

اثر نانوذرات صفر بعدی بر دوام کامپوزیت های سیمانی در معرض کلراید

محمد امین حامدی راد^۱

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران - مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه علم و صنعت ایران

hamedirad@chmail.ir

چکیده

در طول سالیان اخیر، توسعه تکنولوژی نانو در جهان بسیار قابل توجه بوده است. عامل مخرب کلراید یکی از معمول ترین عوامل خرابی بتن مسلح در محیط های خشن و دارای عوامل مهاجم می باشد. در این نوع خرابی یون های کلر با نفوذ به داخل بتن، باعث کاهش قلیائیت بتن (PH) و از بین رفتن لایه محافظ میلگرد شده و در نتیجه موجب خوردگی میلگرد و خرابی بتن می شود. هدف از این پژوهش، بررسی اثر نانو ذرات صفر بعدی مختلف شامل تیتانیوم دی اکسید (TiO₂)، خاکستر پسته برنج (RHA)، زیرکونیوم دی اکسید (ZrO₂)، اکسید آهن (Fe₃O₄)، اکسید آلومینیوم (Al₂O₃)، سیلیسیم دی اکسید (SiO₂) و اکسید مس (CuO) بر دوام در برابر نفوذ یون کلر کامپوزیت های سیمانی می باشد. بدین منظور، در مقالات مختلف، این نانو ذرات به بتن و یا خمیر سیمان افزوده شده و سپس اثر هر یک در هر مخلوط، با مخلوط بدون نانوذرات مقایسه و نتیجه گیری شد. در نهایت نانوذرات سیلیسیم دی اکسید و خاکستر پسته برنج به دلیل عملکرد پوزولانی، پر کنندگی و هسته زایی و دیگر نانو ذرات شامل دی اکسید زیرکونیوم، اکسید آهن، تیتانیوم دی اکسید، اکسید آلومینیوم و اکسید مس به دلیل عملکرد پر کنندگی و هسته زایی، اثر مثبتی بر کاهش نفوذ پذیری و افزایش دوام داشتند. بنابر این استفاده از این نانوذرات موجب افزایش مقاومت کامپوزیت های سیمانی در برابر نفوذ یون کلر و همچنین کاهش خرابی بتن مسلح گردید.

کلمات کلیدی: نانو، بتن، سیمان، دوام، کلراید

مقدمه

بتن مسلح یکی از معمولترین مصالح مورد استفاده در جهان می باشد. بتن پرتلند معمولی از سیمان پرتلند و سنگدانه و آب تولید می شود که با توجه به ساختار متخلخل آن، در برابر ورود مایعات و یون های مهاجم در محیط های خشن، آسیب پذیر است. موضوع دوام بتن به طور خاص در طول عمر یک سازه بتنی مورد توجه است. اخیراً استفاده از ذرات نانو در مصالح بر پایه خمیر سیمان، به دلیل ابعاد ریز و ویژگی های بارز این ذرات، مورد توجه ویژه ای قرار گرفته است. [1] در سال های اخیر، پژوهش های مربوط با تکنولوژی نانو در جهان افزایش قابل ملاحظه ای داشته است. در دو دهه اخیر، بعضی از نانو مواد در کامپوزیت های سیمانی، به جهت بهبود ساختار، خواص مکانیکی، خواص دوام و نرخ هیدراسیون در بتن مصرف شده اند. [2] سازه های بتنی معمولاً در معرض محیط های خشن و حاوی کلرید قرار دارند که ممکن است خواص مکانیکی و دوام بتن مسلح را با خوردگی میلگرد تحت تاثیر قرار دهند. در این نوع خرابی یون های کلر با نفوذ به داخل بتن، باعث کاهش PH بتن و از بین رفتن لایه محافظ میلگرد شده و در نتیجه موجب خوردگی میلگرد و خرابی بتن می شود. هر سازه پس از احداث، نیاز به تعمیر و مرمت خواهد داشت. هزینه تعمیر و مرمت سازه ها، بخش عمده ای از بودجه کشور را به خود اختصاص میدهد. به طور مثال

^۱ Rice Husk Ash

هزینه تعمیر و مرمت سازه ها در کشور انگلستان سالانه بیش از ۲ میلیارد پوند تخمین زده شده است. [3] هدف از این پژوهش، بررسی اثر نانو ذرات مختلف شامل نانو ذرات صفر بعدی شامل RHA ، ZrO_2 ، Fe_3O_4 ، TiO_2 ، Al_2O_3 ، SiO_2 و CuO بر دوام در برابر نفوذ یون کلر کامپوزیت های سیمانی میباشد. بدین منظور، مقالات مختلفی که این نانو ذرات را با مخلوط کنترلی مقایسه کردند مورد بررسی قرار گرفتند. در تمام این مقالات، اثر نانو ذرات بر دوام کامپوزیت های سیمانی با انجام آزمایش های مختلف شامل آزمایش توزیع یون کلر تسریع شده (RCMT)^۲، مقاومت الکتریکی، جذب آب موئینه، سرعت پالس آلتراسونیک (UPV)^۳، نفوذ یون کلر تسریع شده (RCPT)^۴، جذب آب حجمی، عمق نفوذ، تخلخل سنجی با جیوه (MIP)^۵ و همچنین اثر آن ها بر خواص مکانیکی با آزمایش های مقاومت فشاری و کششی غیر مستقیم تعیین شد. در این پژوهش به بررسی نتایج RCMT و RCPT انجام شده بر روی نمونه های کامپوزیت سیمانی حاوی نانو ذرات صفر بعدی مختلف برای بررسی دوام در برابر نفوذ یون کلر خواهیم پرداخت. در مقالات مختلف، این نانو ذرات به بتن و یا خمیر سیمان افزوده شده و سپس اثر هر یک در هر مخلوط بر نتایج آزمایش ها، با نتایج آزمایش های مخلوط بدون نانوذرات مقایسه و نتیجه گیری شد.

مرور ادبیات

مطابق آنچه گفته شد، برای بررسی دوام کامپوزیت های سیمانی از RCPT و RCMT استفاده می شود. RCPT مطابق استاندارد ASTM C1202 [4] و RCMT مطابق استاندارد NTBuild 492 [5] می باشند. در مقاله ای که توسط Mohammad Balapour و همکاران منتشر گردید، اثر نانو ذرات و میکروذرات خاکستر پسته برنج (RHA) بر خواص مکانیکی و دوام ملات های سیمانی بررسی شد. در این مقاله درصد های مختلف از نانو ذرات و میکروذرات در مخلوط های سیمانی استفاده و اثر آن با انجام آزمایش های مقاومت فشاری، جذب آب موئینه، RCMT و مقاومت الکتریکی بر آن سنجیده شد. مشاهده شد که با افزودن نانو ذرات به ملات های سیمانی، دوام بتن در برابر نفوذ یون کلر بهبود یافت. [6] در مقاله دیگری که توسط A. H. Shekari و همکاران منتشر گردید، به بررسی اثر ۴ نوع نانو ذره Al_2O_3 ، TiO_2 ، Fe_3O_4 ، ZrO_2 بر خواص مکانیکی و دوام بتن با انجام آزمایش های مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیر مستقیم، RCPT و جذب آب پرداخته شد. بدین منظور درصد ثابتی از نانو ذرات فوق در طرح مخلوط های یکسانی بکار گرفته شد و در نهایت اثر هر یک به طور جداگانه به مخلوط کنترلی و دیگر نانو ذرات مقایسه گردید. در بین این ۴ نانو ذره، اثر ZrO_2 بر بهبود خواص دوام در برابر نفوذ یون کلر بیش از سایر نانو ذرات ارزیابی شد. [7] Hongjian Du و همکاران به بررسی اثر نانوسیلیس (SiO_2) بر خواص مکانیکی و دوام بتن با انجام آزمایش های مقاومت فشاری، عمق نفوذ، جذب آب، RCMT و MIP پرداختند. برای این منظور طرح مخلوط های مختلفی با درصد های متفاوت از نانو سیلیس تولید شد. سپس اثر استفاده از نانوسیلیس در این طرح مخلوط ها با طرح مخلوط کنترلی مقایسه گردید. در نهایت بهبود دوام در اثر استفاده از نانوسیلیس در بتن مشاهده شد. همچنین در این مقاله به اثر موثر دیسپرسیون نانوذرات بر میزان بهبود خواص دوام مخلوط ها اشاره گردید. [1] در پژوهش دیگری که توسط Ehsan Mohseni و همکاران انجام شد، اثر نانوذرات TiO_2 و خاکستر پسته برنج (RHA) بر خواص مکانیکی و دوام ملات در برابر کلراید بررسی شد. در این پژوهش درصد های مختلفی از نانو ذرات و خاکستر پسته برنج در طرح مخلوط های متفاوت استفاده شد و در نهایت نتایج آزمایش های

^۲ Rapid Chloride Migration Test

^۳ Ultra Pulse Velocity

^۴ Rapid Chloride Penetration Test

^۵ Mercury Intrusion Porosimetry

خواص مکانیکی و دوام آنها با یکدیگر مقایسه گردید. در این پژوهش به اثر بهبود دهنده استفاده از نانوذرات بر خواص دوام ملات در برابر نفوذ یون کلر اشاره شد. آزمایش های مقاومت فشاری، جذب آب، مقاومت الکتریکی، $RCPT$ و UPV در این پژوهش بر روی نمونه های مختلف حاوی نانو ذرات و مخلوط کنترلی انجام شد. [2] در آخرین مقاله مورد بررسی، اثر نانو ذرات CuO و خاکستر پوسته برنج بر خواص مکانیکی و دوام ملات های سیمانی توسط *Bahareh Mehdizadeh Miyandehi* و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله درصد های مختلفی از نانوذرات و خاکستر پوسته برنج در ملات های سیمانی مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش های مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی، جذب آب، MIP ، جذب آب مؤئینه و $RCPT$ بر روی نمونه ها انجام شد. در نهایت برای بررسی اثر نانو ذرات، نتایج این آزمایش ها با نتایج آزمایش ملات کنترلی مورد مقایسه قرار گرفت. اثر نانو ذرات CuO بر دوام ملات های سیمانی در برابر نفوذ یون کلر، اثر مثبت و بهبود دهنده ارزیابی شد. [8] جدول شماره ۱، جمع بندی آزمایش های مختلف انجام شده در مقالات مختلف می باشد:

جدول ۱ - جمع بندی آزمایش های انجام شده در مقالات

مرجع	نانو ذره	مقاومت فشاری	مقاومت کششی	$RCMT$	$RCPT$	MIP	UPV	مقاومت الکتریکی	جذب آب مؤئینی	جذب آب حجمی	عمق نفوذ
[6]	RHA	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
[7]	ZrO_2 Fe_3O_4 TiO_2 Al_2O_3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
[1]	SiO_2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
[2]	TiO_2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
[8]	CuO	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

اثر نانو ذرات بر دوام در برابر نفوذ یون کلر کامپوزیت های سیمانی:

خاکستر پوسته برنج (RHA)

در مقاله ای که توسط Mohammad Balapour و همکاران منتشر گردید، اثر نانو ذرات و میکروذرات خاکستر پوسته برنج (RHA) بر خواص مکانیکی و دوام ملات های سیمانی بررسی شد. روش انجام این پژوهش، تولید مخلوط های سیمانی حاوی درصد های مختلف نانو ذرات (۲٫۵ درصد، ۵ درصد و ۷٫۵ درصد) و همچنین مخلوط بدون نانو ذرات بود. علاوه بر این مخلوط ها، در میزان ۲٫۵ درصد ثابت نانو ذره خاکستر پوسته برنج، مخلوط هایی با درصد های مختلف میکروذرات هم ساخته شد. در نهایت پس از انجام آزمایش RCM ، نتایج تمام این مخلوط ها با یکدیگر مقایسه گردید. در این پژوهش، ذرات نانو خاکستر پوسته برنج به روش آسیاب گلوله و در حد اندازه ۳۶ نانومتر تهیه شد. دیسپرسیون نانو ذرات در ۳۰ درصد از آب مخلوط و کنترل PH در حدود ۹ با افزودن $NaOH$ به ژل برای کنترل انرژی سطحی ذرات و دیسپرسیون بهتر انجام شد. همچنین آزمایش کارایی مخلوط با میز سیلان انجام شد. جدول ۲ بیانگر جزییات طرح مخلوط ملات های مختلف این پژوهش می باشد [6]:

جدول ۲ - طرح های مخلوط آزمایشی حاوی نانو ذرات و میکروذرات خاکستر پسته برنج [6]

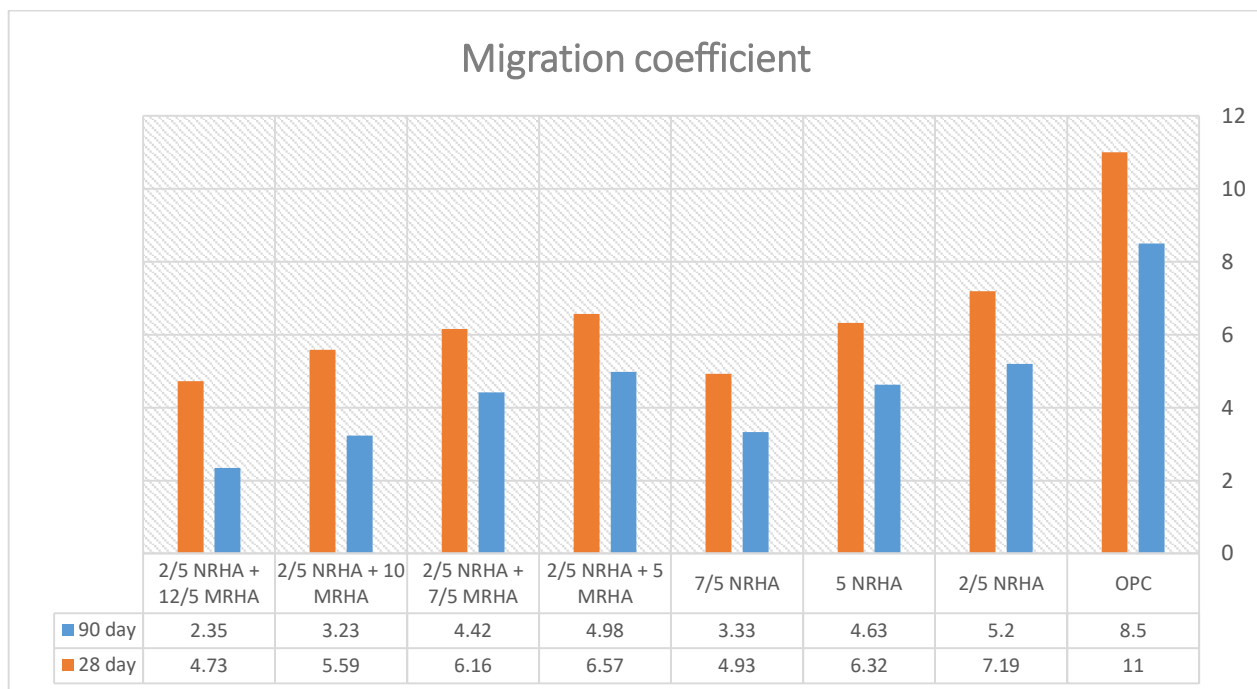
فوق روان کننده (٪)	$MRHA(\frac{kg}{m^3})$	$NRHA(\frac{kg}{m^3})$	ماسه ($\frac{kg}{m^3}$)	آب ($\frac{kg}{m^3}$)	سیمان ($\frac{kg}{m^3}$)	طرح مخلوط
۰,۲۲	۰	۰	۱۲۶۹	۲۶۸	۵۸۲	OPC
۰,۴۶	۰	۱۴,۵۵	۱۲۶۹	۲۶۸	۵۶۷,۴	2.5%NRHA
۰,۵۷	۰	۲۹,۱	۱۲۶۹	۲۶۸	۵۵۲,۹	5%NRHA
۰,۶۸	۰	۴۳,۶۵	۱۲۶۹	۲۶۸	۵۳۵,۳۵	7.5%NRHA
۰,۶۴	۲۹,۱	۱۴,۵۵	۱۲۶۹	۲۶۸	۵۳۸,۳۵	2.5%NRHA +5%MRHA
۰,۷۶	۴۳,۶۵	۱۴,۵۵	۱۲۶۹	۲۶۸	۵۲۳,۸	2.5%NRHA +7.5%MRHA
۰,۹۸	۵۸,۲	۱۴,۵۵	۱۲۶۹	۲۶۸	۵۰۹,۲۵	2.5%NRHA +10%MRHA
۱,۲۱	۷۲,۷۵	۱۴,۵۵	۱۲۶۹	۲۶۸	۴۹۷,۷	2.5%NRHA +12.5%MRHA

آزمایش RCM در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بر روی ملات سیمانی انجام گرفت. پتانسیل الکتریکی به مدت ۲۴ ساعت برای ارزیابی سریع نفوذ یون کلر، به نمونه اعمال شد و پتانسیل الکتریکی به مدت ۲۴ ساعت برای ارزیابی سریع نفوذ یون کلر، به نمونه اعمال شد. عوامل موثر در نتایج این آزمایش شامل ولتاژ، دمای اولیه و ثانویه، عمق نفوذ کلر و مدت زمان آزمایش می باشند. در نهایت نتایج RCMT بر روی ملات های حاوی ذرات خاکستر پسته برنج در جدول ۳ مشهود است [6]:

جدول ۳ - نتایج RCMT ملات های حاوی نانو ذرات و میکروذرات خاکستر پسته برنج (RHA) [6]

ضریب انتقال یون کلر ($10^{-12} m^2/s$)	طرح مخلوط
۹۰ روزه	۲۸ روزه
۸,۱۵	۱۱,۰۰
۵,۲۰	۷,۱۹
۴,۶۳	۶,۳۲
۳,۳۳	۴,۹۳
۴,۹۸	۶,۵۷
۴,۴۲	۶,۱۶
۳,۲۳	۵,۵۹
۲,۳۵	۴,۷۳

همان گونه که ملاحظه می‌گردد، با افزایش نانو ذرات محتوی ملات ها، ضریب انتقال یون کلر کاهش می یابد. این نشان دهنده آن است که نانو ذرات خاکستر پوسته برنج نقش بهبود دهنده ای در دوام در برابر نفوذ یون کلر در کامپوزیت های سیمانی ایفا می کنند. شکل ۱ نشان دهنده نمودار میزان ضریب انتقال یون کلر در ملات های مختلف و اثر بهبود دهنده نانو ذرات در کاهش این ضریب و بهبود دوام ملات های سیمانی در برابر یون کلر می باشد [6]:



شکل ۱ - نمودار ضریب انتقال یون کلر در ملات های مختلف حاوی نانو ذرات و میکرو ذرات خاکستر پوسته برنج [6]

بنابر آن چه ملاحظه شد، با افزودن نانو ذرات و میکرو ذرات، دوام کامپوزیت سیمانی در برابر نفوذ یون کلر بهبود یافت. مطابق آنچه در این پژوهش ذکر شد، دلایل بهبود دوام با نانو ذرات به دو دلیل تقسیم میشوند: نخست عملکرد پوزولانی نانو ذرات در ملات سیمانی می باشد که به دلیل درصد سیلیس و سطح ویژه بسیار بالای آن ها، با $Ca(OH)_2$ آزاد شده از فرآیند هیدراسیون واکنش پوزولانی داده و تشکیل ژل CSH می دهند. عملکرد بعدی نانو ذرات، اثر پرکنندگی آن ها می باشد که موجب پر شدن حفرات موئینه در خمیر سیمان و در نتیجه ساختار متراکم تر و بهبود دوام آن می‌گردد. [6]

نانو ذرات Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_3O_4 , ZrO_2

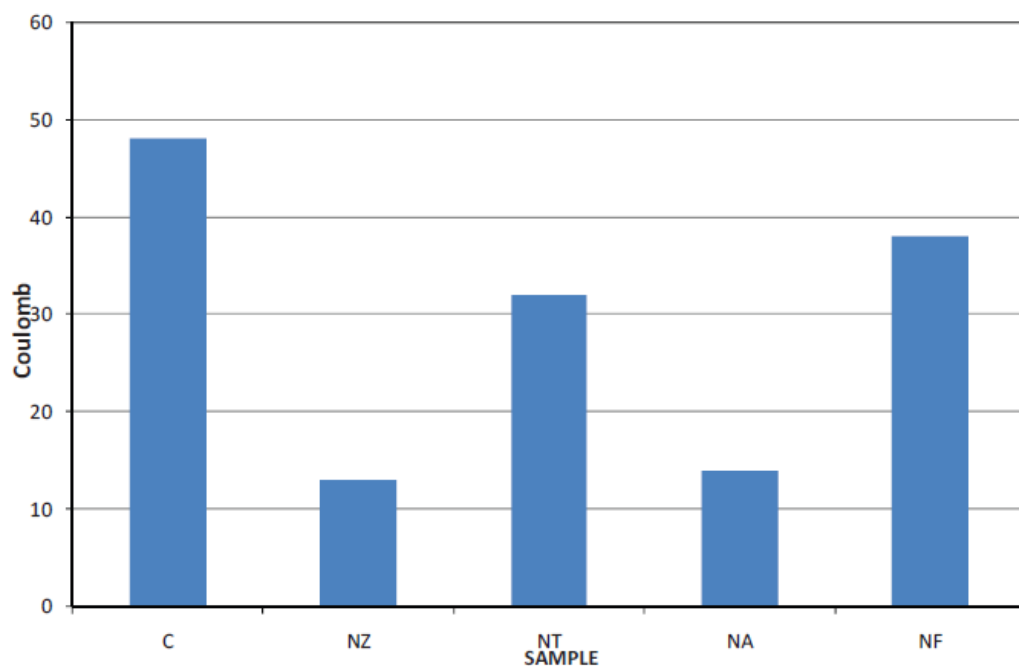
در پژوهشی که توسط A. H. Shekari و همکاران انجام شد، به بررسی اثر ۴ نوع نانو ذره Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_3O_4 , ZrO_2 بر خواص مکانیکی و دوام بتن پرداخته شد. به جهت بررسی اثر این نانو ذرات بر خواص دوام بتن در برابر نفوذ یون کلر، از

آزمایش RCP استفاده گردید. برای این منظور طرح مخلوط های مختلفی با درصد های ثابت از نانو ذرات فوق تولید شد. طرح مخلوط های تولیدی در تمام مقادیر به جز نوع نانو ذرات یکسان بودند. برای ارزیابی اثر نانو ذرات بر دوام در برابر کلراید، آزمایش نفوذ یون کلر تسریع شده (RCPT) بر روی هر یک از آن ها انجام شد. در نهایت نتایج این آزمایش برای مخلوط های مختلف با یکدیگر مقایسه گردید. جدول ۴ بیانگر جزییات طرح مخلوط های بتن در این پژوهش می باشد [7]:

جدول ۴ - طرح های مخلوط آزمایشی حاوی نانو ذرات $Al_2O_3, TiO_2, Fe_3O_4, ZrO_2$ [7]

نمونه	سیمان + ($\frac{kg}{m^3}$)	میکروسیلیس ($\frac{kg}{m^3}$)	W/C	NZrO ₂	NTiO ₂	NAI ₂ O ₃	NFe ₃ O ₄
C*	580	1.5	0.25	-	-	-	-
NZ	580	1.5	0.25	1.5	-	-	-
NT	580	1.5	0.25	-	1.5	-	-
NA	580	1.5	0.25	-	-	1.5	-
NF	580	1.5	0.25	-	-	-	1.5

در نهایت نتایج RCPT برای طرح مخلوط های حاوی نانو ذرات مختلف، مطابق شکل ۲ بدست آمد. بر اساس این نمودار، نانو ذرات باعث کاهش ۲۰ تا ۸۰ درصدی در میزان نفوذ یون کلر در مقایسه با مخلوط کنترلی گردیده اند. [7]



شکل ۲ - نمودار میزان نفوذ یون کلر در طرح مخلوط های مختلف حاوی و بدون نانو ذرات [7]

اندازه نانو ذرات مورد استفاده در این پژوهش ۱۰ الی ۲۵ نانومتر بود. همان گونه که ملاحظه میشود، نانو ذرات مختلف بر اثر عملکرد پرکنندگی و هسته زایی موجب بهبود مقاومت در برابر نفوذ یون کلر در بتن ها شدند. بهترین بهبود در دوام در اثر افزودن نانو ذره ZrO_2 به بتن حاصل شد. [7]

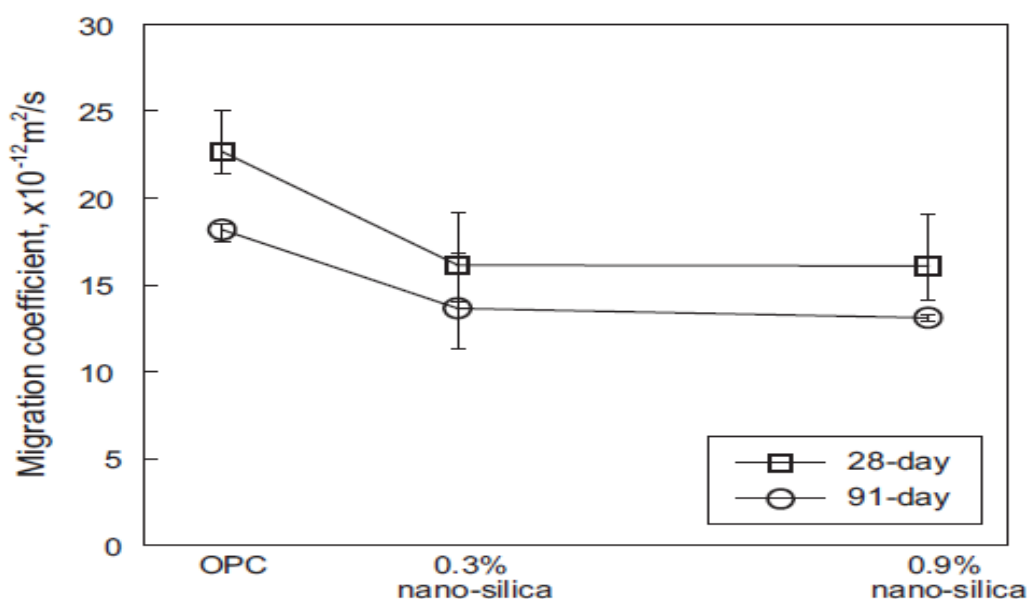
نانو سیلیس (SiO_2)

Hongjian Du و همکاران به بررسی اثر نانوسیلیس (SiO_2) بر خواص دوام بتن در برابر نفوذ یون کلر با انجام آزمایش RCM پرداختند. بدین منظور دو طرح مخلوط حاوی ۰٫۳ درصد و ۰٫۹ درصد نانوسیلیس و یک طرح مخلوط بدون نانو سیلیس و فقط حاوی سیمان پرتلند معمولی تولید شد. نانو ذرات با روش آلتراسونیک به مدت ۱۰ دقیقه و توان ۴۰۰ وات در ۵۰۰ گرم آب حاوی فوق روان کننده (سورفکتانت) دیسپرس شدند. برای توزیع بهتر ذرات و جلوگیری از افزایش دمای محلول، آن را در حمام یخ قرار دادند. ابعاد نانو ذرات صفر بعدی در حدود ۱۳ نانومتر و سطح ویژه آن ها در حدود ۲۰۰ متر مربع بر گرم اندازه گیری شد. طرح مخلوط های ایجاد شده در این پژوهش در جدول ۵ نشان داده شده است [1]:

جدول ۵ - جزییات طرح مخلوط های ایجاد شده حاوی و بدون نانوسیلیس [1]

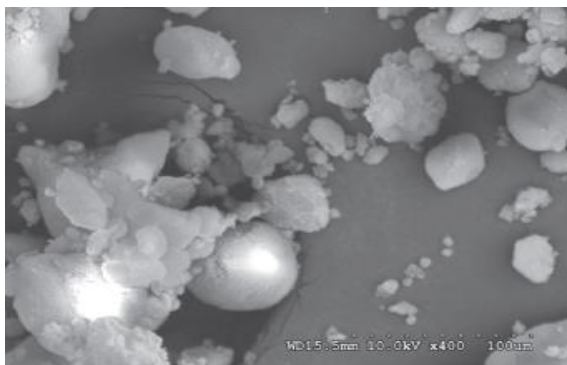
طرح مخلوط	محتویات ($\frac{kg}{m^3}$)					
	آب	سیمان	نانوسیلیس	درشت دانه	ماسه	میکروسیلیس
OPC	185	380	0	825	960	2.6
0.3 Nano-Silica	185	380	1.14	825	948	5.6
0.9 Nano-Silica	185	380	3.42	825	936	6.7

شکل ۳ نتایج ضریب نفوذ یون کلر به ازای مقادیر مختلف نانوسیلیس را نشان میدهد. همان گونه که مشاهده می گردد، اثر نانوسیلیس در درصد بالا (۰٫۹ درصد) تقریباً مشابه با درصد متوسط (۰٫۳ درصد) می باشد. علت آن است که در درصد بالا دیسپرس مناسب ذرات سخت تر بوده و امکان کلوخه شدن آن ها بیشتر است، لذا عدم توزیع مناسب نانو ذرات در کامپوزیت سیمانی موجب کاهش نرخ بهبود در دوام در برابر نفوذ یون کلر شده است [1].

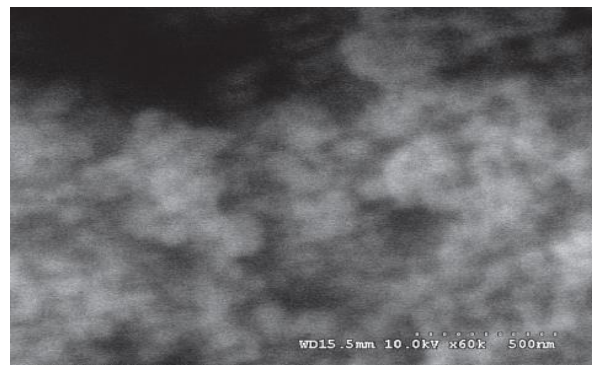


شکل ۳ - ضریب نفوذ یون کلر RCMT در بتن های حاوی درصد های مختلف نانوسیلیس [1]

نانوسیلیس علاوه بر عملکرد پرکنندگی و هسته زایی در ریز ساختار بتن، به علت درصد سیلیس بالا دارای عملکرد پوزولانی میباشد که به موجب آن و ترکیب با $Ca(OH)_2$ آزاد شده از فرآیند هیدراسیون، تشکیل ژل CSH داده و باعث افزایش تراکم و چگالی بتن و همچنین کاهش حفرات موئینه در بتن می گردد. همان طور که قبلاً ذکر شد، توزیع نانو ذرات در کامپوزیت سیمانی بسیار حائز اهمیت است. در نمودار بالا ملاحظه میشود که در میزان ۰,۹ درصد نانو سیلیس ترکیب شده با کامپوزیت سیمانی، به جهت کلوخه شدن ذرات، اثر بهبود دهنده دوام کاهش یافته است. در تصاویر تهیه شده از SEM این کلوخه شدن ذرات به وضوح مشخص می باشد. شکل ۴-الف نشان دهنده دیسپرسیون مناسب در درصد ۰,۳ و شکل ۴-ب نشان دهنده کلوخه شدن ذرات در درصد ۰,۹ می باشد. [1]



شکل ۴-ب: کلوخه شدن ذرات نانو سیلیس [1]



شکل ۴-الف: دیسپرسیون مناسب نانو سیلیس [1]

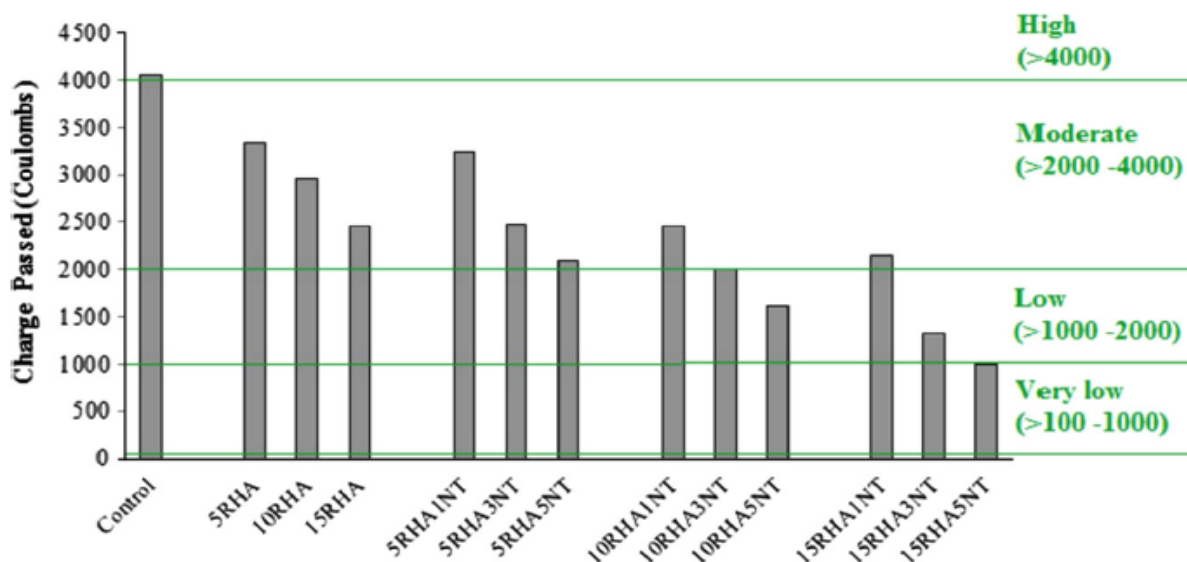
نانو ذره TiO_2

در پژوهشی که توسط Ehsan Mohseni و همکاران انجام شد، اثر نانوذرات TiO_2 و خاکستر پسته برنج (RHA) بر خواص دوام ملات در برابر نفوذ کلراید با انجام RCPT بررسی شد. نانوذرات اکسید تیتانیوم دارای خواص فتوکاتالیستی، کاربرد ضد آلودگی هوا، خودتمیزشوندگی و عدم جرمگیری می باشند. برای بررسی اثر آن ها بر دوام ملات های سیمانی در برابر نفوذ یون کلر، درصد های مختلفی از این نانو ذره همراه با خاکستر پسته برنج در طرح مخلوط ها استفاده شد. پس از آن با انجام آزمایش نفوذ یون کلر تسریع شده (RCPT) بر روی نمونه های مختلف حاوی درصد های مختلف از نانو ذرات و خاکستر پسته برنج، اثر آن ها بر دوام ملات با مقایسه نتایج آن با مخلوط کنترلی (بدون هیچ گونه نانو ذره و خاکستر پسته برنج) بررسی شد. جدول ۶ جزئیات طرح مخلوط های این پژوهش را نشان میدهد [2]:

جدول ۶ - جزئیات طرح مخلوط ملات های سیمانی حاوی نانو ذرات TiO_2 و خاکستر پوسته برنج [2]

کد مخلوط	سیمان ($\frac{kg}{m^3}$)	RHA ($\frac{kg}{m^3}$)	NTiO ₂ ($\frac{kg}{m^3}$)	آب ($\frac{kg}{m^3}$)	ماسه ($\frac{kg}{m^3}$)	میکروسلیس ($\frac{kg}{m^3}$)
Control	700	0	0	280	1195	7.2
5RHA	665	35	0	280	1107	5
10RHA	630	70	0	280	1094	6
15RHA	595	105	0	280	1080	7
5RHA1NT	658	35	7	280	1097	5.2
5RHA3NT	644	35	21	280	1076	5.5
5RHA5NT	630	35	35	280	1055	6
10RHA1NT	623	70	7	280	1083	6.2
10RHA3NT	609	70	21	280	1063	6.7
10RHA5NT	595	70	35	280	1042	7
15RHA1NT	588	105	7	280	1070	7.2
15RHA3NT	574	105	21	280	1050	7.5
15RHA5NT	660	105	35	280	958	8

پس از انجام آزمایش نفوذ یون کلر تسریع شده، نتایج حاکی از اثر بهبود دهنده نانو ذرات بر دوام ملات های سیمانی در برابر نفوذ یون کلر بوده است. مطابق شکل ۵ ملاحظه می گردد که با افزایش نانو ذرات محتوی ملات ها، نفوذ پذیری یون کلر آن ها کاهش و دوام آن ها بهبود یافته است. ابعاد نانو ذرات استفاده شده در این تحقیق، در حدود ۲۰ نانومتر و سطح ویژه آن ها در حدود ۲۰۰ متر مربع بر گرم بوده است که با عملکرد پراکندگی و هسته زایی در ملات، موجب کاهش اتصال حفرات موئینه، کاهش حجم آن ها و ساختار متراکم تر ملات سیمانی شده اند. [2]

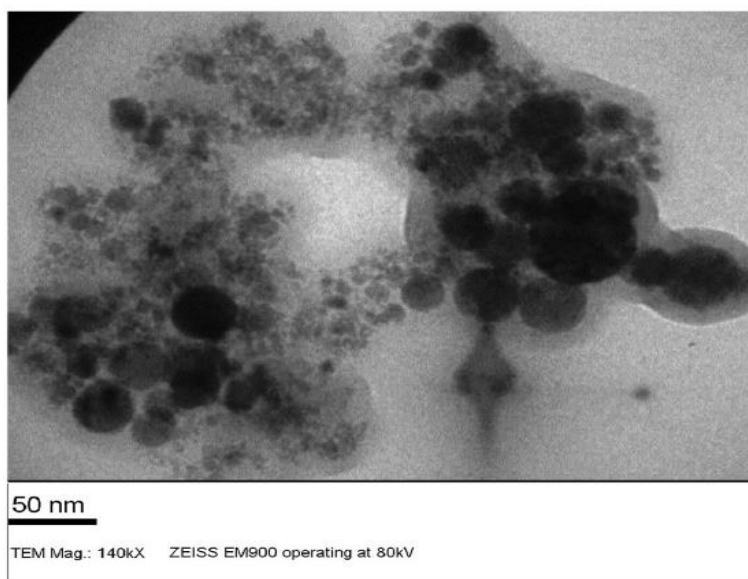


شکل ۵ - نتایج RCPT انجام شده بر روی ملات ها با مشخص کردن محدوده های استاندارد ASTM [2]

نانو ذره CuO

نانو ذرات اکسید مس (CuO) اخیراً به عنوان یک نانو پودر بسیار قوی برای بهبود خواص مکانیکی و خواص حرارتی مصالح سیمانی معرفی گردیده است. در مقاله ای، اثر نانو ذره به همراه خاکستر پسته برنج بر دوام ملات های سیمانی در برابر نفوذ یون کلر با انجام RCPT توسط Bahareh Mehdizadeh Miyandehi و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. اندازه نانو ذرات اکسید مس مورد استفاده در این پژوهش در حدود ۲۰ نانومتر و سطح ویژه آن ها در حدود ۲۰۰ متر مربع بر گرم بودند. مورفولوژی این نانو ذرات که توسط TEM تهیه شده اند، در شکل ۶ نشان داده شده است [8]:

شکل ۶ - مورفولوژی نانو ذرات اکسید مس [8]



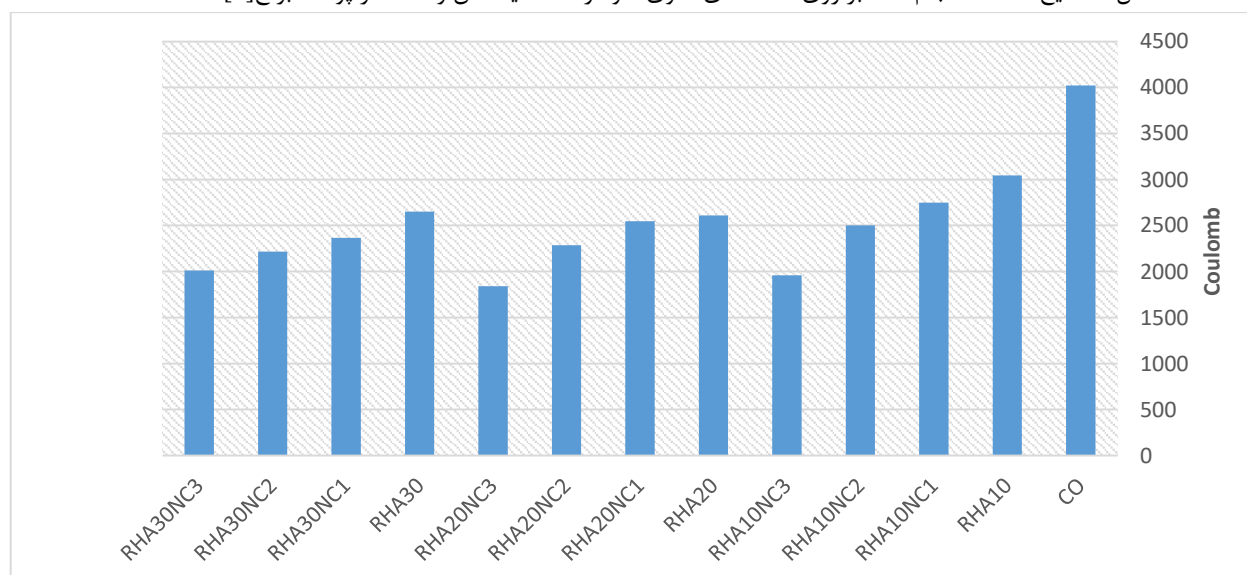
برای بررسی اثر این نانو ذره بر دوام ملات های سیمان حاوی آن، تعدادی طرح مخلوط حاوی درصد های مختلف نانو اکسید مس و خاکستر پسته برنج تولید شد. سپس نتایج آزمایش نفوذ یون کلر تسریع شده با مخلوط کنترلی مقایسه و اثر آن ها بررسی شد. جزئیات طرح مخلوط ها در جدول ۷ نشان داده شده است [8]:

جدول ۷ - جزئیات طرح مخلوط های ملات های سیمانی حاوی نانو اکسید مس و خاکستر پسته برنج [8]

کد مخلوط	سیمان ($\frac{kg}{m^3}$)	RHA ($\frac{kg}{m^3}$)	Nano-CuO ($\frac{kg}{m^3}$)	آب ($\frac{kg}{m^3}$)	ماسه ($\frac{kg}{m^3}$)	میکروسلیس ($\frac{kg}{m^3}$)
CO	700	0	0	280	1190	4.2
RHA10	630	70	0	280	1090	5
RHA10NC1	623	70	7	280	1080	5
RHA10NC2	616	70	14	280	1070	5
RHA10NC3	609	70	21	280	1060	5
RHA20	560	140	0	280	1070	6
RHA20NC1	553	140	7	280	1055	6
RHA20NC2	546	140	14	280	1045	6
RHA20NC3	539	140	21	280	1035	6
RHA30	490	210	0	280	1040	7
RHA30NC1	483	210	7	280	1030	7
RHA30NC2	476	210	14	280	1020	7
RHA30NC3	469	210	21	280	1010	7

با انجام آزمایش نفوذ یون کلر تسریع شده (RCPT) بر روی ملات های حاوی نانو ذرات اکسید مس و خاکستر پسته برنج، همان گونه که نتایج آزمایش در نمودار شکل ۷ ملاحظه میگردد، شاهد بهبود دوام ملات ها در برابر نفوذ یون کلر با افزایش نانو ذرات محتوی می باشیم. این بهبود در دوام ملات ها در اثر توزیع مناسب ذرات نانو در ملات و سطح ویژه بالای آن ها و در نتیجه عملکرد هسته زایی و افزایش CSH تولید شده در فرآیند هیدراسیون می باشد. عملکرد هسته زایی موجب کاهش ابعاد کریستال های کلسیم هیدروکسید و یا $Ca(OH)_2$ می شود. عملکرد دیگر نانو ذرات که موجب بهبود دوام در ملات سیمانی شده، عملکرد پرکنندگی آن ها می باشد که موجب متراکم تر شدن ملات سیمانی شده اند. در مجموع با تراکم بیشتر ملات و حفرات کم تر و اتصال کمتر حفرات موئینه، دوام ملات بهبود یافت. [8]

شکل ۷: نتایج RCPT انجام شده بر روی ملات های حاوی نانو ذرات اکسید مس و خاکستر پسته برنج [8]



نتیجه گیری

نانو ذره RHA و اثر آن در برابر نفوذ یون کلر :
مطابق نتایج بدست آمده از آزمایش RCM ، افزودن نانوذرات منجر به کاهش قابل ملاحظه ضریب نفوذ کلر می گردد.
اثر نانو ذرات خاکستر پوسته برنج در سنین بالا بیشتر مشهود بود.
مخلوط حاوی ۲٫۵ درصد نانو ذره + ۷٫۵ درصد میکرو ذره خاکستر پوسته برنج ، بهترین عملکرد در دوام مقابل نفوذ یون کلر را به نمایش گذاشت.

سطح بالای نانو ذرات موجب افزایش سرعت فرآیند هیدراسیون و تشکیل CSH بیشتر در اثر واکنش پوزولانی میشود.
علاوه بر واکنش پوزولانی ، نانوذرات نقش پرکنندگی در خمیر سیمان را ایفا کرده و خواص دوام را بهبود می بخشد.

نانو ذرات Al_2O_3 ، TiO_2 ، Fe_3O_4 ، ZrO_2 و اثر آن در برابر نفوذ یون کلر :
خواص دوام تمام نمونه های حاوی نانو ذرات بهبود یافتند.
اثر ZrO_2 در بهبود خواص دوام در برابر یون کلر بیش از سایر نانو ذرات بود.
تمام نانو ذرات مورد بررسی ، اثر قابل توجهی بر خواص دوام بتن پر مقاومت داشتند.

نانو ذرات SiO_2 و اثر آن در برابر نفوذ یون کلر :
علاوه بر اثر پرکنندگی نانو سیلیس ، واکنش پوزولانی باعث تراکم بیشتر ریزساختار می گردد.
افزایش تراکم و همگنی در ریزساختار بتن ، موجب بهبود مقاومت در برابر یون کلر ، حتی در مقادیر بسیار کم ذرات نانو (۰٫۳ درصد) میشود.
عامل بسیار مهم در اثربخشی نانوذرات در مخلوط های سیمانی ، دیسپرسیون مناسب آنها می باشد ، به نحوی که در صورت کلوخه شدن آنها ، اثربخشی کاهش می یابد.

نانو ذرات TiO_2 و اثر آن در برابر نفوذ یون کلر :
نتایج آزمایش های دوام ، حاکی از آن است که با افزایش نانو ذرات ، نفوذپذیری یون کلر کاهش یافته است.
ترکیب ۱۵ درصد خاکستر پوسته برنج به علاوه ۵ درصد نانو ذره در ملات سیمانی منجر به اثر مثبت و کمک به خواص دوام در سن ۹۰ روز می شود.
نانو ذرات با عملکرد پرکنندگی و هسته زایی در ملات ، موجب کاهش اتصال حفرات موئینه ، کاهش حجم آن ها و ساختار متراکم تر ملات سیمانی شده اند.

نانو ذرات CuO و اثر آن در برابر نفوذ یون کلر :
نانو ذرات CuO بر روی مقاومت در برابر نفوذ یون کلر در ملات اثر مثبتی دارند.
نفوذ یون کلر با افزایش نانو ذرات ، به طور ویژه ای کاهش می یابد.
کاربرد نانو ذرات منجر به متراکم تر شدن ریزساختار و در نتیجه ، کاهش نفوذ یون کلر به داخل ملات می شود.
این نانو ذرات با عملکرد هسته زایی می توانند موجب شتاب در شکل گیری ژل CSH و کاهش ابعاد $Ca(OH)_2$ در خمیر سیمان گردند. این امر موجب کاهش تخلخل و بهبود خواص مکانیکی و دوام خمیر سیمان می شود.
مخلوط حاوی ۲۰ درصد خاکستر پوسته برنج و ۳ درصد نانو ذره ، به عنوان طرح برتر پیشنهاد می گردد.

مراجع

- [1] H. Du, S. Du, and X. Liu, "Durability performances of concrete with nano-silica," *Constr. Build. Mater.*, vol. 73, pp. 705–712, 2014.
- [2] E. Mohseni, F. Naseri, R. Amjadi, M. M. Khotbehsara, and M. M. Ranjbar, "Microstructure and durability properties of cement mortars containing nano-TiO₂ and rice husk ash," *Constr. Build. Mater.*, vol. 114, pp. 656–664, 2016.
- [3] د. ت. ک. م. م. ناجا، "تعمیر و نگهداری ساختمان - سازه های بتنی،" *فصلنامه دانش مهندسی*, vol. ۳، سال سوم، no. ۸، شماره هشتم، pp. 41–49, 1389.
- [4] A. International, "ASTM C1202-12, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration," *West Conshohocken*, vol. PA, p. www.astm.org, 2012.
- [5] NT Build 492, "Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments," *Measurement*, pp. 1–8, 1999.
- [6] M. Balapour, A. Ramezaniapour, and E. Hajibandeh, "An investigation on mechanical and durability properties of mortars containing nano and micro RHA," *Constr. Build. Mater.*, vol. 132, pp. 470–477, 2017.
- [7] A. H. Shekari and M. S. Razzaghi, "Influence of nano particles on durability and mechanical properties of high performance concrete," *Procedia Eng.*, vol. 14, pp. 3036–3041, 2011.
- [8] B. M. Miyandehi, A. Feizbakhsh, M. A. Yazdi, Q. feng Liu, J. Yang, and P. Alipour, "Performance and properties of mortar mixed with nano-CuO and rice husk ash," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 74, pp. 225–235, 2016.