

Exploring the effect of adding nano-silica and cement on the unconfined compressive strength of soft clay

Khaeroallah Masihpour¹, Seyed Hamid Lajevardi², S.Mohammad Mirhosseini^{3*}, Farid Jamali-Sheini⁴

1- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

4-Professor, Advanced Surface Engineering and Nano Materials Research Centre, Department of Physics, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

ABSTRACT

Clay soils with a water content of more than 35% or close to the liquid limit are known as soft clay. These soils have an unconfined compressive strength (UCS) of less than 25 kilopascals. In order to improve the strength of these soils, additives such as cement and nanoparticles are added to them. These additives are combined with soil, which is called cemented mixed soil. Therefore, this research investigated the effect of the simultaneous addition of Nano-silica with cement on changes in UCS of soft clays with low plasticity (cl). The research considers soil with a constant water content of 40%, exceeding its liquid limit, for all samples. The changes in three factors, the cement and Nano-silica content consumed and the curing time of the specimens, were investigated as effective factors. For cement, 8%, 10%, and 12% relative to the weight of dry soil were considered. Nano-silica at eight levels from zero to 1.4% relative to the weight of dry soil and three curing times 7, 14, and 28 days were considered. A total of 72 series of specimens were made, and the unconfined compressive strength was measured. The results indicate that using nano-silica up to 1.2% in combination with cement increases the UCS by an average of about 170% after seven days, 120% after 14 days, and 48% after 28 days compared to using cement alone. Additionally, adding nano-silica led to a reduction of up to 4% in cement usage. Equations were derived based on the consumption rates of cement and nano-silica, along with the curing period, to estimate the uniaxial strength of the samples. The average difference between the estimated and measured values for all samples ranged from 1% to 3%.

ARTICLE INFO

Receive Date: 21 September 2023

Revise Date: 23 February 2024

Accept Date: 16 March 2024

Keywords:

Soft clay

Cemented mixed soil

Nano silica

UCS

Curing time

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.410143.3189>

*Corresponding author: Seyed Mohammad Mirhosseini.

Email address: Mo. mirhosseini@iau. ac. ir

بررسی تاثیر افزودن نانوسیلیس و سیمان بر مقاومت تک محوری رس های نرم

خیراله مسیح پور^۱، سیدحمیدلاجوردی^۲، سیدمحمد میرحسینی^{۳*}، فریدجمالی شینی^۴

۱- دانشجوی دکتری مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

۴- استاد، مرکز تحقیقات مهندسی سطح پیشرفته و نانومواد، گروه فیزیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

چکیده

خاک های رسی با رطوبت بیش از ۳۵ درصد یا نزدیک به حد روانی، به عنوان رس نرم شناخته می شوند. این خاک ها دارای مقاومت تک محوری کمتر از ۲۵ کیلو پاسکال هستند. به منظور بهبود در مقاومت این خاک ها، مواد افزودنی مانند سیمان و نانو ذرات به آن ها اضافه می شود. این مواد افزودنی با خاک ترکیب شده که به آن «خاک مخلوط سیمانی شده» گفته می شود. در این تحقیق، تأثیر افزودن هم-زمان نانو سیلیس با سیمان، بر تغییرات مقاومت تک محوری خاک رس نرمی با حد روانی کم بررسی گردید. بدین منظور، یک درصد رطوبت ثابت ۴۰ درصد، بیش از حد روانی این خاک، برای کلیه ی نمونه ها در نظر گرفته شد. تغییرات سه عامل درصد سیمان، نانو سیلیس مصرفی و دوره ی عمل آوری نمونه ها به عنوان عوامل مؤثر، مورد بررسی قرار گرفت. برای سیمان، سه درصد ۸، ۱۰ و ۱۲ درصد و نانو سیلیس در ۸ سطح از صفر تا ۱/۴ درصد وزنی نسبت به خاک خشک و برای دوره ی عمل آوری نیز سه دوره ی ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه مدنظر قرار گرفت. در مجموع ۷۲ سری نمونه تهیه و مقاومت تک محوری آن ها اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که استفاده از نانو سیلیس تا ۱/۲ درصد به همراه سیمان، مقاومت تک محوری را نسبت به حالت استفاده از سیمان تنها، به طور متوسط در دوره ی ۷ روزه حدود ۱۷۰ درصد، در دوره ی ۱۴ روزه ۱۲۰ درصد و در دوره ۲۸ روزه ۴۸ درصد افزایش داد. علاوه بر این مشاهده شد با اضافه کردن نانو سیلیس، سیمان مصرفی تا ۴ درصد کاهش یافت. همچنین روابطی در محدوده ی آزمایش های انجام شده برای تخمین مقاومت تک محوری نمونه ها بر اساس مقادیر درصد سیمان و نانو سیلیس مصرفی و دوره ی عمل آوری نمونه ها به دست آمد. میانگین تفاضل مقاومت تک محوری تخمینی از این روابط با مقادیر اندازه گیری شده برای کل نمونه ها، ۱ تا ۳ درصد بود.

کلمات کلیدی: خاک رس نرم، خاک مخلوط سیمانی شده، نانوسیلیس، مقاومت تک محوری، دوره ی عمل آوری.

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۴۰۲/۰۶/۳۰	۱۴۰۲/۱۲/۰۴	۱۴۰۲/۱۲/۲۶	۱۴۰۲/۱۲/۲۶	۱۴۰۳/۰۹/۳۰	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.410143.3189
*نویسنده مسئول:		سید محمد میرحسینی			
پست الکترونیکی:		mo.mirhosseini@iau.ac.ir			

۱- مقدمه

رس‌های نرم^۱ یکی از انواع خاک‌های مسأله‌دار هستند. خاک‌های رسی که رطوبت‌شان بیشتر از ۳۵ درصد یا نزدیک به حد روانی-شان باشد، رس نرم هستند [۱]. این نوع رس‌ها، مقاومتی کمتر از ۲۵ کیلوپاسکال دارند و به دلیل مقاومت بسیار پایین، نیاز است که این نوع خاک با افزودن برخی مواد، اصلاح^۲ شود. تثبیت و تسلیح خاک‌ها از جمله روش‌های مرسوم بهسازی و اصلاح انواع خاک‌های مسأله‌دار مانند خاک‌های رسی نرم هستند [۲]. سیمان، یکی از مهمترین مواد پیونددهنده^۳ شناخته شده‌ای است که در مهندسی ژئوتکنیک، به منظور بهسازی زمین، تقویت و تثبیت خاک‌ها به ویژه خاک رس نرم، استفاده می‌شود [۱-۵].

تحقیقات مختلفی روی اثر سیمان بر خاک‌های رسی نرم انجام شده است [۶-۱۳]. یک ارزیابی انجام شده نشان داد که بهترین درصد سیمان برای تثبیت خاک‌های رسی با حد روانی کم (CL) بین ۸ تا ۱۲ درصد نسبت به وزن خشک خاک است [۶]. همچنین در اصلاح خاک سواحل که نوع خاک آنها می‌تواند ریزدانه‌ی نرم باشد، مشاهده شد که با افزودن ۶ تا ۱۲ درصد سیمان، خواص مکانیکی بهبود می‌یابد [۷-۱۰]. هم چنین در بعضی تحقیقات انجام شده بر روی خاک‌های رسوبی با $(PI=10-20)$ ، مشخص شد که افزودن ۶ تا ۱۰ درصد سیمان به این خاک‌ها، موجب اصلاح آنها می‌شود [۱۱-۱۳].

اضافه کردن سیمان به خاک‌های رسی نرم با استفاده از تکنیک اختلاط خاک، باعث ایجاد پیوند بین دانه‌های سیمان و ذرات رس شده و یک کامپوزیت ایجاد می‌نماید. این کامپوزیت سیمان-خاک، در اثر فعالیت‌های پوزولانی ایجاد می‌شود. این فعالیت‌ها در اثر پر کردن منافذ در خاک توسط سیمان رخ می‌دهند. مشاهده شد که ویژگی‌های این خاک مخلوط در مقایسه با خاک تنها، افزایش پیدا می‌کند [۵ و ۶-۱۴-۱۷].

همچنین از سیمان به همراه سایر مواد دیگر به عنوان بهبوددهنده‌ی خاک‌ها استفاده می‌شود؛ نانو ذرات، از جمله این مواد هستند. ترکیب سیمان و نانو ذرات، عملکرد قابل قبولی را در مقاومت فشاری خاک رس نرم فراهم می‌کند. افزودن نانو ذرات به همراه سیمان می‌تواند کرنش حداکثری را در نمونه‌های خاک اصلاح شده در مقایسه با نمونه‌های اصلاح نشده و نمونه‌های بدون سیمان کاهش دهد. با این روش اصلاح، سفتی کلی^۴ خاک اصلاح شده افزایش می‌یابد [۱۸].

یکی از مهمترین ذرات نانو برای بهبود خواص رس‌ها، نانو سیلیس است که یک ماده پوزولانیک بسیار فعال محسوب می‌شود [۱۱ و ۱۹ و ۲۰]. از آنجا که فرآیند تولید سیمان، فرآیندی انرژی‌بر و آلوده‌کننده‌ی محیط زیست است؛ بنابراین بهینه سازی ترکیب سیمان به گونه‌ای که کمترین میزان انرژی برای تولید آن مصرف شده و کمترین لطمه به منابع طبیعی وارد شود و در نهایت بهترین کارایی را دارا باشد، به عنوان یک هدف اصلی مطرح می‌شود. نانو سیلیس می‌تواند به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی به کار رود؛ در نتیجه می‌تواند به عنوان یک گزینه برای کاهش مصرف سیمان مدنظر قرار بگیرد [۲۱].

تغییرات مشاهده شده در مخلوط‌های اصلاح شده با ذرات نانو SiO_2 ، نتیجه‌ی یک واکنش شیمیایی بین SiO_2 و $Ca(OH)_2$ در طول هیدراتاسیون سیمان است. علاوه بر این، نانو سیلیس به دلیل داشتن انرژی سطحی بالا، هیدراتاسیون سیمان را تسریع می‌کند [۱۱ و ۲۲-۲۴]. هم چنین نانو سیلیس باعث تغییرات در خواص فیزیکی خاک اصلاح شده، مانند بهبود چگالی آن می‌شود؛ چرا که به دلیل ریز بودن ذرات

1-Soft clays

2-Modified

3-Binders' admixture

4-The overall rigidity

نانو، این ذرات در فضای بین دانه‌ها قرار گرفته و اثر پرکنندگی دارند [۱۱ و ۲۵-۲۸].

یکی دیگر از مکانیسم‌های فیزیکی شناخته شده، اثر هسته‌زایی^۱ است که به وسیله این فرایند، ترکیبات هیدراتاسیون ایجاد شده، اطراف ذرات را پوشانده و بدین ترتیب، یک ماتریس متراکم‌تر با محصولات هیدراتاسیون بهتر تشکیل می‌شود [۱۱ و ۲۴ و ۲۹ و ۳۰]. نتایج تجربی نشان داده است که اثر پیوستگی خواص فیزیکی و شیمیایی نانو سیلیس، منجر به افزایش مقاومت ۲۰ درصدی کامپوزیت های سیمانی^۲ می‌شود [۱۱ و ۲۴].

در یک مطالعه، اثر هم‌زمان ترکیب نانو سیلیس با آهک برای بهبود رس‌های نرم مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه، از ترکیب یک درصد نانو سیلیس و ۷ درصد آهک با رس نرم استفاده شد. نتایج نشان داد که این ترکیب، سبب بهبود مقاومت فشاری نمونه‌ها گردید [۲۲]. در یک تحقیق دیگر، با اضافه نمودن ۰/۴ درصد نانو سیلیس به سیمان ۶ درصد و ۸ درصد، مقاومت فشاری تا ۸۰ درصد افزایش پیدا کرده است [۱۱]. همچنین در مطالعه دیگری، از سه ماده پیوند دهنده سیمان، سرباره و نانو سیلیس برای تثبیت خاک رس نرم استفاده شد که خواص مکانیکی و دوام بالاتری برای خاک تثبیت شده، به دست آمد [۳۱]. در تحقیقات دیگری نیز اثر مواد نانو به تنهایی، به خصوص نانو سیلیس به همراه مواد نانوی دیگر روی ماسه‌ها و رس‌ها بررسی گردید. در اغلب تحقیقات انجام شده، به خصوص در مورد نانو سیلیس، درصد مورد استفاده بین ۰ تا ۲ درصد نسبت به وزن خاک خشک بوده است [۱۱ و ۳۲-۳۹].

با توجه به مطالعات قبلی انجام شده؛ در این تحقیق، آزمایشات تک‌محوری به منظور بررسی تغییرات مقاومت تک‌محوری خاک‌های رسی نرم با حد روانی کم در اثر افزودن نانو سیلیس به همراه سیمان به این نوع خاک، تعریف شد. در این جا تغییرات سه عامل دوره‌ی عمل-آوری، درصد سیمان [۱۱] و درصد نانو سیلیس مصرفی، به عنوان عوامل مؤثر مورد بررسی قرار گرفتند.

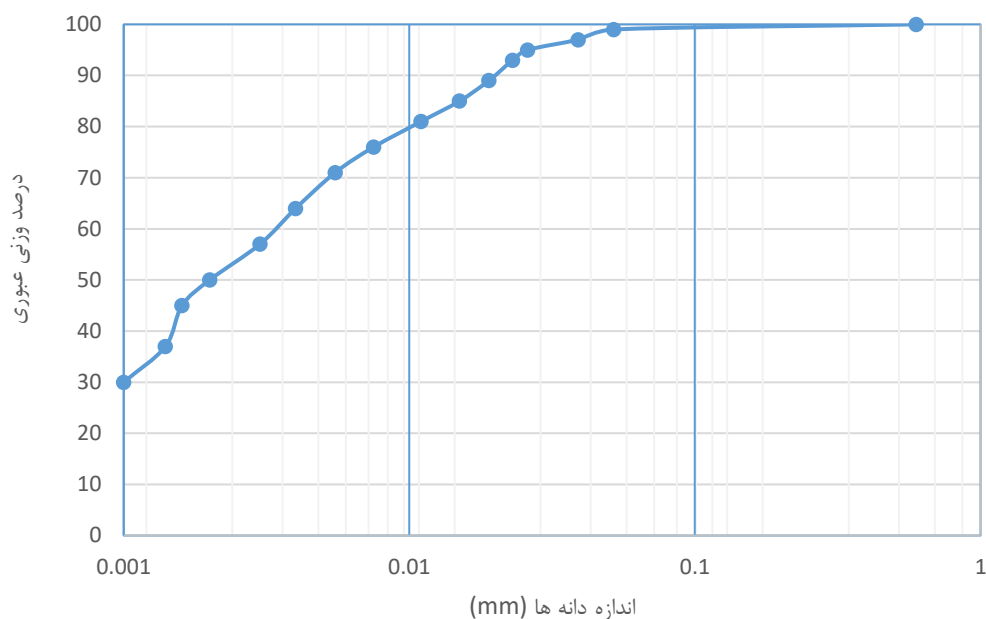
با توجه به این که حد روانی خاک مورد مطالعه ۳۶ درصد بود، انتخاب میزان درصد رطوبت بعد از این حد مد نظر قرار گرفت. این انتخاب باعث شد که حالت خاک مورد مطالعه نمونه‌ها در نمودار حدود اتربرگ، در منطقه روان قرار گیرد. برای این منظور تمام نمونه‌ها با درصد رطوبت ثابت ۴۰ درصد تهیه شدند. برای دوره‌ی عمل‌آوری، سه حالت ۷ و ۱۴ و ۲۸ روز و برای درصد سیمان مصرفی نیز سه مقدار ۸ و ۱۰ و ۱۲ درصد نسبت به وزن خشک خاک در نظر گرفته شد. تغییرات درصد نانو سیلیس مصرفی در ۸ سطح، از صفر تا ۱/۴ درصد نسبت به وزن خشک خاک در نظر گرفته شد. در مجموع ۷۲ سری نمونه تهیه و مقاومت تک‌محوری آن‌ها اندازه‌گیری شد.

۲- مواد و مصالح مورد استفاده و روش‌های انجام آزمایش‌ها

۲-۱- مصالح مورد استفاده و خواص آن‌ها

در این تحقیق از خاک رس با حد روانی کم (CL) و سیمان تیپ ۲ کارخانه سیمان خوزستان و نانو سیلیس استفاده شده است. خاک مورد مطالعه، از عمق ۳ متری حوزه‌ی گودبرداری زیرزمین یک ساختمان مسکونی در حال ساخت در منطقه کیانپارس شهر اهواز برداشت شده است. مشخصات خاک و نانو سیلیس مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ و نمودار دانه‌بندی این خاک نیز در شکل ۱ نشان داده شده است.

1-Nucleation
2-Cementitious composites



شکل ۱: نمودار دانه بندی خاک مورد استفاده

جدول ۱: ویژگی های خاک و نانو سیلیس مورد استفاده

مقدار	ویژگی های نانو سیلیس	مقدار	ویژگی های خاک استفاده شده	مقدار	ویژگی های خاک استفاده شده
۱۱-۱۳	ویژگی های فیزیکی قطر (نانومتر)	درصد ۳۸/۳۴	ویژگی های شیمیایی سیلیس (SiO ₂)	۳۶	ویژگی های فیزیکی حد روانی (درصد)
۲۰۰	مساحت سطح مخصوص (m ² /gr)	۳۶/۲۱	اکسید کلسیم (CaO)	۲۰	حد خمیری (درصد)
۹۸/۱۷	درجه خلوص (درصد)	۱۰/۹	اکسید آهن (Fe ₂ O ₃)	۱۵	نشانه خمیری (درصد)
۹۸/۱۷	ویژگی های شیمیایی نانو سیلیس (درصد)	۴/۷	آلومینیوم (Al ₂ O ₃)	۲/۶۲	چگالی دانه ها
۰/۸۴	اکسید آلومینیوم (Al ₂ O ₃) (درصد)	۳/۷۴	تری اکسید سولفور (SO ₃)	CL	نام خاک بر اساس آیین نامه متحد
		۱/۵۲	پتاس (K ₂ O)		
		۱/۲۹	(MgO)		
		۱/۱۱	(TiO ₂)		
		۰/۷۲	P ₂ O ₅		
		۰/۱۳	Cr ₂ O ₃		
		۰/۱۹	SrO		
		۰/۱۱	(%) Ba		
		۱	Loss in ignition (%)		

۲-۲- مطالعه آزمایشگاهی

در این مطالعه، به منظور اصلاح خاک های رسی نرم، از سیمان و نانو سیلیس به طور همزمان استفاده شد. رطوبت خاک حدود ۴۰ درصد [۱] و سیمان با ۱۰، ۸ و ۱۲ درصد نسبت به وزن خشک خاک در نظر گرفته شد. با هر درصد سیمان یاد شده، نانو سیلیس مصرفی از صفر تا ۱/۴ درصد و با دامنه تغییر ۰/۲ درصد در هر مرحله اعمال گردید. هم چنین سه دوره ی عمل آوری (TD) ۷ و ۱۴ و ۲۸ روزه برای

نمونه‌ها در نظر گرفته شد. نمونه‌ها در سه وضعیت A برای دوره‌ی عمل‌آوری ۷ روزه، B برای دوره‌ی ۱۴ روزه و C برای دوره‌ی ۲۸ روزه نامگذاری شدند. استانداردهای موردنیاز برای آزمایش نمونه‌ها در جدول ۲ آمده است. با توجه به موارد یاد شده، ۷۲ سری نمونه مطابق جدول ۳ آماده گردید. در مورد شکل و زمان اختلاط خاک و سیمان و نانوسیلیس، هم از تجربیات قبلی و هم از روش‌های ذکر شده در مقالات مراجع [۱ و ۱۱ و ۲۱] استفاده شده است.

جدول ۲: آیین‌نامه‌های به کار رفته

ردیف	آزمایش	استاندارد آزمایش
۱	هیدرومتری	ASTM D422
۲	تعیین حد روانی و خمیری خاک	ASTM D4318
۳	تعیین درصد رطوبت	ASTM D2216
۴	طبقه‌بندی خاک به روش یونیفاید	ASTM D2487
۵	وزن مخصوص توده جامد خاک	ASTM D854
۶	تک‌محوری	ASTM D2166
۷	آنالیز میزان مواد موجود در خاک و نانوسیلیس	آزمایش XRF
۸	آنالیز پراش سنج اشعه X	آزمایش XRD

جدول ۳: نمونه‌های تهیه شده جهت اجرای آزمایش تک‌محوری

شماره آزمایش	درصد سیمان مصرفی	درصد نانوسیلیس مصرفی	C(TD=28)	B(TD=14)	A(TD=7)
۱	۸	۰	1-C	1-B	1-A
۲	۱۰	۰	2-C	2-B	2-A
۳	۱۲	۰	3-C	3-B	3-A
۴	۸	۰/۲	4-C	4-B	4-A
۵	۱۰	۰/۲	5-C	5-B	5-A
۶	۱۲	۰/۲	6-C	6-B	6-A
۷	۸	۰/۴	7-C	7-B	7-A
۸	۱۰	۰/۴	8-C	8-B	8-A
۹	۱۲	۰/۴	9-C	9-B	9-A
۱۰	۸	۰/۶	10-C	10-B	10-A
۱۱	۱۰	۰/۶	11-C	11-B	11-A
۱۲	۱۲	۰/۶	12-C	12-B	12-A
۱۳	۸	۰/۸	13-C	13-B	13-A
۱۴	۱۰	۰/۸	14-C	14-B	14-A
۱۵	۱۲	۰/۸	15-C	15-B	15-A
۱۶	۸	۱	16-C	16-B	16-A
۱۷	۱۰	۱	17-C	17-B	17-A
۱۸	۱۲	۱	18-C	18-B	18-A
۱۹	۸	۱/۲	19-C	19-B	19-A
۲۰	۱۰	۱/۲	20-C	20-B	20-A
۲۱	۱۲	۱/۲	21-C	21-B	21-A
۲۲	۸	۱/۴	22-C	22-B	22-A
۲۳	۱۰	۱/۴	23-C	23-B	23-A
۲۴	۱۲	۱/۴	24-C	24-B	24-A

۲-۱-۲-۱- وسایل مورد استفاده برای ساخت نمونه

مطابق شکل ۲، قالبی با ابعاد استاندارد ولی به صورت سه تایی آماده شد. این مجموعه از سه قالب استوانه‌ای به ارتفاع ۷۶ میلی‌متر و قطر ۳۸ میلی‌متر تشکیل شده است. هر قالب استوانه‌ای، متشکل از دو نیم‌لوله است که با یک بست به هم وصل شده و در هنگام ساخت نمونه‌ها، می‌توان بست دور قالب را پس از گذشت ۲۴ ساعت و سفت شدن نمونه، باز کرده و نمونه را از قالب خارج نمود.



شکل ۲: قالب ساخت نمونه‌ها- الف- قالب سرهم شده - ب- سه قالب به صورت جدا از هم- ج- قالب باز شده

۲-۲-۲- ساخت نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌ها، ابتدا خاک خشک از الک نمره ۱۰ [۱] عبور داده شد و به میزان لازم توزین گردید. سپس با توجه به شماره نمونه در جدول ۳، میزان سیمان و نانو سیلیس مورد نیاز نیز وزن شد. در مرحله بعد، نانو سیلیس با خاک خشک مخلوط شده، سپس در یک میکسر به مدت ۲۰ دقیقه مخلوط گردید و پس از آن سیمان وزن شده به خاک مخلوط شده اضافه شد. میکسر به مدت ۱۰ دقیقه دیگر نیز چرخیده و عمل اختلاط انجام شد [۲۱]. در طول مدت اختلاط، برای جلوگیری از ایجاد غبار و خارج شدن نانو سیلیس و سیمان هنگام چرخش میکسر، روی ظرف آن یک درپوش قرار داده شد. پس از اتمام عمل اختلاط، خاک از میکسر خارج شده و میزان آب مورد نیاز به آن اضافه گردید. برای محاسبه میزان کل آب مورد نیاز، ابتدا با در نظر گرفتن نسبت آب به سیمان ۰/۵، مقدار آب مورد نیاز برای سیمان محاسبه شد. سپس با توجه به درصد رطوبت ۴۰ درصد، وزن آب مورد نیاز برای روان نمودن خاک نیز محاسبه شد. مجموع دو مقدار میزان آب محاسبه شده به خاک مخلوط اضافه شده و به صورت دستی مخلوط شد. پیش از ریختن خاک مخلوط، جداره‌های قالب چرب و سپس خاک مخلوط شده با آب، به داخل سه قالب ریخته شد. خاک، بیشتر از ارتفاع قالب ریخته شد و مجموعه قالب‌ها به مدت ۳۰ ثانیه روی میز ویبره قرار گرفت [۱] تا خاک‌ها به طور یکنواخت در قالب جای گرفته و حباب‌های ایجاد شده از درون خاک خارج شود. پس از آماده شدن، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در فضای اتاق در دمای ۲۰ تا ۲۲ درجه قرار داده شدند تا استحکام اولیه را به دست آورند. سپس نمونه از قالب خارج شده و دور آن پلاستیک پیچیده و شماره نمونه روی آن چسبانده شد. تا زمان عمل‌آوری، نمونه‌ها در همان اتاق نگهداری شدند. مراحل آماده‌سازی نمونه در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: مراحل آماده سازی نمونه-الف-میکسر-ب-میکسر با درپوش-ج-خاک روان پس از اضافه نمودن آب به مخلوط خاک-د-قالب نمونه روی میز ویبره-ه-صاف کردن روی نمونه ها پس از ویبره شدن-و-نمونه های سلفون پیچیده شده و نگهداری شده در اتاق

۲-۲-۳-آزمایش نمونه ها

پس از سپری شدن دوره ی عمل آوری، نمونه ها مطابق شکل ۴-الف در دستگاه تک محوری قرار داده شدند و بار وارده و تغییر شکل نمونه تا رسیدن به لحظه گسیختگی یادداشت شد. واحد اندازه گیری نیرو، کیلوگرم و دقت اندازه گیری آن 0.01Kg بود. باتوجه به این که سرعت بارگذاری براساس ASTM D2166 باید بین ۰/۵ تا ۲ درصد کرنش طولی باشد، بنابراین سرعت بارگذاری در این آزمایش، ۰.۵ میلی-متر بر دقیقه تنظیم شد. وضعیت نمونه ها پس از گسیختگی در شکل ۴-ب نشان داده شده است. این گسیختگی، در امتداد ارتفاع نمونه مشاهده می شود. علت این حالت از گسیختگی در نمونه، ترد شدن و استحکامی است که خاک بهبود یافته پیدا کرده است. در صورت نرم بودن نمونه، گسیختگی در آن اتفاق نخواهد افتاد و در اثر وارد شدن مداوم نیرو، افزایش کرنش در نمونه مشاهده خواهد شد و نمونه حالت خمراهی به خود خواهد گرفت. افزایش مقاومت در خاک بهبود یافته، به دلیل اثرگذاری سیمان و نانو سیلیس در ایجاد پیوند بین دانه های خاک رس است [۱۱ و ۲۲-۲۴].



شکل ۴: الف- نمونه در دستگاه تک محوری-ب- نمونه پس از گسیخته شدن

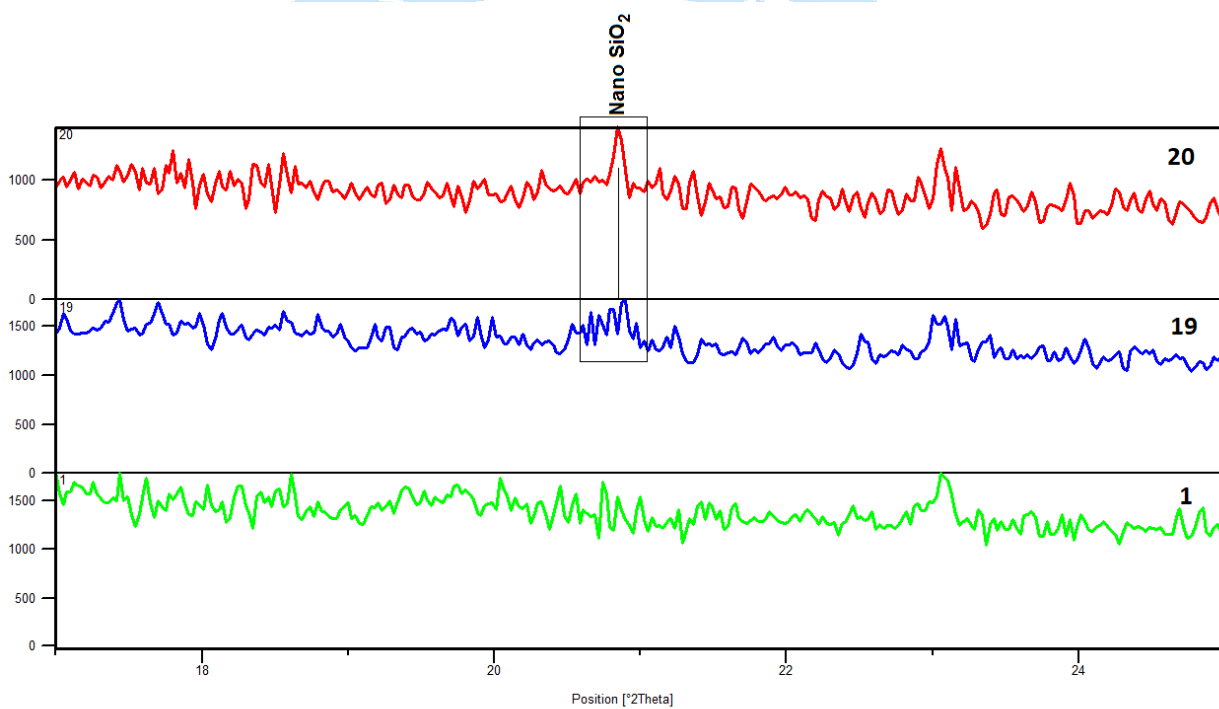
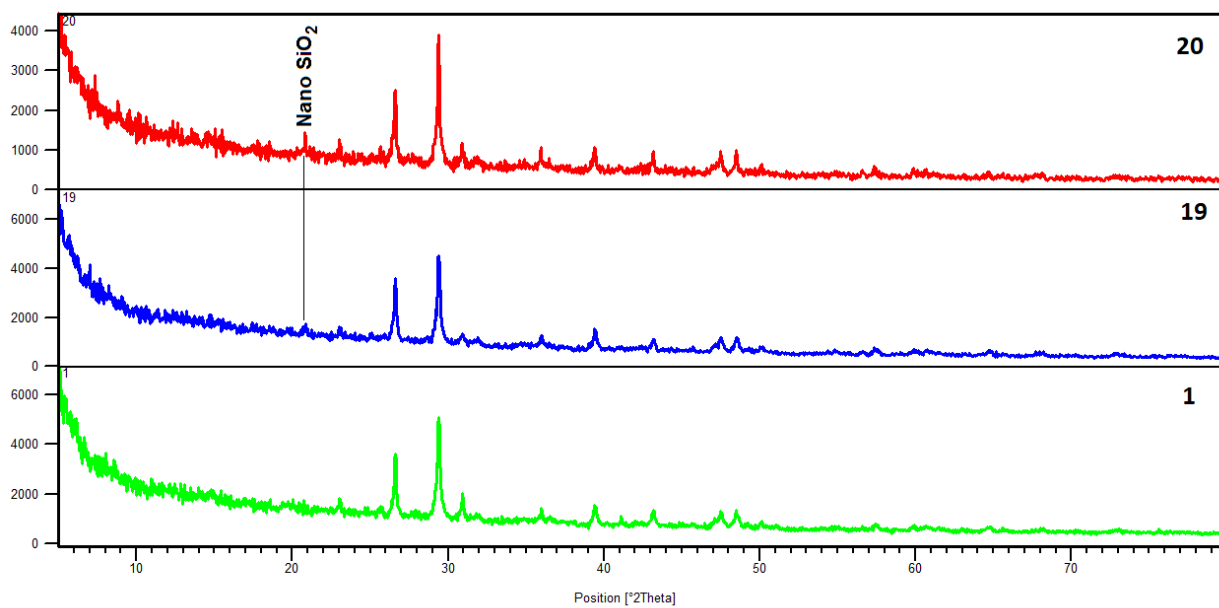
۳- نتایج آزمایش‌ها

در این قسمت، نتایج مربوط به نمونه‌ها به صورت جداگانه در دوره‌های عمل‌آوری مشابه دست‌بندی شده و در جدول ۴ آورده شده است. در این جدول، ω_1 رطوبت نمونه در حال ساخت، ω_2 متوسط رطوبت نمونه‌ها در زمان آزمایش، γ_d متوسط وزن مخصوص خشک نمونه‌ها، q_u مقاومت تک‌محوری و $\varepsilon\%$ متوسط کرنش نمونه‌ها در لحظه گسیختگی است. مقایسه این دو درصد رطوبت، بیانگر این است که نمونه‌ها، میزان ناچیزی از رطوبت (به‌طور میانگین حدود ۲ درصد برای کل نمونه‌ها) را در طول دوره‌ی عمل‌آوری از دست داده‌اند که ممکن است مربوط به همان ۲۴ ساعت اول قبل از سلفون‌پیچی نمونه‌ها باشد.

جدول ۴: نتایج نمونه‌ها با دوره‌ی عمل‌آوری هفت روزه سری A و ۱۴ روزه سری B و ۲۸ روزه سری C

$\varepsilon\%$	q_u (kPa) مقاومت تک‌محوری			γ_d (kN/m ³)	ω_2	ω_1	درصد نانو سیلیس	درصد سیمان	شماره آزمایش
	۲۸-روزه	B-۱۴ روزه	A-۷ روزه						
۱/۵۷	۲۰۱۸/۱۴	۱۰۴۹/۳۰	۶۹۶/۳۳	۱۲/۵۶	۳۶/۶۷	۳۹/۷۸	۰	۸	۱
۱/۹۴	۲۳۵۵/۶۴	۱۱۲۴/۵۳	۶۶۷/۳۹	۱۲/۷۱	۳۵/۰۶	۳۹/۳۸	۰	۱۰	۲
۱/۹۱	۲۰۰۰/۱۰	۱۲۲۳/۲۹	۷۶۱/۰۲	۱۳/۰۱	۳۴/۴۸	۳۹/۱۷	۰	۱۲	۳
۱/۸۲	۱۸۹۰/۷۷	۱۱۹۱/۷۶	۵۹۳/۴۵	۱۲/۸۷	۳۶/۲۰	۳۸/۶۴	۰/۲	۸	۴
۱/۶۵	۲۳۸۱/۲۶	۱۴۲۹/۴۰	۱۱۵۱/۲۹	۱۲/۶۹	۳۵/۵۵	۳۹/۴۲	۰/۲	۱۰	۵
۱/۶۳	۲۴۶۲/۴۰	۱۵۱۳/۷۲	۱۰۶۳/۴۵	۱۳/۰۸	۳۴/۵۱	۴۰/۰۱	۰/۲	۱۲	۶
۱/۸۳	۲۰۸۹/۱۵	۱۴۸۱/۴۸	۱۴۳۶/۶۸	۱۲/۹۴	۳۴/۴۷	۳۹/۴۱	۰/۴	۸	۷
۱/۸۹	۱۷۲۸/۷۴	۱۶۲۱/۵۳	۱۲۹۳/۱۱	۱۲/۸۳	۳۵/۴۰	۳۹/۲۹	۰/۴	۱۰	۸
۲/۰۶	۲۸۸۴/۲۰	۱۸۹۱/۱۳	۱۶۳۴/۶۳	۱۳/۰۵	۳۳/۳۸	۳۳/۶۳	۰/۴	۱۲	۹
۱/۶۶	۲۳۱۷/۹۸	۱۶۷۲/۰۷	۱۴۵۱/۷۴	۱۲/۸۷	۳۶/۸۷	۴۰/۲۴	۰/۶	۸	۱۰
۱/۴۹	۲۷۵۴/۳۵	۱۴۱۶/۴۹	۱۴۰۱/۶۴	۱۲/۸۰	۳۵/۶۳	۳۹/۵۱	۰/۶	۱۰	۱۱
۱/۵۷	۲۵۴۱/۶۱	۲۱۰۷/۰۳	۱۳۲۹/۹۷	۱۳/۰۳	۳۲/۰۷	۳۹/۳۶	۰/۶	۱۲	۱۲
۱/۸۶	۱۸۰۰/۵۳	۱۶۹۶/۴۰	۱۲۸۸/۸۸	۱۲/۰۷	۳۷/۲۰	۴۰/۳۸	۰/۸	۸	۱۳
۱/۳۷	۲۶۰۳/۴۰	۲۰۰۰/۰۱	۱۴۲۸/۲۴	۱۲/۷۹	۳۶/۷۰	۳۹/۱۸	۰/۸	۱۰	۱۴
۱/۸۲	۲۹۲۳/۹۴	۱۹۳۵/۵۳	۱۴۱۱/۵۰	۱۲/۹۷	۳۵/۴۳	۳۹/۶۳	۰/۸	۱۲	۱۵
۱/۵۹	۲۵۴۷/۲۸	۱۹۸۱/۶۴	۱۲۳۶/۳۲	۱۲/۷۵	۳۷/۵۳	۳۹/۳۹	۱	۸	۱۶
۱/۷۷	۳۰۹۱/۳۰	۱۹۹۸/۶۵	۱۶۸۳/۳۸	۱۲/۷۱	۳۴/۸۱	۳۹/۵۱	۱	۱۰	۱۷
۱/۲۵	۳۲۱۴/۲۷	۲۰۷۴/۷۷	۱۵۴۵/۹۴	۱۲/۸۷	۳۴/۹۷	۳۹/۷۶	۱	۱۲	۱۸
۱/۴۸	۲۹۶۳/۹۸	۲۰۹۴/۱۵	۱۶۷۰/۰۵	۱۳/۰۳	۳۴/۷۹	۳۷/۱۷	۱/۲	۸	۱۹
۱/۶۲	۳۲۷۱/۷۱	۲۳۴۷/۵۹	۱۸۳۹/۲۴	۱۲/۹۹	۳۴/۸۴	۳۸/۵۷	۱/۲	۱۰	۲۰
۱/۶۸	۳۱۷۲/۷۰	۲۴۹۹/۶۱	۱۷۸۳/۰۶	۱۲/۹۹	۳۵/۵۵	۳۷/۸۳	۱/۲	۱۲	۲۱
۱/۰۹	۲۲۵۴/۸۱	۱۶۵۶/۳۵	۱۸۵۱/۴۳	۱۲/۸۹	۳۶/۳۶	۳۸/۸۴	۱/۴	۸	۲۲
۱/۰۱	۲۳۸۹/۵۸	۲۲۸۱/۵۷	۱۹۵۷/۲۶	۱۲/۶۶	۳۴/۳۴	۳۹/۲۱	۱/۴	۱۰	۲۳
۲/۲۰	۲۹۴۲/۱۲	۳۲۶۵/۸۷	۱۸۷۵/۴۳	۱۳/۰۹	۳۲/۷۲	۳۸/۹۸	۱/۴	۱۲	۲۴

به‌منظور بررسی حضور نانو سیلیس اضافه شده؛ روی سه نمونه ۱ بدون حضور نانو سیلیس و نمونه ۱۹ با ۱/۲ درصد نانو سیلیس و نمونه ۲۰ با ۱/۴ درصد نانو سیلیس اضافه شده آزمایش XRD انجام گردید. در شکل ۵ نتایج آنالیز این سه نمونه به صورت همزمان آورده شده است.



الف

ب

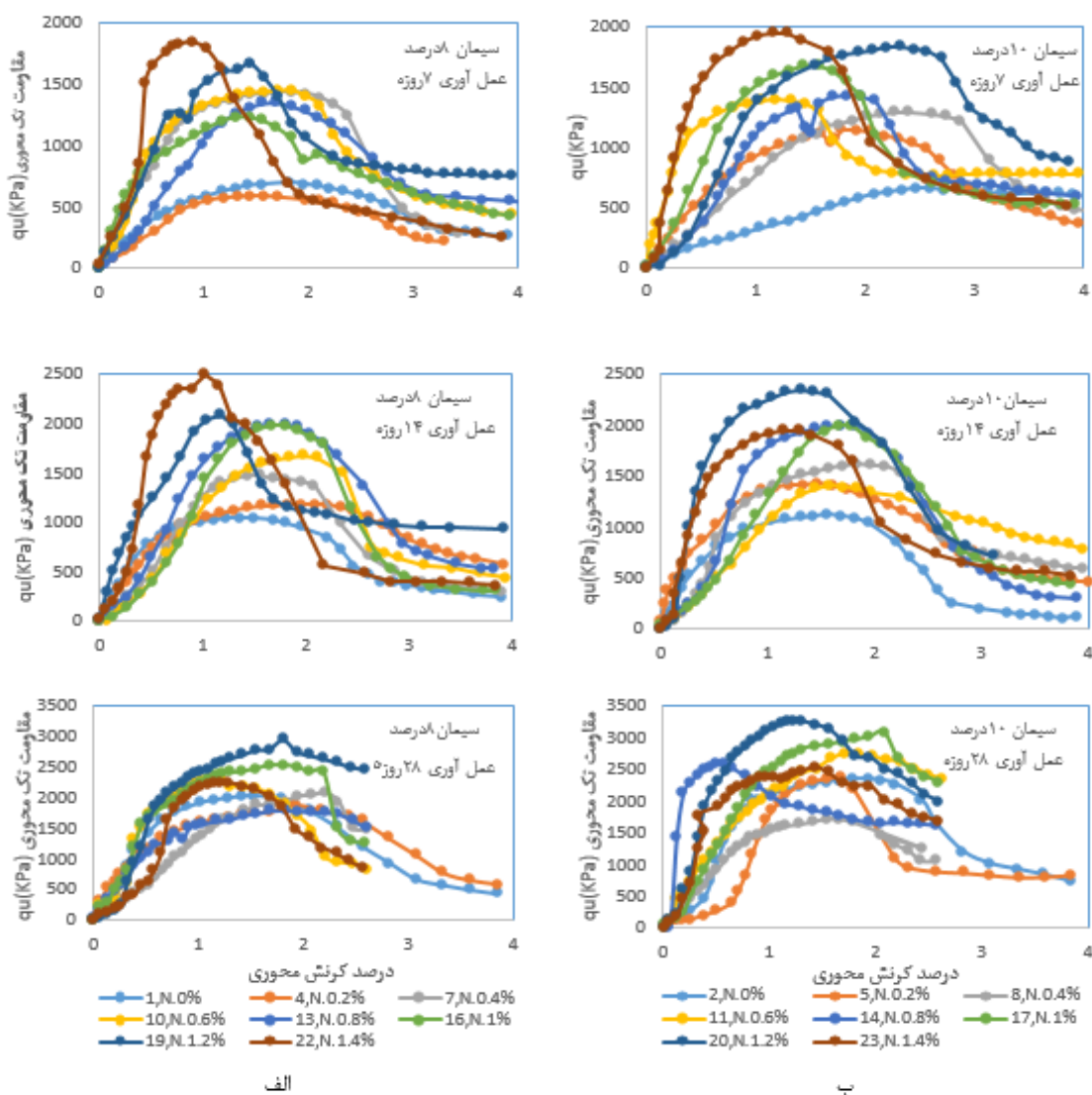
شکل ۵: الگوی XRD نمونه ها الف) در محدوده وسیع و ب) در محدوده کوچکتر

مقایسه هر سه شکل نشان می دهد که در نمونه ۱۹ و ۲۰ که نانو سیلیس اضافه شده یک پیک شاخص نانو سیلیس در محدوده زاویه $2\theta = 21^\circ$ و با کارت استاندارد JCPDS Card NO.00-046-1045 وجود دارد. این پیک در نمونه ۱ که فاقد نانو سیلیس می باشد دیده نمی شود.

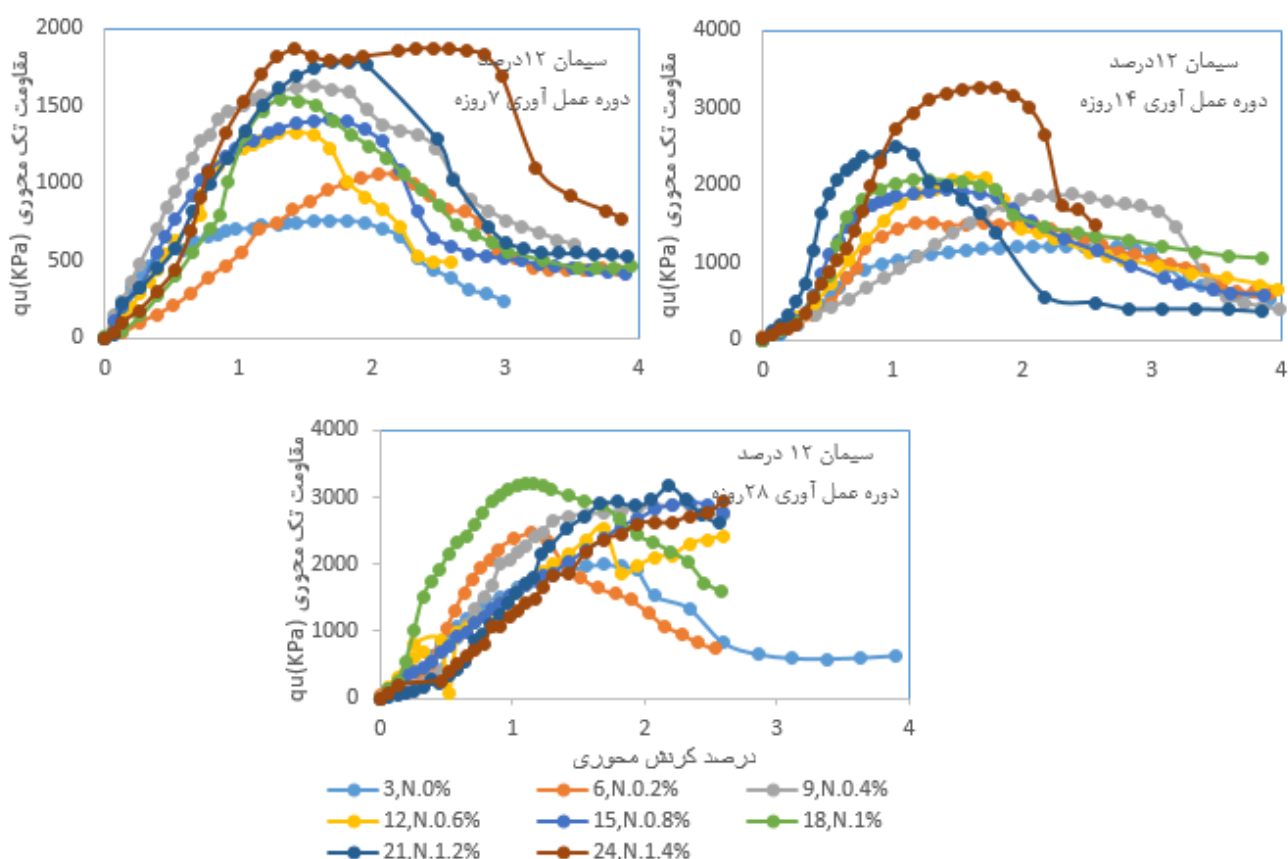
به منظور وضوح بیشتر نمودارها در محدوده ۱۹ تا ۲۱.۵ درجه نیز نمودار همزمان سه نمونه در شکل ۵-ب رسم شده است که با وضوح بیشتری پیک نانو سیلیس را نشان می دهد و دلیل وجود نانو سیلیس اضافه شده در ترکیبات یاد شده می باشد.

همچنین نتایج نشان داد که برای نمونه ۲۰ که میزان بیشتری از نانو سیلیس نسبت به نمونه ۱۹ به آن اضافه شده، شدت پیک مورد اشاره بیشتر شده است.

در شکل ۶ نتایج ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه نمونه‌ها در سیمان‌های ۸ و ۱۰ درصد و در شکل ۷، نتایج ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه نمونه‌ها در سیمان ۱۲ درصد نشان داده شده است. نتایج تنش-کرنش تا محدوده ۴ درصد کرنش برای کلیه نمونه‌ها ترسیم شده است.

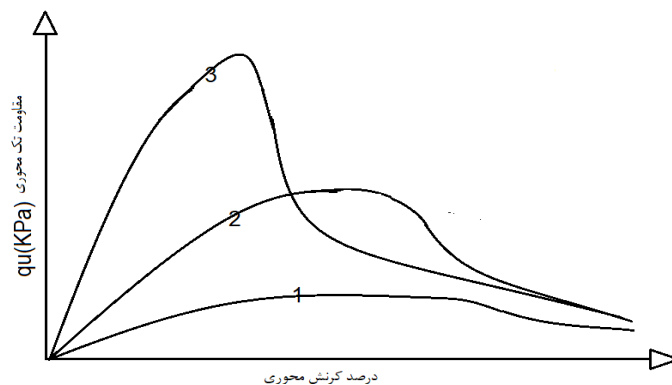


شکل ۶: نتایج تنش-کرنش نمونه‌ها با دوره‌ی عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه برای درصد سیمان-الف - ۸درصد-ب - ۱۰درصد



شکل ۷: نتایج تنش-کرنش نمونه‌ها با دوره‌ی عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه برای درصد سیمان ۱۲ درصد

نتایج نشان داد که مسیر تنش-کرنش در نمونه‌ها، عمدتاً از نمودارهای شکل ۸ تبعیت می‌کند. نمونه‌های با میزان سیمان‌ها و دوره‌های عمل‌آوری مختلف اما با درصد نانو سیلیس تا ۰/۴ درصد، از مسیر شماره ۱ و نانو سیلیس از ۰/۶ درصد تا ۱ درصد از مسیر شماره ۲ و نانو سیلیس ۱/۲ درصد و ۱/۴ درصد از مسیر شماره ۳ تبعیت می‌کنند. مسیر ۱ دارای حالت خوابیده، مسیر ۲ دارای حالت تپه‌ایی و مسیر ۳ دارای قله است و نقطه اوج آن در کرنش کمتری اتفاق می‌افتد. این موضوع بیانگر آن است که با افزایش درصد نانو سیلیس مصرفی در نمونه‌ها، مقاومت تک‌محوری افزایش یافته و حالت تردی بیشتری پیدا می‌کند و در کرنش‌های پایین‌تر به گسیختگی می‌رسد. کرنش لحظه گسیختگی نمونه‌ها در جدول ۳ آورده شده است. این کرنش‌ها از حدود ۱ درصد آغاز شده و کوچکتر از ۳ درصد هستند.



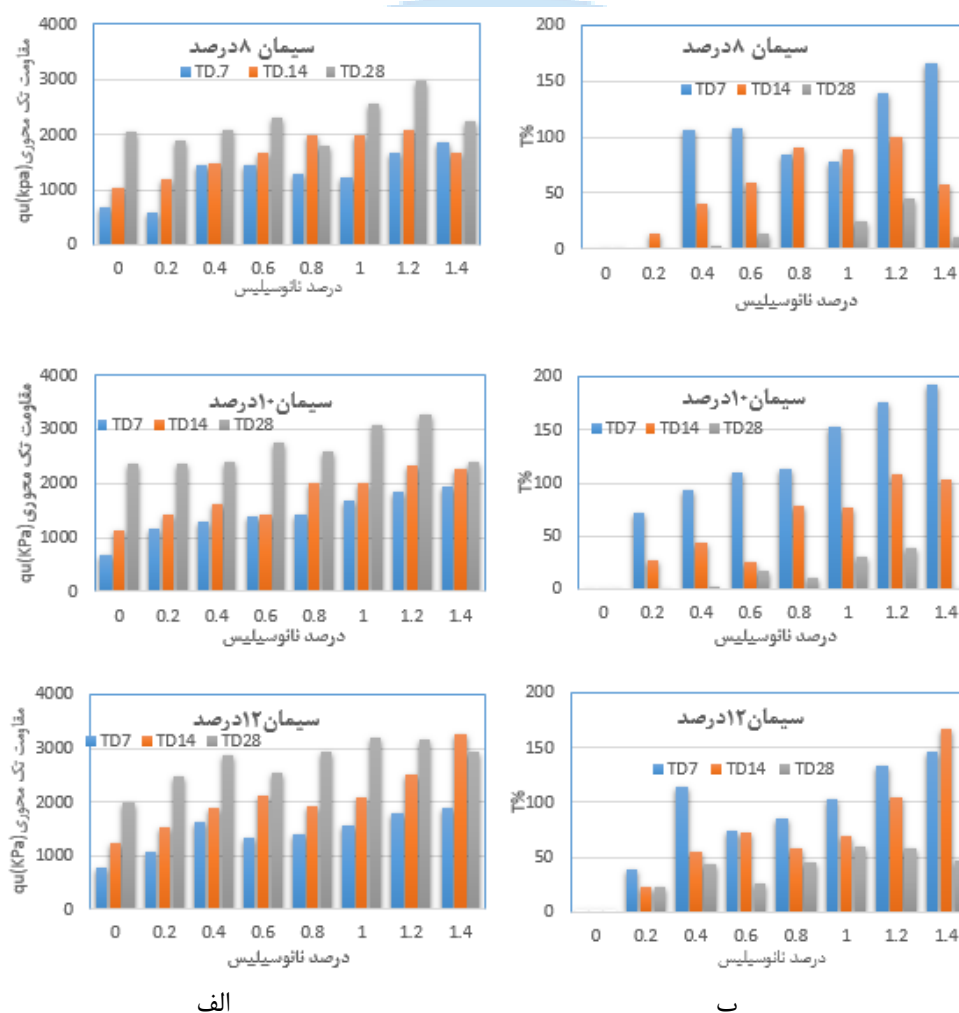
شکل ۸: مسیر شماتیک تنش-کرنش نمونه‌ها تا کرنش ۴ درصد

۴- تحلیل نتایج

نتایج مقاومت تک محوری نمونه‌ها در سیمان ۸ درصد، ۱۰ درصد و ۱۲ درصد و میزان نانو سیلیس‌های متفاوت از صفر تا ۱/۴ درصد در دوره‌های عمل‌آوری ۷ و ۱۴ و ۲۸ روزه در شکل ۹-الف نشان داده شده است. علاوه بر این، در شکل ۹-ب، مقایسه میزان افزایش مقاومت تک محوری هر نمونه نسبت به مقاومت تک محوری در حالت بدون استفاده از نانو سیلیس، به تفکیک براساس درصد سیمان مصرفی نشان داده شده است. برای بررسی میزان تغییر مقاومت هر نمونه نسبت به نمونه‌ی بدون نانو سیلیس مصرفی، رابطه زیر تعریف شد.

$$T \% = \frac{q_{up} - q_{u0}}{q_{u0}} \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه، q_u مقاومت تک محوری هر نمونه و q_{u0} مقاومت تک محوری نمونه‌ای با درصد سیمان و دوره‌ی عمل‌آوری یکسان ولی با نانو سیلیس صفر درصد است. نتایج T% نسبت به مقادیر مختلف نانوسیلیس مصرفی در شکل ۹-ب نشان داده شده است.



شکل ۹: الف - مقاومت تک محوری نمونه‌ها با درصد سیمان ۸، ۱۰، و ۱۲ درصد - ب - میزان افزایش مقاومت تک محوری نمونه‌ها در سیمان ۸ درصد و ۱۰ درصد و ۱۲ درصد نسبت به حالت بدون نانو سیلیس در سه دوره‌ی عمل‌آوری ۷، ۱۴، و ۲۸ روزه

۴-۱- بررسی نمودارهای ۹-الف و ب

نمودارهای شکل ۹-الف نشان می‌دهد که افزایش زمان عمل‌آوری در هر نمونه، باعث افزایش مقاومت تک‌محوری نمونه شده است. این موضوع بیانگر آن است که با گذشت زمان، پیوندهای بین ذرات کامل‌تر شده و باعث افزایش مقاومت می‌شود. این افزایش مقاومت می‌تواند ناشی از تولید ژل‌های سیلیکاتی حاصل از واکنش سیلیس با سیمان و آب، که فرآیندی زمان‌بر است، باشد [۲۱]. اما در سه نمونه، این روند به‌طور کامل انجام نشده و می‌تواند نشان‌دهنده‌ی خطای آزمایش باشد.

در دو نمونه در سیمان ۸ درصد، یکی با نانوسیلیس ۱/۴ درصد و دوره‌ی عمل‌آوری ۱۴ روزه و دیگری با نانوسیلیس ۰/۸ درصد و دوره‌ی عمل‌آوری ۲۸ روزه، روند افزایش اتفاق نیفتاده است. یک نمونه نیز در سیمان ۱۲ درصد و نانوسیلیس ۱/۴ درصد در حالت عمل‌آوری ۲۸ روزه بوده است. در سایر نتایج، افزایش زمان عمل‌آوری باعث افزایش مقاومت تک‌محوری شده است.

نتایج دیگری نیز از نمودارهای شکل ۹-الف به‌دست آمد از جمله، بیشترین مقاومت تک‌محوری در نمونه‌های ۷ روزه در درصد نانوسیلیس ۱/۴ درصد و در نمونه‌های ۱۴ روزه در سیمان ۸ و ۱۰ درصد در نانو سیلیس ۱/۲ درصد، و در سیمان ۱۲ درصد، در میزان نانو سیلیس ۱/۴ درصد رخ داده است. همچنین بیشترین مقاومت تک‌محوری ۲۸ روزه در تمام نمونه‌ها در نانو سیلیس ۱/۲ درصد اتفاق افتاده است. البته در سیمان ۱۲ درصد بیشترین مقاومت ۲۸ روزه در نانوسیلیس ۱ و ۱/۲ درصد بوده که در هر دو درصد نانوسیلیس، این مقاومت تقریباً برابر است.

همچنین از بررسی نمودارهای شکل ۹-ب که نشان دهنده افزایش مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها نسبت به حالت بدون نانو سیلیس آن‌ها است نیز می‌توان به نتایج زیر اشاره نمود:

میزان افزایش مقاومت در نمونه‌هایی با ۸، ۱۰ و ۱۲ درصد سیمان در دوره عمل‌آوری ۷ روزه، به ترتیب حدود ۱۶۶، ۱۹۳ و ۱۴۶ درصد و در حالت ۱۴ روزه به ترتیب حدود ۱۰۰، ۱۰۹ و ۱۷۰ و در حالت ۲۸ روزه به ترتیب ۴۵، ۳۹ و ۶۱ درصد بوده است

همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش دوره عمل‌آوری نرخ رشد مقاومت کاهش می‌یابد. علت این امر می‌تواند به نسبت سیمان به نانو سیلیس مصرفی مرتبط باشد. از آنجایی که وزن سیمان نسبت به نانو سیلیس بیش از ده برابر می‌باشد بنابراین زمان عمل‌آوری سیمان غالب بوده است. زیرا عمده هیدراتاسیون سیمان در همان ۷ روز اول اتفاق می‌افتد. علاوه بر این، نانو سیلیس به دلیل داشتن انرژی سطحی بالا، هیدراتاسیون سیمان را تسریع می‌کند [۱۱ و ۲۲-۲۴]. طبیعتاً با ادامه‌ی زمان عمل‌آوری و با تکمیل شدن فرآیند هیدراتاسیون نرخ رشد مقاومت نیز کاهش می‌یابد.

در سیمان ۱۰ و ۱۲ درصد در تمام درصدهای نانو سیلیس مصرفی، میزان افزایش مقاومت نسبت به حالت بدون نانوسیلیس (T%) همواره از صفر بزرگتر بوده است.

علت افزایش مقاومت نمونه‌ها با افزایش نانو سیلیس، آن است که واکنش پوزولانی بین نانو سیلیس با آهک آزاد شده در خلال فرآیند هیدراتاسیون، کلسیم-سیلیکات-هیدرات بیشتری تولید می‌کند که این مسأله خود باعث بهبود خصوصیات مکانیکی خاک می‌شود [۲۱]. مقاومت در اکثر نمونه‌ها بعد از افزایش نانو سیلیس بیشتر از ۱/۲ کاهش می‌یابد. کاهش مقاومت می‌تواند به علت کلوخه شدن ذرات نانو سیلیس باشد؛ چرا که با افزایش ذرات نانو که سطح مخصوص بالایی دارند، ذرات بیشتری در یک حجم ثابت قرار می‌گیرند [۲۱].

۴-۲- تاثیر افزودن نانوسیلیس بر کاهش درصد سیمان مصرفی

برای انجام بررسی در خصوص کاهش درصد سیمان مصرفی، با اضافه نمودن درصد نانو سیلیس، مقاومت‌های حداکثر در دوره‌ی عمل‌آوری ۲۸ روزه در سه نمونه، در جدول ۵ آورده شده است. مقایسه برای تغییر مقاومت نمونه با سیمان ۱۲ درصد و ۱۰ درصد بدون استفاده از نانو سیلیس با نمونه با سیمان ۸ درصد که فقط ۱/۲ درصد نانو سیلیس به آن اضافه شده، انجام شد.

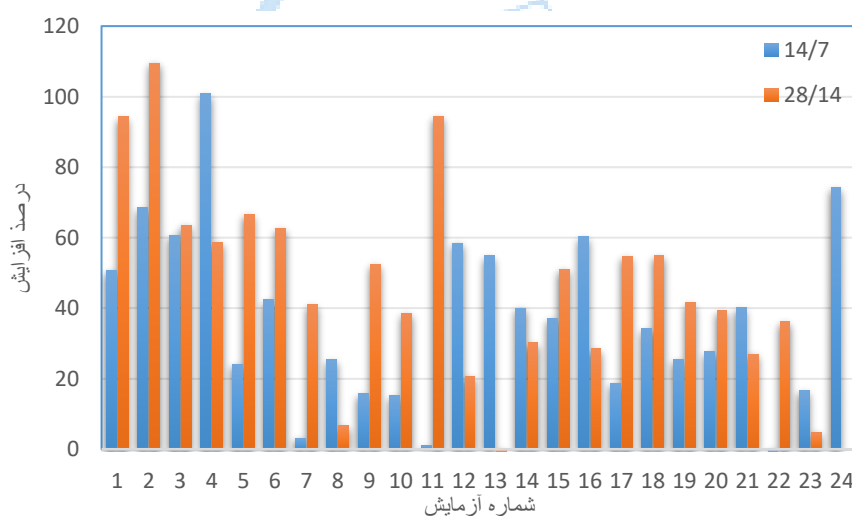
جدول ۵: مقایسه مقاومت ۲۸ روزه سه نمونه ۱۹ و ۲ و ۱

شماره آزمایش	درصد مصرفی سیمان	درصد مصرفی نانوسیلیس	مقاومت تک‌محوری نمونه q_u (kPa)	$T\% = \frac{(2963.98 - q_u)}{q_u} \times 100$
C-6	۱۲	۰/۲	۲۴۶۲/۴	۲۰/۳۶
C-2	۱۰	۰	۲۳۵۵/۶۴	۲۵/۸۳
C-19	۸	۱/۲	۲۹۶۳/۹۸	۰

نتایج نشان داد که با اضافه نمودن میزان ۱/۲ درصد نانوسیلیس به سیمان ۸ درصد در مقایسه با استفاده از سیمان ۱۲ درصد، مقاومت حدود ۲۰ درصد افزایش می‌یابد؛ در حالی که درصد سیمان مصرفی ۴ درصد کمتر شده است. در نمونه با درصد سیمان مصرفی ۱۰ درصد نیز علاوه بر کاهش ۲ درصد مصرف سیمان، مقاومت نیز حدود ۲۶ درصد افزایش یافته است. کاهش مصرف درصد سیمان مصرفی نیز بدون کاهش مقاومت یکی از نتایج مهم این تحقیق است. همین بررسی را می‌توان برای نمونه‌های دیگر نیز انجام داد.

۴-۳- بررسی میزان تاثیر دوره‌ی عمل‌آوری در افزایش مقاومت

مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها در جدول ۴ آمده است. در این قسمت مقایسه میزان تغییر نتایج مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها در دو دوره متوالی برای هر نمونه به دست آمد. نتایج مقایسه این تغییرات برای دوره‌های ۱۴ روزه نسبت به دوره‌های ۷ روزه، و حالت ۲۸ روزه نسبت به حالت ۱۴ روزه برای هر نمونه در شکل ۱۰ آمده است. بررسی نتایج نشان داد که میانگین افزایش مقاومت نمونه‌های ۱۴ روزه نسبت به ۷ روزه ۳۷ درصد و هم‌چنین افزایش مقاومت نمونه‌های ۲۸ روزه نسبت به ۱۴ روزه ۴۴ درصد است. متوسط افزایش برای هر دوره نیز حدود ۴۰ درصد است.

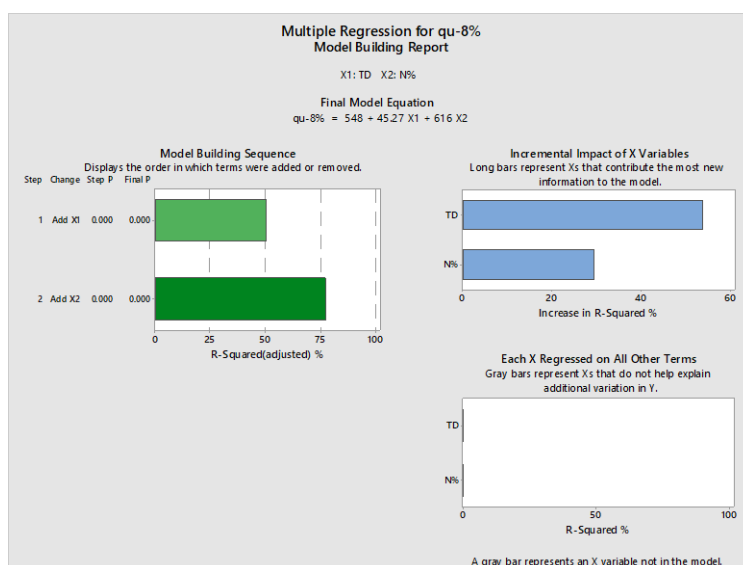


شکل ۱۰- میزان تغییرات افزایشی مقاومت نمونه‌های با دوره‌های عمل‌آوری ۱۴ روزه نسبت به ۷ روزه و ۲۸ روزه نسبت به ۱۴ روزه

۵- تعیین معادلات چند پارامتری

بر اساس نتایج به دست آمده، با توجه به درصد سیمان مصرفی، معادلاتی برای تخمین مقاومت تک محوری نمونه‌ها براساس درصد نانوسیلیس مصرفی و دوره‌ی عمل‌آوری در هر یک از درصد‌های سیمان‌های مصرفی به دست آمد. این روابط، در محدوده مطالعه انجام شده برای رس با حد روانی کم با مشخصات داده شده در جدول ۱ به دست آمده است.

در محدوده آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌های با سیمان ۸ درصد با استفاده از نرم افزار [۴۰]، معادله‌ای برای تخمین مقاومت تک محوری براساس دوره‌ی عمل‌آوری و درصد نانو سیلیس به کار رفته نسبت به وزن خشک خاک براساس شکل ۱۱ به دست آمد.



شکل ۱۱- تعیین معادله بین مقاومت تک محوری و درصد نانوسیلیس و دوره‌ی عمل‌آوری در سیمان ۸ درصد با استفاده از نرم افزار مینی تب

در این تحقیق، از نرم‌افزار مینی تب^۱ استفاده شد. معادلاتی که بدین روش برای سه درصد سیمان مورد استفاده به دست آمد، در ادامه آورده شده است.

۱- معادله تعیین مقاومت تک محوری برای سیمان ۸ درصد

$$C8\%: \quad q_u (KPa) = 548 + 45.27 \times TD + 616 \times Nano \% \quad (2)$$

۲- معادله تعیین مقاومت تک محوری برای سیمان ۱۰ درصد

$$C10\%: \quad q_u (KPa) = 257 + 74.4 \times TD + 1045 \times Nano \% - 21.29 \times TD \times Nano \% \quad (3)$$

۳- معادله تعیین مقاومت تک محوری برای سیمان ۱۲ درصد

$$C12\%: \quad q_u (KPa) = 486 + 61.96 \times TD + 840 \times Nano \% \quad (4)$$

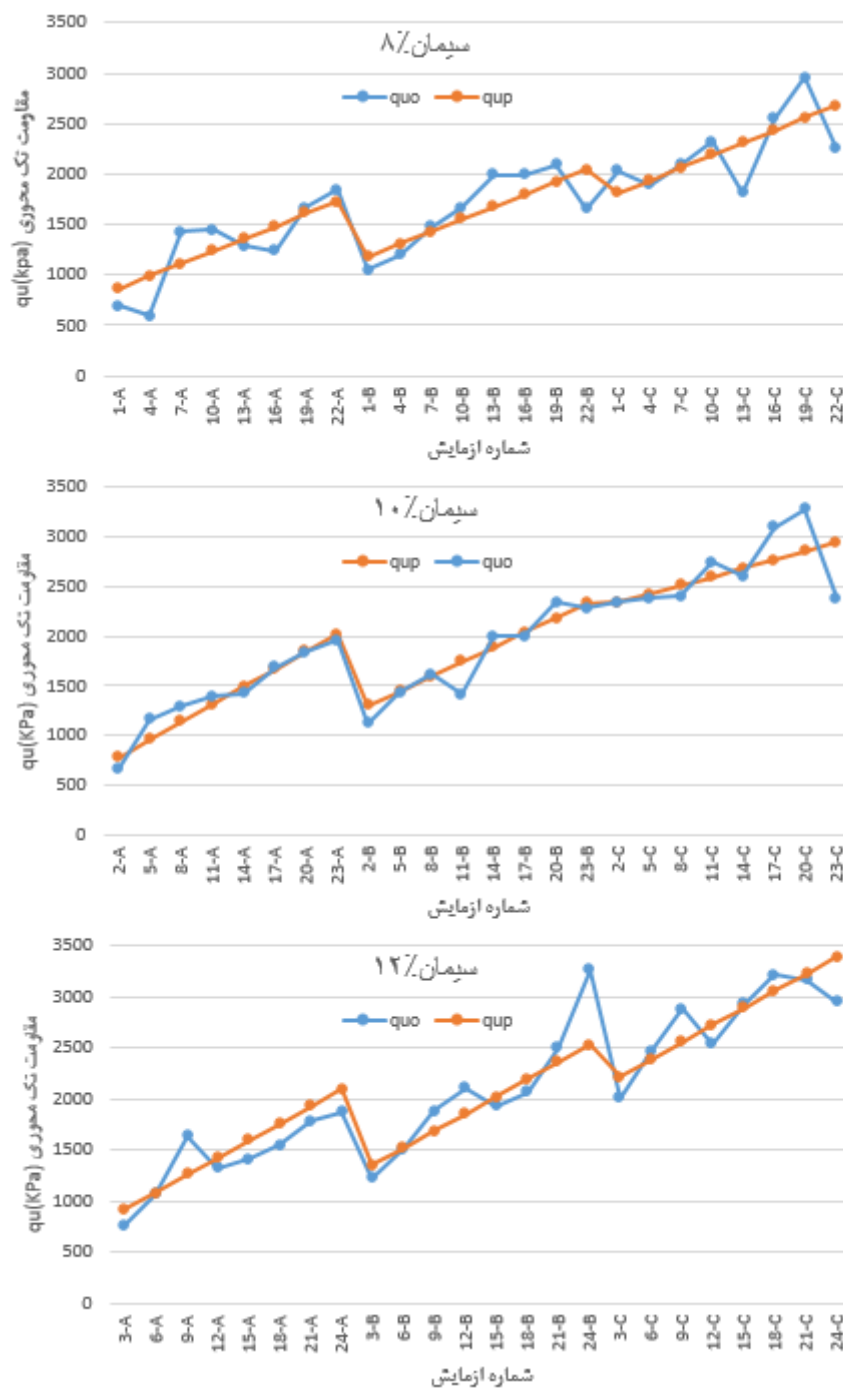
در معادلات فوق، TD دوره‌ی عمل‌آوری برحسب روز و $Nano\%$ درصد وزنی نانو سیلیس مصرفی نسبت به وزن خاک خشک است؛ در علامت $C10\%$ نیز C مخفف سیمان بوده و عدد بعد از آن بیانگر درصد سیمان مصرفی نسبت به وزن خاک خشک است. در ادامه به-منظور مقایسه مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و مقادیر تخمینی با استفاده از معادلات ۲ و ۳ و ۴، مقادیر آن‌ها برای هر نمونه در کنار هم، در شکل ۱۲ برای سه میزان متفاوت سیمان آورده شده است.

همچنین به‌منظور بررسی میزان خطای ناشی از کاربرد معادلات ۲ و ۳ و ۴ در محاسبه مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها، از رابطه ۵ استفاده شده است. این رابطه میانگین بین مقاومت تک‌محوری تخمینی و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n (q_{up} - q_{u0}) \right) \quad (5)$$

در رابطه ۵، \bar{X} مقدار میانگین داده‌ها و n تعداد آن‌ها بوده و سایر پارامترها نیز مشابه رابطه ۱ است. در سیمان ۸ درصد، این میانگین حدود مقدار ۳ درصد بدست آمده که مقدار نسبتاً مناسبی است. میانگین اختلاف برای حالت سیمان ۱۰ درصد، به میزان حدود ۱ درصد و برای حالت سیمان ۱۲ درصد به میزان حدود ۲ درصد به‌دست آمده است. این مقادیر میانگین، مقادیر مناسبی بوده و نشان دهنده تخمین خوب توسط روابط به‌دست آمده هستند. از این روابط در محدوده خاک مورد مطالعه برای تخمین مقاومت می‌توان استفاده نمود.





شکل ۱۲: مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمینی مقاومت تک محوری نمونه‌ها: مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار تخمینی با استفاده از رابطه

۲ و ۳ و ۴ برای نمونه‌ها با سیمان ۸ درصد و ۱۰ درصد و ۱۲ درصد

۶- نتیجه گیری

یکی از روش‌های اصلاح خاک‌های رسی نرم استفاده از سیمان می‌باشد. هم‌چنین از نانوسیلیس به‌تنهایی نیز برای اصلاح خاک‌های رسی استفاده می‌شود. در این مطالعه اثر هم‌زمان نانوسیلیس و سیمان بر مقاومت تک‌محوری خاک‌های رسی با حد روانی کم بررسی شده است. رطوبت خاک حدود ۴۰ درصد و درصد سیمان مصرفی با ۸، ۱۰ و ۱۲ درصد نسبت به وزن خشک خاک در نظر گرفته شده است. با هر درصد سیمان یاد شده، درصد نانوسیلیس مصرفی نسبت به وزن خشک خاک، از صفر تا ۱/۴ درصد و با تغییر ۰/۲ درصد در هر مرحله در نظر گرفته شده است. هم‌چنین سه دوره‌ی عمل‌آوری ۷ و ۱۴ و ۲۸ روزه برای نمونه‌ها در نظر گرفته شد. ۷۲ سری نمونه تهیه گردید که از آزمایش آن‌ها نتایج زیر حاصل گردید.

۱- افزایش دوره‌ی عمل‌آوری در یک درصد معین نانوسیلیس مصرفی، در بیشتر نمونه‌ها باعث افزایش مقاومت تک‌محوری نمونه شده است.

۲- مقاومت ۱۴ روزه نسبت به ۷ روزه و مقاومت ۲۸ روزه نسبت به ۱۴ روزه هر نمونه به‌ترتیب ۳۷ و ۴۴ درصد به‌طور متوسط رشد نشان داده است که یعنی حدوداً بین هر دو دوره عمل‌آوری مقاومت تک‌محوری رشد تقریباً ۴۰ درصدی داشته است.

۳- بیشترین مقاومت تک‌محوری، در دوره‌ی عمل‌آوری ۷ روزه در تمام نمونه‌ها در نانوسیلیس ۱/۴ درصد؛ در ۱۴ روزه در سیمان ۸ و ۱۰ درصد در نانو سیلیس ۱/۲ درصد و در سیمان ۱۲ درصد در نانوسیلیس ۱/۴ درصد و ۲۸ روزه در تمام نمونه‌ها در نانوسیلیس ۱/۲ درصد اتفاق افتاده است.

۴- نتایج نشان داد که افزایش درصد نانو سیلیس تا حدی مقاومت را افزایش می‌دهد و سپس کاهش ایجاد می‌نماید. به‌عنوان یک نتیجه کلی می‌توان بهترین درصد نانوسیلیس مصرفی همراه این سه درصد سیمان را ۱/۲ درصد در نظر گرفت.

۵- با افزایش مقاومت تک‌محوری در اثر افزایش نانو سیلیس، نمونه حالت تردی بیشتری پیدا می‌کند و در کرنش‌های پایین تر به گسیختگی می‌رسد. این کرنش‌ها بین ۱ تا ۳ درصد می‌باشد.

۶- بیشترین رشد مقاومت نسبت به حالت بدون استفاده از نانو سیلیس ابتدا در نمونه‌های ۷ روزه و سپس ۱۴ و بعد در ۲۸ روزه اتفاق افتاده است؛ زیرا عمده‌ی هیدراتاسیون سیمان در همان ۷ روز اول اتفاق می‌افتد. علاوه بر این، نانو سیلیس به دلیل داشتن انرژی سطحی بالا، هیدراتاسیون سیمان را تسریع می‌کند [۱۱ و ۲۲-۲۴].

۷- بررسی کاهش مصرف میزان سیمان نسبت به سیمان ۱۲ درصد به‌عنوان شاهد نشان داد که با اضافه نمودن میزان ۱/۲ درصد نانوسیلیس به نمونه‌های با سیمان ۸ درصد، ضمن این‌که افزایش حدود ۲۰ درصد مقاومت را داریم درصد سیمان مصرفی نیز ۴ درصد کمتر استفاده شده و در سیمان ۱۰ درصد نیز علاوه بر کاهش ۲ درصد مصرف سیمان، مقاومت نیز حدود ۲۳ درصد اضافه شده است. کاهش مصرف سیمان باعث می‌شود اثرات زیست محیطی مخرب تولید سیمان کاهش یابد.

۸- در درصد سیمان‌های سه گانه فوق در محدوده آزمایش‌های انجام گرفته برای خاک مورد مطالعه روابطی برای محاسبه مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها براساس دوره‌ی عمل‌آوری و درصد نانوسیلیس مصرفی به‌دست آمد. اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده با این روابط به‌دست آمده که میانگین این اختلاف‌ها ۱ تا ۳ درصد برآورد شده است.

۹- نتایج پراش سنج اشعه X (XRD) حضور نانو سیلیس در نمونه‌های حاوی این ذرات را تایید نمود.

- [1] Chen, C., Zhang, G., Zornberg, J.G., Morsy, A.M., Zhu, S., Zhao, H. (2018). Interface Behavior of Tensioned Bars Embedded in Cement-Soil Mixtures. *Construction and Building Materials*, 186, (840-853). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.211>.
- [2] Hosseinpour, I., Rezvani, R., Kavoshmelli, M. (2023). Experimental investigation of the behavior of cemented-clay specimen reinforced with geotextile layers. *Journal of Structural and Construction Engineering(JSCE)*, Available at: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.365452.2949>.
- [3] Kitazume, M., Terashi, M. (2013). *The Deep Mixing Method*, CRC Press. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group.
- [4] Kirsch, K., Bell, A. (2013). *Ground Improvement, third ed.*, CRC Press, Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group.
- [5] Zhang, G., Chen, C., Sun, J., Li, K., Xiao, F., Wang, Y., Chen, M., Huang, J, Wang, X. (2022). Mixture optimization for cement-soil mixtures with embedded GFRP tendons. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 611-628. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.076>.
- [6] Mitchell, J.K., Freitag, D.R. (1961). Review and evaluation of soil-cement pavements. *Transactions of the American Society of Civil Engineers (AM. ASCE)*, 126(1), (1123-1144). Available at: <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0008105>
- [7] Wang, Y., Wang, W., Zhao, Y., Li, N., Luo, J., Belete, A. M., Ping, J. (2022). Modification Effect of Nano-Clay on Mechanical Behavior of Composite Geomaterials: Cement, Nano-Silica and Coastal Soft Soil. *Materials*, 15, 8735. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma15248735>
- [8] Basha, E. A., Hashim, R., Mahmud, H. B., Muntohar, A. S. (2005). Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. *Construction and Building Materials*. 19(6), 448–453. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.08.001>
- [9] Ali, F. H., Adnan, A., Choy, C. K. (1992). Geotechnical properties of a chemically stabilized soil from Malaysia with rice husk ash as an additive. *Geotechnical and Geological Engineering*. 10, 117–134. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF00881147>.
- [10] Fang, J., Wang, Y., Wang, K., Dai, W., Yu, Y., Li, C. (2022). Experimental Study on the Mechanical Properties of Diatomite-Modified Coastal Cement Soil. *Materials*, 15, 7857. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma15217857>.
- [11] Bahmani, S., Huat, B., Asadi, A., Farzadnia, N. (2014). Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement. *Construction and Building Materials*, 64, 350–359. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.086>.
- [12] Siswosubroto, B., Hossain, M., Alias, A., Huat, B., Sew, G., Ali, F. (2004). Stabilization of tropical residual soils. *Trop Residual Soils Eng*, 145–167. Available at: <https://doi.org/10.1201/9780203024621.ch9>.
- [13] Burland, J. (1990). On the compressibility and shear strength of natural clays. *Geotechnique*, 40(3), 329–378. Available at: <https://doi.org/10.1680/geot.1990.40.3.329>.
- [14] Chen, C., Zhang, G., Zornberg, J., Morsy, A., Huang, J. (2020). Interface bond behavior of tensioned glass fiberreinforced polymer (GFRP) tendons embedded in cemented soils. *Construction and Building Materials*, 263, 120132. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120132>.
- [15] Xu, D-s., Huang, M., Zhou, Y. (2020). One-dimensional compression behavior of calcareous sand and marine clay mixtures. *International Journal of Geomechanics*, 20(9), 04020137. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001763](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001763).
- [16] Han, J. (2015). *Principles and practice of ground improvement*. John Wiley & Sons.
- [17] Li, J., Qin, Q., Sun, J., Ma, Y., Li, Q. (2022). Mechanical and conductive performance of electrically conductive cementitious composite using graphite, steel slag, and GGBS. *Structural Concrete*, 23(1),533-547. Available at: <https://doi.org/10.1002/suco.202000617>

- [18] Jafari, S. H., Lajevardi, S. H., Sharifipour, M. et al. (2021). Evaluation of small strain stiffness characteristics of soft clay treated with lime and Nano-silica and correlation with UCS (q_u). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **80**, 3163–3175. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02115-7>
- [19] Thomas, G., Rangaswamy, K. (2020). Strengthening of cement blended soft clay with nano-silica particles. *Geomechanics and Engineering*, 20(6), 505-516. Available at: <https://doi.org/10.12989/gae.2020.20.6.505>
- [20] Sadrjamali, M., Athar, S. M., Negahdar, A. (2015). Modifying soil shear strength parameters using additives in laboratory condition. *Current World Environment*, 10(1), 120-130. Available at: <http://dx.doi.org/10.12944/CWE.10.Special-Issue1.17>
- [21] Shush Pasha, I. A., Abbasi, M., Najafnia, H. (2018). Study of the combined effect of cement and Nano silica on shear strength of Babolsar sand. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50, 179-188.
- [22] Sobolev, K., Flores, I., Hermosillo, R., Torres-Martínez, L. M. (2006). Nanomaterials and nanotechnology for high-performance cement composites. *Proceedings of ACI session on nanotechnology of concrete: recent developments and future perspectives*, 7, 93-120.
- [23] Farzadnia, N., Ali, A., Demirboga, R. (2012). Development of nanotechnology in high performance concrete. *Advanced Materials Research*, 364, 115–118. Available at: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.364.115>
- [24] Sobolev, K., Flores, I., Torres-Martinez, L.M., Valdez, P.L., Zarazua, E., Cuellar, E.L. (2009). Engineering of SiO₂ Nanoparticles for Optimal Performance in Nano Cement-Based Materials. In: *Bittnar, Z., Bartos, P.J.M., Němeček, J., Šmilauer, V., Zeman, J. (eds) Nanotechnology in Construction 3*. Berlin, Heidelberg: Springer, 139-148. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-642-00980-8_18
- [25] Kuo, W., Lin, K., Chang, W., Luo, H. (2006). Effects of nano-materials on properties of waterworks sludge ash cement paste. *J Indust Eng Chem – Seou*, 12(5), 702-709.
- [26] Hou, P., Wang, K., Qian, J., Kawashima, S., Kong, D., Shah, S.P. (2012). Effects of colloidal nanoSiO₂ on fly ash hydration. *Cement and Concrete Composites*, 34(10), 1095-1103. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.013>
- [27] Lin, K., Chang, W., Lin, D., Luo, H., Tsai, M. (2008). Effects of nano-SiO₂ and different ash particle sizes on sludge ash-cement mortar. *Journal of Environmental and Management*, 88(4), 708–714. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.03.036>
- [28] Ltifi, M., Guefrech, A., Mounanga, P., Khelidj, A. (2011). Experimental study of the effect of addition of nano-silica on the behaviour of cement mortars. *Procedia Engineering*, 10, 900–905. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.148>
- [29] Gaitero, J., Campillo, I., Guerrero, A. (2008). Reduction of the calcium leaching rate of cement paste by addition of silica nanoparticles. *Cement and Concrete Research*, 38(8), 1112–1118. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.03.021>
- [30] Stefanidou, M., Papayianni, I. (2012). Influence of nano-SiO₂ on the Portland cement pastes. *Composites Part B: Engineering*, 43(6), 2706–2710. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.12.015>
- [31] Eissa, A., Bassuoni, M, A. Ghazy, A., Alfaro, M. (2022). Improving the Properties of Soft Clay Using Cement, Slag, and Nano-silica: Experimental and Statistical Modeling. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(4), 04022031. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004172](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004172)
- [32] Govindarajan, K., [Ramani, S.E.](#) (2022). Geotechnical behaviour of nano-silica stabilized organic soil. *Geomechanics and Engineering*, 28(3), 239-253.
- [33] Veena Vijayan, L., Prakash Arul Jose, J. (2022). STABILITY STUDIES OF COHESIVE SOIL WITH NANO MAGNESIUM AND ZINC OXIDE. *Materials and technology*, 56(2), 187–191. Available at: <https://doi.org/10.17222/mit.2021.329>

- [34] Taha, M.R. (2009). Geotechnical properties of soil-ball milled soil mixtures, in: *Proc. 3rd Symp Nanotechnology in Construction*, Springer-Verlag, 377-382.
- [35] Changizi, F., Haddad, A. (2015). Strength properties of soft clay treated with mixture of nano-SiO₂ and recycled polyester fiber. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(4), 367-378. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.03.013>.
- [36] Mohamadzadeh Sani, A., Arabani, M., Haghi, A. K., Chenari, R. J. (2010). Effect of nanoclay additive on the geotechnical properties of silty sands. in: *Proc. of 4th International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics*, Tehran, 2-3 November 2010, (in Persian).
- [37] Persoff, P., Apps, J., Moridis, G., Whang, J. M. (1999). Effect of dilution and contaminants on strength and hydraulic conductivity of sand grouted with colloidal silica gel. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, 125(6), 461-469.
- [38] Meeravali, K., Ruben, N., Rangaswamy, K. (2020). Stabilization of soft-clay using nanomaterial: Terrasil. *Materials Today: Proceedings*, 27, 1030-1037. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.384>.
- [39] Seifollahi, F., Mohammadi, F. (2023). Experimental Study of Mechanical Properties and Relationships between Strengths of Pure and Nano-silica-Steel fiber-contained Roller Compacted Concrete at Different Curing Days. *Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE)*, Available at:
- [40] Minitab, Inc. Product

