مهندسی عمران شریف (بهار ۱۳۹۷)
دوره‌ی ۲ - ۳۴، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۱۳-۲۲

Original Article

بررسی آزمایشگاهی تأثیر افزودن نانوسیلیس با سطح ویژه‌های متفاوت در پارامترهای فیزیکی و مکانیکی مصالح خاک ـ سیمان

میلاد تاج دینی * **(دکتری)**
مسعود حاجی علیلو (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

خاک ـ سیمان مخلوطی از سیمان پرتلند، خاک و آب است که به‌واسطه‌ی عمل آبرفت سیمان و تراکم، اجزاء آن به‌هم می‌چسبد و ترکیبی متراکم، بادوام و با نفوذپذیری کم و مقاوم در برابر سایش ایجاد می‌کند. با توجه به اینکه تأثیر افزودن نانوسیلیس در سال های اخیر در پارامترهای مختلف فیزیکی و مکانیکی بتن بررسی شده است، در پژوهش حاضر به‌دلیل تفاوت‌های معنادار بین بتن و خاک ـ سیمان، نظیر: درصد ریزدانه‌ی مصرفی قابل توجه در خاک ـ سیمان و عیارکمتر سیمان آن، به تأثیر افزودن محصولات سیلیسی در مصالح مذکور پرداخته شده است. برای این منظور در پژوهش حاضر از ۳ نوع محصول سیلیسی، شامل: میکروسیلیس (با سطح ویژه‌ی $۲۱\ m^۲/g$) و ۲ نوع نانوسیلیس (با سطح ویژه‌های $۲۰۰\ m^۲/g$ و $۳۸۰\ m^۲/g$) در طرح اختلاط استفاده شده است. پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های انجام شده، شامل: پارامترهای تراکم، مقاومت فشاری و ضریب نفوذپذیری بودند که بر روی طرح‌های اختلاط مختلف آزمایش شدند. نتایج آزمایش‌ها حاکی از آن است که مصالح خاک ـ سیمان با افزودن محصولات سیلیسی، عملکرد رفتاری بسیار مناسب‌تری از خود نشان می‌دهند.

واژگان کلیدی: خاک ـ سیمان، نانوسیلیس، آزمایش تراکم، مقاومت فشاری، ضریب نفوذپذیری.

m.tajdini@tabrizu.ac.ir
hajialilue@tabrizu.ac.ir

۱. مقدمه

بتن بنا به تعریف، مخلوطی از اجزاء متشکل از یک سامانه است که شامل: زیر سامانه‌های خمیر سیمان (سیمان و آب)، سامانه‌ی سنگ‌دانه‌ها (شن و ماسه) و سامانه‌ی حد اشتراک (محل اتصال) اجزاء مذکور است که آن را می‌توان به شکل‌های بسیار زیادی در آورد. بتن‌های ویژه نیز به بتن‌هایی با خصوصیات غیرمعمول یا بتن‌های تولید شده با روش‌های غیرمعمول گفته می‌شود. خاک سیمان نیز از جمله همین بتن‌های ویژه است.

طبق تعریف ACI۱۱۶R، خاک سیمان مخلوطی است از خاک و مقداری سیمان مشخص و آب که با چگالی بالایی متراکم شده باشند. در نشریه‌ی ۵۴ کمیته‌ی بین‌المللی سدهای بزرگ، خاک سیمان مخلوطی از سیمان پرتلند، خاک و آب است، که به‌واسطه‌ی آبرفت سیمان و تراکم ماشین‌آلات اجزاء آن به هم چسبیده و ترکیبی متراکم و با دوام و نفوذپذیری کم و مقاوم در برابر سایش ایجاد می‌شود. در ACI۲۳۰IR، خاک ـ سیمان به‌طور جامع‌تری تعریف می‌شود: مصالحی است که به‌واسطه‌ی مخلوط شدن متراکم و عمل‌آوری خاک و سنگ‌دانه و سیمان پرتلند افزودنی‌های شیمیایی و مواد مکمل سیمانی محتمل، شامل: پوزولان‌ها و آب به شکل مصالح سخت شده با خصوصیات مهندسی ویژه ساخته می‌شود.[۱و۲]

مصالح خاک ـ سیمان عموماً در مقابل گزینه‌ی بتن غلتکی در پروژه‌ها استفاده می‌شود. خاک ـ سیمان و بتن غلتکی هر دو به‌طور کامل مخلوط‌های متراکم شده‌یی از سیمان، سنگ‌دانه و آب هستند؛ ولی تفاوت اصلی آنها در نوع و اندازه‌ی سنگ‌دانه‌هاست. خاک سیمان اصولاً ریزدانه‌ی طبیعی گردگوشه است، در حالی که بتن غلتکی شامل دانه‌های با بیش از ۱۹ میلی‌متر است. امروزه خاک ـ سیمان به‌عنوان محافظ شیب سدهای خاکی استفاده می‌شود، در حالی که بتن غلتکی بیشتر در مقاطع بتن حجیم، مانند: سدهای وزنی استفاده می‌شود. تقریباً همه نوع خاک در ساخت خاک ـ سیمان استفاده می‌شوند، اما خاک‌های آلی و رس‌های خمیری و ماسه‌های واکنش‌زا، از این قاعده مستثنی هستند. معمولاً خاک‌های حاوی ۳۵-۵ درصد ریزدانه‌ی عبوری از الک ۲۰۰، بهترین صرفه‌ی اقتصادی را دارند، اما خاک‌های با بیش از ۲٪ مواد آلی برای تثبیت به‌شدت غیرقابل قبول‌اند.[۱و۲]

عمده‌ی استفاده‌ی خاک سیمان به مصرف آن در لایه‌ی اساس روسازی اختصاص

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۷/۲۷، اصلاحیه ۱۳۹۵/۳/۴، پذیرش ۱۳۹۵/۴/۲۹.
DOI:10.24200/J30.2018.1326

دارد، اما در دهه‌ی اخیر به‌دلیل رشد سدسازی درکشور از آن به‌عنوان المان آب‌بند در شیب سدهای خاکی و یا خود المان آب‌بند (مانند فرازبند) تغییر کاربری داده است، به‌طوری که در ساخت فرازبند سدهای کارون ۴، گتوند، رودبار و بختیاری، به استفاده از مصالح مذکور از سوی پیمانکار توجه شده است.

با توجه به اینکه اصولاً برای ساخت المان‌های آب‌بند از مصالح سیمانی زود سخت‌شونده باید استفاده شود تا مسائل فنی، نظیر: رسیدن به مقاومت موردنیاز از یک سو و مسائل اقتصادی، نظیر: افزایش سرعت بهره‌برداری از سوی دیگر تأمین شود، در وهله‌ی اول استفاده از سیمان تیپ III که خاصیت زود سخت‌شوندگی بالایی دارد، ممکن است مدنظر قرارگیرد؛ اما سیمان مذکور معایبی، همچون: مقاومت کم سیمان پس ازگیرش نهایی، اقتصادی نبودن به دلیل سفارشی بودن و حرارت‌زایی بالا ـ که در احجامی مانند سد می‌تواند مشکل‌ساز باشد ـ دارد که استفاده از آن را با تردید همراه می‌سازد.

در میان افزودنی‌های پوزولانی، میکروسیلیس که محصول جانبی کوره‌های قوس الکتریکی است، بهترین کارایی را در بتن دارد که پژوهشگران دلیل آن را داشتن مقدار زیاد سیلیس بی‌شکل (بیش از ۹۰٪) دانسته‌اند. ماده‌ی پوزولانی جدیدی که اخیراً مورد توجه برای استفاده در بتن قرار گرفته است، نانوسیلیس است که به‌صورت پودر جامد و یا امولسیون در آب موجود است. به نظر می‌رسد نانوسیلیس به دلیل میزان بالاتر سیلیس، بی‌شکل بودن و اندازه‌ی کوچک‌تر ذرات، عملکرد بهتری نسبت به میکروسیلیس داشته باشد. زیرا با کاهش یافتن اندازه‌ی ذرات، نسبت سطح مؤثر به حجم ذرات افزایش می‌یابد و آثار سطحی، قوی‌تر می‌شوند و می‌توان گفت واکنش‌پذیری مواد در ابعاد نانو بسیار افزایش می‌یابد؛ لذا، ماده‌ی مذکور در واکنش‌پذیری، خواص ویژه‌یی به ماده در ابعاد نانو در قیاس با مواد با ابعاد بزرگ‌تر می‌دهد.

از آنجایی که ریزساختار محصولات پایه‌ی سیمانی مثل بتن و خاک ـ سیمان نقش مهمی در تعیین خواص آن دارد، انتظار بر این است که استفاده از نانوذرات در آن، آثار قابل توجهی در خواص‌شان داشته باشند. زیرا نانوذرات استفاده شده در بتن، از یک‌سو نقش پرکنندگی حفره‌های بسیار ریز در خمیر سیمان را دارند و از سوی دیگر می‌توانند تغییراتی را در فرایند آبرفت ایجاد کنند. در زمینه‌ی استفاده از نانوسیلیس در بتن، کارهای پژوهشی بسیاری در دنیا صورت گرفته است، ولی از آنجایی که نانوسیلیس و آثار آن کاملاً شناخته شده نیستند، بیشتر نوشتارها به بررسی آثار اولیه‌ی استفاده از آن در خمیر سیمان پرداخته‌اند که در ادامه به برخی از آنها اشاره شده است.

در پژوهشی در سال ۲۰۰۷، به بررسی نحوه‌ی واکنش نانوسیلیس در خمیر سیمان پرداخته شد و نتیجه گرفته شد که وقتی میکروسیلیس به‌عنوان پرکننده‌ی شیمیایی خنثی به سیمان افزوده می‌شود، باعث بهبود ساختار فیزیکی و فراهم آوردن موقعیت مناسب برای شروع محصولات آبرفت می‌شود و از طرف دیگر، به‌عنوان یک پوزولان با هیدروکسیدکلسیم در اثر فرایند آبرفت واکنش می‌دهد و می‌تواند پیوند بین سنگ‌دانه و خمیر را بهبود بخشد. لذا وقتی از نانوسیلیس در ترکیب استفاده شد، این نتیجه به‌دست آمد که با کاهش اندازه‌ی ذرات، درجه‌های ناهمواری اتمی زیادی به‌وجود می‌آیند که واکنش شیمیایی را تشدید می‌کند و به همین دلیل، نانوسیلیس انرژی سطحی بالاتری دارد و فعالیت اتم‌ها در سطح افزایش می‌یابد و به‌راحتی با سایر اتم‌های بیرونی دیگر، واکنش نشان می‌دهند. بدین ترتیب نانوسیلیس‌ها امکان بهتری برای شروع بیشتر و بهتر محصولات آبرفت فراهم می‌کنند و در نتیجه، استحکام پیوندی بین سنگ‌دانه و خمیر را افزایش می‌دهند و ساختار اندرکنش را به‌طور مؤثرتری نسبت به میکروسیلیس بهبود می‌بخشند.[۳]

در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۰۴) نیز با افزودن فقط خاکستر بادی و همچنین نانوسیلیس و خاکستر بادی به‌صورت توأمان به بتن متعارف، این نتیجه به‌دست آمد که مقاومت فشاری نمونه‌ی حاوی ۴٪ نانوسیلیس و ۵۰٪ خاکستر بادی، ۸۱٪ بیشتر از نمونه‌ی حاوی فقط ۵۰٪ خاکستر بادی بوده است و همچنین نمونه‌ی حاوی نانوسیلیس، در ۵۶ روز اول مقاومت بیشتری نسبت به بتن بدون نانوسیلیس کسب کرده است، چرا که نانوذرات در میان مواد حاصل از آبرفت قرار می‌گیرند و از رشد و بزرگ شدن بلورهای مضراترینگایت و هیدروکسیدکلسیم جلوگیری می‌کند و همچنین به‌عنوان یک ماده‌ی پرکننده‌ی مناسب، حفره‌های سیمان را پر می‌کند که موجب افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود.[۴]

یکی از معضلات بتن‌های حجیم (مانند سدها)، مشکل ترک‌خوردگی ناشی از گرمای آبرفت است که سبب می‌شود برای رسیدن به طرح اختلاط مناسب، عیار سیمان کاهش یابد و بالطبع این امر خودبه‌خود سبب کاهش میزان آب و افزایش سنگ‌دانه‌ها خواهد شد که چنین بتنی با مشکلات اجرایی و عدم حصول مقاومت کوتاه‌مدت مواجه خواهد شد. با الهام از موضوع ذکر شده، در پژوهشی در سال ۲۰۰۴ پیشنهاد شد که از نانوسیلیس به‌عنوان جایگزین بخشی از مواد سیمانی استفاده شود و تا حدی مفاهیمی، مانند: بتن خودتراکم و بتن حجیم با هم درآمیخته شود. سپس در ادامه‌ی پژوهش مذکور این نتیجه به‌دست آمد که بیشینه‌ی گرما در بتن حاوی مقادیر زیاد خاکستر بادی، ۴۰-۳۰ ساعت پس از اختلاط به تأخیر می‌افتد و در این حالت، میزان بیشینه‌ی دما نیز حدود ۵۱ درجه‌ی سانتی‌گراد است، در حالی‌که بیشینه‌ی گرمایش در بتن حاوی نانوسیلیس تقریباً هم‌زمان با بتن معمولی، یعنی حدود ۲۵-۱۵ ساعت پس از اختلاط اتفاق می‌افتد و میزان بیشینه‌ی دما، ۶۱ درجه‌ی سانتی‌گراد خواهد بود. به این ترتیب می‌توان گفت استفاده از نانوسیلیس در بتن به همراه خاکستر بادی، یک وضعیت بینابینی از خود نشان می‌دهد که از یک‌سو سرعت کسب مقاومت را نسبت به بتن فقط حاوی خاکستر بادی افزایش می‌دهد و از سوی دیگر، میزان بیشینه‌ی دما را نسبت به بتن معمولی کاهش می‌دهد. نتایج مذکور نشان می‌دهند که با افزودن نانوسیلیس، مقدار حرارت خارج شده در طول فرایند گیرش و سخت شدن سیمان افزایش می‌یابد که دلیل آن را می‌توان ناشی از تشدید عمل آبرفت به‌واسطه‌ی حضور نانوسیلیس دانست. همچنین نانوسیلیس به‌دلیل کاهش تخلخل در بتن و متراکم‌تر شدن ساختار بتن، باعث افزایش دوام بتن می‌شود.[۵]

در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۰۵) نیز نمونه‌های بتنی حاوی فقط خاکستر بادی و نمونه‌های حاوی خاکستر بادی به همراه نانوسیلیس ساخته و میزان نفوذپذیری آنها در مقابل آب سنجیده شد و نتیجه گرفته شد که در حدود ۷۰٪ محصولات آبرفت، ژل سیلیکات کلسیم هیدراته است، که قطر متوسط آن تقریباً ۱۰ نانومتر است. بنابراین ذرات نانوسیلیس می‌توانند فضای خالی موجود در ساختار ژل را پرکنند و ماتریس متراکم‌تری ایجاد کنند که مانع از نفوذپذیری بتن می‌شود.[۶]

همان‌طورکه مشاهده می‌شود، بیشتر مطالعات پیشین بر روی بتن متعارف انجام شده است، که با توجه به مقدار ریزدانه‌ی بیشتر مصالح خاک ـ سیمان نسبت به بتن (اصولاً استفاده از مصالح عبوری از الک نمره‌ی ۲۰۰ در بتن مردود است) و همچنین عیار سیمان کمتر آن (حدود ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب)، رفتار آن کاملاً متفاوت با بتن به نظر می‌رسد، زیرا ذرات ریزدانه نیز سطح ویژه‌ی نسبتاً قابل توجهی دارند که در اندرکنش با نانوسیلیس رفتارشان کمتر بررسی شده است. بنابراین، رفتار ماتریس نانوسیلیس ـ خاک ـ سیمان بسیار پیچیده است و این پیچیدگی بیشتر ناشی از عوامل ناشناخته‌ی مؤثر این نوع از مصالح است و بدین ترتیب این مسئله با آزمایش‌های متفاوت باید بررسی شود، تا پارامترهای مؤثر در رفتار مصالح به نحو

مطلوبی به‌دست آیند. لذا در نوشتار حاضر سعی بر این شده است تا پارامترهای مختلف تأثیرگذار در تراکم و همچنین مقاومت فشاری و نفوذپذیری این طرح اختلاط، از جمله: خصوصیات خود مصالح، مانند: نوع ریزدانه‌ی مصرفی مصالح خاک و همچنین خصوصیات نانوسیلیس، شامل: نوع و مقدار آن در حالات مختلف بررسی شوند.

۲. دستگاه، مصالح و روش انجام آزمایش

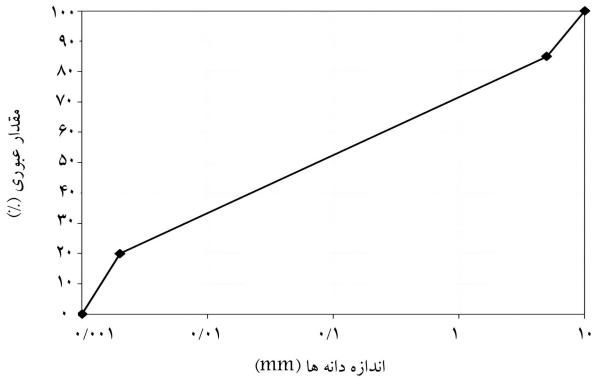
۱.۲. مصالح

۱.۱.۲. خاک

در پژوهش حاضر، از یک نوع دانه‌بندی خاک مطابق استاندارد مورد قبول برای تهیه‌ی خاک ـ سیمان،[۲] مطابق شکل ۱ استفاده شده است که دانه‌بندی دست‌ساز موردنظر، حاوی حدود ۲۰٪ خاک عبوری از الک ۲۰۰ است که میزان نسبتاً قابل توجهی است. به‌منظور اینکه اثر نوع ریزدانه‌ی مصرفی (به عبارت دیگر سطح ویژه‌ی ریزدانه) نیز آزمایش شود، مصالح عبوری از الک ۲۰۰ برای این دانه‌بندی در ۳ حالت مختلف از ۳ کانی متفاوت سیلت غیرخمیری، کائولینیت و بنتونیت انتخاب شده بودند که هرکدام سطح ویژه‌ی مخصوص به خود را داشتند و بدین ترتیب عملاً ۳ ترکیب در طرح اختلاط خاک ـ سیمان بررسی شد. در جدول ۱، مشخصات دانه‌بندی و در جدول ۲، نتایج آزمایش روش جذب سطحی (BET) برای به‌دست آوردن سطح ویژه‌ی ریزدانه‌های استفاده شده ارائه شده است.

۲.۱.۲. سیمان پرتلند

در آزمایش‌های انجام شده از سیمان پرتلند نوع II مطابق استاندارد ASTMC۱۵۰ استفاده شده است که از کارخانه‌ی سیمان تهران با وزن مخصوص ۳٫۱ گرم بر سانتی‌مترمکعب تهیه شده بود. لازم به ذکر است که سیمان پرتلند، مقاومت خوبی در مقابل حمله‌ی سولفاتی دارد و گرمای آبرفت مناسبی تولید می‌کند. در شکل ۲، نمودار دانه‌بندی سیمان مذکور و در جدول ۳، میزان ترکیب‌های شیمیایی آن نشان داده شده است.



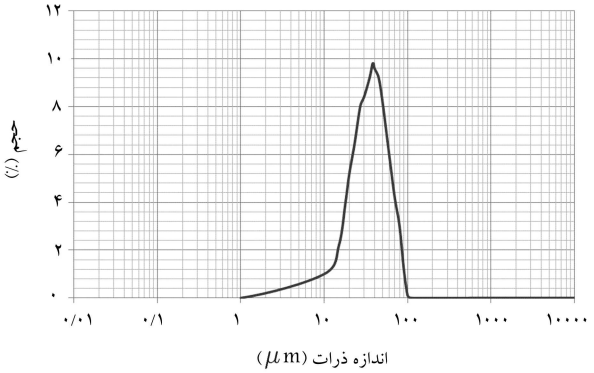
شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مورد استفاده در آزمایش.

جدول ۱. طبقه‌بندی خاک و مشخصات فیزیکی مصالح ماسه‌یی.

نوع مصالح	C_u	C_c	توصیف خاک طبق یونیفاید	توصیف خاک طبق آشتو
ماسه‌ی گردگوشه‌ی مخلوط با رس	۱۲۰	۱۷	SC	A – ۲ – ۴

جدول ۲. نتایج آزمایش BET.

نوع ریزدانه	سیلت	کائولینیت	بنتونیت
سطح ویژه (m^2/g)	۱ ± ۴	۴ ± ۱۷	۳ ± ۶۷



شکل ۲. توزیع دانه‌بندی سیمان مورد آزمایش.

۳.۱.۲. آب

آب در خاک - سیمان به‌منظور کمک به رسیدن به بیشینه‌ی تراکم و جهت آبرفت سیمان پرتلند ضروری است. آب قابل آشامیدن یا دیگر آب‌های نسبتاً تمیز که عاری از مواد مضری، مانند: املاح قلیایی یا اسیدها و یا املاح آلی باشد، می‌تواند در خاک سیمان استفاده شود، تا باعث فعل و انفعالات شیمیایی با سیمانی که در حال سخت شدن است، شود.

۴.۱.۲. محصولات سیلیسی

در پروژه‌ی حاضر از ۳ نوع محصول سیلیسی، شامل: میکروسیلیس و ۲ نوع نانوسیلیس آئروسل با ۲ سطح ویژه‌ی متفاوت محصول شرکت دگوسای آلمان استفاده شده است. این محصولات در ۳ نوع درصد مختلف (۰٫۲۵، ۰٫۵ و ۰٫۷۵ درصد نسبت به وزن سیمان خشک) به مخلوط خاک سیمان افزوده شدند که خصوصیات آنها در جدول ۴ ارائه شده است.

۲.۲. روش انجام آزمایش

۱.۲.۲. آزمایش تراکم

شاید مهم‌ترین خصوصیات خاک ـ سیمان، میزان تراکم آن باشد؛ زیرا مهم‌ترین خواص آن، یعنی: مقاومت، نفوذپذیری و دوام مخلوط را کنترل می‌کند. آزمایش تراکم خاک (که به آزمایش پرکتور نیز معروف است) مطابق استاندارد ASTM D ۶۹۸ برای مصالح خاک انجام می‌شود و هدف آن به‌دست آوردن ۲ مقدار چگالی خشک بیشینه و مقدار رطوبت بهینه‌ی خاک است. اساس آزمایش مذکور بر مبنای این تئوری است که با افزودن آب به خاک، عمل تراکم بهبود می‌یابد، اما این افزایش یک حد معینی دارد و پس از آن کاهش در مقدار چگالی مشاهده می‌شود. به مقدار رطوبتی که در آن چگالی خشک بیشینه به‌دست می‌آید، رطوبت بهینه می‌گویند. براساس آزمایش پرکتور، خاک با مقدار آب مشخص شده در ۳ لایه که هر لایه با ۵۶ ضربه‌ی چکش فلزی با وزن ۲۴٫۴ نیوتن که از ارتفاع ۳۰ سانتی‌متری رها می‌شود، متراکم و نتیجه‌ی آن به‌صورت یک نقطه‌ی چگالی در برابر رطوبت رسم می‌شود. این آزمایش دست‌کم ۵ دفعه انجام می‌شود و مقادیر افزایش آب در مراحل مختلف باید در حدودی باشد که درصدهای رطوبت کمتر و بیشتر از رطوبت بهینه را شامل شود. همچنین برای مخلوط خاک ـ سیمان نیز مقدار چگالی خشک بیشینه

جدول ۳. ویژگی‌های شیمیایی سیمان مورد آزمایش.

ترکیب شیمیایی	Na_2O	SO_3	MgO	K_2O	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2
مقدار (٪)	۰٫۱۲	۳٫۳۴	۲٫۲	۰٫۷۸	۰٫۶۳	۳٫۳۳	۵٫۲۱	۲۰٫۸

جدول ۴. ویژگی‌های محصولات سیلیسی مورد آزمایش.

نوع	قطر متوسط ذرات (نانومتر)	درصد خلوص سیلیس بی‌شکل	سطح ویژه متوسط ذرات (مترمربع بر گرم)	چگالی (گرم بر سانتی‌مترمکعب)
میکروسیلیس	۶۰۰	٪۹۰ <	۲۱	۰٫۲۱
نانوسیلیس ۲۰۰	۱۵	٪۹۹٫۸ <	۲۰۰	۰٫۱۵ <
نانوسیلیس ۳۸۰	۸	٪۹۹٫۸ <	۳۸۰	۰/۱۵ <

و رطوبت بهینه مطابق استاندارد ASTM D۵۵۸ تعیین می‌شود. بر طبق آزمایش مذکور، ابتدا سیمان و خاک به‌صورت مخلوط همگنی درست می‌شود و مقدار آب را به آن می‌افزایند. سپس مخلوط به‌دست آمده در ۳ لایه و هر لایه با ۲۵ ضربه توسط یک وزنه‌ی ۲٫۵ کیلوگرمی متراکم می‌شوند. دقیقاً همین روش برای یافتن پارامترهای تراکم ماتریس نانوسیلیس ـ خاک ـ سیمان نیز استفاده شده است.

۲.۲.۲. آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده

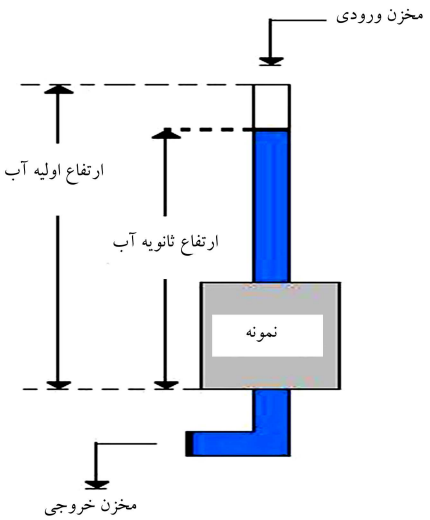
مقاومت فشاری نیز یکی از خصوصیات مهم خاک ـ سیمان است، که مطابق استاندارد ASTM D ۱۶۳۳ به‌دست می‌آید. آزمون مذکور، درجه‌یی از واکنش مخلوط آب ـ سیمان ـ خاک و سرعت سخت شدن آنها را نشان می‌دهد. مقاومت فشاری، معیاری جهت تعیین کمینه‌ی مقدار سیمان موردنیاز در نسبت‌بندی خاک ـ سیمان است، زیرا مقاومت رابطه‌ی مستقیم با چگالی دارد و این خصوصیت در روندی مشابه برای چگالی براساس درجه‌ی تراکم و مقدار آب تأثیر می‌گذارد. برای این منظور، ابتدا نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM D ۱۶۳۲ در قالب‌هایی با قطر ۷۱ میلی‌متر و ارتفاع ۲۲۹ میلی‌متر تهیه و عمل‌آوری می‌شوند. برای عمل‌آوری، نمونه‌ها ۱۲ ساعت در اتاق بخار قرارگرفتند و باید توجه داشت که نمونه‌ها در مدت زمان عمل‌آوری تعریق نکنند و از آنها آب نچکد، لذا نمونه‌ها داخل نایلون آب‌بند قرار می‌گیرند. سپس آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده، بر روی نمونه‌های عمل‌آوری‌شده در مدت زمان‌های ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه توسط دستگاه مقاومت فشاری هیدرولیکی انجام می‌گیرد، بدین ترتیب که بار با نرخ ۱۴۰ کیلوپاسکال بر ثانیه به نمونه‌ها وارد می‌شود و سپس مقاومت فشاری نهایی نمونه‌ها به‌دست می‌آید. یادآوری می‌شود که مقاومت نهایی نمونه از رابطه‌ی ۱ به‌دست می‌آید:

$$q_u = \frac{P_u}{A} \qquad (۱)$$

که در آن، P_u مقدار بار نهایی وارد شده بر نمونه (ظرفیت باربری) بر حسب نیوتن و A مساحت سطح مقطع نمونه بر حسب میلی‌مترمربع است.

۳.۲.۲. آزمایش نفوذپذیری آب

بنا به تعریف، نفوذپذیری به نرخ عبور آب از مصالح اطلاق می‌شود که برای مصالح خاک ـ سیمان با توجه به نفوذپذیری پایین آن از نفوذپذیرسنج با اختلاف ارتفاع آبی متغیر که عموماً برای خاک‌های ریزدانه به‌کار می‌رود، استفاده می‌شود. بر طبق آزمایش مذکور، صافی درشتی در ابتدا و انتهای لوله‌ی نمونه‌گیر گذاشته می‌شود و در قسمت پایین نمونه، مخزن آب قرار دارد. به قسمت بالای نمونه، لوله‌ی شیشه‌یی با سطح مقطع معین نصب و این لوله مملو از آب می‌شود. ضمن نفوذ آب در نمونه



شکل ۳. شکل شماتیک دستگاه هد متغیر.

در زمان‌های مختلف، ارتفاع آب در لوله‌ی شیشه‌یی اندازه‌گیری می‌شود. این ارتفاع در هر لحظه عبارت است از: اختلاف ارتفاع سطح آب در لوله‌ی شیشه‌یی نسبت به سطح آب مخزن خروجی نمونه که پس از اندازه‌گیری مداوم جریان مقدار ضریب نفوذپذیری (برحسب متر بر ثانیه)، از رابطه‌ی ۲ به‌دست می‌آید:

$$k = \frac{a}{A} \times \frac{L}{\Delta t} \times \ln \frac{h_1}{h_2} \qquad (۲)$$

که در آن، a سطح مقطع لوله‌ی ورودی بر حسب سانتی‌متر مربع، A سطح مقطع نمونه برحسب سانتی‌مترمربع، L ارتفاع نمونه بر حسب سانتی‌متر و Δt زمان نهایی افتادن هد است. در شکل ۳، شکل شماتیک دستگاه نمایش داده شده است.

۳. بحث و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

۱.۳. رویه و روند کلی آزمایش‌ها

با توجه به طرح‌های اختلاط مختلف، آزمایش‌ها در ۳ حالت کلی: ۱. آزمایش‌های تراکم، مقاومت فشاری و نفوذپذیری بر روی مصالح نانوسیلیس ـ خاک ـ سیمان با ریزدانه‌ی سیلتی؛ ۲. آزمایش‌های تراکم، مقاومت فشاری و نفوذپذیری بر روی مصالح نانوسیلیس ـ خاک ـ سیمان با ریزدانه‌ی کائولینیتی؛ و ۳. آزمایش‌های

تراکم، مقاومت فشاری و نفوذپذیری بر روی مصالح نانوسیلیس ـ خاک ـ سیمان با ریزدانه‌ی بنتونیتی انجام شده است. همچنین جهت تعیین تأثیر افزودن نانوسیلیس، آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های کنترلی (مخلوط خاک ـ سیمان بدون نانوسیلیس) نیز انجام شده است.

لازم به ذکر است که هر آزمایش در بخش مربوط به خود (شامل: آزمایش تراکم نمونه‌ها، آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها و آزمایش نفوذپذیری نمونه‌ها) و با ۳ زیربخش (شامل: تأثیر نوع ریزدانه‌ی خاک، تأثیر نوع محصول سیلیسی و تأثیر میزان محصول سیلیسی) به‌طور جداگانه بحث و بررسی می‌شود. به‌منظور مقایسه‌ی بهتر تحلیل نتایج، دانه‌بندی‌ها و طرح‌های اختلاط مورداستفاده در هر زیربخش یکسان خواهد بود. در ادامه، نقش هر یک از عوامل تأثیرگذار: نوع ریزدانه‌ی مصرفی، مقدار و نوع محصولات سیلیسی در زمان‌های عمل‌آوری مختلف بر روی خواص مکانیکی و فیزیکی مصالح نانوسیلیس ـ خاک ـ سیمان بحث و بررسی خواهند شد.

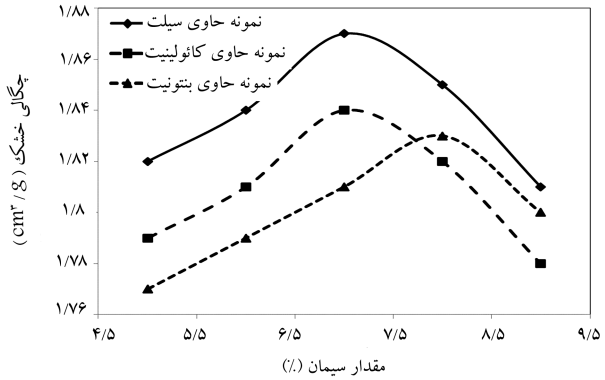
۲.۳. آزمایش تراکم نمونه‌ها

۱.۲.۳. تأثیر نوع ریزدانه‌ی خاک مصرفی

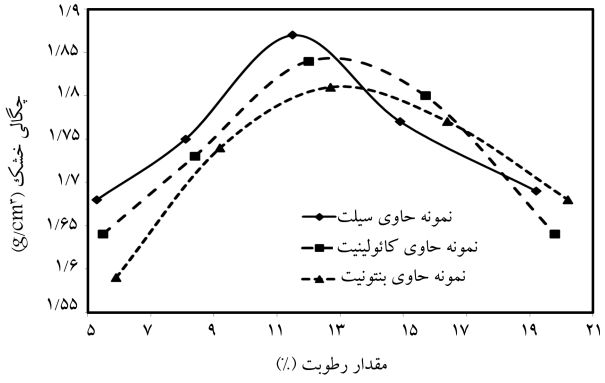
برای اینکه تأثیر نوع ریزدانه‌ی مصرفی در تراکم مصالح نانوسیلیس ـ خاک ـ سیمان بررسی شود، باید از نمونه‌های یک دانه‌بندی خاص ولی با کانی‌های متفاوت بخش ریزدانه با یک درصد مشخص محصول سیلیسی استفاده شود. برای این منظور، ۳ نمونه با دانه‌بندی شکل ۱ که در همه‌ی آنها از ۰٫۵٪ نانوسیلیس ۲۰۰ در طرح اختلاط استفاده شده و بخش ریزدانه‌ی (عبوری از الک ۲۰۰) آنها را مصالح با کانی‌های مختلف سیلت، کائولینیت و بنتونیت تشکیل داده است، تحت آزمایش‌های تراکم قرار گرفتند تا مقدار چگالی خشک بیشینه و مقدار رطوبت بهینه برای نمونه‌های مذکور تعیین شود. لازم به ذکر است در زیربخش‌های تأثیر نوع ریزدانه‌ی خاک مصرفی در آزمایش‌های مقاومت فشاری و نفوذپذیری نیز از همین دانه‌بندی‌ها استفاده شده است.

مؤسسه‌ی USARMY برای دانه‌بندی ذکر شده، مقدار ۲ ± ۷ درصد سیمان (براساس وزن خاک خشک) را جهت تخمین اولیه‌ی طرح اختلاط پیشنهاد می‌کند و هر درصدی از سیمان که چگالی خشک بیشینه را بدهد، به‌عنوان طرح اختلاط بهینه مدنظر قرار می‌دهد. نتایج آزمایش مقدار سیمان بهینه در شکل ۴ نشان داده شده است و همان‌طورکه مشاهده می‌شود، ۲ نمونه حاوی بخش ریزدانه‌ی سیلتی و کائولینیتی در ۷٪ و نمونه‌ی حاوی بخش ریزدانه‌ی بنتونیتی در ۸٪ سیمان به مقدار چگالی خشک بیشینه‌ی خود رسیده‌اند. دلیل این مطلب را می‌توان به حالت خمیری بالای بنتونیت نسبت داد، زیرا این نوع کانی رسی سطح ویژه‌ی بیشتری نسبت به دو کانی دیگر دارد که جذب آب بیشتری برای رسیدن به تراکم بیشینه می‌طلبد و برای این منظور، مقدار سیمان بیشتری برای پرکردن فضاهای خالی ایجاد شده توسط آب اضافی مذکور را نیاز دارد. همچنین بنتونیت شکل‌پذیری بسیار بالایی دارد که انرژی تراکمی را مستهلک می‌کند و بخشی از سیمان، صرف کاهش شکل‌پذیری و هدررفت انرژی آن می‌شود که این موضوع با نتایج سایر پژوهشگران نیز مطابقت دارد.[۷و۸]

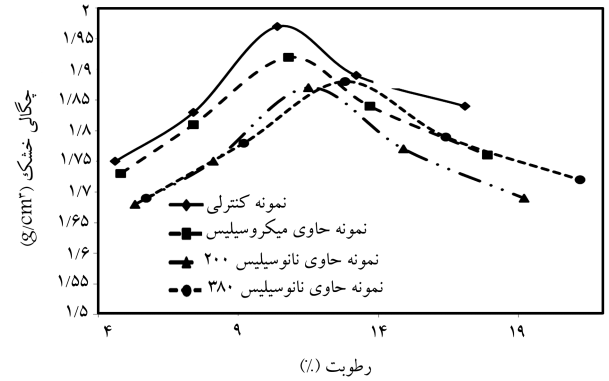
شکل ۵، پارامترهای تراکمی هر ۳ نمونه را هنگامی که با ۷٪ سیمان آمیخته شده‌اند، نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور، نمونه‌ی حاوی بنتونیت نسبت به نمونه‌ی حاوی سیلت حدود ۳٫۵٪ چگالی خشک بیشینه‌ی کمتر و ۲٪ رطوبت بهینه‌ی بیشتری دارد که دلیل این امر را نیز می‌توان به آگلوماسیون بیشتر ذرات بنتونیت به علت سطح ویژه‌ی بیشترش نسبت به سیلت در اثر اختلاط با سیمان و آب مرتبط دانست که سبب کاهش چگالی مصالح می‌شوند که منطبق بر نتایج سایر پژوهشگران است.[۷-۹]



شکل ۴. تأثیر مقدار سیمان در چگالی بیشینه ـ رطوبت بهینه‌ی مصالح با نوع ریزدانه‌های مختلف.



شکل ۵. تأثیر نوع ریزدانه در چگالی خشک و رطوبت بهینه.



شکل ۶. تأثیر نوع محصول سیلیسی در چگالی خشک ـ رطوبت بهینه.

۲.۲.۳. تأثیر نوع محصول سیلیسی

برای اینکه اثر نوع محصول سیلیسی در تراکم مصالح مختلف بررسی شود، باید بر روی یک دانه‌بندی خاص، انواع مختلف محصولات سیلیسی (میکروسیلیس و نانوسیلیس‌ها) با میزان یکسان بررسی شود. برای این منظور در طرح اختلاط دانه‌بندی شکل ۱ که بخش ریزدانه‌ی آن را سیلت تشکیل می‌داد و حاوی ۰٫۵٪ از محصولات مختلف میکروسیلیس، نانوسیلیس ۲۰۰ و نانوسیلیس ۳۸۰ بود، به‌همراه خاک ـ سیمان بدون افزودن نانوسیلیس از دانه‌بندی مذکور (نمونه‌ی کنترلی) تحت آزمایش تراکم قرار گرفتند. لازم به ذکر است در زیربخش‌های تأثیر نوع محصولات سیلیسی در آزمایش‌های مقاومت فشاری و نفوذپذیری نیز از همین دانه‌بندی‌های استفاده شده است که نتایج آنها در شکل ۶ ارائه شده است. همان‌طورکه مشاهده

می‌شود، تمامی مصالح ترکیبی با محصولات سیلیسی نسبت به نمونه‌ی کنترلی کاهش محسوسی در چگالی خشک بیشینه و افزایش در مقدار رطوبت بهینه از خود نشان می‌دهند. بهمنی و همکاران،[۷] دلیل این مطلب را این‌گونه بیان کردند که اولاً ژل سیلیکات ـ کلسیم ـ هیدراته در حضور محصولات سیلیسی با سرعت بیشتری تشکیل می‌شود که تراکم‌پذیری ماتریس را به علت استهلاک انرژی تراکمی مختل می‌کند و کاهش می‌دهد، و ثانیاً محصولات سیلیسی ابعاد بسیار بسیار کوچک‌تری نسبت به سنگ‌دانه‌ها دارند و در نتیجه فضاهای خالی بین ذرات را پر می‌کنند که سبب افزایش اصطکاک بین دانه‌یی می‌شود و در هم فرورفتن دانه‌ها را مختل می‌کند که تمامی نکات فوق موجب کاهش چگالی نانوسیلیس ـ خاک ـ سیمان می‌شوند.

همچنین به‌دلیل اینکه محصولات سیلیسی سطح ویژه‌ی بیشتری دارند، میل واکنش پذیری بیشتری با آب دارند که سبب افزایش میزان رطوبت بهینه نیز می‌شود. با توجه به توضیحات ذکر شده و شکل ۶ مشاهده می‌شود که نمونه‌ی کنترلی از نمونه‌ی حاوی میکروسیلیس، نانوسیلیس ۲۰۰ و نانوسیلیس ۳۸۰ به ترتیب ۳٫۵٪، ۶٫۵٪ و ۶٪ چگالی خشک بیشتر و ۰٫۵٪، ۲٫۵٪ و ۳٪ رطوبت بهینه‌ی کمتری دارد.

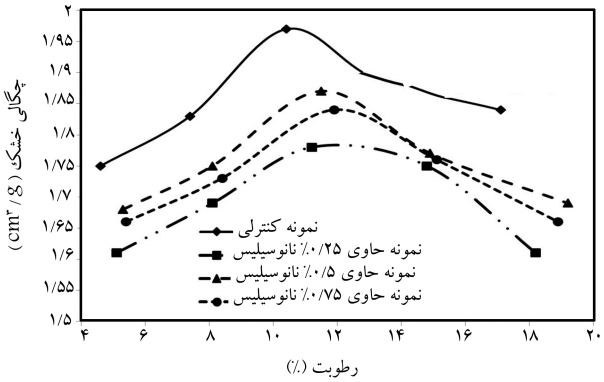
۳.۲.۳. تأثیر مقدار محصول سیلیسی

در بخش کنونی نیز برای اینکه بتوان به تأثیر مقدار محصول توجه کرد، باید یک نوع محصول با مقادیر مختلف در یک دانه‌بندی خاص استفاده شود؛ لذا ۳ طرح اختلاط از همان دانه‌بندی شکل ۱ حاوی بخش ریزدانه‌ی سیلتی و ۳ نوع درصد مختلف ۰٫۲۵، ۰٫۵، ۰٫۷۵ نانوسیلیس ۲۰۰، به‌همراه نمونه‌ی کنترلی تحت آزمایش تراکم قرار گرفتند. لازم به ذکر است در زیربخش‌های تأثیر مقدار محصول سیلیسی در آزمایش‌های مقاومت فشاری و نفوذپذیری نیز از همان دانه‌بندی‌های ذکر شده استفاده شده است.

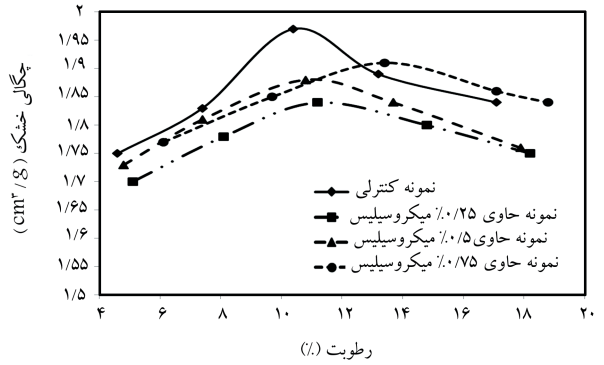
در شکل ۷، اثر افزودن درصدهای مختلف نانوسیلیس ۲۰۰ در مخلوط نانوسیلیس ـ خاک ـ سیمان نشان داده شده است که مطابق آن نمونه‌ها در ترکیب با مقادیر ۰٫۲۵، ۰٫۵ و ۰٫۷۵ درصد نانوسیلیس به‌ترتیب ۱٫۷۶، ۱٫۸۵ و ۱٫۸۲ گرم بر سانتی‌مترمکعب چگالی خشک بیشینه و رطوبت بهینه‌ی ۱۲٫۵، ۱۱ و ۱۲٫۲ درصد دارند. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که با افزایش مقدار نانوذرات از حد معینی به بعد، به‌دلیل انباشتگی و آگلومراسیون خود نانوذرات، تراکم‌پذیری ماتریس کاهش می‌یابد و همچنین میزان بیشتری از آنها در آگلومراسیون مصرف می‌شود. بر طبق نتایج آزمایش‌های ریزساختار فرکل و هلمگ،[۱۰] آگلومراسیون نانوذرات سبب افزایش ضخامت لایه‌های باریک و مویی بین دانه‌ها می‌شود که نتیجه‌ی آن کاهش چگالی است.

با توجه به مقایسه‌ی دو شکل ۶ و ۷، نکته‌ی قابل توجه اینجاست که نوع محصول سیلیسی از مقدار آن، آثار بیشتری در پارامترهای رطوبت و تراکم دارد که دلیل آن را می‌توان به تغییرات ریزساختاری مخلوط‌ها نسبت داد، زیرا هر چه سطح ویژه افزایش می‌یابد، میزان واکنش پذیری محصولات نیز افزایش می‌یابد.

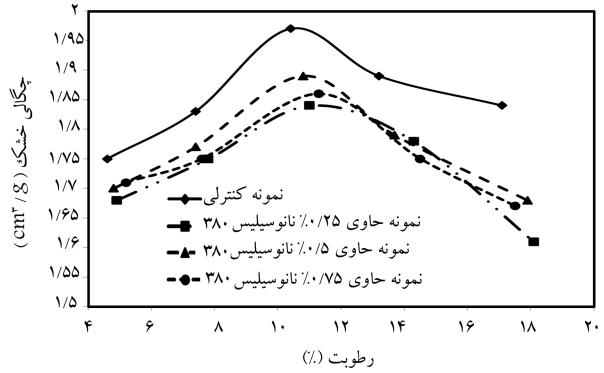
با مراجعه‌ی مجدد به شکل ۷ مشاهده می‌شود که مقدار بهینه‌ی افزودنی سیلیسی برای وقتی که از نانوسیلیس ۲۰۰ در مخلوط اضافه می‌شود، حدود ۰٫۵٪ است؛ یعنی لزوماً با افزایش مقدار نانوذرات، شاهد کاهش چگالی خشک نخواهیم بود. لذا برای اینکه مقدار بهینه‌ی محصولات سیلیسی در کلیه‌ی طرح‌های اختلاط مشخص شوند، آزمایش‌های تراکم‌پذیری برای میکروسیلیس و نانوسیلیس ۳۸۰ نیز انجام شده است که نتایج آن در شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق شکل مذکور، مقدار درصد بهینه‌ی میکروسیلیس در مخلوط ۰٫۷۵ درصد وزنی و نانوسیلیس ۳۸۰،



شکل ۷. تأثیر مقدار نانوسیلیس ۲۰۰ در چگالی خشک و رطوبت بهینه.



الف) منحنی های رطوبت -تراکم برای میکروسیلیس؛



ب) منحنی های رطوبت - تراکم برای نانوسیلیس ۳۸۰.

شکل ۸. تأثیر مقدار میکروسیلیس و نانوسیلیس ۳۸۰ در چگالی خشک و رطوبت بهینه.

همانند نانوسیلیس ۲۰۰ برابر با ۰٫۵ درصد وزنی نسبت به سیمان است که دلیل آن را می‌توان به اثر پراکندگی، مطابق مطالبی که پژوهشگران مختلف ارائه کرده‌اند، ارتباط داد.[۸-۱۰] بر طبق این اثر با ریزتر شدن نانوذرات در مخلوط به‌جای اینکه آنها با سیمان و آب واکنش دهند، در سطح‌شان به یکدیگر می‌چسبند و تشکیل کلوخه‌های نانومتری می‌دهند و در نتیجه در مخلوط پراکنده نمی‌شوند و وارد مرحله‌ی واکنش با سیمان نمی‌شوند.

نکته‌ی دیگری که از مقایسه‌ی منحنی‌های تراکمی مخلوط‌های حاوی نانوسیلیس و میکروسیلیس به‌دست می‌آید، این است که مخلوط حاوی میکروسیلیس (شکل ۸الف) حالت ناقوسی پهن دارد و مخلوط‌های حاوی نانوسیلیس حالت ناقوسی تیزتر دارند که بیانگر حساسیت بیشتر مخلوط‌های حاوی نانوسیلیس نسبت به میزان رطوبت

هستند که دلیل آن را می‌توان میل شدیدتر واکنش نانوسیلیس‌ها با آب عنوان کرد.

۳.۳. آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها

۱.۳.۳. تأثیر نوع ریزدانه‌ی خاک مصرفی

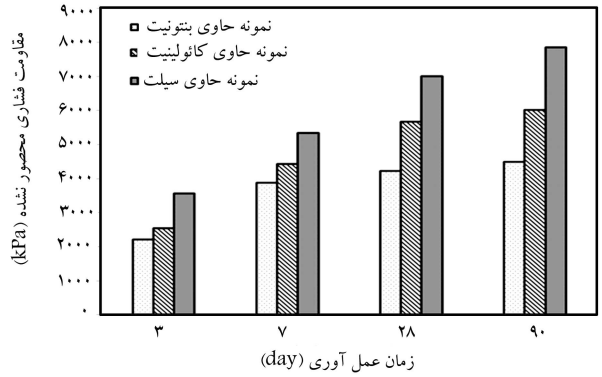
مروری مفهومی به ادبیات فنی نشان می‌دهد که تلاش پژوهشگران در مطالعات پیشین خویش، بیشتر بر روی تأثیر نانوذرات در پارامترهای مقاومتی مصالح بتن متعارف معطوف بوده است.[۱۱] برای مثال در مطالعات متعددی بر روی بتن با افزودن نانوسیلیس، آزمایش‌های مقاومتی و دوام‌انجام شده است،[۱۲-۱۴] که همان‌طور که قبلاً ذکر شد، این مصالح با خاک سیمان تفاوت بسیار زیادی دارند.

در پژوهش حاضر سعی شده است تا علاوه بر درنظرگرفتن مصالح ماسه به عنوان اسکلت اصلی مصالح خاک ـ سیمان، نقش رس مخلوط در آن نیز به عنوان جزء جدایی‌ناپذیر اغلب خاک‌های مخلوط موجود در طبیعت نیز بررسی شود، زیرا مطابق آیین‌نامه‌ی ACI۱۳۶، مصرف مصالح عبوری از الک ۲۰۰ در بتن متعارف مجاز نیست.

برای این منظور از همان ۳ طرح اختلاط مذکور در بخش ۱.۲.۳ در آزمایش‌های مقاومت فشاری استفاده شده است، تا بتوان نقش نوع ریزدانه را به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای مصالح خاک ـ سیمان تعیین کرد، که نتایج آن در شکل ۹ مشاهده می‌شود.

مطابق شکل مذکور، عامل زمان نقش مهمی در افزایش مقاومت دارد و نرخ رشد مقاومت فشاری ۷ روزه در مخلوط حاوی بنتونیت نسبت به مقاومت ۲۸ روزه‌اش در مقایسه با سایر طرح‌های اختلاط بیشتر است که دلیل آن را می‌توان به سطح ویژه‌ی بالای بنتونیت نسبت به دیگر کانی‌های رسی نسبت داد. همچنین مشاهده می‌شود که مقاومت ۹۰ روزه‌ی طرح اختلاط مذکور فقط ۳۵٪ از مقاومت ۷ روزه‌اش بیشتر است، در حالی که در مخلوط حاوی سیلت، قیاس ذکرشده به حدود ۱۱۵٪ خواهد رسید. زیرا با افزایش سطح ویژه، انرژی مصالح افزایش یافته است؛ که باعث سرعت بخشیدن به واکنش آبرفت می‌شود و از آنجا که این واکنش مقدمه‌یی بر واکنش پوزولانی است، به‌صورت خودکار به این واکنش در مخلوط نیز سرعت می‌بخشد، که اصطلاحاً سبب تولید خوشه‌های اضافی ژل سیلیکات کلسیم هیدراته در مخلوط می‌شود.

یادآوری این مطلب خالی از لطف نیست که روند واکنش‌های پوزولانیک در خاک‌های حاوی رس به این صورت است که ترکیب اکسیدکلسیم موجود در سیمان و هیدروکسید موجود در آب با آلومینات درکائولینیت و سیلیکات در بنتونیت به مدت



شکل ۹. مقاومت فشاری محصور نشده‌ی مصالح نانوسیلیس ـ خاک ـ سیمان به‌صورت تابعی از زمان عمل‌آوری و نوع ریزدانه‌ی مصرفی.

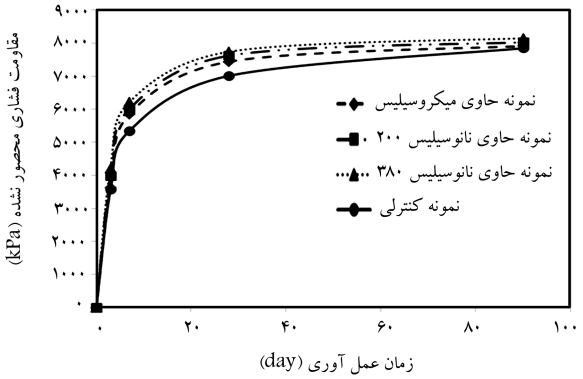
زمان نیاز دارد و پس از انجام واکنش مذکور، باند چسبنده‌ی C-S-H (سیلیکات کلسیم هیدراته) در مخلوط بنتونیت‌دار و C-A-H (آلومینات کلسیم هیدراته) در مخلوط کائولینیت‌دار تولید می‌شود که سبب افزایش مقاومت مصالح می‌شود. ضمناً گیرایش دانه‌ها در ناحیه‌ی انتقالی نیز در داخل همین ژل‌های چسباننده صورت می‌گیرد که با آزمایش‌های ریزساختاری در مطالعات مختلف مطلب ذکر شده نشان داده شده است.[۸و۹]

نتایج پژوهشگران نشان می‌دهد که مصالح ریزدانه‌ی غیرخمیری به‌دلیل گیرایش قوی‌تر در ناحیه‌ی انتقالی، مقاومت بسیار بیشتری نسبت به مصالح خمیری کسب می‌کنند؛ زیرا تولید ژل چسباننده با افزایش بخش رسی افزایش می‌یابد، اما به‌دلیل آگلومراسیون آنها از بازده‌ی نواحی انتقالی که مهم‌ترین بخش اندرکنشی میکرومکانیکال مصالح پایه‌ی سیمانی هستند، می‌کاهد.[۷-۹]

۲.۳.۳. تأثیر نوع محصول سیلیسی

با وجود مطالعات متعددی که پیرامون تأثیر نانوسیلیس‌ها در خواص مواد پایه‌ی سیمانی انجام شده است، هنوز میزان تأثیرگذاری نانوسیلیس‌ها در خواص مواد پایه‌ی سیمانی مشخص نیست و نتایج متفاوت و گاه متناقض گزارش شده است. به‌عنوان مثال در پژوهشی در سال ۲۰۱۱،[۱۵] مشاهده شده است که در نسبت آب به مواد سیمانی برابر جایگزینی ۳٪ سیمان با نانوسیلیس، افزایش ۱۰۵ درصدی مقاومت فشاری ملات در سن ۲۸ روزه‌ی بتن ایجاد شده است، در حالی که در پژوهش دیگری (۲۰۰۴)،[۶] گزارش شده است که جایگزینی ۳٪ مواد سیمانی با نانوسیلیس پودری با اندازه‌ی میانگین ذرات ۱۵ نانومتر، سبب کاهش مقاومت ۲۸ روزه‌ی بتن به اندازه‌ی ۸٪ در نسبت آب به مواد سیمانی برابر شده است که به نظر می‌رسد تفاوت در نوع و سطح ویژه‌ی نانوسیلیس‌های استفاده شده در مطالعات مواد پایه‌ی سیمانی، منشأ تفاوت در رفتار آنها باشد.

با توجه به توضیحات مقدماتی ذکر شده، برای یافتن تأثیر نوع نانوذرات در پارامترهای مقاومتی خاک ـ سیمان مخلوط شده با محصولات سیلیسی در جدول ۴، همان ۳ طرح اختلاط مذکور در بخش ۲.۲.۳ تحت آزمایش‌های فشاری محصور نشده قرارگرفتند که منحنی روند کسب مقاومت هر ۳ نمونه به‌همراه نمونه‌ی کنترلی در شکل ۱۰ نشان داده شده است که مطابق آن با افزودن محصولات سیلیسی به مصالح خاک ـ سیمان، مقاومت مصالح خصوصاً در مدت عمل‌آوری ۷ روزه، رشد چشم‌گیری پیدا کرده است، به‌طوری که افزودن میکروسیلیس، نانوسیلیس ۲۰۰ و نانوسیلیس ۳۸۰ به‌ترتیب افزایش مقاومتی حدود ۱۴، ۱۹ و ۲۲ درصد در مصالح حاوی آنها نسبت به مصالح کنترلی ایجاد کرده‌اند، که با رسیدن به زمان عمل‌آوری ۹۰ روزه، افزایش مقاومت‌ها به‌ترتیب به ۲، ۳ و ۵/۵ درصد رسیده است.



شکل ۱۰. منحنی روند کسب مقاومت برای انواع مختلف محصولات سیلیسی.

باتوجه به مطالب ذکر شده مشاهده می‌شود که افزودن نانوسیلیس به مصالح خاک ـ سیمان، فقط مقاومت آنها را در زمان‌های ۷ تا ۲۸ روز افزایش مطلوبی می‌دهد؛ بدین دلیل که واکنش‌های پوزولانیک غالباً در بازه‌ی زمانی مذکور اتفاق می‌افتند و افزودن آنها فقط به افزایش سرعت واکنش‌های پوزولانیک کمک می‌کند و در طولانی‌مدت (۹۰ روز)، تأثیر شگرفی در مقاومت مخلوط نمی‌گذارند. لذا چون روند افزایش مقاومت در سنین پایین با افزودن نانوسیلیس رشد چشم‌گیری پیدا می‌کند، استفاده از نانوسیلیس در ترکیب با خاک ـ سیمان در موارد اجرایی موردنیاز، نظیر ساخت المان آب‌بند می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

۳.۳.۳. تأثیر مقدار محصول سیلیسی

برای مقایسه‌ی تأثیر مقدار محصول سیلیسی مصرفی در مقاومت فشاری از ۳ طرح اختلاط ذکر شده در بخش ۳.۲.۳ استفاده شده است، که نتایج آن به همراه نمونه‌ی کنترلی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نکته‌ی جالب توجه اینجاست که مقاومت فشاری مخلوط حاوی ۰٫۵٪ نانوسیلیس ۲۰۰ از هر دو مخلوط دیگر بیشتر است که دلیل آن را می‌توان ارتباط مستقیم بین مقاومت فشاری و تراکم مصالح خاک ـ سیمان دانست، زیرا نانوسیلیس ۲۰۰ در محتوای ۰٫۵٪ به مقدار بهینه‌ی خود در مخلوط دست می‌یابد و چگالی خشک بیشینه دارد.

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، با توجه به اینکه خاک ـ سیمان ماهیت متفاوتی از بتن دارد، نمی‌توان انتظار داشت که لزوماً با افزایش مقدار نانوسیلیس، مقاومت فشاری مصالح خاک ـ سیمان نیز افزایش یابد، زیرا نانوسیلیس‌ها علاوه بر افزایش سرعت واکنش‌های آبرفت و پوزولانیک، نقش فیلر را نیز در بتن ایجاد می‌کنند و این در حالی است که نقش فیلر در خاک ـ سیمان، بر عهده‌ی ذرات عبوری از الک ۲۰۰ است. این مطلب در مطالعه‌ی انجام شده‌یی (۲۰۱۴) بر روی خاک رس با حالت خمیری پایین بهسازی شده با سیمان نیز به‌خوبی نشان داده شده است؛[۷] زیرا اصولاً طرح اختلاط مصالح مذکور نیز با هم تفاوت عمده دارد. بدین جهت وقتی که از مقدار بهینه در مخلوط استفاده می‌شود، در نتیجه میزان آب کمتری در مخلوط استفاده می‌شود که سبب کاهش حجم حفره‌های موجود در ماتریس می‌شود. بنابراین می‌توان دریافت که مصالح خاک ـ سیمان، بیشتر ماهیتی شبیه به خاک از خود نشان می‌دهند تا اینکه از خود ماهیتی شبیه به بتن نشان دهند.

۴.۳. آزمایش نفوذپذیری نمونه‌ها

۱.۴.۳. تأثیر نوع ریزدانه‌ی خاک مصرفی

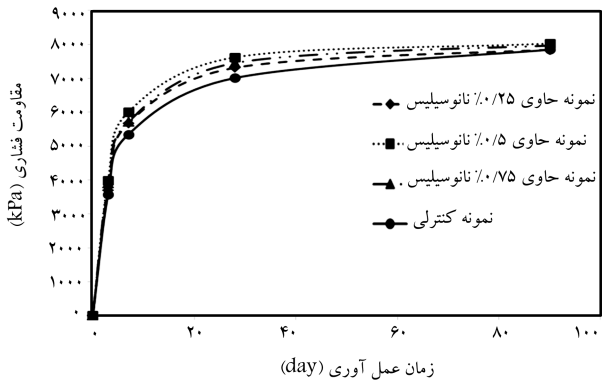
دوام یا پایایی محصولات پایه‌ی سیمانی، متناظر با سن یا عمر خدمت‌رسانی آنها در شرایط محیطی مشخص به‌شمار می‌آید. بدیهی است با تغییر شرایط محیطی حاکم، مفهوم دوام آنها تغییر می‌کند. طبق تعریف آیین‌نامه‌ی ACI۲۰۱، دوام محصولات حاوی سیمان پرتلند به توانایی آن برای مقابله با عوامل هوازدگی، تهاجم شیمیایی، سایش و یا هر فرایندی که به آسیب‌دیدگی می‌انجامد، گفته می‌شود. بنابراین، محصولی پایاست که تا حدود زیادی شکل اولیه و کیفیت و قابلیت خدمت‌رسانی خود را در شرایط محیطی حاکم حفظ کند. افزایش فزاینده‌ی هزینه‌های تعمیر و بازسازی سازه‌های آسیب دیده‌ی ناشی از تخریب مصالح مصرفی، بخش قابل توجهی از هزینه‌ی ساخت سازه‌ها را به خود اختصاص می‌دهد. برآورد می‌شود که در کشورهای پیشرفته‌ی صنعتی، بیش از ۴۰٪ کل منابع مالی صنعت ساختمان در بخش تعمیر و نگهداری سازه‌های موجود و کمتر از ۶۰٪ آن برای ایجاد سازه‌های جدید هزینه می‌شود.[۱۶]

گستره‌ی دوام محصولات پایه‌ی سیمانی، به مراتب وسیع‌تر از موضوع مقاومت آنهاست. تعیین مقاومت محصولات مذکور به ویژه مقاومت فشاری آنها امری است که طی سالیان گذشته به مدت بیش از ۱۰۰ سال به انجام رسیده است و به نظر می‌رسد حاوی نکات پیچیده‌یی نباشد، هر چند جزئیات خاصی دارد و به هر حال در سن خاصی در کوتاه‌ترین زمان ممکن اندازه‌گیری می‌شود؛ اما در مورد دوام، پیچیدگی بیشتری به‌دلیل سازوکارهای متفاوت و آزمایش‌های گوناگون وجود دارد.

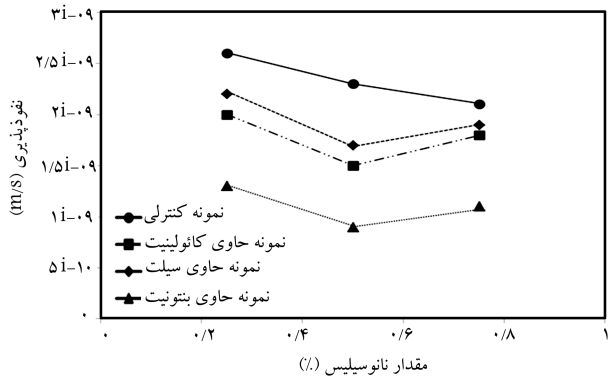
با توجه به توضیحات ذکر شده، یکی از مهم‌ترین مسائل در دوام محصولات پایه‌ی سیمانی، مسئله‌ی چگونگی عملکرد آنها در برخورد با آب، نظیر: جذب آب و نفوذپذیری آنهاست. آزمایش‌های نفوذپذیری محصولات پایه‌ی سیمانی (نظیر بتن خمیری) در برابر آب، از گذشته‌ی دور براساس رابطه‌ی دارسی انجام می‌شده است و ضریب نفوذپذیری آنها، که با بعد L/T است، طبق رابطه‌ی ۲ به‌دست می‌آید.

برای این منظور از نمونه‌های طرح اختلاط بخش ۱.۲.۳ استفاده شده است که نتایج آن در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مطابق شکل مذکور، نمونه‌های حاوی بنتونیت نسبت به نمونه‌های دیگر، نفوذپذیری کمتری دارند که دلیل آن را می‌توان به ۲ واکنش فیزیکی و شیمیایی در مخلوط مذکور نسبت داد. از لحاظ شیمیایی، مخلوط بنتونیت‌دار حاوی سیلیس بیشتری نسبت به دو مخلوط دیگر است و نتیجتاً واکنش‌های پوزولانی و تولید ژل چسباننده که مهم‌ترین عامل برای جلوگیری از نفوذ آب هستند، را افزایش می‌دهد؛ که همان‌طور که ذکر شد، عامل مذکور چسباننده حدود ۷۰٪ مخلوط را تشکیل می‌دهد که با روش‌هایی، مانند: میکروسکوپ الکترونی و طیف اشعه‌ی ایکس در مطالعات مختلف نشان داده شده است.[۶و۷]

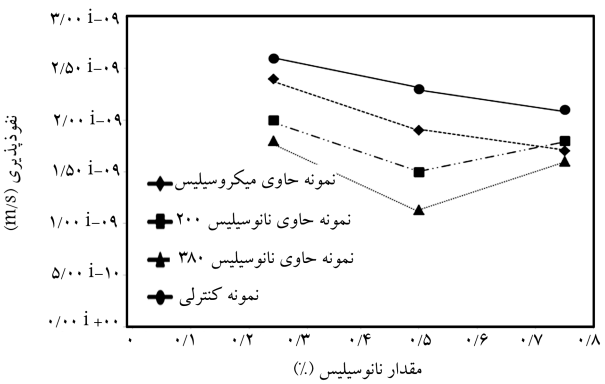
از لحاظ فیزیکی نیز به‌دلیل اینکه بنتونیت، قطر کمتری نسبت به سیلت و کائولینیت دارد و اصطلاحاً در اندازه‌های کلوئیدی قرار دارد، فضاهای خالی بسیار کمتری را در مخلوط به‌جای می‌گذارد، به‌طوری که در بتن‌های خمیری در نسبت آب



شکل ۱۱. منحنی روند کسب مقاومت برای مقادیر مختلف محصولات سیلیسی.



شکل ۱۲. مقدار نفوذپذیری برای نمونه‌ها با ریزدانه‌های متفاوت.



شکل ۱۳. ضریب نفوذپذیری در طرح‌های اختلاط متفاوت.

به سیمان ثابت، یک افزایش جزئی در نسبت بنتونیت ضریب نفوذپذیری را دست‌کم ۱۰ برابر افزایش می‌دهد.[۱۶] شایان ذکر است که به همین دلیل از بنتونیت در ساخت پرده‌ی آب‌بند سدها استفاده می‌شود. به‌عنوان مقایسه در حالتی که ۰٫۵٪ نانوسیلیس در تمام طرح‌های اختلاط استفاده شده است، ضریب نفوذپذیری مخلوط بنتونیت‌دار، ۲٫۵ برابر کمتر از نمونه‌ی کنترلی است که بیان‌گر نقش انکارناپذیر بنتونیت در مخلوط خاک ـ سیمان است.

۲.۴.۳. تأثیر نوع محصول سیلیسی

با توجه به اینکه با تغییر نوع محصول سیلیسی، ماهیت فیزیکی آن نیز تغییر پیدا می‌کند، لزوم انجام آزمایش‌ها بر روی آنها ضروری است. در پژوهش حاضر از ۳ ماده‌ی میکروسیلیس، نانوسیلیس ۲۰۰ و نانوسیلیس ۳۸۰ در طرح اختلاط به مقادیر یکسان استفاده و نتایج آن بر ضریب نفوذپذیری سنجیده شده است. مطابق شکل ۱۳، نانوسیلیس ۳۸۰ تأثیر بیشتری در کاهش هدایت آب دارد که دلیل آن را می‌توان به توان سرعت بیشتر واکنش‌های این محصول در ایجاد ژل آب‌بند و بستن فضاهای خالی عنوان کرد. زیرا فعالیت‌های کاتالیستی عموماً در سطح مواد کاتالیزوری روی می‌دهند، که با کاهش ذرات تا حدود نانو، سطح مخصوص و همین‌طور نیروهای سطحی افزایش می‌یابند و بنابراین کاتالیزورهای نانوذره‌یی نسبت به مواد با ابعاد بزرگ‌تر، خواص ممتازتری دارند؛ که این بدان معناست که با افزایش سطح ویژه‌ی نانوسیلیس سرعت آب‌بندی بیشتر خواهد شد.

۳.۴.۳. تأثیر مقدار محصول سیلیسی

مطابق نتایج شکل های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار نانوسیلیس ۲۰۰ و ۳۸۰، هدایت هیدرولیکی آن تا مقدار ۰٫۵٪ کاهش و سپس افزایش مختصری می‌یابد و همچنین از شکل‌های مذکور بر می‌آید که میکروسیلیس نیز در مقدار ۰٫۷۵٪، کمترین نفوذپذیری را تجربه می‌کند و نتایج آن مطابقت خوبی با نتایج آزمایش فشاری دارد و همچنین نقش پارامترهای تراکم بهینه در مخلوط را نشان می‌دهد و حاکی از آن است که در صورت استفاده‌ی بهینه از مواد مذکور در خاک ـ سیمان، بهترین عملکرد هم از لحاظ مقاومت فشاری و هم نفوذپذیری به‌دست خواهد آمد. این امر بدان دلیل است که آگلومراسیون مقادیر زیاد نانوسیلیس‌ها، تأثیرات شیمیایی و فیزیکی آنها را به سبب تجمع آنها در نقاط مختلف مخلوط کاهش می‌دهد؛ در حالی که در میکروسیلیس‌ها، پدیده‌ی آگلومراسیون تأثیر چندانی نخواهد داشت، زیرا آگلومراسیون آنها نهایتاً ذرات‌شان را به اندازه‌های نزدیک به ذرات رس می‌رساند که در کاهش نفوذپذیری تأثیر چندانی ندارد.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، آزمایش‌های تراکم و مقاومت فشاری و نفوذپذیری بر روی مصالح خاک ـ سیمان مخلوط شده با ۳ نوع محصول سیلیسی با سطح ویژه‌های متفاوت میکروسیلیس، نانوسیلیس ۲۰۰ و نانوسیلیس ۳۸۰ انجام و اثر پارامترهای مختلف مصالح خاک و محصول سیلیسی در آنها ارزیابی شده است. برخی از نتایج حاصل از آزمایش‌ها، به این شرح هستند:

- نتایج آزمایش تراکم بر مخلوط خاک ـ سیمان ـ نانوسیلیس نشان داده است که مقدار بهینه‌ی محصولات در ماتریس به سطح ویژه‌ی آنها وابسته است؛ به‌طوری که محصولات نانوسیلیس در ۰٫۵٪ به مقدار بهینه‌ی خود و میکروسیلیس در ۰٫۷۵٪ به مقدار بهینه‌ی خود می‌رسند که دلیل آن انباشت گروهی ذرات نانوسیلیس به‌دلیل جاذبه‌ی سطحی‌شان نسبت به همدیگر است.
- نتایج آزمایش‌های تراکم نشان دادند که منحنی چگالی بیشینه ـ رطوبت بهینه در حالتی که از میکروسیلیس در مخلوط استفاده شود، حالت ناقوسی پهن دارد؛ در حالی که وقتی از نانوسیلیس در مخلوط استفاده می‌شود، حالت ناقوسی نوک تیز می‌گیرد که این مطلب به‌دلیل حساسیت و میل واکنش بیشتر با آب در نانوسیلیس‌هاست، زیرا ذرات نانوسیلیس سطح ویژه‌ی بالاتری دارند.
- با تحلیل و مقایسه‌ی داده‌های موجود در آزمایش فشاری مشاهده می‌شود که روند کسب مقاومت مخلوط‌های حاوی بنتونیت در همان سنین ابتدایی اتفاق افتاده و نسبتاً متوقف شده است که دلیل آن را می‌توان به انجام و اتمام واکنش‌های پوزولانیک در این مدت کوتاه نسبت داد، زیرا انرژی آغازین واکنش آنها و نتیجتاً فرایند آبرفت بیشتر است.
- مخلوط‌های حاوی نانوسیلیس در روزهای ابتدایی، بخش غالب مقاومت خود را کسب می‌کنند و با رسیدن زمان عمل‌آوری به ۹۰ روز، تقریباً مقاومتی نزدیک با نمونه‌ی کنترلی تجربه می‌کنند که بیان‌گر نقش مؤثر نانوسیلیس‌ها در فقط کوتاه‌مدت است.
- نفوذپذیری مخلوط‌های حاوی نانوسیلیس و میکروسیلیس در مقدار بهینه‌شان به کمینه‌ی مقدار خود می‌رسد و مخلوط حاوی نانوسیلیس ۳۸۰، آب‌بندی بالاتری نسبت به دو مخلوط دیگر دارد که دلیل آن را می‌توان به تولید بیشتر ژل سیلیکات کلسیم هیدراته در مخلوط و همچنین پرکردن فضاهای نانومتری در مخلوط ذکر شده نسبت داد. زیرا محصولات با این سطح ویژه‌ی کم، توان بالایی در تولید خوشه‌های اضافی ژل سیلیکات کلسیم هیدراته دارند.

منابع (References)

1. ACI., *State of the Art Report on Soil Cement*, 230, IR (2006).
2. ICOLD., *Soil Cement for Embankment Dams*, Bulletin 54 (1996).
3. Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K. and Rongshen, K. "Influence of nano-sio2 addition on properties of hardened

cement paste as compared with silicafume", *Construction and Building Materials*, **21**(3), pp. 539-545 (2007).

4. Li, G. "Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-sio2", *Cement and Concrete Research*, **34**(6), pp. 1043-1049 (2004).
5. Li, H., Xiao, H., Yuan, J. and Ou, J. "Microstructure of cement mortar with nano-particles", *Composites*, **35**(2), pp. 185-189 (2004).
6. Ji, T. "Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-sio2", *Cement and Concrete Research*, **35**(10), pp. 1943-1947 (2004).
7. Bahmani, S.H., Huat, B., Asadi, A. and Farzadnia, N. "Stabilization of residual soil using SiO2 nanoparticles and cement", *Construction and Building Materials*, **64**, pp. 350-359 (2014).
8. Al-Rawas, A., Hago, A. and Al-Sarmi, H. "Effect of lime, Cement and Sarooj on the swelling potential of an expansive soil from Oman", *Building and Environment*, **40**(5), pp. 681-687 (2005).
9. Sarriosseir, A., Razavi, M. and Carlson, B. "Stabilization of soils with portland cement and CKD and application of CKD on slope erosion control", *Advances in Geotechnical Engineering*, ASCE, **86**, pp. 778-787 (2011).
10. Ferekel, H. and Hellmig, R. "Effect of nanopowder deagglomeration on the densities of nanocrystalline ceramic green bodies and their sintering behaviour", *Nanoconstruction Materials*, **11**(5), pp. 617-622 (1999).
11. Sanchez, F. and Sobolev, K. "Nanotechnology in concrete-A review", *Construction and Building Materials*, **24**(11), pp. 2060-2071 (2010).
12. Madani, H., Bagheri, A. and Parhizkar, T. "The pozzolanic reactivity of monodisperced nanosilica hydrosols and their influence on the hydration characteristics of portland cement", *Cement and Concrete Research*, **42**(12), pp. 1563-1570 (2012).
13. Madani, H., Bagheri, A., Parhizkar, T. and Raisghasemi, A. "Chloride penetration and electrical resistivity of concrete containing nanosilica hydrosols with different specific surface areas", *Cement and Concrete Composites*, **53**, pp. 18-24 (2014).
14. Madani, H., Bagheri, A., Parhizkar, T. and Raisghasemi, A. "The influence of different preparation methods on the aggregation status of pyrogenic nanosilicas used in concrete", *Materials and Stuctures*, **47**, pp. 1-11 (2012).
15. Khaloo, A.R., Vayghan, A.G. and Bolhassani, M. "Mechanical and microstructural properties of cement paste incorporating nano silica particles with various specific surface areas", *Key Engineering Materials*, **478**, pp. 19-24 (2011).
16. Brenner, P., Roshanzamir, I. and Abed, J. "Design of cofferdams-Technical Report", Dam and Hydropower Plant Project (Jul 2003).