تحقیقات بتن
سال هجدهم، شمارهٔ سوم
پائیز ۱۴۰۴
ص ۱۰۴ – ۹۲
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۳

بررسی تأثیر دی‌اکسید تیتانیوم بر خاصیت خودتمیزشوندگی و دوام بتن در برابر نفوذ یون کلراید به روش RCMT

محمدجواد زارع قنات نوی
دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران.
اشکان خدابنده‌لو *
دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران.
پیمان حمیدی
استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران.
کیوان فرزاد
استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران.

چکیده

در سال‌های اخیر، بتن‌های خودتمیزشونده به‌دلیل ظرفیت بالای آن‌ها در کاهش آلودگی‌های محیطی و کاهش هزینه‌های نگهداری، جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند. این بتن با استفاده از پوشش‌های فوتوکاتالیستی به‌وسیلهٔ دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2)، امکان حذف آلاینده‌ها را فراهم آورده و باعث حفظ زیبایی و پاکیزگی نماهای شهری را فراهم می‌کنند. باوجود این ، دوام و پایداری بتن‌های خودتمیزشونده در برابر نفوذ یون کلراید، به‌ویژه در محیط‌های خورنده، یک ابهام در کاربرد گسترده آن‌ها به شمار می‌آید. این تحقیق با هدف بررسی تأثیر TiO_2 بر بهبود دوام بتن در برابر نفوذ یون کلراید و خاصیت خودتمیزشوندگی انجام شده است. بدین ترتیب پنج طرح مخلوط با دی‌اکسید تیتانیوم با درصدهای مختلف ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪ وزنی سیمان ساخته شد و با روش RCMT طبق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که افزودن TiO_2 تا ۲۰٪ موجب کاهش ۸۰٪ نفوذ یون کلراید نسبت به نمونه شاهد می‌شود. همچنین، خاصیت خودتمیزشوندگی در نمونه‌های با ۱۵و ۲۰٪ افزودنی به شکل مؤثری بهبود یافت. این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از دی‌اکسید تیتانیوم در بتن، علاوه بر افزایش دوام در محیط‌های خورنده، امکان ساخت بتن‌های خودتمیزشونده با کاربرد در محوطه و سازه‌های شهری را فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: **بتن خودتمیزشونده، دی‌اکسید تیتانیوم، یون کلراید، تست RCMT، خاصیت فوتوکاتالیستی.**

* نویسنده مسئول: a.khodabandehlou@iau.ac.ir

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، گسترش شهرنشینی و توسعهٔ زیرساخت‌های عمرانی موجب شده است که انتخاب و به‌کارگیری مصالح ساختمانی بادوام و سازگار با محیط زیست، بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد. بتن به‌عنوانپرمصرف‌ترین ماده ساختمانی، نقش حیاتی در ساخت سازه‌های عمرانی ایفا می‌کند. اما یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش‌روی آن، کاهش دوام به‌دلیلنفوذ یون‌های مخرب به‌ویژه یون کلراید است که منجر به خوردگی آرماتور و کاهش عمر مفید سازه‌های بتنی می‌شود [۱].

نفوذ یون کلراید به درون بتن، به ویژه در مناطق شهری، صنعتی و یا مناطق در معرض نمک‌پاشی و آب‌های آلوده، یکی از عوامل اصلی آغاز و گسترش فرآیند خوردگی فولاد مسلح می‌باشد. این پدیده نه‌تنها هزینه‌های تعمیر و نگهداری سازه‌ها را به شدت افزایش می‌دهد بلکه تهدیدی جدی برای دوام و پایداری زیرساخت‌های شهری به شمار می‌رود [۲].

از طرفی توسعهٔ بتن‌های نوین با خواص ویژه، مانند بتن‌های خودتمیزشونده که از فناوری فوتوکاتالیستی بهره می‌برند، مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. استفاده از دی‌اکسید تیتانیوم[1] به‌عنوانعامل فوتوکاتالیست، علاوه بر ارتقای قابلیت تجزیه آلاینده‌های محیطی و کمک به پاکیزگی محیط شهری، می‌تواند بر برخی از ویژگی‌های دوام بتن نیز اثرگذار باشد. با وجود گزارش‌هایی مبنی بر افزایش تخلخل یا تغییر برخی ویژگی‌های مکانیکی بتن در اثر افزودن دی‌اکسید تیتانیوم، تأثیر این ماده بر مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلراید هنوز به‌طور کامل روشن نشده است و نیازمند تحقیقات بیشتری می‌باشد [۳].

یکی از روش‌های قابل‌اتکا برای ارزیابی نفوذپذیری کلراید در بتن، آزمون مهاجرت سریع یون کلراید به روش RCMT[2] است. است که به‌صورت آزمایشگاهی می‌تواند معیار مناسبی برای مقایسه عملکرد نمونه‌های مختلف بتن ارائه دهد [۴].

نادری و همکاران (۱۴۰۰) در تحقیق خود تأثیر نانوتیتانیوم، نانوسیلیس و سیلیکافیوم را بر خاصیت خودتمیزشوندگی بتن اکسپوز بررسی کردند. بدین منظور سه طرح اختلاط با جایگزینی ۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۵٪ نانوتیتانیوم به جای سیمان ساخته شد و برای افزایش مقاومت فشاری از سیلیکافیوم استفاده گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از ۰/۲۵ و ۰/۵٪ نانوتیتانیوم نسبت به نمونه شاهد باعث بهبود قابل توجه خاصیت خودتمیزشوندگی بتن می‌شود. همچنین ترکیب ۰/۵٪ نانوتیتانیوم و ۰/۲۵٪ سیلیکافیوم از نظر زیست‌محیطی و قابلیت نظافت بتن بهترین عملکرد را نشان داد [۵]. ویسالی و همکاران (۲۰۲۰) برای ساخت بتن خودتمیزشونده سازگار با محیط زیست از دی‌اکسید روی به‌عنوانافزودنی استفاده کردند. نتایج نشان داد که افزودن ۰/۵٪ اکسید روی، بیشترین خاصیت خودتمیزشوندگی را به بتن می‌دهد و هیچ تأثیر منفی بر خواص مکانیکی آن ندارد [۶]. ژو و همکاران (۲۰۲۳) در تحقیق خود تأثیر نانواکسید تنگستن و سنگ‌دانه‌های بازیافتی را بر بتن خودتمیزشونده بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده همزمان از نانوذرات و سنگ‌دانه‌های بازیافتی در بتن خودتمیزشونده، ضمن افزایش خاصیت خودتمیزشوندگی، به بهبود عملکرد، صرفه‌جویی اقتصادی و کاهش مشکلات زیست‌محیطی کمک می‌کند [۷]. دیکار و همکاران (۲۰۲۱) با انجام تحقیق روی بتن‌های حاوی ۰/۵، ۱ و ۱/۵٪ نانوتیتانیوم، به این نتیجه دست یافتند که با افزایش میزان نانوتیتانیوم به بیش از ۰/۵ ٪ مقاومت کششی بتن کاهش پیدا می‌کند. اما خاصیت فوتوکاتالیستی آن همچنان حفظ می‌شود [۸]. باگیاما و همکاران (۲۰۲۳) در تحقیق خود ملات سیمانی خودتمیزشونده با نانوتیتانیوم و پودر باریت در مقادیر مختلف تولید کردند. نمونه‌های تهیه شده با ۵٪ باریت و نانوتیتانیوم زیر نور خورشید و فرابنفش قرار گرفتند و مشخص شد بیشترین خاصیت خودتمیزشوندگی مربوط به ملات دارای حداقل ۴٪ نانوتیتانیوم در شرایط نور خورشید است [۹]. خنیرا و همکاران (۲۰۲۱) تأثیر پوشش فوتوکاتالیستی اکسید تیتانیوم را بر بتن مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که افزودن ۵٪ دی‌اکسید تیتانیوم موجب افزایش قابل توجه کارایی فوتوکاتالیستی شده و ترکیب به دست آمده می‌تواند تا ۹۰٪ دوده کربن را در مدت ۶۰ دقیقه حذف کند [۱۰].

بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که افزودن مواد فوتوکاتالیست اغلب باعث افزایش تراکم، آب‌گریزی و مقاومت فشاری بتن می‌شود. اما برخی ویژگی‌های مکانیکی یا دوام بتن را

[1] TiO_2

[2] Rapid Chloride Migration Test

تحت تأثیر منفی قرار می‌دهد. همچنین نانواکسید تیتانیوم پرکاربردترین و مؤثرترین فوتوکاتالیست در بتن خودتمیزشونده می‌باشد [۵-۸]. اما هزینه بالای نانوذرات، مشکل توزیع یکنواخت آن‌ها در بتن، جذب بالای آب توسط این ذرات و نیاز به فناوری خاص برای تولید و انتقال، مهم‌ترین موانع توسعه کاربرد فوتوکاتالیست‌ها در صنعت بتن هستند که باید برطرف شوند. بدین منظور در این تحقیق برای کاهش هزینه‌های ساخت و دسترسی آسان به مواد فوتوکاتالیست، بجای نانو اکسید تیتانیوم از دی‌اکسید تیتانیوم در ابعاد ماکرو استفاده می‌شود. بنابراین یکی از جنبه‌های نوآوری این تحقیق میزان خودتمیزشوندگی بتن با استفاده از دی-اکسید تیتانیوم و بررسی دوام آن در برابر نفوذ یون کلراید می‌باشد. یافته‌های این تحقیق می‌تواند گامی مؤثر در جهت توسعه مصالح ساختمانی نوین، ارتقای پایداری سازه‌های بتنی و حفاظت از زیرساخت‌های شهری باشد.

۲-مواد و مصالح

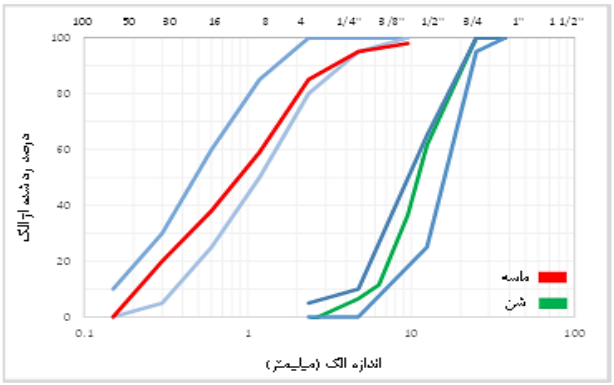
۲-۱- مصالح

سنگ‌دانه مورد استفاده جهت ساخت بتن در این تحقیق، مخلوط نخودی و بادامی با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر است که از معدن منطقه دوکوهک استان فارس تهیه گردیده. مشخصات فیزیکی این سنگ‌دانه مطابق با جدول شماره ۱ می‌باشد. مدول نرمی ماسه مورد استفاده مطابق با استاندارد ASTM-C136 نیز ۳/۱ بدست آمد.

جدول ۱- مشخصات شن و ماسه مصرفی

نوع سنگ‌دانه	حداکثر قطر سنگ‌دانه	مدول نرمی	وزن مخصوص SSD	جذب آب
	mm		kg/m^3	%
ماسه	۴/۷۵	۳/۱	۲۶۰۰	۲/۳
شن	۱۹	–	۲۶۳۰	۱/۵

روش اجرا و طبقه‌بندی الک‌های شماره‌بندی شده، مطابق استاندارد ASTM-C136 انجام گرفت که در شکل شماره ۱ نمایش داده شده است. همچنین میزان وزن و اندازه سنگ‌دانه‌ها با الگوی پیشنهادی استاندارد ASTM-C33 مقایسه و تطبیق داده شد. در شکل شماره ۱ الگوی دانه‌بندی ماسه با منحنی قرمز رنگ، الگوی دانه‌بندی شن با منحنی سبز رنگ و تعیین حداقل یا حداکثر میزان مجاز دانه‌بندی شن و ماسه طبق استاندارد ASTM-C33 با منحنی آبی رنگ نمایش داده شده است.



شکل ۱- منحنی دانه بندی شن و ماسه مصرفی

سیمان مصرفی در این تحقیق، سیمان تیپ ۲ فارس‌نو می‌باشد. چگالی این سیمان ۳/۱۰ gr/cm^3 است. آنالیز شیمیایی این سیمان در جدول شماره ۲ که منطبق بر شناسه فنی شرکت سازنده این محصول می‌باشد ضمیمه شده است.

جدول ۲- خواص شیمیایی سیمان و دی‌اکسید تیتانیوم مصرفی

نماد عنصر	سیمان	دی‌اکسید تیتانیوم
SiO_2	٪ ۲/۹	٪۰/۷
Fe_2O_3	٪ ۳/۹	–
Al_2O_3	٪ ۴/۷	٪۲
CaO	٪ ۶۰/۴	٪۱
MgO	٪ ۲/۲	٪۱
SO_3	٪ ۱/۳	٪۰/۱
C_3S	٪ ۲۲/۷	–
L.O.I	٪ ۲	–
Na_2O	–	٪۰/۲
TiO_2	–	٪۹۵

دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) یک ماده معدنی خنثی و جاذب اشعه UV است که به‌عنوانفتوکاتالیست کاربرد دارد و به نام‌های اکسید تیتانیوم و تیتانیا نیز شناخته می‌شود. این ماده در یکی از سه فرم کریستالی آناتاز، بروکیت و روتیل در طبیعت یافت می‌شود و از عناصر تیتانیوم و اکسیژن تشکیل شده است. سالانه حدود ۷/۵ میلیون تن از آن در جهان تولید می‌گردد و ایران دارای معادن بزرگ تیتانیوم مانند قره‌آغاج و کهنوج است که عمدتاً محصول

آن به‌صورت خام صادر می‌شود [۱۵]. در این تحقیق از دی‌اکسید تیتانیوم فاز آناتاز محصول Lomon Billions ساخت چین، با خلوص بالای ۹۵٪ با حداکثر اندازه ۵ میکرون، استفاده شد. سایر مشخصات این محصول به شرح جدول شماره ۲ و ۳ می‌باشد.

جدول ۳- مشخصات فیزیکی دی‌اکسید تیتانیوم مصرفی

حداکثر رطوبت	٪۰/۵
pH	۷
جرم مولکولی	۸۰ g/mol
وزن مخصوص	۴/۱ g/cm^3
نقطه جوش	۲۹۷۲ C
شکل ظاهری	سفید رنگ بدون بو
میزان انحلال پذیری	کم

شکل ۲- دی‌اکسید تیتانیوم مصرفی

استفاده از محصولات روان‌کننده یا کاهنده آب، به جهت افزایش کیفیت خصوصیات مکانیکی و دستیابی به روانی مطلوب بسیار مرسوم بوده و مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱]. در این تحقیق برای ساخت بتن و تامین روانی مدنظر و جلوگیری از تشکیل کلوخه ماده افزودنی از اَبرروان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات، استفاده گردید. خصوصیات فیزیکی این ماده مطابق جدول شماره ۴ می‌باشد.

جدول ۴- مشخصات فیزیکی اَبرروان کننده مصرفی

وزن مخصوص	استاندارد	یون کلر	pH	حالت فیزیکی	مقدار جایگزینی
۱/۲ gr/cm^3	ASTM C1017	٪۰/۱	۵/۵	مایع	٪۱ تا ٪۳ وزن سیمان

۳- طرح مخلوط

در این تحقیق برای ساخت نمونه‌های بتنی خودتمیزشونده، از دی‌اکسید تیتانیوم در نسبت‌های وزنی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪ نسبت به سیمان استفاده شد. تمامی نمونه‌ها با سیمان مصرفی ۴۰۰ کیلوگرم در هر متر مکعب، حداکثر اندازه اسمی سنگ‌دانه ۱۹ میلی‌متر و نسبت آب به سیمان ۰/۴ تهیه شدند. همچنین مقدار اَبرروان‌کننده پایه کربوکسیلات به‌گونه‌ای تنظیم شد که اسلامپ بتن در محدوده ۱±۱۰ سانتی‌متر ثابت بماند. همچنین آزمایش اسلامپ طبق استاندارد ASTM-C143 انجام شد.طرح اختلاط بتن مربوط به هر متر مکعب در جدول شماره ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- طرح اختلاط و مقادیر وزنی مصالح برای ساخت هر متر مکعب بتن

ردیف	نام	سیمان	شن	ماسه	دی‌اکسید تیتانیوم	نسبت دی-اکسید تیتانیوم	آب	اَبرروان کننده	اسلامپ
		kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	٪	kg/m^3	lit/m^3	cm
۱	RNJ-C	۴۰۰	۶۰۰	۱۲۰۰	۰	۰	۱۶۰	۴	۱±۱۰
۲	RNJ-5%	۴۰۰	۶۰۰	۱۲۰۰	۲۰	۵	۱۶۰	۴/۳	
۳	RNJ-10%	۴۰۰	۶۰۰	۱۲۰۰	۴۰	۱۰	۱۶۰	۴/۹	
۴	RNJ-15%	۴۰۰	۶۰۰	۱۲۰۰	۶۰	۱۵	۱۶۰	۵/۶	
۵	RNJ-20%	۴۰۰	۶۰۰	۱۲۰۰	۸۰	۲۰	۱۶۰	۶/۲	

٤-یافته‌ها

٤-۱- نفوذ یون کلراید

این آزمایش روشی غیرمخرب و سریع برای سنجش نفوذپذیری بتن در برابر یون کلراید است. در این تحقیق آزمون به روش RCMT طبق استاندارد ASHTO-T357 انجام شد. به منظور اطمینان از صحت و ارتقاء کیفیت نتایج آزمایش، دو برش مجزا از

بخش‌های مختلف هر نمونه تهیه و میانگین مقادیر حاصل به‌عنوانتیجه نهایی مورد استناد قرار گرفت. برای انجام آزمایش، از نمونه‌های استوانه‌ای بتن با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ضخامت ۵ سانتی‌متر استفاده شد. سپس نمونه‌ها کاملاً شسته و خشک شده و سپس در محفظه خلاء به‌گونه‌ای قرار گرفتند تا هر دو سطح آزاد آن‌ها در معرض فضای خالی باشد. پس از اشباع‌سازی با آب و ایزوله‌کردن سطح جانبی با غلاف لاستیکی، محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۰/۳٪ در تماس با سطح بالایی نمونه قرار داده شد. سپس انتهای دیگر نمونه با محلول نمک ۱۰٪ در تماس داده شد. برای شروع آزمایش، الکترودها به منبع ولتاژ مستقیم وصل و ابتدا ولتاژ روی ۶۰ ولت تنظیم شد و جریان عبوری از هر نمونه ثبت گردید. در صورت غیرمجاز بودن مقدار جریان اولیه، ولتاژ تنظیم می‌شود تا از گرم‌شدن بیش از حد نمونه جلوگیری شود. پس از حدود ۱۸ ساعت، دستگاه خاموش و نمونه‌ها از غلاف خارج شدند. در نهایت ضریب مهاجرت یون کلراید بر اساس رابطه (۱) محاسبه شد. در ادامه نمونه‌ها را پس از اتمام آزمایش به دو نیم تقسیم کرده، سپس محلول نیترات نقره ۰/۱ N بر روی سطح شکسته شده اسپری گردید تا محیط آلوده به کلراید در بتن تغییر رنگ پیدا کند.

$$D_{nssm}=\frac{0.0239\times(273+T)^{L}}{(U-2)\times t}\times\left[(X_d-0.0238)\times\sqrt{\frac{(273+T)T\times d}{U-2}}\right]$$

D_{nssm}: ضریب مهاجرت حالت غیر پایدار

U: ولتاژ اعمال شده

T: مقدار میانگین دمای اولیه و نهایی در محلول آنولیت بر حسب سانتی‌گراد

L: ضخامت نمونه بر حسب میلیمتر

X_d: مقدار میانگین عمق نفوذ بر حسب میلیمتر

t: مدت زمان انجام آزمایش بر حسب ساعت

همچنین عمق نفوذ کلراید با استفاده از رابطه (۲) بدست می‌آید. رابطه M نرخ نفودیون کلر برحسب میلیمتر بر ولت ساعت، h میانگین عمق نفوذ یون کلر بر حسب میلیمتر، V ولتاژ اعمال شده به آزمونه‌ها برحسب ولت، t مدت زمان آزمایش برحسب ساعت می‌باشد[۲۳].

$$M=\frac{h}{V\times t}$$

در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ویرایش ۱۳۹۹ مقادیر مجاز مشخصه از آزمایش‌های نفوذپذیری بتن برای اعمال دوام در شرایط محیطی به شرح جدول شماره ۶ تعیین شده است [۲۴].

جدول ۶- مقادیر مجاز مشخصه از آزمایش‌های نفوذ پذیری بتن برای اعمال در شرایط محیطی [۲۴]

طبقه بندی	محدوده ی مجاز مقادیر مشخصه (دوام)[1]			
	۱	۲	۳	۴
	شرایط XCD1 و XCS1	شرایط XCS2 و XCD2 و XCD3	شرایط XCS3 و XCD4	شرایط XCS4
۴. مهاجرت کلرید RCMT (در سن ۲۸ روز)				
روش "الف" استاندارد ملی ۲۱۴۷۹، حداکثر، میلیمتر بر ولت ساعت.	–	۰،۰۴۵	۰،۰۳	۰،۰۲
روش "ب" استاندارد ملی ۲۱۴۷۹،حداکثر، مترمربع بر ثانیه	–	۱۸×۱۰^{-۱۲}	۱۲×۱۰^{-۱۲}	۶×۱۰^{-۱۲}

شرایط محیطی XCS2: بطور دائم غرقاب یا درون خاک خیس یا مرطوب قرار دارند.

شرایط محیطی XCD2: مرطوب به ندرت خشک.

شرایط محیطی XCD3: بتن مستقیم در تماس با خاک دارای یون کلراید

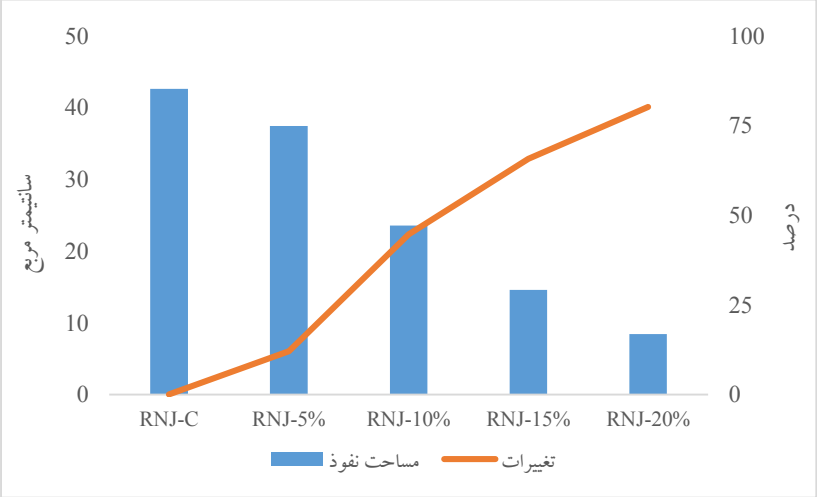
شرایط محیطی XCD4: در تماس با چرخه‌ی تر و خشک شدن مانند روسازی محوطه ساختمان و پارکینگ‌ها.

شرایط محیطی XCS4: نواحی در معرض پاشش جزر و مد

نتایج نشان داد که هرچه مقدار دی‌اکسید تیتانیوم در مخلوط بتن افزایش یابد، میزان نفوذ یون کلراید در نمونه‌ها به طور محسوسی کاهش پیدا می‌کند. به‌طوری که این کاهش در طرح‌های RNJ-5, 10, 15, 20% نسبت به نمونه کنترل به ترتیب برابر با ۱۲، ۴۵، ۶۶ و ۸۰٪ (گرد شده به بالا) بوده است. بنابراین افزایش مقدار دی‌اکسید تیتانیوم در ترکیب بتن موجب ارتقای تراکم ساختار و کاهش تخلخل کلی بتن می‌شود که این امر منجر به محدود شدن مسیرهای نفوذ یون‌های کلراید و کاهش قابلیت انتشار آن‌ها درون ماتریس بتن خواهد شد. علاوه بر این، دی‌اکسید تیتانیوم به‌عنوانیک ماده معدنی غیرفعال، با مسدودسازی کانال‌های نفوذ و حتی جذب بخشی از یون‌ها، حرکت یون‌های کلراید در ساختار بتن را کند و با مانع مواجه می‌سازد. این خصوصیات، همراه با ویژگی فوتوکاتالیستی ذاتی TiO_2، سبب افزایش دوام و طول عمر سازه‌های بتنی در معرض محیط‌های حاوی یون کلراید، نظیر مناطق صنعتی، نواحی ساحلی و راه‌های شهری تحت عملیات نمک‌پاشی، خواهد شد. جدول ۷ و شکل ۳ میزان نفوذ یون کلراید در بتن و نتایج این آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۷- مقایسه میزان ضریب انتشار، نرخ نفوذ، حداکثر عمق نفوذ و مساحت نفوذ یون کلراید در نمونه‌های مختلف

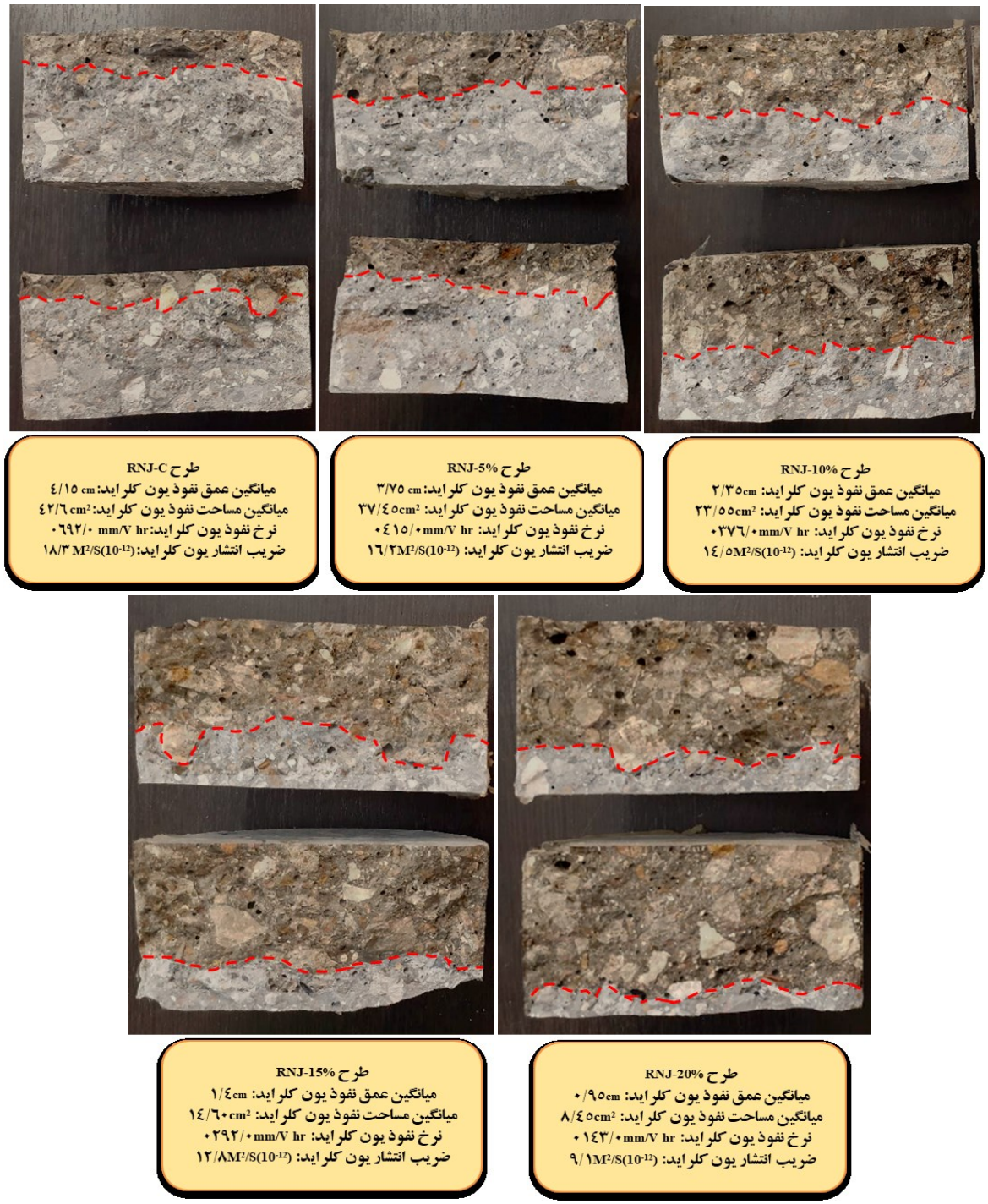
نام طرح	ضریب انتشار یون کلراید	نرخ نفوذ یون کلراید	میانگین عمق نفوذ یون کلراید	میانگین مساحت نفوذ یون کلراید	تغییرات (بر اساس مساحت)	ارزیابی بر اساس مبحث ۹	
	$M^2/S\ (10^{-12})$	mm/V hr	cm	cm^2	٪	الف	ب
RNJ-C	۱۸/۳	۰/۰۶۹۲	۴/۱۵	۴۲/۶	–	×	×
RNJ-5%	۱۶/۲	۰/۰۴۱۵	۳/۷۵	۳۷/۴۵	۱۲/۱	۲	۲
RNJ-10%	۱۴/۵	۰/۰۳۷۶	۲/۳۵	۲۳/۵۵	۴۴/۷	۲	۲
RNJ-15%	۱۲/۸	۰/۰۲۹۲	۱/۴	۱۴/۶۰	۶۵/۷	۲	۳
RNJ-20%	۹/۱	۰/۰۱۴۳	۰/۹۵	۸/۴۵	۸۰/۲	۳	۴



شکل ۳- مقایسه مساحت نفوذ یون کلراید در نمونه‌های مختلف

نتایج نشان می‌دهد که استفاده از دی‌اکسید تیتانیوم نه‌تنها می‌تواند به جهت کاهش نفوذپذیری کلراید، دوام بتن را افزایش دهد بلکه یکی از ابزارهای کلیدی برای مقابله با خوردگی میلگرد و فرسودگی زودهنگام سازه‌های زیرساختی نیز به شمار می‌آید. مقایسه این یافته‌ها با پیشینه تحقیق، حاکی از همخوانی کامل است. بعنوان مثال در تحقیق تکمه‌داش و همکاران (۲۰۱۶)، مشاهده شد که استفاده از نانو تیتانیوم تا ۳٪ وزنی سیمان، تراکم و نفوذناپذیری بتن را به میزان ۸۴٪ افزایش داده است. این داده‌ها نشان می‌دهد که کاهش نفوذ کلراید با افزودن TiO_2 حتی در مقیاس میکرونی (و نه صرفاً نانویی)، نیز به وضوح قابل ردیابی است[۱۶]. همچنین

تحقیق موزنسکی و همکاران (۲۰۱۹) و کالوندی و همکاران (۱۳۹۷) نیز تأکید می‌کنند که افزودن نانو ذرات تیتانیوم به بتن موجب بهبود تراکم، کاهش تخلخل و در نتیجه کاهش نفوذپذیری یون‌های مهاجم می‌شود[۲۰,۱۸]. به‌طور خاص، بهره‌گیری همزمان از دی‌اکسید تیتانیوم و دی‌اکسید آلومین باعث می‌شود علاوه بر ارتقای خاصیت خودتمیزشوندگی، از منظر مقاومت برابر یون‌های خورنده نیز دستاوردهای مطلوبی حاصل گردد. از طرفی افزایش دوام و کاهش نیاز به تعمیر و نگهداری به طور مستقیم در کاهش هزینه‌های دوره بهره‌برداری تأثیرگذار خواهد بود. همچنین این اطمینان را می‌دهد که استفاده از دی‌اکسید تیتانیوم به ویژه در مناطقی که به‌دلیل حضور بالای کلرید (نمک‌پاشی یا مجاورت با منابع آب شور)، دوام سازه‌های بتنی همواره با تهدید روبه‌روست، می‌تواند موثر باشد. شکل شماره ۴ میزان نفوذ یون کلراید در نمونه‌های مورد تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۴ میزان نفوذ بون کلراید در بتن پس از انجام آزمایش

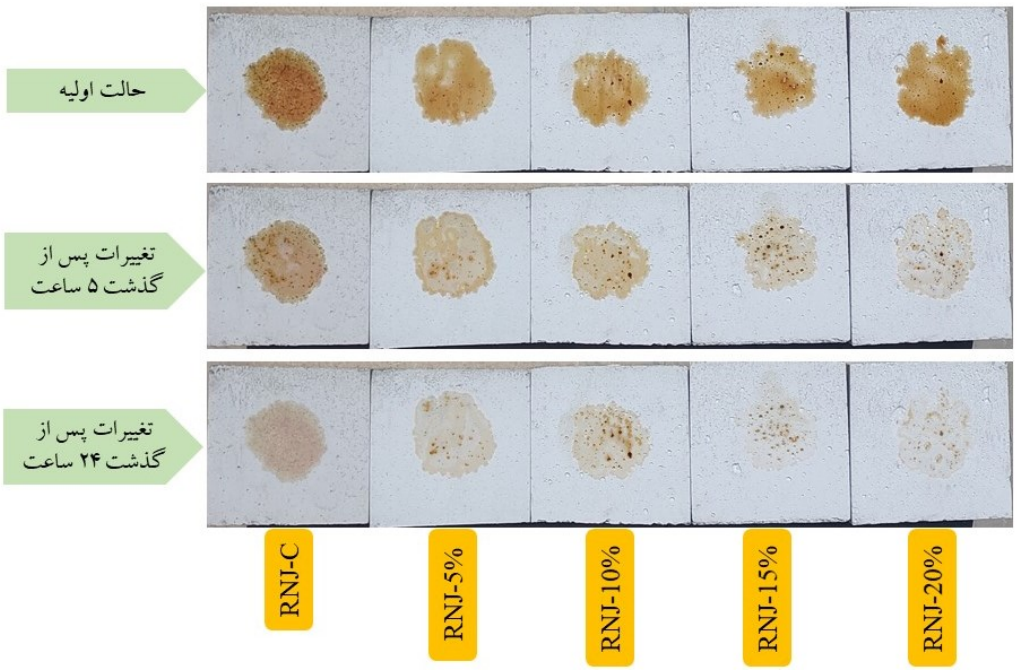
در شکل ۴ به منظور اطمینان از صحت و کیفیت نتایج آزمایش، دو برش مجزا از بخش‌های مختلف نمونه تهیه شد و میانگین مقادیر حاصل به‌عنوان نتیجه نهایی مورد استناد قرار گرفت.

همچنین طبق نتایج بدست آمده و ارزیابی آن بر مبنای مبحث نهم مقررات ملی ویرایش ۱۳۹۹، مشخص شد که استفاده از طرح RNJ-5, 10% در شرایط محیطی XCS2, XCD2, XCD3 و طرح‌های RNJ-15% در شرایط محیطی XCD4 و طرح RNJ-20% در شرایط محیطی XCD4, XCS4 قابل استفاده می‌باشد.

لازم به ذکر است که ناحیه سفیدرنگ نشان‌دهنده میزان نفوذ یون کلراید در بتن است که پس از اسپری کردن محلول نیترات نقره روی سطح بتن، با تغییر رنگ قابل مشاهده می‌شود.

٤- ۲- خودتمیزشوندگی

شکل شماره ۵ مقایسه عملکرد خودتمیزشوندگی سطوح مختلف بتن فوتوکاتالیستی پس از آلودگی با لکه روغن سوخته در بازه‌های زمانی ۵ و ۲۴ ساعت را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در تصویر مشاهده می‌شود، نمونه‌های مورد بررسی شامل بتن شاهد و طرح‌های RNJ-5, 10, 15, 20% هستند. برای ارزیابی خاصیت خودتمیزشوندگی، سه قطره آلاینده روغن صنعتی تیره رنگ روی سطح نمونه‌ها ریخته شد و سپس نمونه‌ها تحت نور مستقیم خورشید در دمای محیط ۱۰±۳۵ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۷±۲۵٪ و شدت تابش فرابنفش (UV) به میزان حداکثر ۱۰ W/m^2 قرار گرفتند. سپس تغییرات ظاهری سطح در زمان‌های مختلف بررسی و مقایسه شد. در ساعات اولیه (ردیف نخست تصویر که مربوط به گذشت ۵ ساعت است)، باقی ماندن لکه روغن روی سطح نمونه‌ها، به خصوص در نمونه شاهد و RNJ-5, 10%، نشان‌دهنده پایین بودن خاصیت خودتمیزشوندگی در این نمونه‌هاست و بیانگر این است که میزان ترکیبات موجود در آن‌ها کافی نبوده است. اما در نمونه‌های RNJ-15, 20% همان ابتدا روند کمرنگ شدن جوهر با سرعت و شدت بیشتری آغاز شده که نشان‌دهنده تأثیر مثبت حضور مواد فوتوکاتالیستی در افزایش کارایی پاکسازی سطحی است. پس از گذشت ۲۴ ساعت، تفاوت عملکرد کاملاً محسوس می‌شود و نمونه‌های RNJ-15, 20% تقریباً تا حد زیادی از روغن و سوخته پاک شده‌اند و تنها آثاری کم‌رنگ بر سطح آن‌ها مشاهده می‌شود. این تفاوت معنادار نشانه عملکرد مؤثر مواد فوتوکاتالیستی مانند نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) است که با فعال شدن تحت تأثیر نور آفتاب منجر به آغاز واکنش‌های اکسایشی و تجزیه ترکیبات آلی آلودگی می‌شوند. بنابراین استفاده دقیق و بهینه از این مواد در طرح اختلاط بتن می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش خاصیت خودتمیزشوندگی و بهبود دوام و زیبایی سطوح ایفا کند.



شکل ۵- مقایسه میزان خودتمیزشوندگی نمونه‌های مورد تحقیق

۵- بحث

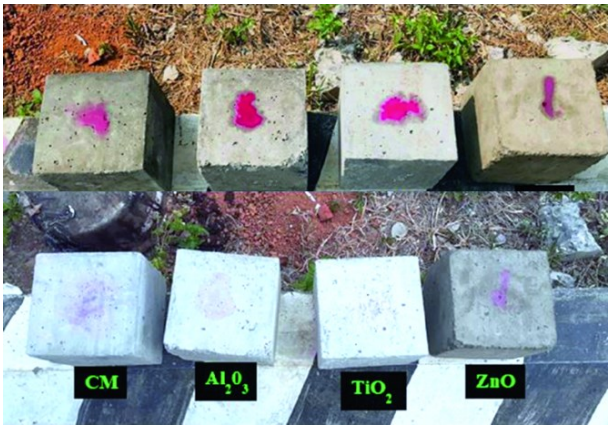
خواص فوتوکاتالیستی بتن علاوه بر بهبود دوام و طول عمر سازه، نقش مهمی در کاهش هزینه‌های نگهداری و حفاظت از ظاهر سازه‌ها (به‌خصوص بافت شهری و تاریخی) ایفا می‌کند و نیاز به روش‌های سنتی و پرهزینه تمیزکاری را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. این فناوری با تجزیه آلاینده‌های موجود در باعث ارتقای نظافت شهری می‌شود. بیشترین اثربخشی بتن‌های فوتوکاتالیستی در سازه‌هایی است که در معرض تابش نور خورشید هستند. این مزیت باعث می‌شود تا بتن فوتوکاتالیستی به‌عنوانراهکاری نوآورانه برای افزایش دوام سازه‌ها و کمک به حفظ محیط زیست، مورد توجه قرار گیرد.

شکل شماره ۶ مربوط به تحقیق جیانگ و همکاران در سال ۲۰۲۳ است که میزان خودتمیزشوندگی بتن را با استفاده از فوتوکاتالیست‌های مختلف مقایسه می‌کند. بر اساس نتایج این مطالعه، ترکیبات تیتانیوم عملکرد به مراتب بهتری نسبت به سایر فوتوکاتالیست‌ها مانند دی‌اکسیدروی یا آلومینیوم در ارتقای خاصیت خودتمیزشوندگی بتن از خود نشان داده‌اند [۲۵].

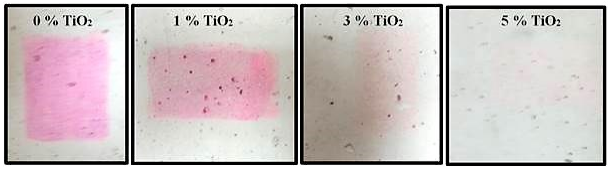
همچنین شکل شماره ۷ نیز برگرفته از تحقیق دیگر چن و همکاران در سال ۲۰۲۲ است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که افزودن ۵٪ نانو دی‌اکسید تیتانیوم به بتن معمولی بالاترین خاصیت خودتمیزشوندگی را ایجاد کرده و تعادل مناسبی میان عملکرد و مصرف به دست می‌آید [۲۶].

با این حال، نتایج تحقیق حاضر بیانگر آن است که برای کسب خاصیت خودتمیزشوندگی، حداقل به ۱۵ تا ۲۰٪ دی‌اکسید تیتانیوم نیاز است. این تفاوت می‌تواند به‌دلیل نوع و اندازه ذرات فوتوکاتالیست مورد استفاده در بتن باشد. نکته مهم آن است که افزودن بیش از حد دی‌اکسید تیتانیوم نه تنها باعث افزایش بیشتر خاصیت خودتمیزشوندگی نمی‌شود، بلکه می‌تواند دوام و عملکرد بتن را کاهش داده و هزینه‌ها را افزایش دهد. بنابراین انتخاب مقدار و روش اختلاط مناسب این ماده اهمیت ویژه‌ای در حفظ کیفیت سازه و دستیابی به حداکثر اثربخشی دارد.

همچنین نتایج آزمایش نفوذ یون کلراید در بتن نشان داد که طرح RNJ-15% قابل استفاده در نما، محوطه‌سازی و پارکینگ ساختمان و طرح RNJ-20% قابل استفاده در تمامی شرایط‌های محیطی می‌باشند.



شکل ۶- مقایسه میزان خودتمیزشوندگی بتن با استفاده از مواد کاتالیزور مختلف [۱۹]



شکل ۷- مقایسه میزان خودتمیزشوندگی بتن با استفاده از درصدهای مختلف نانو دی‌اکسید تیتانیوم [۲۰]

٦-نتیجه‌گیری

برخی از مهم‌ترین نتایج این تحقیق به شرح ذیل می‌باشد:

۱. مقایسه نمونه‌های ساخته‌شده نشان داد که با افزایش درصد دی‌اکسید تیتانیوم از ٪۵ به ٪۲۰، کاهش قابل‌توجهی در نرخ نفوذ و ضریب انتشار یون کلراید در بتن مشاهده می‌شود. میزان کاهش نفوذ یون کلراید در طرح RNJ-20% نسبت به طرح شاهد حدود ٪۸۰ است، که این موضوع نقش مثبت افزودنی TiO_2 را در بهبود دوام بتن به‌ویژه برای شرایط محیطی شدید (طبقات ۳ و ۴ آیین‌نامه‌ای) اثبات می‌کند.

۲. بر اساس ارزیابی انجام‌شده طبق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، طرح‌های دارای ۱۵ و ۲۰٪ دی‌اکسید تیتانیوم تنها نمونه‌هایی بودند که امکان استفاده در بالاترین سطح طبقه‌بندی محیطی را دارند. در حالی که نمونه‌های با درصد کمتر فقط برای خورندگی متوسط مناسب‌اند. این امر می‌تواند راهنمای مشخصی برای انتخاب طرح اختلاط بتن در پروژه‌های عمرانی با توجه به شرایط محیطی ارائه دهد.

۳. مقایسه خاصیت خودتمیزشوندگی نمونه‌ها نشان داد که استفاده بیش از اندازه دی‌اکسید تیتانیوم باعث افزایش خاصیت

فوتوکاتالیستی یا خودتمیزشوندگی در بتن نمی‌شود. بطوریکه استفاده از مقادیر بالاتر از ۱۵٪ وزنی دی‌اکسید تیتانیوم در بتن تأثیر محسوسی در خاصیت خودتمیزشوندگی بتن نخواهد داشت.

۴. افزودن دی‌اکسید تیتانیوم به ترکیب بتن موجب ایجاد خاصیت فوتوکاتالیستی در سطح بتن شده و سطوح بتنی را خودتمیزشونده می‌سازد. این ویژگی نه تنها به افزایش عمر مفید و کاهش میزان خوردگی منجر شده، بلکه باعث کاهش هزینه‌های مربوط به نگهداری و حفظ کیفیت ظاهری سازه‌های بتنی در محیط‌های مستعد آلودگی، به ویژه شهرهای بزرگ، می‌گردد.

۷- مراجع

[1]. Lapidus, A., Korolev, E., Topchiy, D., Kuzmina, T., Shekhovtsova, S., & Shestakov, N. (2022). Self-cleaning cement-based building materials. Buildings, 12(5), 606. https://doi.org/10.3390/buildings12050606.

[2]. Diamanti, M. V., Luongo, N., Massari, S., Lupica Spagnolo, S., Daniotti, B., & Pedeferri, M. P. (2021). Durability of self-cleaning cement-based materials. Construction and Building Materials, 280, 122483. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122483

[3]. Sakthipriya, C., & Manikandan, R. K. (2020). An experimental study on TiO_2 based self-cleansing concrete by partial replacement of sand by waste glass. SSRG International Journal of Civil Engineering, 7(12), 9–12. https://doi.org/10.14445/23488352/IJCE-V7I12P102.

[4]. Ehsani, A., & Shabani, B. (2019). TiO_2 nanoparticles on flexural damage of self-compacting concrete. International Journal of Damage Mechanics, 18(8), 7895–1049.

[5]. Naderi, A., & Riahi, S. (2021). The effects of TiO_2 nanoparticles on flexural damage of self-compacting concrete. International Journal of Damage Mechanics, 20(1), 1049–1056. https://doi.org/10.1177/1056789510388522

[6]. Visali, P., Spiesz, P., Hüsken, G., & Brouwers, H. J. H. (2020). SCC modification by use of amorphous nano-silica. Cement and Concrete Composites, 45, 69–81. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.013

[7]. Zhu, L., Hao, Y., Lu, Z., Wu, H., & Ran, Q. (2019). Do economic activities cause air pollution? Evidence from China's major cities. Sustainable Cities and Society, 49, 101616. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101616

[8]. Dikar, J., & Barluenga, G. (2025). Effect of silica-based nano and micro additions on SCC at early age and on hardened porosity and permeability. Construction and Building Materials, 81, 154–161. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.032

[9]. Bagima, K., & Keivan, A. (2023). The effect of TiO_2 and ZnO nanoparticles on physical and mechanical properties of normal concrete. Asian Journal of Civil Engineering, 14(4), 517–531.

[10]. Khannyra, S., Mosquera, M. J., Addou, M., & Gil, M. L. A. (2021). Cu-TiO_2/SiO_2 photocatalysts for concrete-based building materials: Self-cleaning and air de-pollution performance. Construction and Building Materials, 313, 125419. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125419

[11]. Visali, C., Priya, A. K., & Dharmaraj, R. (2021). Utilization of ecofriendly self-cleaning concrete using zinc oxide and polypropylene fibre. Materials Today: Proceedings, 37, 1083–1086. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.391

[12]. Xu, Y., Chen, W., & Jiang, T. (2023). Self-cleaning fair-faced concrete adopting recycled aggregates. In Multi-functional concrete with recycled aggregates (pp. 227–250). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85740-3.00012-1

[13]. Dikkar, H., Kapre, V., Diwan, A., & Sekar, S. K. (2021). Titanium dioxide as a photocatalyst to create self-cleaning concrete. Materials Today: Proceedings, 45, 4058–4062. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.879

[14]. Bhagyamma, G., & Panchangam, S. C. (2023). Development of self-cleaning cement mortar exposed to indoor and outdoor environment. Materials Today: Proceedings. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.084

[15]. Hossein Beiki, & Nouraleh. (2023). Investigation of the photocatalytic properties of titanium dioxide with nanosilica in self-cleaning concrete. Research in Science, Engineering and Technology, 31(9), 31-46.

[16]. Ghadim Takmeh Dash, F., Jafari Sadeghi, A., & Afshin, H. (2021). Investigation of some durability properties of concrete pavements containing nanoparticles. Journal of Amirkabir Civil Engineering, 1–10.

[17]. Ismaili, J., Andalibi, K., & Kasaei, J. (2025). Investigation of the effects of adding nano-alumina on the mechanical properties of concrete. In 10th International Congress of Civil Engineering (pp. 15–30). Tabriz, Iran.

[18]. Muzenski, V., & Rajesh, C. A. (2022). Experimental investigations on mechanical strength of concrete using nano-alumina and nano-clay. In International Conference on Emerging Trends in Material Science and Technology (pp. 143–160).
[19]. Behfarnia, K., & Salemi, N. (2023). The effects of nano-silica and nano-alumina on frost resistance of normal concrete. Construction and Building Materials, 580–584.
[20]. Kalvandi, M., Rezaei, M., & Kalvandi, M. (2025). Profile of the authors: The effect of iron nanoparticles, iron oxide, titanium and silica particles on the properties and durability of concrete. In 2nd National Congress of Civil Engineering and Construction Projects (pp. 20–31).
[21]. Sharma, S., Kaur, I., & Gupta, S. (2019). Effect of fly ash and nano titanium dioxide on compressive strength of concrete. International Research Journal of Engineering and Technology, 6(7), 2262–2265.
[22]. Talaulikar, G. S., & Savoikar, P. P. (2023, July). Durability Assessment of Concrete Structures Using RCPT and RCMT. In International Conference on Interdisciplinary Approaches in Civil Engineering for Sustainable Development (pp. 471-479). Singapore: Springer Nature Singapore.
[23]. Ministry of Roads and Urban Development. (2020). National Building Regulations of Iran: Part 9 – Design and Execution of Reinforced Concrete Structures (9th Edition, Table 9, p. 506). Iranian National Standards Organization. [In Persian]
[24]. Jiang, L., Zheng, H., Xiong, J., Fan, Z., Shen, T., Xie, H., ... & Li, W. (2023). Fabrication of negative carbon superhydrophobic self-cleaning concrete coating: high added-value utilization of recycled powders. Cement and Concrete Composites, 136, 104882.
[25]. Chen, G., Yan, D., Liu, J., Xu, Y., Zhou, Y., Wu, B., & Song, J. (2022). Self-cleaning coating for exterior walls of concrete buildings. Surface Innovations, 11(6-7), 453-463.

Investigation of the Effect of Titanium Dioxide on the Self-Cleaning Property and Durability of Concrete Against Chloride Ion Penetration Using the RCMT Method

Mohammad Javad Zare Ghanat Novi
Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran.
Ashkan Khodabandehlou *
Associate Professor, Department of Civil Engineering, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran.
Peyman Hamidi
Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran.
Keyvan Farzad
Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran.

Abstract

In recent years, self-cleaning concretes have gained significant importance due to their high capacity for reducing environmental pollution and maintenance costs. These concretes, employing photocatalytic coatings with titanium dioxide (TiO_2), facilitate the removal of pollutants and help maintain the beauty and cleanliness of urban facades. However, the durability and sustainability of self-cleaning concretes against chloride ion penetration, particularly in corrosive environments, remain ambiguous concerning their widespread application. This study aims to investigate the effect of TiO_2 on enhancing concrete durability against chloride ion penetration and its self-cleaning properties. For this purpose, five concrete mix designs with titanium dioxide at varying percentages of 0, 5, 10, 15, and 20% by cement weight were prepared and evaluated using the RCMT method in accordance with Section 9 of the National Building Regulations. The results demonstrated that adding up to 20% TiO_2 resulted in an 80% reduction in chloride ion penetration compared to the control sample. Furthermore, the self-cleaning properties were significantly improved in samples with 15% and 20% additive. This research indicates that utilizing titanium dioxide in concrete not only enhances durability in corrosive environments but also enables the production of self-cleaning concretes suitable for use in urban pavements and structures.

Keywords: Self-cleaning concrete, Titanium dioxide, Chloride ion, RCMT test, Photocatalytic property.

* Corresponding Author: a.khodabandehlou@iau.ac.ir