications of nano-mechanics in geotechnical engineering. in: Proc. of the International Workshop on Micro-Geomechanics Across Multiple Strain Scales Cambridge, UK: (2005) 29-30.
- [3] Naderi, N., Naeini, S.A., The influence of polymer inclusion and plasticity index on the unconfined compression strength of clays. Proc. of the 2nd International Conf. on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Nicosia, North Cyprus. (2009)
- [4] Dupas, J., Pecker, A., Static and dynamic properties of sand cement. *Journal of Geotechnical ASCE J Geotech Eng* 105(3) (1979) 419-436.
- [5] Shihata, S. A., Baghdadi, Z.A., Simplified method to assess freeze-thaw durability of soil cement. *Journal of Materials in Civil Engineering* 13(4) (2001) 243-247.
- [6] Esmailipour, E., The effect of recession on cement industry and solutions to exit from it. *Cement Technology Journal*, (2015) (In Persian).
- [7] Yılmaz, B., Uçar, A., Öteyaka, B., Uz, V., Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended portland cement. *Building and Environnement* 42(11) (2007) 3808-3815.
- [8] Ardestani, P., The environmental effects of using nanosilica in concrete. MS.C. thesis, K. N. Toosi University of Technology, (2008) (In Persian).
- [9] Ramzaniyanpour, A., Firoozmakan, Sh., Ebadi, T., Bahrami, H., The effect of nanosilica on the physical properties and durability of concrete. 6th Civil Engineering Congress, Semnan, (2011) (In Persian).
- [10] Sobolev, K., Flores, I., Hermosillo, R., Torres-Martinez, L., Nanomaterials and nanotechnology for high-performance cement composites. *Journal of American Concrete Institute* 254 (2006) 93-129.
- [11] Tobon, J. L., Restrepo, O. J., Paya, J., Comparative analysis of performance of portland cement blended with nano silica and silica fume. *Dyna Magazine* 163 (2010) 37-48.
- [12] Ghazavi, M., Boulhasani, M., Design and construction of grout using lime and nanosilica for stabilization of kaolinite and study of its parameters for application in trash burying sites. 2nd International Symposium of Environment, (2009) (In Persian).
- [13] Taha, M. R. (2009). "Geotechnical properties of soil-ball milled soil mixtures" *Nanotechnology in Construction* 3: 377-385.

- conditions. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken. (2012)
- [28] Ladd, R. S., Preparing test specimens using undercompaction. *Geotechnical Testing Journal* 1(1) (1978) 16-23.
- [26] Annual Book of ASTM Standards, Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken. (2012)
- [27] Annual Book of ASTM Standards, Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

I. Shooshpasha, M. Abbasi, H. Najafniya, Analyzing the Effect of Nano-Silica-Cement Mixture on Shear Strength of Babolsar Sandy Soil. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(1) (2018) 179-188.

DOI: 10.22060/ceej.2017.11358.5010

