

بررسی آزمایشگاهی تأثیر افزودنی نانوسیلیس بر مقاومت سایشی بتن نفوذپذیر در روسازی

بهروز شیرگیر (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

هادی عزیزاده گودرزی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

وحید شیرگیر، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

E-mail: shirgir@khu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۱۵ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۱۴

چکیده

بتن نفوذپذیر ترکیبی از سنگدانه با دانه‌بندی باز فاقد ریزدانه است که خمیر سیمان باعث اتصال سنگدانه‌ها به یکدیگر و در نهایت ایجاد یک شبکه متصل به هم از حفرات بین سنگدانه‌های را به دنبال خواهد داشت. با توجه به قابلیت استفاده از ذرات نانو به‌عنوان تقویت کننده خواص مقاومتی بتن در سایر مطالعات، در این مقاله به بررسی تأثیر افزودنی نانو سیلیس بر مقاومت سایشی بتن نفوذپذیر پرداخته شده است. افزودنی مورد استفاده در این تحقیق نانوسیلیس کلوییدی است. ۵ نوع نمونه با علائم اختصاری PPC، PCNS1، PCNS3، PCNS5 و PCNS7، که به ترتیب معرف نمونه بتن نفوذپذیر شاهد، بتن نفوذپذیر حاوی نانو سیلیس به میزان ۱، ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی سیمان است، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مجموع ۳۰ نمونه تهیه شد که از این تعداد، ۵ نمونه مکعبی برای آزمایش فشاری و ۱۵ نمونه مکعبی برای مقاومت سایش بود. ارزیابی مقاومت فشاری با استفاده از استاندارد مقاومت فشاری نمونه‌ها بر اساس استاندارد BS 1881: Part 108 بر روی نمونه مکعبی ۲۸ روزه و مقاومت سایشی طبق استاندارد EN 1338 از طریق ساییدن سطح رویه قطعه بتنی توسط یک استوانه زبر فولادی به‌همراه ماده ساینده، تحت شرایط استاندارد انجام می‌شود انجام گرفته است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که با افزایش مصرف نانوسیلیس در بتن نفوذپذیر، مقاومت فشاری و سایشی نمونه‌ها نیز افزایش یافته اما این افزایش تا ۵ درصد روند صعودی داشته و در صورت مصرف بیش از این مقدار روند نزولی مشاهده می‌شود. بهبود ۴۸ درصدی در مقاومت فشاری و ۲۸ درصدی در مقاومت سایشی نسبت به نمونه شاهد متعلق به نقطه بهینه (۵ درصد افزودنی نانوسیلیس) است. افزایش شدت واکنش نانوسیلیس با هیدروکسید کلسیم و تولید ژل سیلیکات کلسیم هیدراته از عوامل اصلی افزایش مقاومت خمیر سیمان و بهبود چسبندگی بین مصالح سنگدانه‌ای توسط خمیر سیمان و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری و سایشی نمونه‌های بتنی می‌تواند باشد.

واژه های کلیدی: نانو سیلیس، بتن نفوذپذیر، سایش و روسازی

۱. مقدمه و مروری بر تحقیقات دیگران

عوارض منفی و معایب روسازی‌های بتنی معمولی به‌عنوان یک ماده غیر قابل نفوذ برای آب و هوا باعث شده است که نوع جدیدی از بتن، یعنی نفوذپذیر که می‌توان از آن در ساخت قطعات پارکینگ، مسیرهای پیاده‌رو، روسازی جاده‌ای با ترافیک سبک و شانه‌راه‌ها استفاده نمود، توسعه یابد. [Gesoğlu, et al. 2013]. یا استفاده از این نوع روسازی به‌دلیل توانایی در انتقال آب از سطح خود، تغذیه آب‌های زیرزمینی و متعاقباً کاهش رواناب سطحی را می‌توان تأمین نمود [Tennis, Leming and Akers, 2004]. سطح بالای تقاضای استفاده زیاد از بتن نفوذپذیر به دلیل مزایای فراوان آن که شامل کاهش رواناب سطحی، بهبود کیفیت آب، افزایش مقاومت اصطکاک روسازی در شرایط بارندگی با زهکشی مناسب و همچنین کاهش صدای ناشی از حرکت چرخ وسایل نقلیه بر روی روسازی است. این ویژگی‌ها بتن نفوذپذیر را به یک ماده دوست‌دار محیط زیست تبدیل نموده است. [Chen, Liu, and Li, 2008].

بتن نفوذپذیر شامل ترکیبی از یک مقدار کنترل شده از خمیر سیمان، دانه‌بندی سنگدانه با اندازه ذرات یکنواخت و توزیع باریک اندازه ذرات و با ماسه بسیار اندک و در شرایطی بدون ماسه است. [Chen and Zhang, 2009 and Marolf, et al. 2004 and Park, Seo and Lee, 2005]. خمیر سیمان به صورت یک پوشش ضخیم سطح مصالح سنگدانه‌ای را می‌پوشاند و این پوشش باعث اتصال سنگدانه‌ها به یکدیگر و در نهایت ایجاد یک شبکه متصل به هم از حفرات بین سنگدانه‌ای (حدود ۱۵ الی ۲۵ درصد) را به دنبال خواهد داشت. در نتیجه یک این نوع بتن دارای نفوذپذیری بسیار زیادی تا cm/min ۲۰ خواهد شد [Neithalath, 2007].

در دو دهه اخیر استفاده از بتن نفوذپذیر به عنوان روسازی در جاده‌های درجه دو، قطعات پارکینگ، پیاده‌روها به دلایل بسیاری از جمله مزایای زیست محیطی آن افزایش یافته است [Nguyen, et al. 2013]. به بخشی از این خواص و مزایای بتن نفوذپذیر در شکل یک اشاره شده است. به دلیل مزایای فراوان به ویژه فواید زیست محیطی بتن نفوذپذیر استفاده از آن در انواع زیرساخت‌ها، از جمله روسازی‌های در

معرض ترافیک سبک و همچنین لایه روکش روسازی‌های در معرض ترافیک سنگین به ویژه در مناطق با بارندگی زیاد، رو به افزایش است. بنابراین در برابر کاربرد وسیع این نوع از بتن، تقاضای بتن نفوذپذیر با مقاومت و دوام بالا رو به افزایش خواهد بود. متأسفانه، به دلیل تخلخل بالا و مقدار کم ملات سیمان، بتن نفوذپذیر در مقایسه با بتن معمولی از مقاومت کم‌تری برخوردار است [Chen, et al. 2013]. افزایش میزان درصد فضای خالی در نمونه‌های بتنی از طرفی باعث کاهش مقاومت نمونه بتنی می‌شود و از طرف دیگر موجب افزایش ضریب نفوذپذیری، افزایش میزان جذب انرژی صوتی و افزایش ایمنی در سطح روسازی خواهد شد. در شکل یک مقایسه‌ای بین خصوصیات بتن معمولی و نفوذپذیر انجام شده است. مطالعات وسیعی بر روی ویژگی‌های نفوذپذیری، مقاومت، دوام در برابر یخ‌زدگی و مقاومت سایشی بتن در روسازی انجام شده است [Zhang and Li, 2013 and Wu, et al. 2011].

مقاومت سایشی بتن که آزمایشی بر روی سطح رویه بتن است، طبق تعریف کمیته ACI ۲۰۱ توانایی مقابله روسازی در برابر سایش و اصطکاک ناشی از تماس چرخ وسایل نقلیه، لغزش، بار سنگین کامیون‌ها و سایش رویه توسط سایر مواد است [Ytterburg, 1971].



شکل ۱. مقایسه بتن معمولی و متخلخل

مواردی مانند مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان، نوع پرداخت و نوع عمل آوری بر روی خواص لایه رویه تأثیرگذار بوده و

خواص مذکور، به صورت آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج حاصل با نمونه بتن نفوذپذیر شاهد مقایسه می‌شود. تاکنون تمامی مطالعات و پژوهش‌های انجام شده در خصوص استفاده از افزودنی‌های نانو در زمینه بتن معمولی بوده و هیچ مطالعه‌ای در زمینه بتن نفوذپذیر که یکی از چالش‌های اصلی آن مقاومت کم است، انجام نشده است. با توجه به نتایج حاصل از افزودن این مواد به بتن معمولی انتظار این است که در بتن‌های متخلخل نیز نتایج مشابهی به دست آید، اما با توجه به ویژگی‌های خاص بتن نفوذپذیر مثل تخلخل بسیار زیاد آن، می‌توان انتظار داشت که به گونه‌ای، شرایط در این نوع بتن کمی تفاوت داشته باشد. به عبارت دیگر در بتن‌های معمولی عوامل اصلی تأمین کننده مقاومت اتصال و قفل و بست مصالح سنگدانه‌ای و چسبندگی بین مصالح سنگدانه‌ای که خمیر سیمان تأمین کننده آن است، هست، حال این‌که نقش چسبندگی مصالح سنگدانه‌ای که توسط خمیر سیمان تأمین می‌شود در بتن‌های با تخلخل بالا کم‌تر است و انتظار می‌رود با بهبود این بخش نتایج بهتری نیز حاصل شود.

۲. برنامه آزمایشگاهی

در این بخش در خصوص تعیین دانه‌بندی، خصوصیات مواد و مصالح مصرفی جهت ساخت بتن نفوذپذیر، تشریح خواص نانوسیلیس مصرفی و ارائه روش آزمایشات، بحث و بررسی شده است. مواد و مصالح مورد استفاده جهت ساخت بتن نفوذپذیر مشابه بتن معمولی است با این تفاوت که در بتن نفوذپذیر درصد ریزدانه مصرفی پایین است. همچنین به منظور دستیابی به مخلوطی مناسب از نظر کارایی و جلوگیری از نتایج نامطلوب، ضروری است که فرآیند اختلاط به دقت نظارت شود. اساساً مواد تشکیل دهنده بتن نفوذپذیر در فرآیند اختلاط شامل مواد سیمانی، سنگدانه، آب و در شرایطی برخی از افزودنی‌ها می‌باشد. همانگونه که اشاره شد ماده افزودنی نانویی در تحقیق صرفاً از نوع نانوسیلیس می‌باشد که این ماده به صورت کلونیدی انتخاب شده است.

میزان اثر این پارامترها بر روی مقاومت سایشی بیش‌تر از سایر خواص بتن است [Li, Zhang and Ou, 2007].

ذرات با ابعاد نانو دارای سطح ویژه بالا باعث بوجود آمدن واکنش شیمیایی مقدار زیادی می‌شود. امروزه اغلب کارها و مطالعات انجام شده در خصوص نانوذرات در بتن، بر روی نانوسیلیس [Qing et al. 2007 and Lin et. al, 2008 and Sobolev et.al 2009 and Qing et al. 2008] و نانوتیتانیوم بوده است [Jo, et al. 2007 and Li, Zhang, and Ou, 2006, and Li, Xiao and Ou, 2004]. نتایج حاصل از آزمایش‌های سایش و مقاومت فشاری بر روی بتن حاوی دو گروه افزودنی نانو دی‌اکسید سیلیس و نانودی‌اکسی تیتانیوم، حکایت از تأثیرات منحصر به فرد این افزودنی‌ها در بهبود خواص سایشی و فشاری نشان داده است. مقاومت سایشی و فشاری بتن با افزایش درصد ذرات نانو کاهش می‌یابد. تحقیقات نشان داده است که مقدار ذرات نانو تأثیر زیادی روی نیاز به آب خمیر سیمان دارد. افزایش مقدار ذرات نانو، نیازمند افزایش مقدار آب مصرفی است. اگر نسبت‌های اختلاط بتن یکسان باشد، کارایی بتن با افزایش بیش از حد ذرات نانو کاهش می‌یابد که به همین دلیل از مقاومت سایشی و فشاری بتن کاسته می‌شود. از طرفی پخش صحیح ذرات نانو در مخلوط بتن با افزایش مقدار ذرات سخت‌تر شده که این نیز از مقاومت سایشی و فشاری بتن بدلیل افزایش احتمال وجود نواحی ضعیف می‌کاهد. همچنین مقاومت سایشی بتن حاوی ذرات نانو به‌طور خطی با مقاومت فشاری، ارتباط دارد [Li, Xiao and Ou, 2004].

اضافه کردن مقدار کمی از نانو سیلیکا در مخلوط می‌تواند منجر به بالا بردن کیفیت بتن از منظر مقاومت سایشی گردد [Longhi et al. 2015]. مقاومت در برابر سایش و مقاومت فشاری نمونه را می‌توان با جایگزینی مقداری از سیمان پرتلند با نانوذرات SiO_2 و CuO بهبود داد. بهبود هر دو خواص مکانیکی به دلیل حضور نانوذرات سیلیس است [Riahi and Nazari, 2011]. با توجه به پتانسیل استفاده از ذرات نانو به ویژه نانو سیلیس به‌عنوان تقویت کننده خواص مقاومتی بتن، در این مقاله بررسی تأثیر افزودنی نانو سیلیس بر مقاومت سایشی و ارتباط آن با مقاومت فشاری مدنظر است. برای این منظور

۱-۲ انتخاب مصالح سنگدانه‌ای، سیمان و افزودنی‌ها

نتایج آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص حقیقی و ظاهری و درصد جذب آب مصالح سنگی مانده روی الک ۸ (بر اساس استاندارد آشتو T85)، سنگدانه‌های عبوری از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۲۰۰ (بر اساس استاندارد آشتو T84) و تعیین وزن مخصوص ظاهری مصالح عبوری از الک شماره ۲۰۰ (بر اساس استاندارد آشتو T100) در جدول دو نشان داده شده است.

در این تحقیق از سیمان پرتلند معمولی محصول تولیدی شرکت سیمان تهران استفاده شده است. مشخصات شیمیایی و فیزیکی این نوع سیمان و محدوده‌های مجاز آن، مطابق با استاندارد ۳۸۹ به ترتیب در جدول سه و چهار آمده است. همچنین به منظور سهولت در عملیات اختلاط ساخت نمونه‌ها، از فوق‌روان‌کننده با نام تجاری نرمال P116، محصول شرکت صنایع شیمیایی پارسا، استفاده شد.

افزودنی مورد استفاده در این تحقیق نانوسیلیس کلوییدی متعلق به شرکت تولیدکننده با نام تجاری ایکا محصول کشور سوئد است. این محصول از دفتر ستاد حمایت از طرح‌های تحقیقاتی نانو، مستقر در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی تهیه شد. در حال حاضر تولید این ذرات به صورت انبوه در داخل کشور امکان‌پذیر نیست. مشخصات فیزیکی و شیمیایی این ذرات مانند اندازه، درصد وزنی، درجه خلوص و سایر ویژگی‌ها در جدول پنج آمده است.

۱-۲ تعیین دانه‌بندی و طرح اختلاط

یکی از دانه‌بندی مرسوم مورد استفاده جهت ساخت بتن نفوذپذیر بر اساس استاندارد ASTM C-33 دانه‌بندی شماره 89 است. برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر از این نوع دانه‌بندی استفاده شده است. محدوده بالا و پایین این نوع دانه‌بندی در شکل دو آمده است.

مصالح سنگدانه‌ای مورد استفاده در این تحقیق از مخازن کارخانه آکام‌شن واقع در منطقه شهریار در غرب تهران، انتخاب شد. این مصالح از نوع رودخانه‌ای بوده و عمدتاً از جنس سیلیس هستند. آزمایش‌های بررسی مرغوبیت مصالح سنگی، از قبیل ارزش ماسه‌ای (AASHTO T176)، افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (AASHTO T104)، درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لس آنجلس (AASHTO T96)، شاخص تورق (B.S. 812) و تعیین درصد شکستگی در یک وجه و دو وجه (ASTM D-5821) بر روی مصالح منتخب انجام و نتایج آن در جدول یک آمده است.

جدول ۱. نتایج آزمایش‌های مرغوبیت مصالح سنگی

نوع آزمایش	مشخصه استاندارد	نتیجه آزمایش
سایش لوس آنجلس	AASHTO T-96	٪۱۴
افت وزنی ناشی از سولفات سدیم	AASHTO T-104	ریزدانه: ٪۰/۵ درشت دانه: ٪۰/۲
شکستگی در یک وجه و بیش‌تر	ASTM D-5821	٪۹۹
شکستگی در دو وجه و بیش‌تر	ASTM D-5821	٪۹۷
تطویل و تورق	(BS-812)	---
تورق		٪۲۰
ارزش ماسه‌ای ریزدانه (SE)	AASHTO T176	٪۶۰

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های وزن مخصوص و جذب آب مصالح سنگی

درصد جذب آب	وزن مخصوص		توضیحات
	حقیقی (Bulk)	ظاهری (Apparent)	
۲/۵۴	۲/۶۵	۲/۵۳	مصالح مانده روی الک ۸
۳/۱۴	۲/۶۵	۲/۵۱	مصالح عبوری از الک نمره ۸ و مانده روی الک
		۲/۶۹	مصالح عبوری از الک ۲۰۰
		۲/۵۳	وزن مخصوص حقیقی کل مخلوط مصالح

بررسی آزمایشگاهی تأثیر افزودنی نانوسیلیس بر مقاومت سایشی بتن نفوذپذیر در روسازی

جدول ۳. مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی منطبق بر استاندارد ملی شماره ۳۸۹

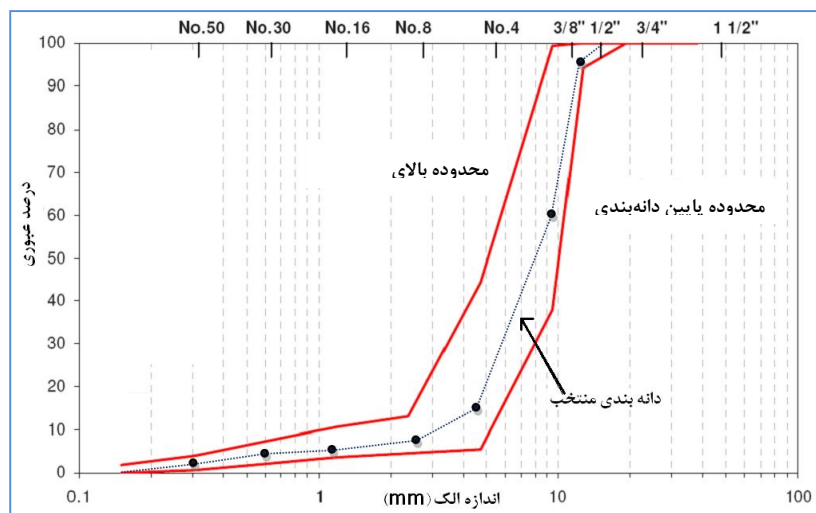
SO _۲	MgO	Fe _۲ O _۳	Al _۲ O _۳	SiO _۲	CaO	
%	%	%	%	%	%	
<۳	<۵	<۶	<۶	>۲۰	---	مقدار مجاز طبق استاندارد ۳۸۹
۲/۸۸	۳/۵۶	۳/۴۰	۳/۸۷	۲۱/۸۸	۶۲/۹۷	مقدار اندازه‌گیری شده

جدول ۴. مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی منطبق بر استاندارد ملی شماره ۳۸۹

سطح مخصوص	زمان گیرش اولیه (دقیقه)	زمان گیرش نهایی (دقیقه)	مقاومت فشاری (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)	مقدار مجاز طبق استاندارد ۳۸۹
>۲۸۰۰	>۴۵	<۳۶۰	>۱۷۵	>۳۱۵
۳۸۵۳	۱۶۵	۲۱۰ دقیقه	۲۱۳	۳۲۵

جدول ۵. خواص فیزیکی و شیمیایی افزودنی‌های نانو

مشخصه (شرکت تولیدکننده)	مقدار وزنی نانو در کلومید (%)	قطر ذرات (نانو متر)	مساحت سطح ویژه (متر مربع بر گرم)	خلوص ویسکوزیته
نانو سیلیس SiO ₂ (Eka)	۱۵	۱۲±۲	۲۰۰±۲۵	≥۹۹/۸



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی بر اساس استاندارد ASTM C33, #89 [۴]

مطالعه دیگری به اقتباس گرفته شده است. از آنجایی که این مطالعه توسط محققین مقاله حاضر انجام شده است و مصالح

تاکنون استاندارد خاصی برای طرح اختلاط بتن متخلخل مطرح نشده است. بنابراین طرح اختلاط انتخابی در این پژوهش از یک

پودر آلوئینا با اندازه ذرات ۸۰ میکرون است. نازل خروجی دستگاه طوری طراحی شده است که بتواند 3 ± 0.5 لیتر پودر ساییده را در هر دقیقه روی سطح در معرض سایش پخش نماید. در شکل سه تصویری شماتیک و واقعی از اجزای دستگاه سایش ساخته شده برای این منظور و نحوه قرائت شاخص سایش نشان داده شده است.

نکته مهم این است که اگر شیار ایجاد شده چهار گوش نباشد (اختلافی بیش از $1/5$ میلی متر بین دو عرض انتهایی شیار موجود باشد) نتایج قابل قبول نیست و آزمایش باید مجدداً انجام گیرد.

مقاومت فشاری نمونه‌ها بر اساس استاندارد BS 1881: Part 108 برای نمونه مکعبی ۲۸ روزه انجام گرفته است.

دستگاه مورد نظر قابلیت بارگذاری به صورت تنظیمات دیجیتال تا محدوده ۳۰ تن را دارا می باشد. سرعت تغییر شکل طبق استاندارد برای این آزمایش $1/3$ میلی متر در دقیقه اتخاذ شده است. در مجموع تعداد نمونه‌های تهیه شده برای انجام آزمایش‌های شرح داده شده در مجموع ۳۰ نمونه است که ۱۵ نمونه مکعبی برای آزمایش فشاری و ۱۵ نمونه منشوری برای سایش ساخته شده است.

۴. نتیجه گیری و تحلیل و تفسیر نتایج

نتایج آزمایش‌های مربوط به مقاومت فشاری و سایش نمونه‌های بتن نفوذپذیر برای سن ۲۸ روزه در جدول هفت نشان داده شده است. نتایج این جدول متعلق به دو گروه از نمونه‌های بتن نفوذپذیر (کنترلی و حاوی نانو سیلیس)، است. همان گونه که نتایج نشان می دهد، با افزایش درصد افزودنی نانو سیلیس مقاومت فشاری و مقاومت سایش نمونه‌ها نیز افزایش می یابد. اما این افزایش تا مقدار افزودنی ۵ درصد ادامه داشته و با افزایش این افزودنی به ۷ درصد وزن سیمان، روند افزایشی آن تغییر و نرخ بهبود کاهش می یابد. نقطه بهینه این افزودنی متعلق به مقدار ۵ درصد افزودنی است. در شکل چهار روند تغییرات مقاومت فشاری و سایش با تغییرات افزودنی نانو سیلیس نشان داده شده است. بهبود ۴۸ درصدی در مقاومت فشاری و ۲۸ درصدی در مقاومت سایشی متعلق به نقطه بهینه افزودنی نانو سیلیس (درصد) است.

در شکل پنج نمودار تغییرات میزان سایش بتن نفوذپذیر در برابر تعداد دوره‌های سایش در پنج سطح ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰

مورد استفاده در این پژوهش نیز همان مصالحی است که در تحقیق قبلی مورد استفاده قرار گرفته است. لذا بر همین مبنا طرح اختلاط بهینه به دست آمده از آن مطالعه در این تحقیق استفاده شده است. چگالی مخلوط به میزان ۱۹۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب انتخاب شده است. مقادیر وزنی و درصد هر یک از اجزای تشکیل دهنده آن در جدول (۶) نشان داده شده است. در این طرح نسبت وزنی سیمان به سنگدانه (C/Agg)، ۰/۲۲ و نسبت وزنی آب به سیمان (W/C)، ۰/۲۹ انتخاب شده است. نسبت وزنی آب به سیمان متفاوت از مقدار جذب آب مصالح سنگدانه‌ای است به عبارت دیگر بایستی مصالح سنگدانه‌ای بصورت اشباع با سطح خشک در نظر گرفته شوند. با توجه به این که در این تحقیق از نانو سیلیس افزودنی استفاده شده است و این افزودنی جایگزین سیمان مصرفی در اختلاط به کار می رود در این صورت وضعیت طرح اختلاط به شرح جدول (۶) خواهد شد. علامت PPC، معرف نمونه بتن نفوذپذیر کنترلی، PCNS1، PCNS3، PCNS5 و PCNS7، به ترتیب نمایانگر بتن نفوذپذیر حاوی نانو سیلیس به میزان ۱، ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی سیمان مصرفی در بتن نفوذپذیر است.

۳. شرح آزمایش‌ها و برنامه آزمایشگاهی

۳-۱-۳ آزمایش تعیین کننده مقاومت سایشی و فشاری و نفوذپذیری

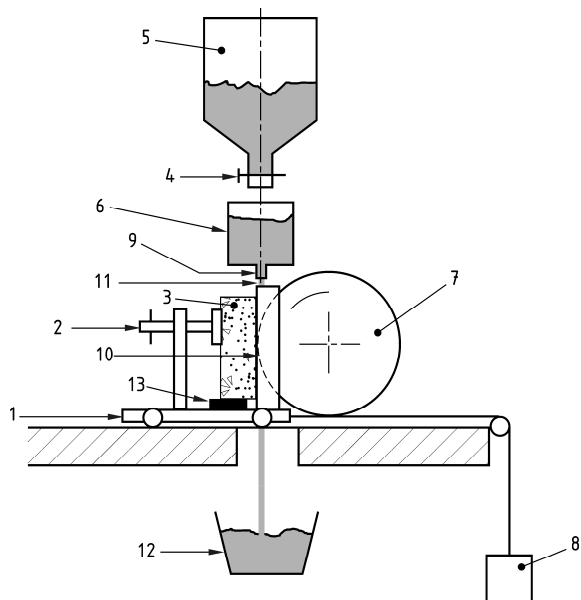
جهت ارزیابی مقاومت سایشی بتن نفوذپذیر از آزمایش مقاومت سایشی به وسیله یک استوانه دوار فلزی استفاده می شود. ابعاد نمونه بایستی در حدود ۱۵ سانتی متر در طول، ۱۰ سانتی متر در ارتفاع و ۶ سانتی متر در عرض باشد. برای این منظور دستگاهی منطبق بر استاندارد EN 1338 ساخته و از آن به منظور ارزیابی مقاومت سایشی بتن استفاده شد. سایش سطح رویه یک بلوک بتنی با ابعاد مذکور توسط استوانه دوار فلزی زبر به همراه یک ماده ساینده، تحت شرایط استاندارد انجام می شود. قطر استوانه دوار چرخ فولادی ۲۰ سانتی متر و ضخامت آن ۷ سانتی متر است که با سرعت ۷۵ دور در دقیقه می چرخد. همچنین دستگاه دارای کیفی است که درون آن ماده ساینده از طریق آن بر روی سطح سایش پخش می شود. پودر ساینده مورد نیاز برای این آزمایش

بررسی آزمایشگاهی تأثیر افزودنی نانوسیلیس بر مقاومت سایشی بتن نفوذپذیر در روسازی

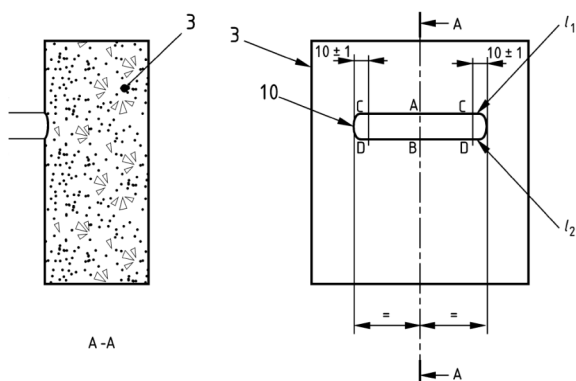
شدت تغییرات و میزان حساسیت مقاومت سایشی نمونه‌ها به تعداد دوره‌های سایش را مورد بررسی قرار داد.

دور و برای پنج نوع مخلوط مختلف نشان داده شده است. در این شکل نمودار برازش خطی متغیرهای میزان سایش در برابر تعداد دوره‌های سایش نیز ارائه شده است. با استفاده از این شکل می‌توان

شکل ۳. تصویر شماتیک و واقعی از اجزای دستگاه سایش (بالا) و نحوه قرائت شاخص سایش (پایین)



- | | |
|-------------------------|------------------------|
| ۱ نگهدارنده نمونه همراه | ۲ پیچ |
| ۳ نمونه | ۴ شیر |
| ۵ مخزن برای مواد ساینده | ۶ محفظه قابل تنظیم |
| ۷ چرخ سنگ گسترده | ۸ وزنه |
| ۹ اسلات | ۱۰ محل سایش |
| ۱۱ آهنک سنگ زنی | ۱۲ محل پخش مواد ساینده |
| ۱۳ ظرف مواد ساییده شده | |

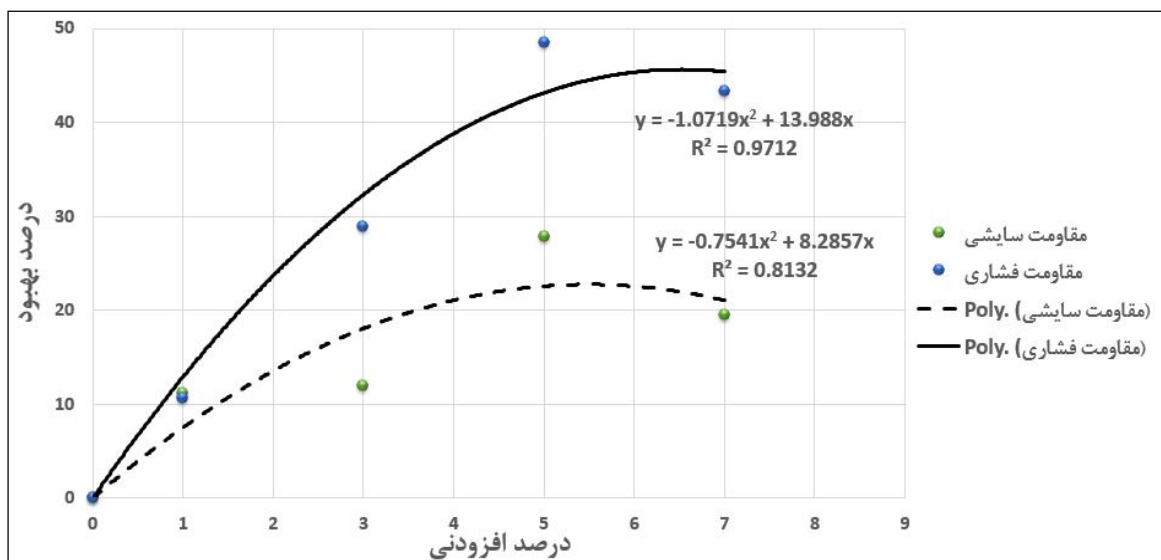


جدول ۶. طرح اختلاط انتخابی بتن نفوذپذیر

روان کننده	نانوسیلیس (کیلوگرم)	درشت دانه (کیلوگرم)	ریزدانه (کیلوگرم)	سیمان (کیلوگرم)	آب (کیلوگرم)	علامت اختصاری
۱/۷	-	۹۷۷	۵۰۳	۳۲۵	۱۲۰	PPC
۲/۷	۳/۲۵	۹۷۷	۵۰۳	۳۲۱/۷	۱۲۰	PCNS1
۲/۷	۹/۷۵	۹۷۷	۵۰۳	۳۱۵/۲	۱۲۰	PCNS3
۲/۷	۱۶/۲۵	۹۷۷	۵۰۳	۳۰۸/۷	۱۲۰	PCNS5
۲/۷	۲۲/۷۵	۹۷۷	۵۰۳	۳۰۲/۲	۱۲۰	PCNS7

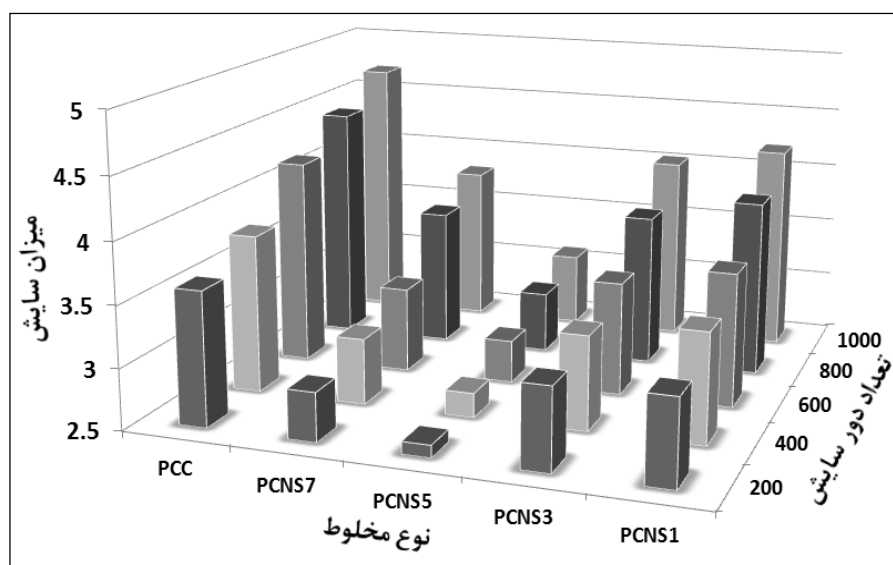
جدول ۷. نتایج آزمایش های مقاومت فشاری و سایش برای نمونه های معمولی و حاوی افزودنی نانوسیلیس

علامت اختصاری	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)		شاخص سایش (سانتی متر)	
	مقدار	انحراف معیار	مقدار	انحراف
PPC	۱۳/۰۳	۱/۵۰	۳/۶	۰/۰۸
PCNS1	۱۴/۴۲	۰/۸۳	۳/۲	۰/۱۳
PCNS3	۱۶/۸۰	۱/۵۶	۳/۱۷	۰/۱۱
PCNS5	۱۹/۳۵	۲/۲۹	۲/۶	۰/۱۰
PCNS7	۱۸/۶۷	۱/۲۶	۲/۹	۰/۱۲



شکل ۴. مقایسه نتایج مقاومت فشاری و شاخص سایش برای پنج نوع مخلوط

بررسی آزمایشگاهی تأثیر افزودنی نانوسیلیس بر مقاومت سایشی بتن نفوذپذیر در روسازی



شکل ۵. تأثیر تعداد دورهای بر میزان سایش در نمونه‌های کنترلی و نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف نانوسیلیس

جدول ۸. پارمترهای برازش خطی بین متغیر شاخص سایش و تعداد دورها برای نمونه کنترلی و نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف نانوسیلیس

نوع مخلوط	روابط شاخص سایش با تعداد دورها	مقدار بهبود (%)
	$S = \alpha - \beta \cdot I_a$	α
	R^2	
PPC	$S = 3.295 - 0.0014I_a$ $t = (61, 81), (17, 73)$ $F = 314, 42$	0.987
PCNS1	$S = 2.905 - 0.0013I_a$ $t = (54, 50), (15, 86)$ $F = 251, 71$	0.984
PCNS3	$S = 2.870 - 0.0011I_a$ $t = (32, 25), (8, 20)$ $F = 67, 22$	0.943
PCNS5	$S = 2.460 - 0.0007I_a$ $t = (128, 47), (22, 58)$ $F = 507, 00$	0.992
PCMS7	$S = 2.597 - 0.0012I_a$ $t = (27, 51), (8, 39)$ $F = 70, 49$	0.946

افزایش شدت واکنش نانوسیلیس با هیدروکسید کلسیم و تولید ژل سیلیکات کلسیم هیدراته از عوامل اصلی افزایش مقاومت خمیر سیمان و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های بتنی است. این اتفاق به‌ویژه در سنن پایین نمونه‌های بتنی رخ می‌دهد. [Jo, 2007 and Li, H., Zhang, M., and Ou, J.P., (2006)] با توجه به نتایج حاصله از آزمایش مقاومت فشاری و همچنین ارتباط بسیار قوی بین مقاومت فشاری و مقاومت سایشی بتن نفوذپذیر که در این تحقیق مشاهده شد، مکانیزم بهبود مقاومت سایشی بتن نفوذپذیر را مانند مقاومت فشاری که در مطالعات اشاره شده به اثبات رسیده دانست.

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

مهم‌ترین دلیل ضعف در بتن نفوذپذیر، ضعف در مقاومت پیوندی بین خمیر چسباننده و سنگ‌دانه‌ها است به‌نحوی که در بازرسی ساختمان گسیختگی این نوع از بتن پس از شکست مشاهده می‌شود که خط شکست از محل اتصال بین خمیر سیمان و سنگ‌دانه عبور می‌نماید. با توجه به پتانسیل استفاده از ذرات نانو به‌عنوان تقویت‌کننده خواص مقاومتی بتن، در این مقاله تأثیر افزودنی نانو سیلیس بر خواص مقاومتی و سایشی بتن نفوذپذیر ۲۸ روزه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج و یافته‌های این تحقیق عبارتند از:

۱. افزودنی نانو سیلیس مقاومت سایشی فشاری و فشاری نمونه‌های بتن نفوذپذیر ۲۸ روزه را افزایش داده و حداکثر بهبود حاصله متعلق به نمونه‌های حاوی ۵ درصد نانو سیلیس است.
۲. با مقایسه نتایج حاصله مشاهده می‌شود که افزودن نانو سیلیس به بتن نفوذپذیر حساسیت نمونه به تغییرات در برابر تعداد دور سایش را کاهش می‌دهد.
۳. به‌دلیل اندازه بسیار ریز این افزودنی‌ها انتظار می‌رود که نقش پرکنندگی این مواد بیش‌تر شامل بخش خمیری و سیمانی بتن شود و اسکلت بتن کم‌تر تحت تأثیر خاصیت پرکنندگی این مواد قرار می‌گیرد.
۴. پرکنندگی بخش خمیر سیمان بتن توسط ذرات نانو سیلیس به دو شکل انجام می‌گیرد. بخشی از ذرات نانو

با توجه به جدول ۸ مقادیر مربوط به شیب نمودارها بیان‌گر میزان حساسیت نمونه‌ها به سایش با دوره‌های متخلف است و همانگونه که در جدول هشت نشان داده شده است، با مقایسه نتایج حاصله مشاهده می‌شود که نمونه حاوی ۵ درصد نانو سیلیس کم‌ترین و نمونه کنترلی بدون افزودنی بیش‌ترین حساسیت در برابر تغییرات تعداد سایش را به خود اختصاص داده است. همچنین مقدار ثابت معادلات موجود در جدول هشت نمایانگر میزان مقاومت سایشی انواع نمونه‌ها است که مشاهده می‌شود بیش‌ترین مقاومت متعلق به نمونه حاوی ۵ درصد افزودنی است و مقدار این بهبود نسبت به نمونه کنترلی ۲۵ درصد گزارش می‌شود. همچنین در شکل شش ارتباط بین مقاومت فشاری و مقاومت سایشی نشان داده شده است. ارتباط قوی و مستقیم این دو پارامتر در شکل شش مشهود است. البته در بتن معمولی نیز چنین ارتباطی بین مقاومت فشاری و سایش نمونه‌ها وجود دارد.

مکانیزم تأثیر افزودنی نانوسیلیس بر خواص فیزیکی بدین ترتیب است که زمانی که ذرات نانویی با سطح ویژه بالا به سیمان یا بتن اضافه می‌شود به‌عنوان یک پرکننده در اندازه بسیار ریز فضای خالی بخش خمیر سیمان را پر کرده و مقدار آب موجود در فضای خالی سیمان را کاهش می‌دهد. در مقابل با توجه به جایگزینی ذرات نانویی با سیمان و افزایش سطح ویژه، مقدار آب مورد نیاز برای اختلاط نیز افزایش می‌یابد. بدین ترتیب مقدار آب مورد نیاز در مخلوط به دو عامل فوق بستگی پیدا می‌کند. با افزایش مقدار افزودنی نانو به بیش از تا ۵ درصد عامل دوم به‌دلیل سطح ویژه بسیار بالا، حاکم خواهد بود. به‌عبارت دیگر با افزایش مقدار افزودنی نانوسیلیس مقدار سطح ویژه به شدت افزایش یافته و نتیجتاً مقدار آب جذب شده توسط خمیر سیمان نیز افزایش می‌یابد و در نهایت خمیر سیمان بوجود آمده دارای ضخامت بیش‌تری می‌شود. به‌دلیل سطح ویژه بالای افزودنی نانو (حدود ۲۰۰ مترمربع بر گرم)، واکنش بین مواد نانوسیلیس و هیدروکسید کلسیم مقدار زیادی افزایش می‌یابد که این مورد در بسیاری از مطالعات دیگران نیز به اثبات رسیده است [Li, Zhang, Jo, et. al, 2007 and Li, Xiao and Ou, 2004].

که در واکنش شرکت نموده، مستقیماً فضای خالی خمیر سیمان را پر می‌نمایند.

sludge/fly ash mortar", Waste Management; Vol. No. 28, pp. 1081-1087.

-Lin, K. L., Chang, W. C., Lin, D. F., Luo, H. L. and Tsai, M. C. (2008) "Effects of nano-SiO₂ and different ash particle sizes on sludge ash-cement mortar", Journal of Environmental Management; Vol. 88, No. 4, pp. 708-714.

-Li, H., Xiao, H. G., and Ou, J. P. (2004) "A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nanophase materials", Cement and Concrete Research; No. 34, pp. 435-438.

-Li, H., Zhang, M. H., and Ou, J. P. (2007) "Flexural fatigue performance of concrete containing nano-particles for pavement", International Journal of Fatigue; Vol. No. 29, pp. 1292-1301.

-Li, H., Zhang, M. H. and Ou, J. P. (2006) "Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement", Wear; Vol. No. 260, pp. 1262-1266.

-Longhi, M., Gonzalez, M., Rahman, S., Tighe, S. L. and Sangiorgi, C. (2015) "evaluation of strength and abrasion resistance of pervious concrete mixes using three types of cements", In Transportation Research Board 94th Annual Meeting (No. 15-3369)

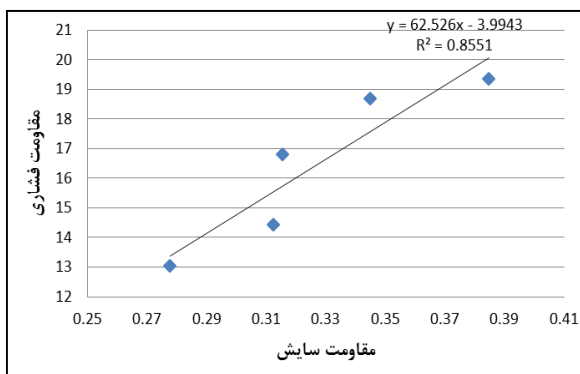
-Marolf, A., Neithalath, N., Sell, E., Wegner, K., Weiss, J. and Olek, J. (2004) "The influence of aggregate size and gradation on acoustic absorption of enhanced porosity concrete" ACI Material Journal; Vol. 101, No. 1, pp.82-91.

-Neithalath, N. (2007) "Extracting the performance predictors of enhanced porosity concretes from electrical conductivity spectra", Cement Concrete Research; Vol. 37, No. 5, pp.796-804.

-Nguyen, D. H., Boutouil, M., Sebaibi, N., Leleyter, L. and Baraud, F. (2013) "Valorization of seashell by-products in pervious concrete pavers", Construction and Building Material; Vol. 49: pp.151-160.

-Park, S. B., Seo D, S. and Lee J. (2005) "Studies on the sound absorption characteristics of porous concrete based on the content of recycled aggregate

سیلیس که در واکنش هیدراتاسیون شرکت نموده، با آب و هیدروکسیدکلسیم واکنش داده و تولید ژل سیلیکات کلسیم هیدراته را به دنبال خواهد داشت و در نتیجه خمیر سیمان متراکم‌تری را بوجود می‌آورد و بخش دیگری از این ذرات



شکل ۶. مقاومت سایشی در برابر مقاومت فشاری نمونه های بتن نفوذپذیر

۶. مراجع

-Chen, B., Liu, J., and Li, P. (2008) "Experimental Study on Pervious Concrete", Proceeding of the 9th International Conference On Concrete Pavements, San Francisco, California; pp. 17-21.

-Chen, Y. and Zhang, Q., (2009) "Manufacturing Technology of Porous Cement Concrete for Highway Construction", Road Pavement Material Characterization and Rehabilitation; Vol. 191, pp. 22-33.

-Chen, Y., Wang, K., Wang, X. and Zhou, W. (2013) "Fracture and fatigue of pervious concrete", Construction and Building Materials; Vol. 42, pp.97-104.

-Gesoglu, M., Guneyisi, E., Khoshnaw, G. and Ipek, S. (2013) "Abrasion and freezing-thawing resistance of pervious concretes containing waste rubbers", Construction and Building Materials; Vol. 73, pp. 19-24.

-Jo, B. W., Kim, C. H., Tae, G. H. and Park, J. B. (2007) "Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles", Construction and Building Materials; Vol. 21, pp. 1351-1355.

-Lin, D. F., Lin, K. L., Chang, W. C., Luo, H. L. and Cai, M.Q. (2008) "Improvements of nano-SiO₂ on

Nanotechnology In Construction), Prague, Czech Republic, pp. 139–148.

-Tennis, P. D., Leming, M. L., and Akers, D. J. (2004) "Pervious Concrete Pavements", Pervious Concrete Pavements, EB302.02, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, USA.

-Wu, H., Huang, B., Shu, X., and Dong, Q., (2011). "Laboratory Evaluation of Abrasion Resistance of Portland Cement Pervious Concrete", Journal of Material and Civil Engineering; Vol. No. 23(5), pp.697–702.

-Ytterburg, R.. (1971) "Wear-Resistant Industrial Floors of Portland Cement Concrete", Civil Engineering - ASCE, Vol. No. 41(1), pp. 68-71.

-Zhang, P. and Li, Q. (2013) "Effect of polypropylene fiber on durability of concrete composite containing fly ash and silica fume", Compos B Engineering; Vol. 45, No. 1, pp. 1587–1594.

and target void ratio" Cement Concrete Research; Vol. 35, No. 9. pp.1846–54.

-Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K., and Rongshen, C. (2007) "Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume", Construction and Building Materials; Vol. No. 21, pp. 539-545.

-Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K., and Rongshen, C. (2008) "A comparative study on the pozzolanic activity between nano-SiO₂ and silica fume", Journal of Wuhan University Technology- Material Science Education; Vol. No. 21(3), pp. 153–157.

-Riahi, S., Nazari, A. (2011) "Compressive strength and abrasion resistance of concrete containing SiO₂ and CuO nanoparticles in different curing media." Science China Technological Sciences 54.9 (2011): pp.2349-2357.

-Sobolev, K., Flores, I., Torres-Martinez, L. M., Valdez, P. L., Zarazua, E. and Cuellar, E. (2009) "Engineering of SiO₂ nanoparticles for optimal performance in nano cementbased materials", in Nanotechnology in construction: proceedings of the NICOM3 (3rd International Symposium On