Journal of Structural and Construction Engineering, 9(2), 2022, pp. 44-64

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Analysis of mechanical behavior and durability of fine-grained soil-cement with nanosilica, hemp and polypropylene additives Case study of Nazarabad industrial townTitle

ali nabizadeh[1*], Mehdi hosseini[2], sahar daneshvar[3], minoofar afshari[4]

1- Departemnt of civil engineering, Shahid Rajae teacher training university, Lavizan, Tehran, Iran
2- master of civil engineering, geotechnicscentral Tehran azad university, Tehran, iran
3- master of civil engineering, geotechnicscentral Tehran azad university, Tehran, iran
4- master of civil engineering, geotechnicscentral Tehran azad university,Tehran, iran

ABSTRACT

Soil-cement is a mixture of cement, water and soil that by compaction and hydration of cement, its components are joined together to form a compound with very low permeability, durable and abrasion resistant. Considering that the main applications of soil-cement as a base layer in road paving are sealing elements in earthen and concrete dams and foundation improvement, and since in recent years the addition of cement on mechanical parameters and The soil-cement physics has been investigated. In this study, the effect of adding different weight percentages of hemp fibers, polypropylene fibers and nanosilica to the soil-cement before and after successive melting and freezing cycles in shear and behavioral strength parameters. In this research, the sample soil of Nazarabad industrial town of Karaj was used. The measurement parameters in this research are different enclosing stresses, different processing times, different weight percentages of hemp fibers, propylene fibers and nanosilica and after successive melting and freezing cycles. This study is in Unreinforced non-drained triaxial test. The results indicate the improvement of behavioral and resistance parameters in all materials and increased durability after successive cycles of melting and freezing in samples containing nanosilica.

ARTICLE INFO

Receive Date: 28 April 2021
Revise Date: 20 July 2021
Accept Date: 30 September 2021

Keywords: *Soil-cement*
shear strength
nanosilica
hemp
propylene

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2021.283541.2436

*Corresponding author: Ali Nabizadeh
Email address: ali.nabizadeh@sru.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

تحلیل و بررسی رفتار مکانیکی و دوام خاک ریزدانه-سیمان با افزودنی‌های نانوسیلیس،کنف و پلی پروپیلن
مطالعه موردی شهرک صنعتی نظر آباد

علی نبی زاده[1*] ،مهدی حسینی[2]، سحر دانشور[2]، مینوفر افشاری[2]

۱- گروه مهندسی عمران، عضو هیئت علمی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، لویزان، تهران، ایران
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران- ژئوتکنیک ،دانشگاه آزاد تهران مرکزی، تهران، ایران

چکیده

خاک سیمانی مخلوطی است از سیمان،آب و خاک که توسط عمل تراکم و هیدراسیون سیمان،اجزاء آن بهم چسبیده و یک ترکیب با نفوذ پذیری بسیار پایین ، با دوام و مقاوم در برابر سایش را پدید می آورند. نظر به این که کاربرد های اصلی خاک سیمان به عنوان لایه اساس در روسازی راه ، المان آب بند در سد های خاکی و بتنی و بهسازی پی به شمار می آید و از آنجایی که در سال های اخیر افزودن انواع سیمان بر پارامتر های مکانیکی و فیزیکی خاک سیمان مورد پژوهش قرار گرفته است، در این تحقیق به تأثیر افزودن درصد های وزنی مختلف الیاف کنف ،پروپیلن و نانوسیلیس قبل و پس از چرخه های متوالی ذوب و یخبندان به خاک سیمان در پارامتر های مقاومت برشی و رفتاری در دستگاه سه محوری پرداخته شد. در این تحقیق از خاک نمونه منطقه شهرک صنعتی نظر آباد کرج استفاده شد. پارامتر های اندازه گیری در این تحقیق، تنش های محصور کننده متفاوت، زمانهای عمل آوری متفاوت ، درصد های وزنی متفاوت الیاف کنف ، پروپیلن و نانوسیلیس و پس از سیکلهای متوالی ذوب و یخبندان می باشد.این پژوهش در دستگاه سه محوری تحکیم نیافته ی زهکشی نشده انجام شد.نتایج حاکی از بهبود پارامتر های رفتاری و مقاومتی در تمام مصالح و افزایش دوام پس از چرخه های متوالی ذوب و یخبندان در نمونه های حاوی نانوسیلیس می باشد.

کلمات کلیدی: خاک سیمان، مقاومت برشی، نانوسیلیس،کنف، پروپیلن

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.283541.2436
۱۴۰۰/۰۲/۰۸	۱۴۰۰/۴/۲۹	۱۴۰۰/۷/۰۸	۱۴۰۰/۷/۰۸	۱۴۰۱/۰۲/۳۱	doi: 10.22065/JSCE.2021.283541.2436

*نویسنده مسئول: علی نبی زاده
پست الکترونیکی: nabizadeh@sru.ac.ir

۱- مقدمه

با توجه به آیین نامه ACI116R [۱] ، خاک سیمان "مخلوطی است از خاک و مقدار سیمان مشخص و آب که با چگالی بالایی متراکم شده باشد." در نشریه شماره ۵۴ کمیته بین المللی سد های بزرگ، خاک سیمان اینگونه تعریف می شود:"مخلوطی از سیمان پرتلند،آب و خاک که به وسیله ماشین آلات راهسازی ،اجزای آن به هم چسبیده و ترکیبی متراکم ،با دوام و با نفوذپذیری نسبتاً کم و مقاوم در برابر سایش ایجاد می شود."در ACI230.IR [۲] خاک سیمان به طور جامع تری تعریف می شود:"مصالحی که به وسیله مخلوط شدن ، متراکم کردن و عمل آوری مخلوط خاک و سنگدانه،سیمان پرتلند ،افزودنی های شیمیایی و مواد مکمل سیمانی محتمل شامل پوزولان ها و آب به شکل مصالح سخت شده با خصوصیات مهندسی ویژه ساخته می شود."یکی از کاربردهای این مصالح در راهسازی ها می باشد که بدلیل اختلاف دمای شدید شب و روز در برخی مناطق کشور (نظیر مناطق کویری) دوام این مصالح در طی زمان کاهش محسوسی یافته که منجر به خسارات مالی به پروژه های راهسازی کشور شده و از عمر مفید راه ها می کاهند و سبب افزایش هزینه های تعمیر و نگهداری می گردند[۳و۴].از آنجاییکه اکثر مطالعات گذشته برروی بتن متعارف انجام گرفته است که با توجه به مقدار ریزدانه بیشتر مصالح خاک سیمان نسبت به بتن و همچنین عیار سیمان کمتر آن رفتار آن کاملا متفاوت با بتن بنظر می رسد.

مصالح خاک-سیمان عموماً در مقابل گزینه ی بتن غلطکی در پروژه های عمرانی استفاده می شوند.بتن متراکم شده غلطکی معمولاً در سد های بتنی و بتن ریزی های حجیم داخل سد ها به کار می رود.با توجه به نقش سازه ای بتن متراکم شده غلطکی،مقاومت فشاری آن نسبتاً بالا می باشد.خاک سیمان با توجه به نوع استفاده آن در سد های خاکی ،مقاومت فشاری کمتر و تغییرشکل پذیری بیشتری نسبت به بتن متراکم شده غلطکی دارد.نحوه اختلاط و دانه بندی اولیه خاک سیمان و بتن متراکم شده غلطکی متفاوت می باشد.اختلاط مصالح خاک سیمان در حالت درجا در محوطه کارگاهی و در نزدیکی محل اجرا انجام می گیرد،لیکن اختلاط مصالح بتن غلتکی در سیستم بتن ساز و در کارگاه مرکزی صورت می پذیرد.با توجه به مقاومت نسبتاً پایین خاک سیمان از هرنوع مصالح خاکی فاقد مواد آلی یا قلیایی می توان استفاده نمود.درحالیکه سنگدانه های مصرفی در بتن غلتکی باید مطابق ASTM C 33 و با افزایش کمی مقدار مواد ریزدانه رد شده از الک شماره ۲۰۰ همراه می باشد.مقدار ریزدانه رد شده از الک شماره ۲۰۰ برای خاک سیمان بسیار بیشتر از بتن غلتکی و در محدوده ۵ الی ۳۵ درصد مطابق ACI 230.IR و ۴ تا ۳۸ درصد مطابق با (نشریه شماره ۵۴) [۵] می باشد.حداکثر اندازه اسمی سنگدانه ها در بتن غلتکی نیز معمولاً بیشتر است و حتی تا ۱۵۰ میلیمتر می رسد؛در صورتیکه این اندازه برای خاک سیمان معمولاً به ۵۰ میلیمتر محدود می شود.بدلیل بیشتر بودن مقاومت فشاری در بتن غلتکی، در سد های وزنی و بتن ریزی های حجیم بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد.با توجه به استفاده از مصالح خاک سیمان در پوشش بالادست سد های خاکی،نقش مقاومت فشاری در این نوع مصالح کمتر می باشد.مقدار سیمان مصرفی در خاک سیمان نیز کمتر از بتن غلتکی می باشد. به همین سبب صرفه اقتصادی بیشتری دارد و اغلب در تولید و اجرا نسبت به بتن غلتکی حساسیت ها و کنترل کیفیت کمتری دارد.

الیاف پلی پروپیلن دارای کمترین جرم مخصوص می باشند، کرنش شکست بالایی داشته و مقاومت کششی معقولی را دارا می باشد و در محیط قلیایی و کلریدی پایداری خوبی دارند. این الیاف هیدروفوبیک بوده و جاذب آب نمی باشند و بنابراین تاثیر چندانی روی تقاضای آب مخلوط ندارند و مانع هیدراسیون ملات نمی شوند.الیاف پروپیلن به سبب اصلاح پارامتر های مقاومتی خاک به صورت مسلح سازی آن بکار میروند.در حقیقت رفتار این الیاف در خاک مانند رفتار آرماتور در بتن می باشد. [6]

میکروسیلیس در بین افزودنی های پوزولانی بهترین کارایی را در بتن داشته است.دلیل این اتفاق از نظر پژوهشگران وجود مقدار زیادی سیلیس بی شکل (بیش از ۹۰ ٪) دانسته اند. ماده پوزولانی جدیدی که اخیراً مورد توجه در بتن قرار گرفته است،نانوسیلیس می باشد که این ماده به صورت جامد و یا امولوسیون در آب است . همانطور که از اسم نانو مشخص است، ذرات نانوسیلیس خیلی کوچکتر از ذرات میکروسیلیس هستند. نانو سیلیس ها در محدوده وسیعی از سطح ویژه از ۵۰ تا ۱۰۰۰ متر مربع بر گرم تولید می شوند. مسلما نمی توان انتظار داشت که نانوسیلیس با سطح مخصوص ۵۰ متر مربع بر گرم همان اثری را بر خواص بتن داشته باشد که نانو سیلیس با سطح مخصوص ۱۰۰۰ متر مربع بر گرم بر بتن می گذارد.سرعت واکنش و واکنش پذیری پوزولانها بستگی به مقدار سطح مخصوص آنها دارد؛ یعنی هرچقدر سطح مخصوص واکنش دهنده ها بیشتر باشد، سرعت واکنش آنها نیز بیشتر می شود. بنابراین بدیهی است که نانوسیلیس ها بدلیل دارا بودن سطح مخصوص بیشتر نسبت به میکروسیلیس از اهمیت بیشتری برخوردار باشند. [7]

تحقیقی توسط هوتون انجام گرفته که در آن اثر ۰ تا ۲۰ درصد میکروسیلیس بر خواص مکانیکی بتن و همچنین دوام آن در برابر واکنش قلیایی سنگدانه ها، حمله سولفات ها و سیکل های ذوب و یخبندان مورد بررسی قرار گرفت.وی به این نتایج رسید که: ۱-بتن معمولی پس از چرخه ذوب و یخبندان گسیخته شد؛در حالیکه بتن حاوی میکروسیلیس به دلیل خلل و فرج و نفوذپذیری کم تا ۹۰۰ سیکل ذوب و یخبندان را تحمل نمود.۲-جایگزینی ۱۰ درصد سیمان با میکروسیلیس برای افزایش مقاومت در برابر سولفات ها و همچنین سیکل های ذوب و یخبندان در حد مطلوب مناسب است.با توجه به اینکه افزودن میکروسیلیس به سیمان برای افزایش خواص مقاومتی آن سالهاست که مورد توجه قرار گرفته،با توسعه این فناوری و میسر شدن دسترسی به اکسید سیلیس در ابعاد نانو،بحث افزودن نانوسیلیس به بتن به میان آمد.ذرات نانوسیلیس به دلیل سطح مخصوص بسیار بالایی که دارند،حفره ها و فضا های بسیار کوچک بین ذرات بتن را پر می کنند و و از سوی دیگر و با کریستال های هیدرات کلسیم که در ناحیه بین دانه ای قرار دارند،واکنش داده و ژل کلسیم –هیدراته-سیلیکات تولید می کنند که کمک زیادی به دوام بتن می نماید . [8]

تحقیقات در رابطه با تاثیر پوزولانها در سال ۲۰۰۷ توسط پنگ و همکارانش[9] نیز انجام شد. آنها به بررسی تاثیر استفاده از مواد حبابزا و پوزولانها به صورت جداگانه و توامان بر دوام بتن در برابر سیکلهای یخ و ذوب پرداختند. هدف از این پژوهش، تولید بتنی با مقاومت فشاری ۵۰ تا ۶۰ مگاپاسکال بود که در عین حال دوام مناسبی در برابر سیکلهای یخ و ذوب داشته باشد. در این تحقیق از خاکستر بادی و میکروسیلیس به عنوان پوزولان استفاده شد. آنها به این نتیجه رسیدند که استفاده از مواد حبابزا، باعث افزایش حجم کل حفرات و همچنین افزایش اندازه ی متوسط حفرات بتن میشود.در نتیجه دوام بتن در برابر سیکلهای متناوب یخ و ذوب افزایش می یابد.استفاده از مواد پوزولانی باعث افزایش مقاومت دراز مدت بتن میشود. ولی در نسبت ۰/۳۲ آب به سیمان استفاده از مواد حبابزا گزینه بهتری نسبت به پوزولانهاست. این مواد ساختار حفرات بتن را بسیار کم بهبود میبخشند. بنابراین برای افزایش دوام بتن با نسبت آب به استفاده از مواد حبابزا گزینه ی بهتری نسبت به پوزولانهاست.مابقی این نوشته به صورت زیر تنظیم می‌شود. انواع مقاله و ساختار آنها در بخش دو توضیح داده می‌شود. در بخش سوم، نکات مهم مربوط به تنظیم و نوشتار مقاله بیان می‌شود و در انتها نتیجه‌گیری انجام خواهد شد.

در سال ۲۰۱۲ آجرلو و همکاران [10]به بررسی پارامتر های مقاومت برشی خاک سیمان با استفاده از دستگاه سه محوری پرداختند.خاک مورد استفاده در پژوهش آنها در دسته ی SP قرار داشت و تنش های محصور کننده ۰ ،۱۰۰ ،۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال بود.نمونه ها هم ترکیبات ۰ تا ۸ درصد سیمان بودند.در نمونه هایی با فشار محصور کننده کمتر نتایج آنها رفتار اتساعی و در نمونه هایی با فشار محصورکننده بیشتر نمونه ها رفتاری انقباضی داشتند.آنها نتیجه گرفتند که رفتار خاک سیمان به شدت شبیه رفتار ماسه ی متراکم می باشد و با استفاده از تحلیل حالت حدی مقاومت خاک سیمان را می توان به دو عامل شکستگی قفل و بست بین دانه ها و خمیر چسبنده سیمانی و مقاومت پس از اتساع که منجر به کاهش یافتن مقاومت و نرم شوندگی آن می شود نسبت دادند.

ساید و همکاران درسال ۲۰۱۲ [11] به بررسی تأثیر افزودن نانوسیلیس و نانوسیلیس به همراه خاکستر بادی به بتن پرداختند.سپس نمونه ها را تحت آزمایش های مقاومت برشی و فشاری قرار دادند.آنها به این نتیجه رسیدند که برای نمونه های همراه با خاکستر بادی و بدون آن ،نانوسیلیس ها سبب افزایش مقاومت فشاری و کششی در مخلوط میگردند؛ بطوریکه در روز های نخست به ترتیب شاهد افزایش ۱۸٪ و ۱۴٪ مقاومت میانگین نمونه ها هستیم.همچنین نمونه کنترلی و نمونه حاوی خاکستر بادی تنها در ۹۰ روز مقاومت یکسانی از خود نشان می دهند که افزودن نانوسیلیس می تواند نقش موثری در افزایش مقاومت نمونه های حاوی خاکستر بادی داشته باشد که این افزایش نرخ مقاومت به دو عامل واکنش های پوزولانی و تأثیر آن ها به عنوان پرکننده نانوسیلیس ها بستگی دارد.

در سال ۲۰۱۳ صدیقی و همکاران[12] با اضافه کردن سیمان به سه خاک مسئله دار شمال کشور (رس رشت،رس گرگان و ماسه انزلی) آنها را تحت آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی شده قرار دادند و نتیجه گرفتند که با آنکه اضافه کردن سیمان باعث می شود که مقاومت برشی افزایش پیدا کند،اما رفتار نمونه ها از نرم به شکننده تغییر می کند.آنها همچنین نتیجه گرفتند که نمونه های بدون سیمان ،نمونه های حاوی ۵ درصد سیمان و نمونه های حاوی ۸ درصد سیمان به ترتیب بصورت نرم ،صفحه ای و دونیم شدن گسیخته می شوند.

در سال ۲۰۱۳ پژوهشگر دیگری به نام چاکرابورتی و همکاران [13] از الیاف جوت اصلاح شده برای کنترل خواص فیزیکی و مکانیکی ملات سیمان استفاده نمودند.آنها به این نتایج رسیدند که مقاومت فشاری، مدول پارگی و مقاومت خمشی به ترتیب ۲۵٪ ، ۲۸٪ و

۳۸٪ در مقایسه با ملات کنترلی بدون هیچ گونه تقویت کننده جوت افزایش داشته است و همچنین شاخص چقرمگی و مقاومت در برابر ترک خوردگی افزایش یافته است و در آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه ای مشاهده گردید که افزودن الیاف کنف موجب تغییر مود شکست ترکیب شده و شکست را از حالت ناگهانی به تدریجی تغییر می دهند، در نمونه حاوی الیاف روند گسترش ترک بصورت تدریجی بوده و الیاف بواسطه تحمل نیروی کششی در پایین تارخنثی از شکست ناگهانی مصالح جلوگیری کرده است.

در سال ۲۰۱۸ نیز تحقیقی بر روی خاک سیمان با افزودن الیاف ذرت توسط کوآنگ ترن و همکاران [14] انجام گرفت که نشان داد افزودن الیاف طبیعی ذرت موجب کاهش چگالی خشک خاک و افزایش رطوبت بهینه شده است و همچنین موجب افزایش مقاومت فشاری و کششی خاک سیمان با افزودن این الیاف بوده است که این افزایش به ترتیب ۱۷۷ و ۸۸ درصد هستند، که نشان دهنده تاثیر مثبت الیاف بر روی خاک سیمان میباشد.

درسال ۲۰۱۸ میرزابابایی و همکارانش [15] به بررسی اثر تقویت الیاف بر مقاومت برشی و نسبت خلأ رس نرم پرداختند و در این پژوهش رفتار مقاومت برشی یک رس نرم تقویت شده با الیاف پلی پروپیلن با طول و مقدار های مختلف با استفاده از تست برش مستقیم معکوس بررسی شد و به این نتایج رسیدند اگرچه افزودن الیاف به خاک رس نرم باعث تقویت نیروی برشی میشود، اما در تنش های نرمال و موثر بالا بدون درنظر گیری میزان فیبر اثر الیاف ناچیز است. یعنی مقاومت برشی رس تقویت شده با الیاف با رس غیر مسلح در تنش موثر بالا نتایج نزدیک به هم دارند و همچنین افزایش مقدار الیاف پلی پروپیلن و افزایش طول الیاف موجب افزایش مقاومت برشی نمونه میشود.

در سال ۲۰۱۹ اشتاروت عمار و همکاران [16] تحقیقاتی برای تقویت خاک رس درجا انجام دادند. آنها از الیاف طبیعی کنف استفاده نمودند و به بررسی مکانیزم تعامل خاک رس و این الیاف پرداختند. هدف از این تحقیقات بررسی مقاومت برشی بین خاک رس و کنف از طریق آزمایش برش مستقیم و آزمایش کشش کنف بوده و محتوای آب تراکم و شرایط زهکشی مورد توجه قرار گرفت. نتایج نشان داد پارامتر مقاومت برشی تحت تاثیر مکانیسم آزمون شرایط زهکشی بوده و الیاف کنف نسبتا کارامد است.

در سال ۲۰۱۹ تحقیقی انجام گرفت که هدف اصلی این کار مطالعه تاثیر الیاف پلاستیکی تایر فرسوده بر مقاومت فشاری محدود نشده، رفتار تورمی، تست تخلیه بار و شکل‌پذیری خاک رس سفت شده توسط سیمان است. در این زمینه مجموعه‌ای از آزمایش‌ها را انجام دادند که نتایج نشان می‌دهد که هنگامی که الیاف پلاستیکی لاستیک و سیمان افزایش می‌یابد، چگالی خشک نمونه، تورم و فشار به تدریج کاهش می‌یابند. این کاهش برای خاک رس با پتانسیل تورم بالاتر مهم است. به دلیل تراکم بالای لاستیک، فشرده‌سازی به طور قابل توجهی با الیاف پلاستیکی لاستیک و محتوای سیمان افزایش می‌یابند .این تحقیق نشان داد که گنجاندن الیاف تایر در خاک با استحکام بالا، UCS طبق استاندارد ASTM D2166 [17] را افزایش می‌دهد. نتایج حاکی از تاثیر مفید الیاف بوده است و نمونه‌های سیمان تقویت‌شده با الیاف ، نسبت به نمونه‌های تقویت نشده نتایج بهتر و کاربردی تر داشته است . [18]

مقالات دیگری نیز وجود دارد که علاوه بر پلی پروپیلن، الیاف های دیگری به خاک اضافه شده اند که نتایج آنها نشان میدهد الیاف علاوه بر تاثیر روی پارامتر مقاومت برروی موارد دیگری نیز تاثیر می گذارند. مثلا در این پژوهش درسال ۲۰۲۰ ویژگی‌های پتانسیل تورم با افزودن ۲۰ ٪ از میکروسیلیس و ۱,۵ ٪ از پلی پروپیلن به طور قابل‌توجهی کاهش یافت. مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) خاک با افزودن ۲۰ ٪ از میکروسیلیس و ۱,۵ ٪ از فیبر پلی پروپیلن به طور قابل‌توجهی بهبود یافت. [19]

در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۲۰ زینچنگ ژانگ و همکارانش به بررسی مکانیزم نانوسیلیس بر روی بهبود عملکرد خاک همراه با سنگریزه تثبیت شده با سیمان پرداختند. در این تحقیق با استفاده از فعالیت زیاد و خواص فوق العاده ریز نانو SiO2 -NS ایجاد شد که قادر به بهبود خواص سیمان بود - تثبیت کننده خاک بر اساس و چشم انداز کاربرد گسترده ای داشت. نتایج نشان داد که ۱- قدرت نانوسیلیس از عملکرد ترکیبی با دوره عمل آوری و مقدار افزودنی نانوسیلیس پیروی می کند. هنگامی که مقدار افزودنی ثابت بود ، رابطه بین قدرت و دوره عمل آوری از یک عملکرد نمایی پیروی می کرد. استحکام و مقدار افزودنی یک تابع قدرت بود که دوره عمل آوری ثابت شد. مقاومت فشاری مصالح دارای نانوسیلیس در مقایسه با مصالح بدون نانوسیلیس در دوره عمل آوری ۲۸ روزه بیش از ۱۵٪ و در مقایسه با سیمان درجه ۳۲,۵ ۵۰٪ افزایش یافته است. ۲- فعالیت کاتالیزوری پوزولانی نانوسیلیس میزان ژل هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) را به طور قابل توجهی افزایش داد. این ماده همچنین توانست توزیع ساختار شبکه فضای کلوئیدی را یکنواخت تر کرده و بعد فراکتال ذرات

را ۰/۰۵ بهبود بخشد. نتایج فوق داده های نظری را برای کاوش در مکانیزم رشد مقاومت تثبیت کننده خاک و برای ترویج کاربرد استفاده از پسماند جامد فراهم می کند. [20]

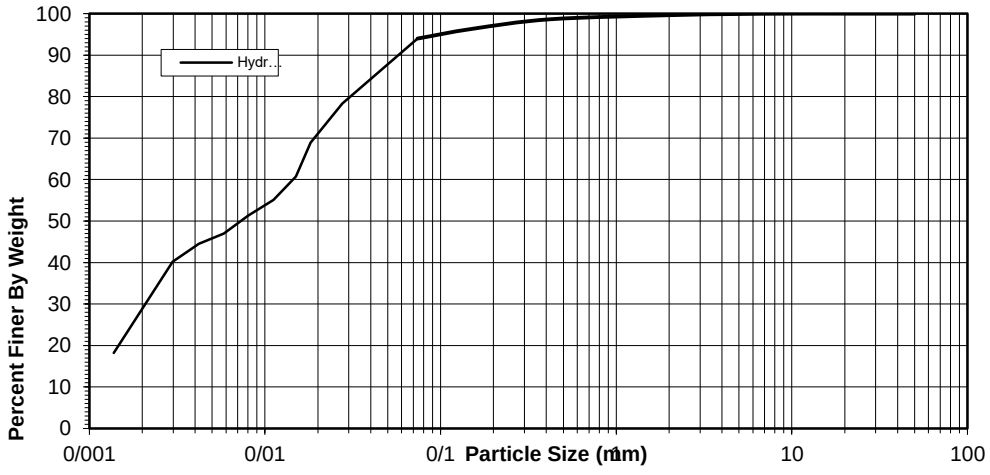
به توانایی مصالح در برابر تخریب ناشی از تغییرات حجم یا نیروهای شدید فرسایشی بر اساس درصد افت وزنی دوام گویند. مقاومت در برابر دوره های ذوب و یخبندان ، مقاومت در برابر تغییرات حجم، با مقدار افت مواد در آزمایشهای تر و خشک شدن و یخ و ذوب شدن نشان داده میشود. تجربه نشان می دهد که آزمایش دوام یخ زدن و ذوب شدن ، آزمایشی با شرایط شدیدتر نسبت به آزمایش تر و خشک شدن می باشد. بنابراین خاک سیمان که دارای سنگدانه های با دانه بندی نسبتا ریزتری نسبت به بتن متعارف می باشد ، از این رو مقاومت در برابر ذوب و یخ بندان کمتری دارد.[۹] گروهی از نانومواد که مورد توجه جدی پژوهشگران قرارگرفته اند نانومواد با قابلیت واکنش پوزولانی هستند. هدف از این پژوهش مقایسه خاک ، خاک-سیمان بدون افزودنی، خاک-سیمان با افزودنی نانوسیلیس به عنوان یک ماده پوزولانی و خاک-سیمان با الیاف تسلیح کننده طبیعی و مصنوعی همچون کنف و پلی پروپیلن می باشد. در این تحقیق به تأثیر افزودن درصد های وزنی مختلف الیاف کنف ،پروپیلن و نانوسیلیس قبل و پس از چرخه های متوالی ذوب و یخبندان به خاک سیمان در پارامتر های مقاومت برشی و رفتاری در دستگاه سه محوری پرداخته شد. به عنوان مطالعه موردی از خاک نمونه منطقه شهرک صنعتی نظر آباد کرج استفاده شد. پارامتر های اندازه گیری در این تحقیق، تنش های محصور کننده متفاوت، زمانهای عمل آوری متفاوت ، درصد های وزنی متفاوت الیاف کنف ، پروپیلن و نانوسیلیس قبل و پس از اعمال سیکلهای متوالی ذوب و یخبندان می باشد. در این پژوهش از آزمایش های شناسایی خاک ، تراکم استاندارد، اعمال سیکل های ذوب و یخبندان و آزمایش سه محوری تحکیم نیافته زهکشی نشده استفاده شد.

۲. مصالح ، دستگاه و روش انجام

۲-۱- مصالح

۲-۱-۱- خاک

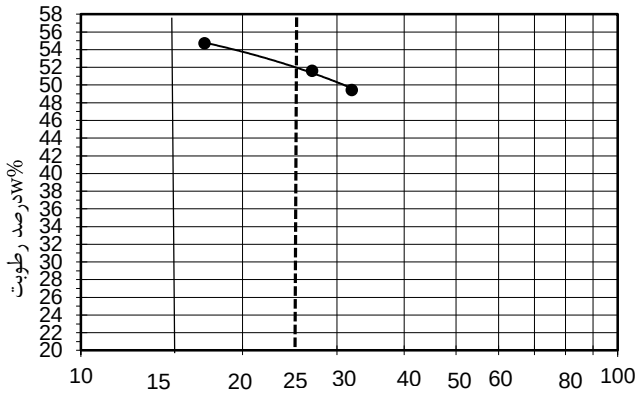
در این پژوهش از یک نوع دانه بندی خاک مطابق استاندارد ASTMD2487 [21] مورد قبول برای تهیه خاک سیمان مطابق شکل ۱ استفاده شده است که دانه بندی طبیعی مورد نظر حاوی ۹۴٪ خاک عبوری از الک شماره ۲۰۰ می باشد .همچنین مشخصات خاک مورد نظر در جدول ۱ و نتایج آزمایش حد روانی در شکل ۲ نشان داده شده است. این خاک از شهرک صنعتی نظر آباد واقع در شهرستان کرج تهیه گردیده است.



شکل۱: نتایج دانه بندی خاک

جدول۱: مشخصات دانه بندی

USCS	DESCRIPTION	CLAY or SILT	SAND	GRAVEL	L . L	P.L	P . I	Cc	Cu	D10	D30	D60	D100
C.H	High Plasticity Clay	94	5.9	0.1	52	14	38	0.97	1.14	0.06	0.064	0.069	9.5



شکل۲: نتایج آزمایش حد روانی

۲-۱-۲- آب

آب در خاک سیمان به دلیل رسیدن به حداکثر تراکم و به جهت هیدراسیون سیمان پرتلند یکی از ارکان اصلی است.آب مورد استفاده نباید دارای اسید یا املاح آلی باشد تا بتواند باعث فعل و انفعالات شیمیایی با سیمان در حال سخت شدن شود.

۲-۱-۳- سیمان

سیمان مورد استفاده در این پژوهش از کارخانه سیمان تهران و با وزن مخصوص تقریبی ۳/۱ گرم بر سانتی متر مکعب تهیه گردید که ویژگی های شیمیایی این سیمان در جدول ۲ آورده شده است.

جدول۲: ویژگی شیمیایی سیمان

ترکیب شیمیایی	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O
درصد وزنی ٪	۶۳,۳	۲۰,۸	۵,۲	۳,۶۵	۱,۸	۲,۵	۰,۵	۰,۵

۲-۱-۴- نانوسیلیس

دلیل استفاده از این ماده پوزولانی این است که سطح مخصوص بسیار بیشتری نسبت به میکروسیلیس دارد و از آنجاییکه سرعت واکنش و واکنش پذیری پوزولانها بستگی به مقدار سطح مخصوص آنها دارد؛ یعنی هرچقدر سطح مخصوص واکنش دهنده ها بیشتر باشد، سرعت واکنش آنها نیز بیشتر می شود و حفره ها و فضا های بسیار کوچک بین ذرات را بهتر پر می کنند و و از سوی دیگر و با کریستال های هیدرات کلسیم که در ناحیه بین دانه ای قرار دارند،واکنش داده و ژل کلسیم –هیدراته-سیلیکات بیشتری تولید می کنند.[7]بنابراین با توجه به توضیحات بالا از نانوسیلیس استفاده شد. نانوسیلیس های بکار رفته در این تحقیق به صورت پودری هستند که در جدول۳

ویژگی های فیزیکی نانوسیلیس بکار برده شده آورده شده است.در این پژوهش از درصد های وزنی ۰/۲۵ ، ۰/۵ و ۰/۷۵ گرم نانوسیلیس نسبت به وزن سیمان استفاده شد.

جدول۳ : مشخصات نانوسیلیس

نام نانوماده	Purity (خلوص)	ABS (اندازه)	SSA (سطح ویژه)	Color (رنگ)	True density (چگالی واقعی)
نانو اکسید سیلیکون (نانوسیلیکا)	۹۹+٪	۱۰ nm	۶۰۰ m^2/g	white	۲.۲ g/cm3

۲-۱-۵- الیاف پلی پروپیلن

الیاف پلی پروپیلن با ابعاد ۱۲ و ۱۸ میلی‌متر برای اختلاط با بتن و با بعد ۶ میلی‌متر برای اختلاط با خاک و گچ استفاده می‌شود. الیاف پلی پروپیلن الیافی دارای خواص مکانیکی بسیار از جمله جذب نیروی وارد شده به خاک ، اجرای ساده و در دسترس بودن آن است .علاوه بر آن این الیاف غیر فلزی جذب آب کم و تقریبا صفر دارد به همین دلیل افزودن ان در خاک موجب افزایش درصد اب به سیمان طرح اختلاط نشده است(زیرا افزایش آب تا حدودی باعث کاهش مقاومت نمونه می شود.)این الیاف آسیبی به طبیعت نمیرساند و خرید و استفاده ان مقرون به صرفه است.[6]با توجه به توضیحات بالا از این الیاف در این پژوهش استفاده شد.الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده در این پژوهش با نسبت های وزنی ۰/۵ ، ۱ و ۱/۵ درصد نسبت به سیمان و با بعد ۶ میلیمتر استفاده شده اند. خواص مکانیکی الیاف پلی پروپیلن در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴: مشخصات الیاف پلی پروپیلن

نام الیاف	طول الیاف	مقاومت کششی	وزن مخصوص
پلی پروپیلن	۶ میلیمتر	۴۰۰ مگاپاسکال	۰,۹۱ گرم بر سانتیمتر مکعب

۲-۱-۶- الیاف کنف

در این تحقیق از الیاف کنف با نسبت های وزنی ۰/۵ ، ۱ و ۱/۵ درصد نسبت به سیمان استفاده شده است. دلیل استفاده از الیاف کنف این است که الیاف کنف الیافی غیر فلزی میباشد که علاوه بر خواص مکانیکی بالا از وزن کم و اجرای ساده ای برخوردار است و همچنین مقرون به صرفه و در دسترس بودن و سازگاری با طبیعت از دیگر فواید این الیاف میباشد.[13] مشخصات الیاف استفاده شده در جدول شماره ۵ قابل مشاهده است.

جدول۵ مشخصات الیاف کنف

نام الیاف	طول الیاف	قطر	مقاومت کششی	وزن مخصوص	مدول الاستیسیته
کنف یا جوت	۲ سانتیمتر	۲۰میکرومتر	۴۸۰ مگاپاسکال	۱,۴۵ گرم برسانتیمتر مکعب	۲۰۵۰۰مگا پاسکال

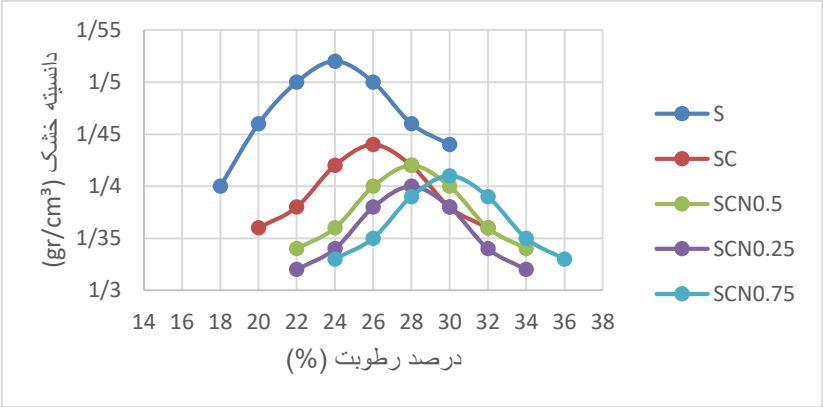
۲-۲- روش انجام آزمایش و تهیه نمونه ها

به سبب ساخت نمونه های آزمایشگاهی در دستگاه سه محوری ، با هدف اینکه بتوانیم درصد رطوبت بهینه و چگالی خشک حداکثری را بدست آوریم،آزمایش های تراکم متعددی بر روی خاک(نمونه کنترلی)، خاک-سیمان، خاک-سیمان حاوی نانوسیلیس،خاک-

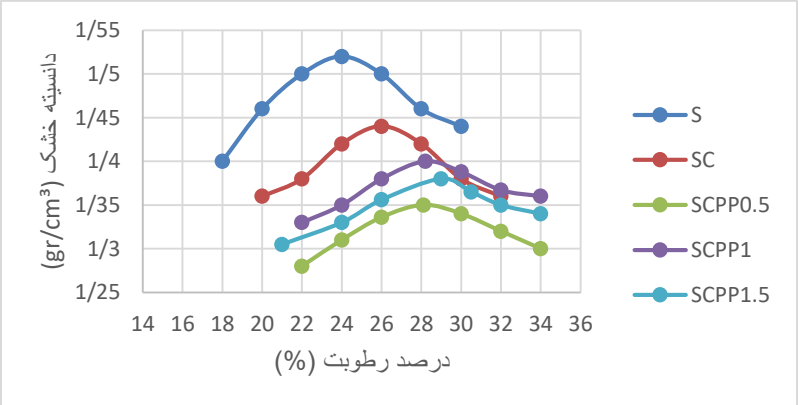
سیمان همراه با کنف و خاک سیمان همراه با پلی پروپیلن طبق آیین نامه ASTM D558 [22] انجام شدند.برای انجام این آزمایش ابتدا خاک و سیمان را به صورت مخلوط همگنی درست می کنند و مقداری آب را به آن اضافه می کنیم.سپس این مخلوط در ۳ لایه و هر لایه با ۲۵ ضربه یک وزنه ۲/۵ کیلوگرمی متراکم می شوند.دقیقاً همین روش برای یافتن پارامتر های تراکم ماتریس های خاک-سیمان-نانوسیلیس ، خاک-سیمان-پلی پروپیلن و خاک-سیمان-کنف استفاده شد.البته این مراحل را برای نمونه ی کنترلی هم تکرار می کنیم.بدین ترتیب به جهت طرح اختلاط نمونه ها برای دانه بندی فوق الذکر ۸_+ درصد سیمان را (بر اساس وزن خشک سنگ دانه ها) را جهت تخمین اولیه طرح اختلاط انتخاب کردیم.افزایش و کاهش درصد سیمان تاجایی ادامه پیدا کرد تا بواسطه ی آن وزن مخصوص خشک حداکثری بدست آمد.درصد سیمان استفاده شده در این مرحله ، درصد سیمان بهینه نام گرفت (۱۲ درصد) . در ادامه آزمایش تراکم را با ترکیب های خاک-سیمان-نانوسیلیس، خاک سیمان-پلی پروپیلن و خاک-سیمان-کنف با درصد های مختلف انجام شد که نتایج آن در شکل های 3 تا 5 قابل مشاهده است.

همانطور که در شکلهای ۳ تا ۵ مشاهده می شود تمامی نمونه های سیمانته نسبت به نمونه ی کنترلی کاهش محسوسی در مقدار دانسیته خشک و افزایش در مقدار رطوبت بهینه از خود نشان داده اند.این اتفاق در نمونه هایی که دارای افزودنی نانوسیلیس هستند هم نسبت به خاک سیمان بدون افزودنی دیده می شود؛یعنی کاهش دانسیته خشک حداکثر و افزایش رطوبت بهینه.این مطلب را می توان اینگونه توجیه کرد که اولاً ژل سیلیکات-کلسیم-هیدراته در حضور نانوسیلیس با سرعت بیشتری تشکیل می گردد که باعث می شود انرژی تراکم استهلاک یابد و در ثانی نانوسیلیس ها بدلیل داشتن ابعاد نانو در ناحیه انتقالی حضور می یابند که با پرکردن فضا های خالی،سبب افزایش اصطکاک بین دانه ای در این نواحی می شوند.

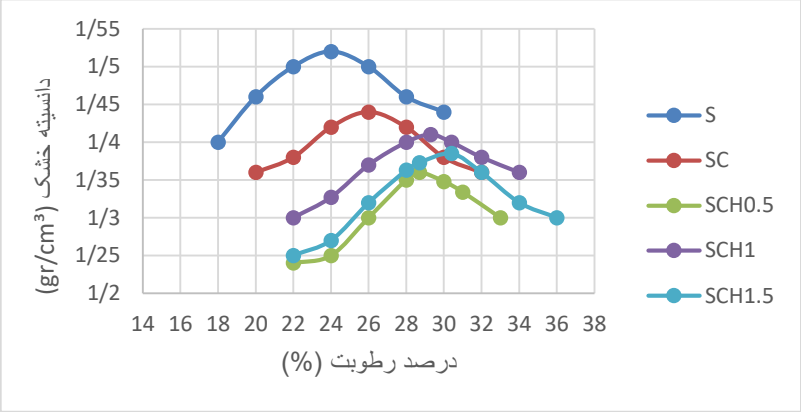
از طرف دیگر نانوسیلیس ها به دلیل اینکه سطح ویژه بیشتری دارند،میل به واکنش پذیری بیشتری با آب دارند که سبب افزایش میزان رطوبت بهینه می گردد.یعنی هرچه درصد وزنی نانوسیلیس بیشتر باشد،مقدار رطوبت بهینه بیشتر می شود.



شکل۳: تاثیرافزودن سیمان و نانوسیلیس با درصدهای مختلف بر دانسیته خشک و رطوبت بهینه



شکل۴: تاثیرافزودن سیمان و الیاف پلی پروپیلن با درصدهای مختلف بر دانسیته خشک و رطوبت بهینه



شکل۵ تاثیرافزودن سیمان و الیاف کنف با درصدهای مختلف بر دانسیته خشک و رطوبت بهینه

به منظور بررسی جزئیات رفتار مقاومتی برشی نمونه ها آزمایش سه محوری تحکیم نیافته ی زهکشی نشده (UU) بر روی تمامی نمونه ها صورت گرفت.به منظور ساختن نمونه ها از قالبی به ارتفاع ۷/۱ و قطر ۳/۵ سانتی متر استفاده شد.بعد از ترکیب مصالح،آنها را در داخل قالب ریخته و در سه لایه به طور یکسان کوبیده شد.

۳- بررسی آزمایشهای مقاومت برشی بر روی نمونه ها

در این پژوهش آزمایش های سه محوری تحکیم نیافته زهکشی نشده بر مبنای آیین نامه ASTMD2850 [23] بر روی ماتریس های خاک(نمونه کنترلی)،خاک سیمان ، خاک-سیمان-نانوسیلیس،خاک-سیمان-پلی پروپیلن و خاک-سیمان-کنف انجام شد تا ویژگی های تنش-کرنش و مقاومتی و دوام قبل و پس از ۵۰ سیکل متوالی ذوب و یخبندان مورد بررسی قرار گیرد.پارامتر های گوناگون آزمایش های انجام شده بشرح ذیل می باشد:

الف: سه تنش محصور کننده (kg/cm^2(۰/۳، ۰/۷ و ۱/۵) مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

ب: سه درصد مختلف وزنی (نانوسیلیس-پلی پروپیلن-کنف) مورد آزمایش قرار گرفت.

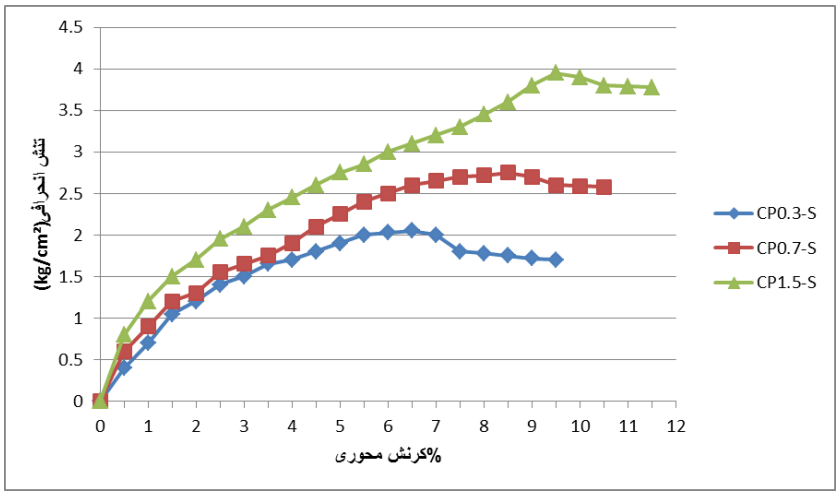
ج: زمان عمل آوری(۳ ، ۷ و ۲۸ روزه) بوده است.

د: پس از ۵۰ سیکل متوالی ذوب و یخبندان مقاومت نمونه ها مورد بررسی قرار گرفت.

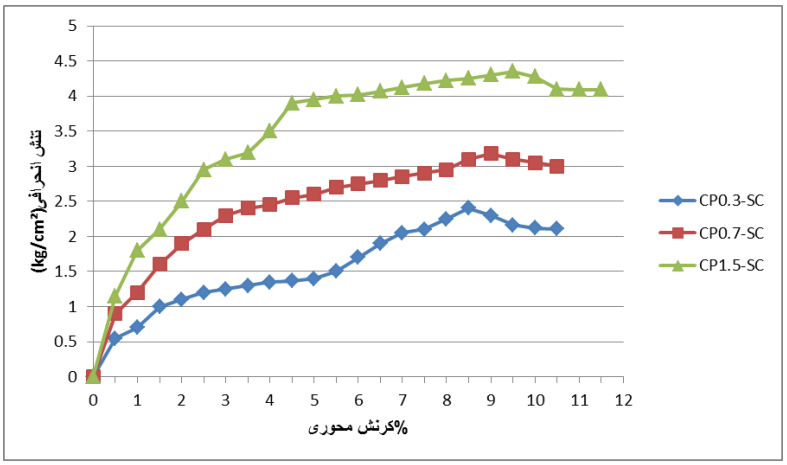
۳-۱- تجزیه و تحلیل نتایج بر اساس سه تنش محصور کننده متفاوت

همانگونه که در شکل های ۶ تا ۱۰ مشاهده می شود مقدار تنش انحرافی با افزایش تنش محصورکننده افزایش می یابد.علاوه بر این،افزایش تنش محصورکننده سبب تغییر شکل حالت شکسته نمونه ها می گردد؛بطوریکه هرچه تنش محصور کننده بیشتر می شود،حالت شکست نمونه ها بیشتر شبیه مصالح ترد است و تنش قابل تحمل مصالح در آنها بصورت مشخص،توسط نقطه اوج منحنی مشاهده می شود و درتنش محصورکننده کمتر مصالح پس از این مرحله دچار کرنش نرم شوندگی می شوند در حالیکه برای تنش های محصورکننده بزرگتر(۱/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع) رفتار مصالح شکل پذیر تر است که این رفتار مطابق نتایج سایر محققین در مورد مصالح سیمانته می باشد .همانطور که مشاهده می شود ،از لحاظ کیفی این منحنی ها شباهت زیادی به نمونه ی بدون افزودنی نانوسیلیس ،کنف و پروپیلن دارند و تفاوت آنها در رفتار اتساعی محسوس تر و افزایش مقاومت فشاری حداکثری نسبت به مصالح بدون نانوسیلیس

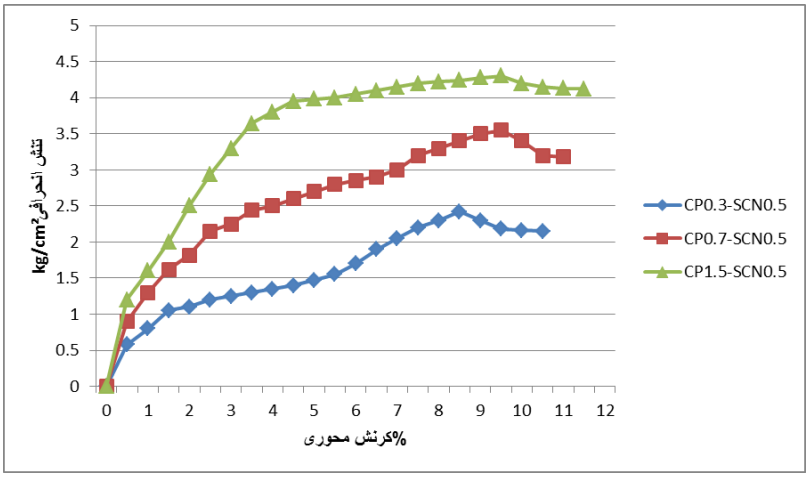
است.بررسی در این منحنی ها نشان میدهد که تا قبل از تسلیم، مقادیر تنش انحرافی افزایش می یابد و در عین حال شبکه قفل و بست سیمانی اتساع را به تأخیر می اندازد که بدان معناست که انرژی گسیختگی ،اغلب صرف شکستن بند های سیمانی می شود تا اینکه صرف اتساع مصالح شود. شکستن بند های سیمانی منجر به کاهش مقاومت می شود ،اما همزمان سبب افزایش حجم می گردد که دلیل آن را می توان اینگونه بیان نمود که این بند ها پس از رهایی در مخلوط نقش روانکاری ایجاد کرده و موجب افزایش حجم مصالح می گردند.



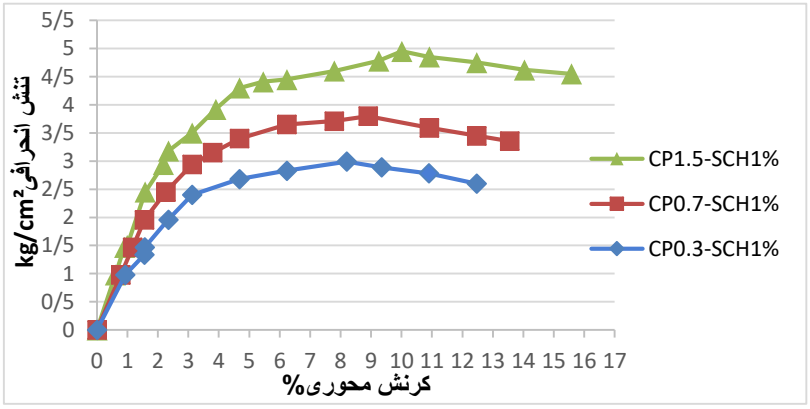
شکل ۶ نمودار تنش-کرنش بررسی نمونه شاهد در سه حالت تنش محصور کننده ۰,۳، ۰,۷ و ۱,۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع



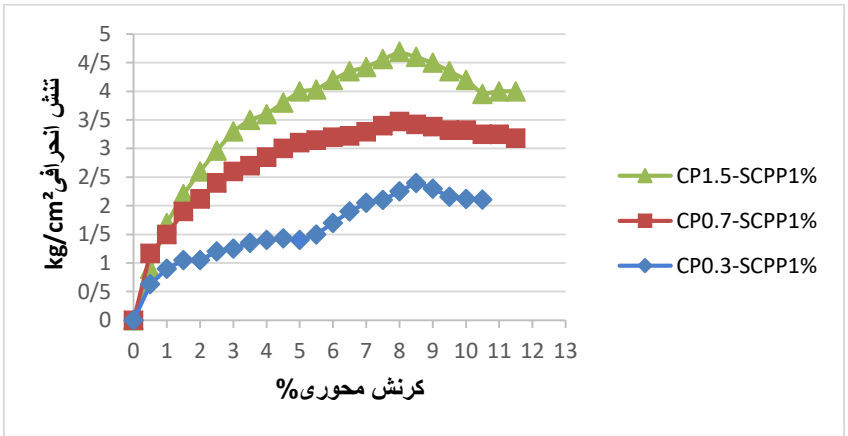
شکل۷: نمودار تنش-کرنش بررسی نمونه خاک-سیمان در سه حالت تنش محصور کننده ۰,۳، ۰,۷ و ۱,۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع



شکل۸: نمودار تنش-کرنش بررسی نمونه خاک-سیمان-نانوسیلیس در سه حالت تنش محصور کننده ۰,۳، ۰,۷ و ۱,۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع



شکل۹: نمودار تنش-کرنش بررسی نمونه خاک-سیمان-الیاف کنف در سه حالت تنش محصور کننده ۰,۳، ۰,۷ و ۱,۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع

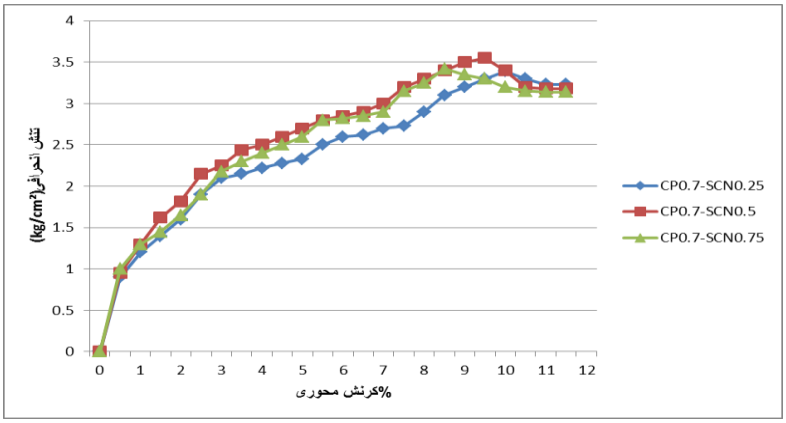


شکل۱۰: نمودار تنش-کرنش بررسی نمونه خاک-سیمان-الیاف پلی پروپیلن در سه حالت تنش محصور کننده ۰,۳، ۰,۷ و ۱,۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع

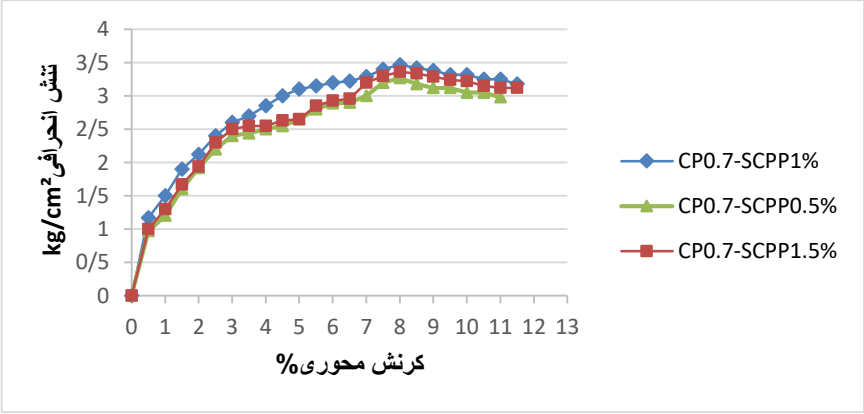
۳-۲- تجزیه و تحلیل نتایج بر اساس درصد های وزنی مختلف نانوسیلیس ، کنف و پلی پروپیلن

جهت بررسی تأثیر مقدار وزنی نانوسیلیس ،کنف و پلی پروپیلن در مقاومت فشاری خاک سیمان ، سه درصد ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ برای نانوسیلیس و درصد های ۰/۵ ، ۱ و ۱/۵ برای کنف و پلی پروپیلن نسبت به سیمان را با هم مقایسه گردید که نتایج آن در شکل های ۱۱تا ۱۳ نشان داده شد.نکته ی جالب و بسیار حائز اهمیت این است که مقاومت فشاری حاوی ۰/۵ درصد نانوسیلیس نسبت به دیگر مقادیر بیشتر است. از طرف دیگر میزان یک درصد از هر دو الیاف کنف و پلی پروپیلن هم با اختلاف کمی نسبت به باقی درصد های وزنی بیشترین مقاومت برشی را داشته اند که البته دلیل چنین اتفاقی را میتوان ارتباط مستقیم میان مقاومت فشاری و تراکم مصالح خاک سیمان دانست.به این دلیل که نانوسیلیس در آزمایش تراکم، در نسبت وزنی ۰/۵ درصد و الیاف کنف و پلی پروپیلن هم در نسبت وزنی یک درصد به مقدار بهینه خود در مخلوط رسیده و وزن مخصوص خشک حداکثری دارند.

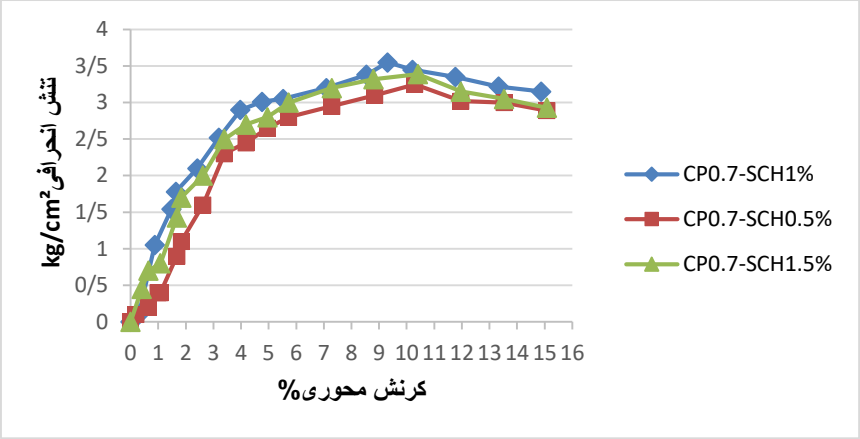
با توجه به اینکه خاک سیمان ماهیت متفاوتی از بتن دارد،نمی توان انتظار داشت که لزوماً با افزایش نانوسیلیس مقاومت فشاری این مصالح نیز افزایش یابند.زیرا نانوسیلیس علاوه بر افزایش سرعت واکنش های هیدراتاسیون و پوزولانیک نقش فیلر هم در بتن ایجاد می کنند.این در حالیست که نقش فیلر در خاک سیمان بر عهده ذرات گذرنده از الک ۲۰۰ می باشد.به همین دلیل زمانی که از مقدار بهینه در مخلوط استفاده می شود، میزان آب کمتری در مخلوط استفاده می گردد که سبب کاهش حجم حفرات موجود در ماتریس می گردد.بنابراین می توان دریافت که مصالح خاک سیمان بیشتر رفتاری شبیه به خاک از خود نشان میدهند تا اینکه ماهیتی شبیه به بتن داشته باشند.



شکل۱۱: تاثیر درصد وزنی مختلف ۰,۲۵ و ۰,۵ و ۰,۷۵ نانوسیلیس بر مقاومت حداکثری ترکیب خاک -سیمان- نانوسیلیس در تنش محصور شده ثابت ۰,۷ کیلوگرم بر سانتی متر مربع



شکل ۱۲: تاثیر درصد وزنی مختلف ۰,۵ و ۱ و۱,۵ الیاف پلی پروپیلن بر مقاومت حداکثری ترکیب خاک -سیمان- الیاف پلی پروپیلن در تنش محصور شده ثابت ۰,۷ کیلوگرم بر سانتی متر مربع



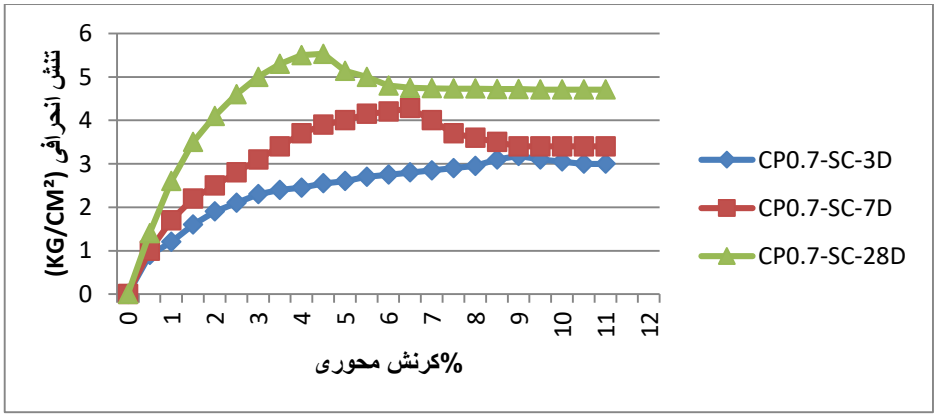
شکل۱۳: تاثیر درصد وزنی مختلف ۰,۵ و ۱ و۱,۵ الیاف کنف بر مقاومت حداکثری ترکیب خاک -سیمان- الیاف کنف در تنش محصور شده ثابت ۰,۷ کیلوگرم بر سانتی متر مربع

۳,۳. تجزیه و تحلیل نتایج بر اساس زمان عمل آوری

تأثیر زمان عمل آوری بر نمودار تنش-کرنش و مقاومت برشی نمونه ها در شکل های ۱۴تا ۱۷ نشان داده شده است. همانگونه که در تمامی شکل ها دیده می شود، هرچه زمان عمل آوری بیشتر می شود ،شیب نمودار های تنش-کرنش افزایش می یابد و شیب نمودار تنش-کرنش معرف سختی نمونه هاست؛ یعنی هرچه شیب نمودار بیشتر باشد،نمودار سختی بیشتری دارد.از سوی دیگر افزایش زمان عمل آوری باعث افزایش مقاومت نمونه ها می شود.پیرامون این رفتار می توان گفت با گذشت زمان واکنش های شیمیایی بیشتری به وجود می آید و در نتیجه باند سیمانی قوی تر می شود.

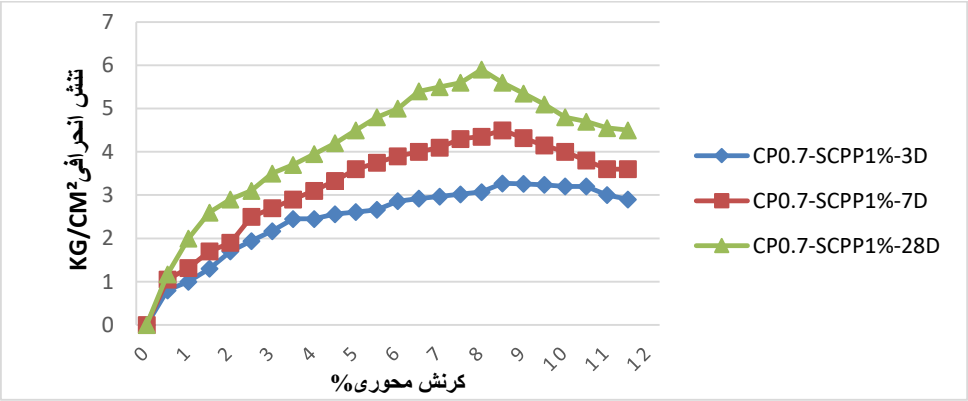
همچنین کاملا تاثیر سیمان و الیاف در مقاومت و تحمل نیرو وارده به نمونه ها قابل مشاهده است و تاثیر هرچند ناچیز الیاف کنف و پلی پروپیلن نیز مشهود است و در نهایت طول زمان عمل آوری نمونه ها بر روی افزایش مقاومت آنها تاثیر گذار میباشد .

همچنین در نمونه های دارای نانوسیلیس به علت هیدراسیون و افزایش سطح تماس بین ذرات افزایش شیب تنش-کرنش و به تبع آن افزایش مقاومت برشی بیشینه کاملاً مشهود است.بالا بودن سطح ویژه سبب افزایش سطح انرژی مصالح شده که باعث سرعت بخشیدن به واکنش هیدراسیون می شود و از آنجا که این واکنش مقدمه ای بر واکنش پوزولانی می باشد، بصورت خودکار به این واکنش در مخلوط نیز سرعت می بخشد که اصطلاحا سبب تولید خوشه های اضافی ژل سیلیکات-کلسیم-هیدراته در نمونه های دارای نانوسیلیس در مخلوط می شود.

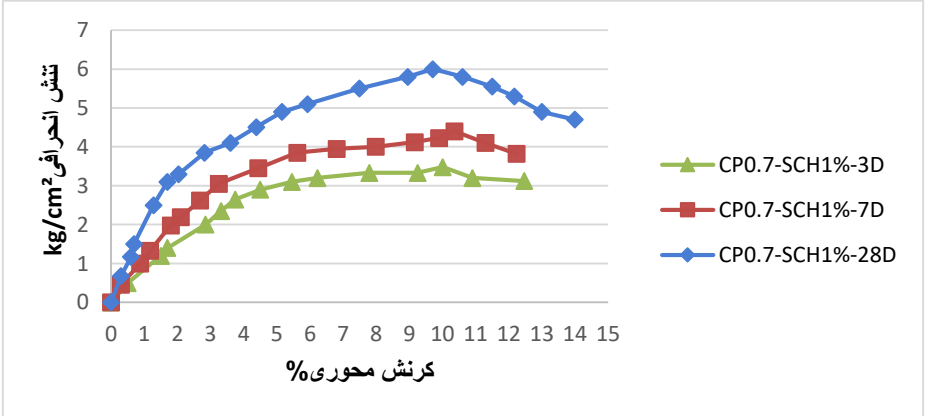


شکل۱۴: نمودار تنش انحرافی-کرنش محوری مقایسه نمونه خاک سیمان در تنش محصور شده ثابت ۰,۷ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در زمان عمل آوری ۳و۷و۲۸ روزه

شکل۱۵: نمودار تنش انحرافی-کرنش محوری مقایسه نمونه خاک سیمان نانوسیلیس در تنش محصور شده ثابت ۰,۷ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در زمان عمل آوری ۳و۷و۲۸ روزه



شکل۱۶: نمودار تنش انحرافی-کرنش محوری مقایسه نمونه خاک سیمان پلی پروپیلن در تنش محصور شده ثابت ۰,۷ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در زمان عمل آوری ۳و۷و۲۸ روزه



شکل۱۷: نمودار تنش انحرافی-کرنش محوری مقایسه نمونه خاک سیمان الیاف کنف در تنش محصور شده ثابت ۰,۷ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در زمان عمل آوری ۳و۷و۲۸ روزه

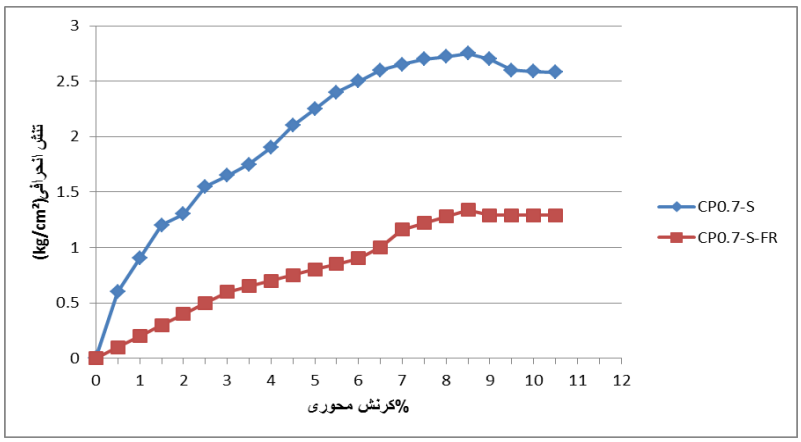
۴-۳تجزیه و تحلیل نتایج پس از اعمال ۵۰ سیکل ذوب و یخبندان

برای اعمال سیکلهای ذوب و یخبندان ۳ آیین نامه مد نظر قرار گرفت.آیین نامه ASTM D559 [24]که روشی مربوط به اعمال چرخه های تر و خشک کردن خاک-سیمان است ؛ آیین نامه ASTM D560 [25] که مربوط به اعمال چرخه های ذوب و یخبندان خاک-سیمان می باشد و آیین نامه ASTM C666 [26]که مربوط به اعمال چرخه های ذوب و یخبندان بتن می باشد.از آنجاییکه عیار سیمان در بتن بیشتر از مخلوط خاک-سیمان است ، مقاومت بیشتری نیز نسبت به خاک-سیمان دارد.از همین رو شرایط در نظر گرفته شده در اعمال چرخه های ذوب و یخبندان در آیین نامه ASTM C666 نسبتاً سخت تر از آیین نامه های ASTM D559 و ASTM D560 می باشد. با توجه به اینکه با افزودن نانوسیلیس به مخلوط خاک-سیمان ، مقاومت این مصالح به طور چشمگیری افزایش یافت، لذا تصمیم بر آن شد تا اعمال چرخه های ذوب و یخبندان را در شرایط سخت تر و با توجه به آیین نامه ASTM C666 انجام گیرد.

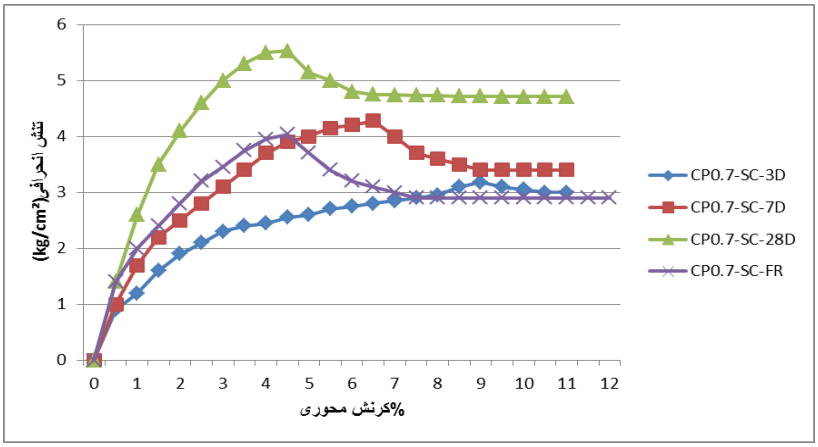
با توجه به این نکته که بیشترین مقاومت برشی مربوط به نمونه های حاوی نانوسیلیس می باشد (در مقابل کنف و پلی پروپیلن)، این ماده ی پوزولانی تحت سیکلهای ذوب و یخبندان قرار داده شد.همانطور که در شکل های ۱۸ تا ۲۰ دیده می شود،نقش نانوسیلیس در کاهش نیافتن مقاومت فشاری پس از سیکل های متوالی ذوب و یخبندان کاملا مشهود است.بطوریکه خاک مورد استفاده در این پژوهش پس از ۵۰ سیکل متوالی ذوب و یخبندان ۴۹ درصد از مقاومت فشاری خود را از دست داد و همچنین در مورد خاک سیمان بدون افزودنی نانوسیلیس این رقم به ۲۷ درصد کاهش یافت؛این درحالیست که مقاومت فشاری خاک سیمان همراه ۰/۵ درصد نانوسیلیس پس از ۵۰ سیکل ذوب و یخبندان تنها ۷ درصد کاهش پیدا کرده است.

همانطور که در شکل ۱۹ دیده می شود ،مقاومت برشی مصالح خاک سیمان پس از ۵۰ سیکل ذوب و یخبندان ۲۷ درصد نسبت به مقاومت فشاری زمان عمل آوری ۲۸ روزه کاهش پیدا کرده و حتی نسبت به مقاومت فشاری ۷ روزه نیز ۶ درصد کمتر است و تنها از مقاومت فشاری ۳ روزه خاک سیمان بیشتر است.

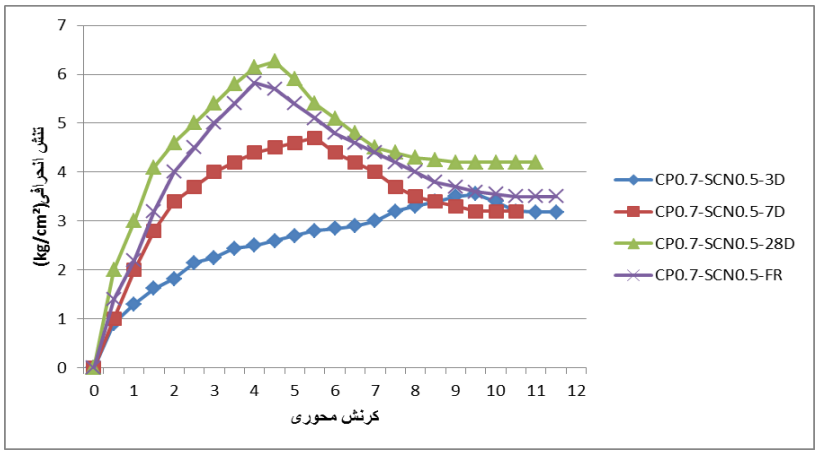
با توجه به موارد فوق الذکر، نمونه های دارای نانوسیلیس(شکل ۲۰)عملکرد خوبی در برابر سیکل های ذوب و یخبندان از خود بجا گذاشتند و تنها ۷ درصد نسبت به نمونه عمل آوری شده در ۲۸ روز کاهش مقاومت فشاری را تجربه کرده اند و همچنین نکته قابل توجه دیگر و متفاوت با نمونه خاک سیمان بدون افزودنی نانوسیلیس در این آزمایش این بود که مقاومت فشاری پس از سیکل های ذوب و یخبندان در این مصالح حدود ۲۰ درصد بیشتر از مقاومت فشاری این مصالح در زمان عمل آوری ۷ روزه بوده است که باز هم نشان دهنده ی تأثیر بسزای این ماده پوزولانی بدلیل سطح ویژه بسیار کم و تولید ژل سیلیکات-هیدارته-کلسیم می باشد.



شکل۱۸ :نمودار تنش انحرافی-کرنش محوری نمونه کنترلی(خاک) قبل و پس از اعمال سیکلهای ذوب و یخبندان



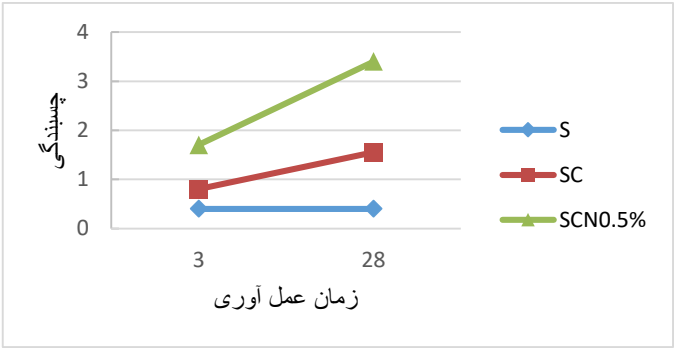
شکل۱۹ :نمودار تنش انحرافی-کرنش محوری خاک-سیمان قبل و پس از اعمال سیکلهای ذوب و یخبندان



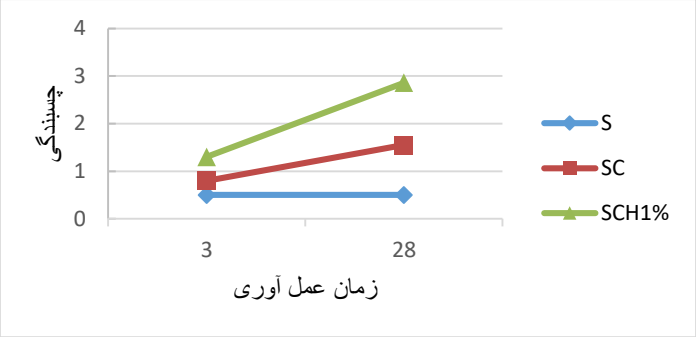
شکل ۲۰ : نمودار تنش انحرافی-کرنش محوری خاک-سیمان-نانوسیلیس قبل و پس از اعمال سیکلهای ذوب و یخبندان

۵،۳. اثر زمان عمل آوری بر روی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک

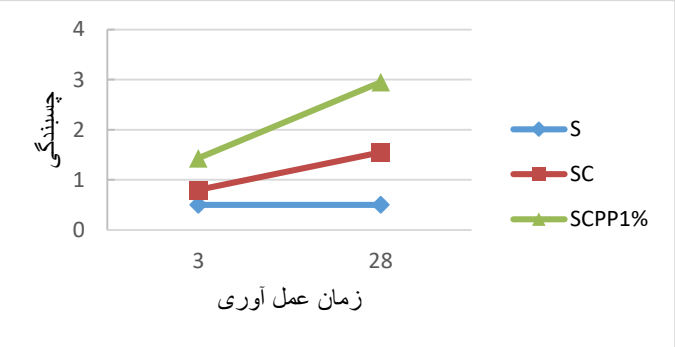
با توجه به نتایج ارائه شده در شکل های ۲۱ الی۲۳ مشاهده می شود پارامتر چسبندگی در نمونه های دارای الیاف کنف و پلی پروپیلن و نانوسیلیس نسبت به نمونه خاک و خاک سیمان افزایش محسوسی یافته است. این مطلب را اینگونه می توان توجیه کرد که نانوسیلیس ها بدلیل سطح ویژه ی بالایی که دارند به عمل هیدراسیون که در روز های اولیه اتفاق می افتد، سرعت می بخشند و موجب افزایش واکنش های شیمیایی در مصالح شده و به دلیل کامل شدن فرایند هیدراتاسیون بین ترکیبات خاک و سیمان و الیاف کنف و پلی پروپیلن مقاومت نمونه ها در برابر شکست بیشتر میشود همین امر در نتایج ذکر شده مشهود است و همچنین این امر باعث افزایش چسبندگی و اتصال بین ذرات و نمونه ها شده است و با گذشت عمر نمونه ها پارامتر چسبندگی روند صعودی دارد .



شکل۲۱ : بررسی پارامتر چسبندگی در طول عمر متفاوت بر نمونه خاک سیمان نانوسیلیس



شکل۲۲: بررسی پارامتر چسبندگی در طول عمر متفاوت بر نمونه خاک سیمان الیاف کنف



شکل۲۳ : بررسی پارامتر چسبندگی در طول عمر متفاوت بر نمونه خاک سیمان الیاف پلی پروپیلن

۴- نتیجه گیری:

- نتایج آزمایش های تراکم بر مخلوط خاک-سیمان نشان دادند که مقدار دانسیته خشک حداکثر با اضافه کردن سیمان کاهش ومیزان جذب آب آن هم نسبت به نمونه کنترلی افزایش می یابد.
- نتایج آزمایش های تراکم با الیاف های کنف و پلی پروپیلن حاکی از کاهش دانسیته خشک حداکثر و افزایش درصد رطوبت بهینه بود.همچنین هردو الیاف در درصد وزنی یک به مقدار دانسیته خشک حداکثر میرسند.
- نتایج آزمایش های تراکم بر روی ماتریس خاک-سیمان-نانوسیلیس نشان دادند که با اضافه کردن ۰,۲۵ نانوسیلیس به مخلوط ،دانسیته خشک حداکثر کاهش و با اضافه کردن درصد وزنی ۰,۵ افزایش و پس از آن (درصد وزنی ۰,۷۵)دوباره کاهش می یابد .این عملکرد را می توان اینگونه توجیه نمود که احتمال کلوخه ای شدن ذرات نانوسیلیس با افزایش مقدار آنها در مخلوط افزایش می یابد که سبب جاذبه سطحی بسیار بالای بین ذرات نانوسیلیس می باشد که منجر به کاهش عملکرد ذرات نانوسیلیس در محصولات پایه سیمانی می گردد.
- نتایج آزمایشهای سه محوری نشان داد که هرچه زمان عمل آوری بیشتر شود ،شیب نمودار های تنش-کرنش افزایش یافته و شیب نمودار تنش-کرنش معرف سختی نمونه هاست؛ یعنی هرچه شیب نمودار بیشتر باشد،نمودار سختی بیشتری دارد.
- افزایش زمان عمل آوری در تمام نمونه ها باعث افزایش مقاومت نمونه ها می شود.پیرامون این رفتار می توان گفت با گذشت زمان واکنش های شیمیایی بیشتری به وجود می آید و در نتیجه باند سیمانی قوی تر می شود.همچنین در نمونه های دارای نانوسیلیس به علت هیدراسیون و افزایش سطح تماس بین ذرات افزایش شیب تنش-کرنش و به تبع آن افزایش مقاومت برشی

بیشینه کاملاً مشهود است.بالا بودن سطح ویژه سبب افزایش سطح انرژی مصالح شده که باعث سرعت بخشیدن به واکنش هیدراسیون می شود و از آنجا که این واکنش مقدمه ای بر واکنش پوزولانی می باشد، بصورت خودکار به این واکنش در مخلوط نیز سرعت می بخشد که اصطلاحا سبب تولید خوشه های اضافی ژل سیلیکات-کلسیم-هیدراته در نمونه های دارای نانوسیلیس در مخلوط می شود.

- نتایج آزمایشهای سه محوری برای ارزیابی درصد های مختلف نانوسیلیس(۰,۲۵، ۰,۵ و ۰,۷۵) نسبت به سیمان نشان داد که مقاومت فشاری نمونه حاوی ۰,۵ درصد نانوسیلیس نسبت به دیگر مقادیر بیشتر است که البته دلیل چنین اتفاقی را میتوان ارتباط مستقیم میان مقاومت فشاری و تراکم مصالح خاک سیمان دانست.به این دلیل که نانوسیلیس در آزمایش تراکم، در محتوای ۰,۵ درصد به مقدار بهینه خود در مخلوط رسیده و وزن مخصوص خشک حداکثری دارد.
- و همچنین نتایج آزمایشهای سه محوری برای ارزیابی درصد های مختلف الیاف های کنف و پلی پروپیلن (۰,۵، ۱ و ۱,۵) نسبت به سیمان نشان داد که مقاومت فشاری نمونه حاوی ۱ درصد الیاف نسبت به دیگر مقادیر بیشتر است که البته دلیل چنین اتفاقی را میتوان ارتباط مستقیم میان مقاومت فشاری و تراکم مصالح خاک سیمان دانست و همانطور که بیان شد در آزمایش تراکم، در محتوای ۱ درصد به مقدار بهینه خود در مخلوط رسیده و وزن مخصوص خشک حداکثری دارد.
- نمونه های حاوی نانوسیلیس در تمام سنین عمل آوری دارای مقاومت برشی بیشتری نسبت به الیاف پلی پروپیلن و کنف است.
- نتایج آزمایش های سه محوری پس از ۰,۵ سیکل متوالی ذوب و یخبندان حاکی از نقش نانوسیلیس در کاهش نیافتن مقاومت برشی پس از سیکل های متوالی ذوب و یخبندان است.بطوریکه نمونه خاک مورد استفاده در این پژوهش پس از ۵۰ سیکل متوالی ذوب و یخبندان ۴۹ درصد از مقاومت فشاری خود را از دست داد و همچنین در مورد خاک سیمان بدون افزودنی نانوسیلیس این رقم به ۲۷ درصد کاهش یافت؛این درحالیستکه مقاومت فشاری خاک سیمان همراه ۰,۵ درصد نانوسیلیس پس از ۵۰ سیکل ذوب و یخبندان تنها ۷ درصد کاهش پیدا کرده است.
- مقاومت فشاری نمونه خاک سیمان پس اعمال سیکلهای ذوب و یخبندان ۶ درصد از مقاومت این نمونه در زمان عمل آوری ۷ روزه کمتر است.این در حالیستکه مقاومت برشی در نمونه حاوی ۰,۵ درصد نانوسیلیس پس از اعمال سیکلهای ذوب و یخبندان ۲۰ درصد از این مقاومت در زمان عمل آوری ۷ روزه بیشتر است که نشانگر تأثیر بسزای این ماده پوزولانی در کنترل دوام بدلیل سطح ویژه بسیار کم و تولید ژل سیلیکات-هیدارته-کلسیم می باشد.
- پارامتر چسبندگی در تمام نمونه ها اعم از نمونه های دارای کنف، پلی پروپیلن و نانوسیلیس پس از دوره ۲۸ روزه افزایش یافته اند که این افزایش در نمونه دارای نانوسیلیس بسیار محسوستر بوده است. این مطلب را اینگونه می توان توجیه کرد که نانوسیلیس ها بدلیل سطح ویژه ی بالایی که دارند به عمل هیدراسیون که در روز های اولیه اتفاق می افتد، سرعت می بخشند و موجب افزایش واکنش های شیمیایی در مصالح شده و به دلیل کامل شدن فرایند هیدراتاسیون بین ترکیبات خاک و سیمان و الیاف کنف و پلی پروپیلن مقاومت نمونه ها در برابر شکست بیشتر میشود ، همین امر در نتایج ذکر شده مشهود است و همچنین این امر باعث افزایش چسبندگی و اتصال بین ذرات و نمونه ها شده است و با گذشت عمر نمونه ها پارامتر چسبندگی روندی صعودی دارد.

- از کاربرد های خاک سیمان میتوان به روسازی و اساس زیرین جاده ها، بهسازی خاک و پی ها، حفاظت از شیب ها در سد های بتنی و خاکی و خاکریز ها و تراز نمودن کانالها و مخزن های آب اشاره نمود. هدف از مطالعه موردی شهرک صنعتی نظر آباد کرج ، بهسازی خاک این منطقه به وسیله سیمان به کمک مکملهای انتخاب شده بود که در بین آنها ماده پوزولانی نانوسیلیس بدلیل افزایش مقاومت ، جلوگیری از نشست، افزایش دوام و جلوگیری از ترک خوردگی (کاهش هزینه ها) از الیاف کنف و پلی پروپیلن بسیار موثر تر بوده و برتری واکنش های پوزولانی با تولید ژل هیدرات-سیلیکات-کلسیم را نسبت به مواد تسلیح کننده نشان میدهد . با توجه به این پژوهش بهترین گزینه برای بهسازی خاک شهرک صنعتی نظر آباد، نانوسیلیس می باشد.

مراجع

[1] ACI “Cement and Concrete Terminology ” 116 IR(2000).

[2] ACI “State of the Art Report on Soil Cement,” 230, IR(2006).

[3] Pacewska, B., Bukowska, M., Wilinska, I. and Swat, M., "Modification of the Properties of Concrete by a New Pozzolan-A Waste Catalyst from the Catalytic Process in a Fluidized Bed," Cement and Concrete Research, V. 32, pp.145-152, 2002.

[4] Fakharrian, K. Heydari, S. Eghbali, A. “Effect of Portland Cement Addition On anisotropic Strength of Sand Under Compression and Extension Triaxial Tests.”Sharif civil engineering journal. 29, 107-115.(In Persian)(2012)

[5] ICOLD “ Soil Cement for Embankment Dams,” Bulletin 54,(1996).

[6] Khattak, J. Alrashidi, M. ,(2006) “Durability and mechanistic charecteristics of fiber reinforced soil-cement mixtures.” International journal of Pavment Engineering.7, 53-62.

[7]f.karimzade ,e.ghasemali ,s.salemizade(2009). "Nanotechnology : Properties , Production and application" Esfahan : The Center for Educational Jihad of the University of Isfahan .

[8] Hooton, R.D., "Influence of Silica Fume Replacement of Cement on Physical Properties and Resistance to Sulphate Attack, Freezing and Thawing and Alkali-Silica Reactivity." ACI Materials Journal, V. 90, No. 2, pp.143-151, 1993.

[9] Peng, G. F., Ma, Q., Hu, H. M., Gao, R., Yao, Q. F. and Liu, Y. F., "The Effects of Air Entrainment and Pozzolans on Frost Resistance of 50-60 MPa Grade Concrete," Construction and Building Materials,V. 21, pp.1034-1039, 2007.

[10] Ajorloo, A .Mroueh,H. Lancelot, L. “Experimental Investigation of Cement Treated Sand Behavior . Under Triaxial Test.” Geotech Geol Eng, 30,129–143(2012).

[11] Said, A.M. Zeidan, M.S. Bassouni, M.T. Tian, Y.(2012) “Properties of concrete incorporating nanosilica.” construction and building materials 838-844.

[12] Sedighi, P. Eslami, A. Aflaki, E. “Effect of Cement Treatment on Shear Strength Parameters of Difficult Soil from Southern Coastlines of the Caspian sea.” Sharif civil engineering journal. 29, 97-128.(In Persian)(2013).

[13] Chakroborty, S. Kundu, S.P. Roy,A. Adhikari,B. Majmudar, S.B. (2013). “Polymer modified jutefibre as reinforcing agent controlling the physical and mechanical charecteristics of cement mortar.” Construction and building materials.49, 214-222

[14] KQ Tran, T Satomi, H Takahashi ,(2018). “Improvement of mechanical behavior of cemented soil reinforced with waste cornsilk fibers.” Construction and Building Materials.

[15] M. Mirzababaei, A. Arulrajah, A. Haque, S. Nimbalkar and A. Mohajerani ,(2018). “Effect of fiber reinforcement on shear strength and void ratio of soft clay” Geosynthetics International\Volume 25 Issue 4, August, pp. 471-480

[16] AshtaroutAmmar, ShadiNajjar and SalahSadek ,(2019). “Mechanics of the Interface Interaction between Hemp Fibers and Compacted Clay” International Journal of Geomechanics/Volume 19 Issue 4 - April

[17] ASTM Standard D2166. 2000. Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[18]Melik Bekhiti, Habib Trouzine, Mohamed Rabehi ,(2019). “Influence of waste tire rubber fibers on swelling behavior, unconfined compressive strength and ductility of cement stabilized bentonite clay soil” Construction and Building Materials Volume 208, 30 May, Pages 304-313

[19] Studies on the impact of polypropylene and silica fume blended combination on the material behaviour of black cotton soil (2020) Author links open overlay panelP.MurthiaR.SaravananbK.Poongodic

[20] xhingchen,zh . jianen,g . henghui,f . xinghau,l . zhe,g . li,x . shengli,s . (2020) .” Study on the Mechanism of Nano-SiO2 for Improving the Properties of Cement-Based Soil Stabilizer” . Nanomaterials 2020, 10, 405; doi:10.3390/nano10030405

[۲۱] ASTM D2487 “Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)

[۲۲] ASTM D558 “Standard Test Methods for Moisture-Density (Unit Weight) Relations of Soil-Cement Mixtures "

[۲۳] ASTM D2850 “Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils"

[24]ASTM D559 / D559 “Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures”

[۲5] ASTM D560 “Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures-water content-compaction- soil-cement specimens"

[۲6] ASTM C666 “Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing”