

# بررسی عملکرد نانوذرات اکسیدروی بر مشخصات مهندسی مواد پایه‌ی سیمانی

امیر خاقانی بروجنی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

سیدحسام مدنی\* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۷ (دوره ۲ - ۳۴، شماره ۲/۴، ص. ۷۴-۶۵)

امروزه گسترش آلاینده‌های ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی و استفاده از مواد شیمیایی در صنایع مختلف باعث شده است تا بهره‌برداری از فناوری‌های جدید همچون نانوذرات در سطوح مواد پایه‌ی سیمانی، به‌منظور تجزیه و تخریب آلاینده‌ها، امری ضروری تلقی شود. لذا در نوشتار حاضر، به‌منظور ایجاد سطوح پایه‌ی سیمانی با خاصیت فوتوکاتالیستی از نانوذرات اکسیدروی با درصد‌های مختلف نسبت به وزن مواد سیمانی در ماتریس خمیر استفاده شده است. سپس به‌منظور بررسی خواص فوتوکاتالیستی و عوامل مؤثر در عملکرد سطوح مذکور در محیط محلول، از محلول متیلن‌بلو با غلظت ۵ میلی‌گرم بر لیتر استفاده و میزان حذف آن بررسی شد. همچنین به‌منظور بررسی عملکرد نانوذرات اکسیدروی در خواص مکانیکی و دوام ملات‌های حاوی نانوذرات اکسیدروی، آزمایش‌های مقاومت فشاری، مهاجرت تسریع‌شده‌ی یون کلرید، جذب حجمی و موئینه‌ی آب صورت گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد جایگزینی نانوذرات اکسیدروی در خمیر سیمان سبب حذف متیلن‌بلو در محیط محلول می‌شود و تأثیر قابل‌توجهی در مشخصات مکانیکی و دوام ملات‌های حاوی نانوذرات اکسیدروی دارد.

**واژگان کلیدی:** مواد پایه‌ی سیمانی، نانو اکسیدروی، فوتوکاتالیست، خواص مکانیکی و دوام.

a.khaghani@yahoo.com  
h.madani@kgut.ac.ir

## ۱. مقدمه

مواد شیمیایی و میکروبی بسیار مضر و خطرناک در فاز گاز، همچون ( $NO_x$ ) ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی و در فاز مایع، ناشی از فاضلاب، باعث شده است تا یافتن مواد و روش‌هایی نوین به‌منظور کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی، تصفیه‌ی آتشفرو منابع آبی امری ضروری تلقی شود. چرا که تمرکز چنین آلاینده‌هایی در محیط‌های شهری، به‌خصوص شهرهای بزرگ و پرجمعیت علاوه بر آنکه سبب بروز انواع بیماری‌های خطرناک و سرطان‌زا می‌شوند، عامل بسیار مهمی نیز در کاهش عمر نمای خارجی ساختمان‌ها و عناصر زیباشناختی شهرها محسوب می‌شوند.<sup>[۱]</sup>

بر همین اساس پژوهشگران درصدد برآمدند تا با روش‌های نوینی همچون نانو فناوری، توانایی سطوح پایه‌ی سیمانی را ارتقاء بخشند و آن را به سطوحی با توانایی بالا در تخریب و اضمحلال آلودگی‌ها تبدیل کنند. شایان ذکر است که افزایش روزافزون استفاده از مواد پایه‌ی سیمانی سبب شد تا امروزه، مواد پایه‌ی سیمانی به‌عنوان پر مصرف‌ترین مصالح جهانی قرن بیست و یکم شناخته شوند و قسمت عمده‌ی از محیط پیرامونی زندگی افراد را نیز تشکیل دهند. در نتیجه به‌منظور

با توجه به نتایج بررسی‌های صورت‌گرفته نشان می‌دهد می‌توان از این پتانسیل بالقوه در محیط مواد پایه‌ی سیمانی بهره‌ی فراوانی برد و این سطوح را به سطوحی توانمند تبدیل کرد تا علاوه بر توانایی بالای این سطوح در رویارویی با شرایط خاص زیست‌محیطی، توانایی بالایی در پاک‌سازی محیط در فاز مایع و گاز از آلودگی‌های آلی و باکتریال داشته باشند.

با توجه به آنکه برخلاف نانو سیلیس،<sup>[۵]</sup> مطالعه‌ی چندانی بر روی نانو اکسیدروی به‌عنوان یک فوتوکاتالیست بسیار قوی در مواد پایه‌ی سیمانی صورت نگرفته است، نویسندگان درصدد آن برآمدند تا عملکرد نانوذره‌ی روی را در محیط مواد پایه‌ی سیمانی بررسی کنند بنابراین در مطالعه‌ی حاضر از نانوذرات اکسیدروی به‌عنوان فوتوکاتالیست در محیط مواد پایه‌ی سیمانی به‌منظور حذف آلاینده‌های آلی استفاده شد. بررسی‌های صورت‌گرفته نشان می‌دهد که باند انرژی (گپ) نانو اکسیدروی تقریباً مشابه با نانوذرات اکسید تیتانیوم است. در نتیجه می‌توان انتظار داشت که ظرفیت فوتوکاتالیستی دو نانوذره‌ی مذکور مشابه یکدیگر باشد. حال آنکه در برخی مراجع

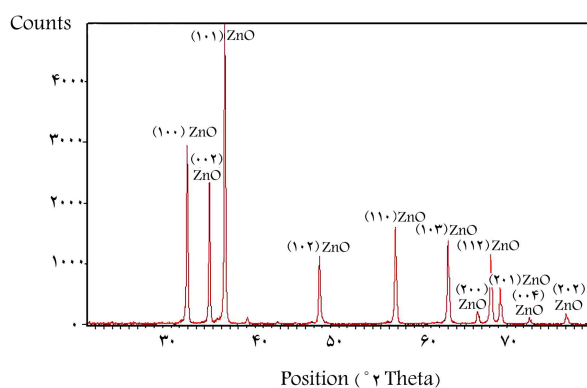
بر همین اساس پژوهشگران درصدد برآمدند تا با روش‌های نوینی همچون نانو فناوری، توانایی سطوح پایه‌ی سیمانی را ارتقاء بخشند و آن را به سطوحی با توانایی بالا در تخریب و اضمحلال آلودگی‌ها تبدیل کنند. شایان ذکر است که افزایش روزافزون استفاده از مواد پایه‌ی سیمانی سبب شد تا امروزه، مواد پایه‌ی سیمانی به‌عنوان پر مصرف‌ترین مصالح جهانی قرن بیست و یکم شناخته شوند و قسمت عمده‌ی از محیط پیرامونی زندگی افراد را نیز تشکیل دهند. در نتیجه به‌منظور

بر همین اساس پژوهشگران درصدد برآمدند تا با روش‌های نوینی همچون نانو فناوری، توانایی سطوح پایه‌ی سیمانی را ارتقاء بخشند و آن را به سطوحی با توانایی بالا در تخریب و اضمحلال آلودگی‌ها تبدیل کنند. شایان ذکر است که افزایش روزافزون استفاده از مواد پایه‌ی سیمانی سبب شد تا امروزه، مواد پایه‌ی سیمانی به‌عنوان پر مصرف‌ترین مصالح جهانی قرن بیست و یکم شناخته شوند و قسمت عمده‌ی از محیط پیرامونی زندگی افراد را نیز تشکیل دهند. در نتیجه به‌منظور

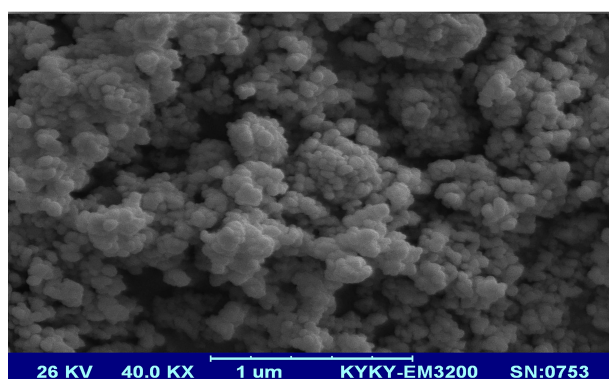
\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۸/۱۵، اصلاحیه ۱۳۹۵/۱۲/۷، پذیرش ۱۳۹۶/۱/۲۹.

DOI:10.24200/J30.2019.1445



شکل ۱. نمودار پراش اشعه‌ی ایکس نانواکسیدروی.



شکل ۲. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوذرات اکسیدروی.

جدول ۱. آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی.

ترکیب	درصد	ترکیب	درصد	ترکیب	درصد
$SiO_2$	۲۳/۱	$CaO$	۶۵/۲	$Na_2O$	۰/۲۵
$Al_2O_3$	۴/۲	$MgO$	۲/۵	$LOI$	۱/۵
$Fe_2O_3$	۰/۴۲	$SO_3$	۲	$K_2O$	۰/۳۵

در نتیجه استفاده از آن‌ها در محیط بتن و یا کامپوزیت‌های مشابه از نظر مسائل اقتصادی توجیه نداشت. لذا باید مواد مذکور را در پوشش‌های پایه‌ی سیمانی در لایه‌هایی نازک استفاده کرد. از طرف دیگر، با توجه به وجود مسائل زیبایی‌شناختی و کاربرد بیشتر پوشش‌های پایه‌ی سیمانی سفیدرنگ در نما، لذا در پژوهش حاضر از سیمان سفید به‌عنوان جزئی از پوشش‌های پایه‌ی سیمانی نمای متداول استفاده شده است.

بر همین اساس سیمان سفید با رده‌ی مقاومتی  $W - 52/5$ ، به‌عنوان سیمان مصرفی در طول پژوهش انتخاب و استفاده شد. آنالیز شیمیایی و دانه‌بندی ذرات سیمان به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۳ ارائه شده است. سایر مشخصات سیمان مصرفی نیز انطباق مناسبی با استاندارد ملی ایران شماره‌ی ۲۹۳۱ تجدیدنظر ۱۳۹۳، داشت. [۱۳]

### ۳.۲. سنگ‌دانه‌ی ریز

در مطالعه‌ی حاضر از سنگ‌دانه‌ی طبیعی (گردگوشه) از جنس سیلیس استفاده شد. بررسی‌های انجام‌شده در نحوه‌ی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها نشان می‌دهد که منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های مصرفی (شکل ۴) در مقایسه با منحنی دانه‌بندی استاندارد

برای اکسیدروی تحرک الکترونی بیشتری قائل شده‌اند [۶] و معتقدند که نانوذرات فوتوکاتالیستی اکسیدروی گاهی کارایی و فعالیت بیشتری نسبت به دی‌اکسیدتیتانیوم دارند. [۸،۷]

همچنین نتایج بررسی‌های صورت‌گرفته بر روی نانواکسیدهای نیمه‌هادی همچون  $ZnO$  و  $TiO_2$  نشان می‌دهد که می‌توان از نانوذرات اکسیدروی به‌عنوان فوتوکاتالیست در فرایندهای تبدیل شیمیایی استفاده‌ی فراوان برد و به‌عنوان روشی نوین و کارآمد در محیط‌های آلوده، بهره‌برداری کرد. [۹] در روش مذکور، الکترون‌های موجود در لایه‌ی ظرفیت فوتوکاتالیست، تحت تابش نور (فرابنفش) برانگیخته می‌شوند و با گذر از باند انرژی (گپ) به لایه‌ی هدایت انتقال می‌یابند. [۲] در نتیجه‌ی برانگیختگی صورت‌گرفته، جفت الکترون - حفره پدید می‌آید که قادر است طی یک سری واکنش اکسایش - کاهش، از طریق تولید گونه‌های اکسیژن فعال ( $O_2^-$ ) و رادیکال هیدروکسیل ( $OH^\cdot$ )، محدودده‌ی وسیعی از آلاینده‌های آلی و باکتری‌های را تخریب و تجزیه کند. [۱۰] این تذکر لازم است که این قبیل ترکیب‌ها (آلی و باکتریال) معمولاً سمی و در برابر تجزیه‌ی بیولوژیکی هوازی مقاوم هستند. لذا با فرایندهای تصفیه‌ی بیولوژیکی متداول قابل حذف نیستند و نیاز به فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته دارند. یکی از روش‌های مذکور می‌تواند استفاده از اکسیدهای نیمه‌هادی همچون نانوذرات اکسیدروی باشد. [۱۱]

بنابراین در نوشتار حاضر، ابتدا به بررسی خواص مکانیکی و دوام نانوذرات اکسیدروی در محیط سیمان پرداخته و سپس به کمک سطوح مذکور، ترکیب شیمیایی متبلین‌بلو تخریب و تجزیه شده است، تا علاوه بر اثبات و تعیین میزان خاصیت فوتوکاتالیستی مواد پایه‌ی سیمانی، تأثیر استفاده از مواد پایه‌ی سیمانی را در ممانعت از ورود فاضلاب‌های رنگی حاصل از صنایع نساجی به محیط و منابع آبی بررسی کرد. مطالعه‌ی صورت‌گرفته در این زمینه نشان می‌دهد تخلیه‌ی فاضلاب‌های رنگی مذکور به درون آب، منجر به کاهش نفوذ نور خورشید و نامطلوب شدن وضعیت دید، بروز پدیده‌ی اتروفیکاسیون [۲] و تداخل در اکولوژی آب می‌شود و با کاهش شدت فتوسنتز گیاهان آبی در محیط‌های آبی، باعث آسیب رساندن به محیط‌زیست می‌شود. [۱۲]

## ۲. مواد و ابزار

### ۱.۲. نانوذرات اکسیدروی

مشخصات نانوذرات اکسیدروی مورد استفاده در مطالعه‌ی حاضر که به روش رسوب‌دهی شیمیایی تولید شده‌اند، به این قرار است: ویژگی نانوذرات مصرفی با استفاده از دستگاه طیف‌سنج پراش اشعه‌ی ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تعیین شد.

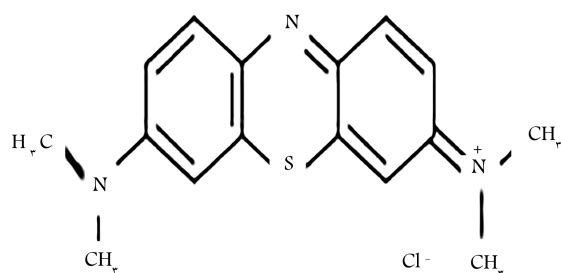
بررسی‌های صورت‌گرفته نشان می‌دهد نانوذرات مورد استفاده کاملاً کریستالیزه شده (شکل ۱) و از نوع کریستال‌های هگزاگونال با گروه فضایی  $P6_3mc$  هستند. همچنین در مقایسه با الگوهای مرجع موجود در نرم‌افزار x'pert، هماهنگی بسیار مناسبی دارند. همچنین از بررسی اطلاعات به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (شکل ۲) می‌توان دریافت که اندازه‌ی متوسط نانوذرات مصرفی در محدوده‌ی ۳۰ الی ۵۰ نانومتر قرار می‌گیرد.

### ۲.۲. سیمان مصرفی

با توجه به آنکه نانوذرات مصرفی نسبت به سایر اجزاء ملات پر هزینه‌تر است،

جدول ۳. بررسی شدت تابش نور خورشید در طول موج های مختلف.

ردیف	طول موج (nm)	شدت
۱	فروسرخ (۸۰۰-۱۷۰۰)	$262 \text{ w/m}^2$
۲	مرئی (۴۰۰-۷۰۰)	$116.6 \text{ klx}$
۳	UAV (۳۶۰-۴۰۰)	$34.8 \text{ w/m}^2$
۴	UVB (۳۳۰-۳۶۰)	$1.97 \text{ w/m}^2$
۵	UVC (۲۷۰-۳۳۰)	$0.23 \text{ w/m}^2$



شکل ۵. ساختار شیمیایی متیلن بلو.

جدا شدن ذرات آگلومره می شود، که در نهایت باعث پخش شدن بهتر نانوذرات می شود. [۱۷، ۱۶]

به منظور ایجاد مخلوطی همگن و پراکندگی مناسب نانوذرات در محیط سیمان، سوسپانسیونی حاوی غلظت های مختلف نانوذرات اکسیدروی در آب مقطر تهیه و به مدت ۳۰ دقیقه با مگنت استیر هم زده شد. سپس با استفاده از التراسونیک پراپدار با بسامد ۱۵۰ کیلوهرتز، به مدت ۳۰ دقیقه تحت امواج مافوق صوت قرار داده شد، تا ذرات اکسیدروی کاملاً در محیط محلول پراکنده شوند.

## ۵.۲. محلول آزمون

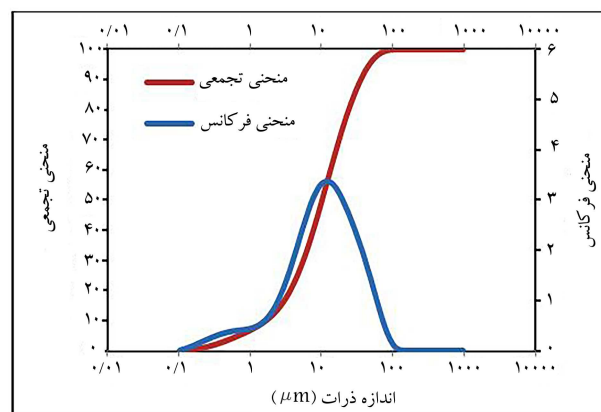
از محلول آبی متیلن بلو با فرمول شیمیایی و جرم مولی  $(C_{16}H_{18}N_2SCI \times \text{مولی})$   $(373.90 \text{ gr/mol})$  برای تعیین فعالیت فوتوکاتالیستی سطوح مواد پایه ی سیمانی استفاده شده است. ساختار شیمیایی متیلن بلو در شکل ۵ مشاهده می شود.

## ۶.۲. منبع تحریک کاتالیست

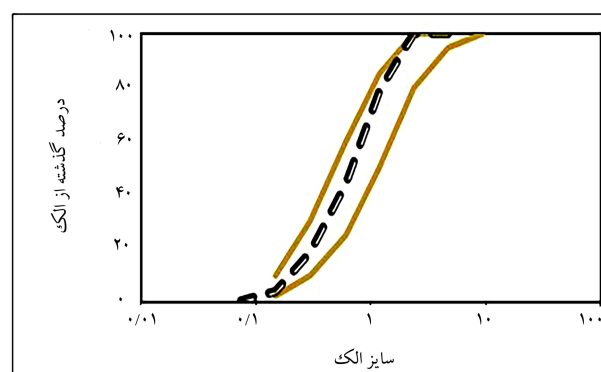
به منظور ایجاد شرایط طبیعی و واقعی در طول آزمون، از تابش نور خورشید به عنوان منبع نورانی استفاده شد. جهت بررسی شدت های نور خورشید در طول موج های مختلف از دستگاه لوکس متر استفاده شد که در جدول ۳ شدت تابش های مختلف ارائه شده است.

## ۷.۲. محافظه ی آزمون

اندازه گیری ها مطابق با شکل شماتیک ۶، در یک استوانه ی شیشه یی (ساول آزمون) تحت تابش نور خورشید، انجام شد. همچنین برای حصول غلظت یکنواخت در طول مراحل آزمون، محلول آزمون (متیلن بلو) هر ۲۰ دقیقه یک بار به کمک همزن مغناطیسی هم زده شد.



شکل ۳. منحنی دانه بندی سیمان مصرفی.



شکل ۴. منحنی دانه بندی سنگ دانه ی مصرفی.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سنگ دانه ی ریز مصرفی.

شناسه	وزن مخصوص در حالت SSd ( $g/cm^3$ )	جذب آب در عبوری از الک ۲۰۰ (%)	نمره ۲۰۰ (%)
سنگ دانه ی ریز	۲/۵۶	۱/۲	۱

ASTM C۳۳/C۳۳<sup>[۱۴]</sup> انطباق مناسبی دارد. مشخصات فیزیکی سنگ دانه ها نیز در جدول ۲ ارائه شده است.

## ۴.۲. آماده سازی نانو اکسیدروی

برای تولید ترکیب های سیمانی حاوی نانوذرات، برخی از پژوهشگران توصیه می کنند که به منظور پراکندگی بهتر نانوذرات اکسیدروی در مخلوط سیمان، ابتدا باید آن ها را با آب مخلوط و سپس به مخلوط سیمان اضافه کرد.<sup>[۱۵]</sup> همچنین مطالعات صورت گرفته نشان می دهند زمانی که ذرات نانو در فاز آبی پراکنده می شوند، اندازه ی کلوخه های آن ها به مراتب بزرگ تر از اندازه ی اولیه می شود. لیکن لازم است از برخی روش های مکانیکی برای پخش بهتر نانوذرات استفاده شود. یکی از مؤثرترین روش های مذکور استفاده از امواج التراسونیک است.<sup>[۱۶]</sup>

ایجاد امواج التراسونیک در سوسپانسیون ذرات معلق نانومتری، وسیله یی مؤثر جهت حذف کلوخه هاست. در روش مذکور، زمانی که التراسونیک به محلول اعمال می شود، حباب هایی در مقیاس میکرو درون محلول ایجاد می شوند. در پالس های رفت و برگشتی امواج التراسونیک، این حباب ها می ترکند و منجر به افزایش فشار در آن نقطه می شوند. شوک حاصل از ترکیدن موجب خرد شدن و از هم

$$D_{nssm} = \frac{0.239(273 + T) \times L}{(U - 2) \times t} \times (X_d - 0.238) \times \sqrt{\frac{(273 + T) \times L \times X_d}{U - 2}} \quad (1)$$

که در آن:  $D_{nssm}$ : ضریب انتشار یون کلرید  $\times 10^{-12} (m^2/s)$ ;  $U$ : مقدار ولتاژ اعمالی،  $T$ : میانگین دمای اولیه و ثانویه در محلول آب نمک،  $L$ : ضخامت نمونه برحسب میلی‌متر،  $X_d$ : میانگین مقادیر عمق نفوذ،  $T$ : مدت زمان آزمایش بر حسب ساعت، هستند.

#### ۵.۹.۲. آزمایش جذب حجمی آب

آزمایش جذب حجمی آب با الگوبرداری از استاندارد ASTM C۶۴۲-۰۶<sup>[۲۱]</sup> با هدف بررسی میزان جذب آب توسط ملات‌های سخت‌شده انجام شد. برای این منظور، پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، ابتدا نمونه‌ها در دمای  $110^\circ C$  خشک و سپس در ظرف آب به نحوی غوطه‌ور شدند که سطح آب،  $25 \pm 5$  میلی‌متر بالاتر از سطح نمونه‌ها قرار گرفتند.

در آزمون مذکور، نمونه‌ها در زمان‌های تعیین‌شده از آب خارج و توسط پارچه‌ی تمیز، آب سطح آن‌ها خشک و سپس توزین شدند. بدین ترتیب با داشتن وزن آزمون در حالت خشک و پس از غوطه‌وری، درصد جذب آب بر حسب وزن آزمون خشک از رابطه‌ی ۲ به دست آمد:

$$I = \frac{m_t - m_o}{m_o} \times 100 \quad (2)$$

که در آن:  $I$ : درصد جذب آب،  $m_o$ : وزن نمونه در حالت خشک،  $M_t$ : تغییر وزن نمونه در زمان  $t$  برحسب گرم، هستند.

#### ۶.۹.۲. آزمایش سرعت جذب مویینه‌ی آب

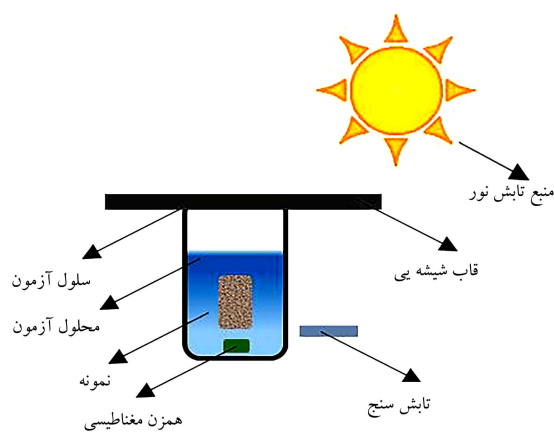
هدف از انجام آزمایش سرعت جذب مویینه‌ی آب، تعیین نرخ جذب آب، توسط نمونه‌ها با استفاده از افزایش جرم ملات‌هاست. آزمایش مذکور براساس استاندارد ASTM C۱۵۸۵-۰۴<sup>[۲۲]</sup> به‌منظور بررسی فضا‌های مویینه‌ی موجود در مخلوط‌های پایه‌ی سیمانی و همچنین شناخت و بررسی عملکرد نانوذرات اکسیدروی در کاهش تخلخل و فضا‌های مویینه‌ی موجود در ملات‌ها صورت گرفت. مقدار جذب مویینه عبارت است از تغییر جرم نمونه، تقسیم بر سطح مقطع در تماس با آب و وزن مخصوص آب (رابطه‌ی ۳):

$$I = \frac{m_t}{A \cdot \rho} \quad (3)$$

که در آن:  $I$ : مقدار جذب آب برحسب میلی‌متر،  $m_t$ : تغییر وزن نمونه در زمان  $t$  برحسب گرم،  $A$ : سطح مقطعی از نمونه که در تماس با آب است (میلی‌مترمربع)،  $\rho$ : چگالی آب برحسب گرم بر میلی‌مترمکعب هستند.

### ۳. طرح اختلاط خمیر و ملات

با توجه به آنکه در مطالعه‌ی حاضر، هدف بررسی عملکرد نانوذرات اکسیدروی بر روی خواص مکانیکی، دوام و فوتوکاتالیستی نمونه‌های پایه‌ی سیمانی بوده است، بر همین اساس تأثیر درصدهای مختلف نانوذرات اکسیدروی در محیط مواد پایه‌ی سیمانی بررسی شد. در نوشتار حاضر، از ۷ طرح اختلاط با درصد نانوذرات متفاوت  $(0, 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100)$  درصد نسبت به وزن سیمان جهت ساخت خمیر و ملات استفاده شدند که مشخصات آن‌ها به ترتیب در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. همچنین نسبت وزن آب به سیمان در کلیه طرح‌های اختلاط، ثابت



شکل ۶. نمودار شماتیک راکتور آزمون.

#### ۸.۲. اسپکتروفتومتر

از دستگاه آشکارساز UV-VIS، مدل Varia, Cary ۵۰، جهت شناسایی ترکیب‌های متیلن‌بلو محلول در آب استفاده شد. همچنین سل مورد استفاده در آزمایش مذکور به‌منظور جلوگیری از انکسار و عبور کامل نور از جنس کوارتز انتخاب شد.

#### ۹.۲. اصول آزمون

نوشتار حاضر در دو بخش، شامل این بخش‌ها بررسی شده است: الف) بررسی خواص مکانیکی (مقاومت فشاری)، دوام (نفوذ یون کلر، جذب حجمی و مویینه‌ی آب) و تصویرهای میکروسکوپ الکترونی مواد پایه‌ی سیمانی حاوی نانوذرات اکسیدروی؛ ب) توانایی تخریب و تجزیه‌ی متیلن‌بلو توسط خمیره‌های سیمانی حاوی نانوذرات اکسیدروی.

##### ۱.۹.۲. آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر طبق استاندارد BS۱۸۸۱-۱۱۶<sup>[۱۸]</sup> با استفاده از نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۵ سانتی‌متر در سن‌های مختلف انجام شد.

##### ۲.۹.۲. تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی

به منظور بررسی ریزساختار ملات‌های حاوی نانوذرات اکسیدروی از تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد.

##### ۳.۹.۲. آزمایش تعیین روانی ملات سیمان هیدرولیکی

آزمایش تعیین روانی ملات سیمان هیدرولیکی براساس استاندارد C۱۴۳۷-۰۱<sup>[۱۹]</sup> ASTM، با هدف اندازه‌گیری میزان روانی و بررسی عملکرد نانوذرات اکسیدروی بر روی روانی و کارایی ملات‌های ساخته‌شده استفاده شد.

##### ۴.۹.۲. آزمایش مهاجرت تسریع‌شده‌ی یون‌های کلرید (RCMT)

آزمایش مهاجرت تسریع‌شده‌ی یون‌های کلرید براساس استاندارد NT BUILD۴۹۲<sup>[۲۰]</sup> با هدف تعیین سرعت نفوذ یون‌های کلرید و بررسی عملکرد نانوذرات اکسیدروی در بهبود خواص دوام ملات‌های ساخته‌شده انجام شده است. همچنین در آزمایش مذکور پس از اجرای مراحل و شرایط کار مطابق با استاندارد ذکرشده، عمق نفوذ یون‌های کلرید به درون ملات، با پاشش محلول نقره‌ی نیترات و اندازه‌گیری به‌وسیله‌ی کولیس انجام شد. پس از اندازه‌گیری عمق نفوذ کرده، مقادیر به‌دست آمده جهت محاسبه‌ی ضریب انتشار یون‌های کلرید در رابطه‌ی ۱ قرار داده شد:

جدول ۴. نسبت‌های طرح اختلاط مخلوط‌های ملات در ۱ مترمکعب.

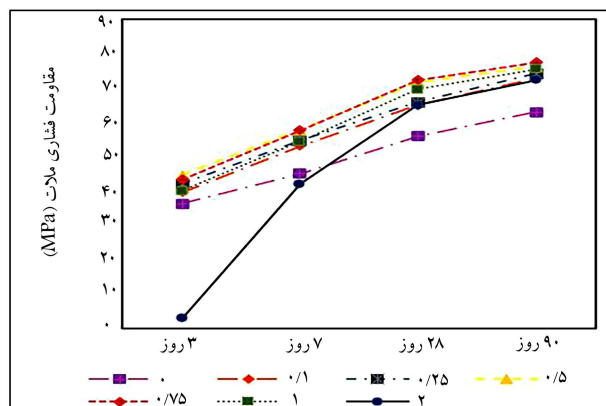
ردیف	طرح	سیمان ( $kg/m^3$ )	نانواکسیدروی ( $kg/m^3$ )	ماسه ( $kg/m^3$ )	آب ( $kg/m^3$ )
۱	Control	۶۰۰	۰	۱۳۵۰/۱	۲۸۸
۲	Z-۰/۱	۵۹۹/۴	۰/۶	۱۳۵۰/۳	۲۸۸
۳	Z-۰/۲۵	۵۹۸/۵	۱/۵	۱۳۵۰/۶	۲۸۸
۴	Z-۰/۵	۵۹۷	۳	۱۳۵۱/۱	۲۸۸
۵	Z-۰/۷۵	۵۹۵/۵	۴/۵	۱۳۵۱/۶	۲۸۸
۶	Z-۱	۵۹۴	۶	۱۳۵۲/۱	۲۸۸
۷	Z-۲	۵۸۸	۱۲	۱۳۵۴/۱	۲۸۸

جدول ۵. نسبت‌های طرح اختلاط خمیرهای سیمانی در ۱ مترمکعب.

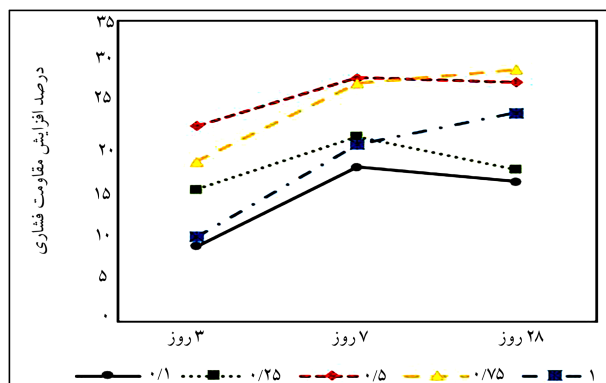
ردیف	طرح	سیمان ( $kg/m^3$ )	نانواکسیدروی ( $kg/m^3$ )	آب ( $kg/m^3$ )
۱	Control	۱۶۱۹/۵۴	۰	۴۸۵/۸۶
۲	Z-۰/۱	۱۶۱۹/۰۷	۱/۶۲	۴۸۵/۷۲
۳	Z-۰/۲۵	۱۶۱۸/۳۷	۴/۰۴	۴۸۵/۵۱
۴	Z-۰/۵	۱۶۱۷/۲	۸/۰۸	۴۸۵/۱۶
۵	Z-۰/۷۵	۱۶۱۶/۰۳	۱۲/۱۲	۴۸۴/۸۱
۶	Z-۱	۱۶۱۴/۸۷	۱۶/۱۵	۴۸۴/۴۶
۷	Z-۲	۱۶۱۰/۲۳	۳۲/۲	۴۸۳/۰۷

جدول ۶. نحوه‌ی اختلاط ملات و خمیر سیمانی.

ردیف	نحوه‌ی اختلاط	خمیر	ملات
۱	تهیه سوسپانسیون نانو ذرات	*	*
۲	اختلاط خشک کلبه مصالح (۲ دقیقه)	*	*
۳	افزودن آب و نانو ذرات سوسپانسیون شده در طی یک دقیقه	*	*
۴	هم زدن دستی (۱ دقیقه)	*	*
۵	دو دقیقه هم زدن توسط مخلوط‌کن	*	*
۶	توقف هم زدن به مدت ۳۰ ثانیه و جمع‌آوری ملات و خمیر از دور ظرف	*	*
۷	سه دقیقه هم زدن مجدد، توسط مخلوط‌کن	*	*
۸	توقف هم زدن به مدت ۳۰ ثانیه و جمع‌آوری ملات و خمیر از دور ظرف	*	*
۹	دو دقیقه هم زدن توسط مخلوط‌کن	*	*



شکل ۷. نتایج مقاومت فشاری درصدهای مختلف ملات با ZnO.



شکل ۸. مقادیر ارتقاء یافته‌ی مقاومت در درصدهای مختلف نانواکسیدروی نسبت به مخلوط کنترل.

از متیلن‌بلو با غلظت ۵ میلی‌گرم در لیتر تهیه شد. سپس ۱۵۰ میلی‌لیتر از محلول درون ظرفی با حجم ۲۵۰ میلی‌لیتر ریخته شد و جهت آزمایش مطابق با بند ۷.۲ در معرض تابش نور خورشید قرار گرفت.

نگاه داشته شد. این تذکر لازم است که خمیرهای سیمانی مورد استفاده جهت آزمایش تخریب متیلن‌بلو به شکل استوانه‌یی با قطر ۳/۶ و ارتفاع ۶/۸ سانتی‌متر قالب‌گیری شدند.

### ۱.۳. نحوه‌ی اختلاط ملات و خمیرهای سیمانی

جهت اطمینان بیشتر از اختلاط مناسب و پخش شدن نانو ذرات سوسپانسیون شده، زمان اختلاط خمیر و ملات به ترتیب به ۷/۵ دقیقه و ۱۰ دقیقه لحاظ شد. مراحل اختلاط ملات و خمیر در جدول ۶ تشریح شده است.

این تذکر لازم است که پس از ساخت و عمل‌آوری خمیرهای سیمانی، محلولی

### ۴. نتایج

#### ۱.۴. مقاومت فشاری

شکل ۷، نتایج مقاومت فشاری ملات با درصدهای مختلف نانواکسیدروی و شکل ۸ مقادیر ارتقاء یافته‌ی مخلوط‌های ساخته شده را نسبت به مخلوط کنترل نشان می‌دهند.

همانگونه که در شکل های ۷ و ۸ مشاهده می شود، استفاده از نانوذرات اکسیدروی به طور کلی سبب افزایش مقاومت ملات ها شده است. به طوری که با افزایش نسبت نانوذرات مصرفی در ملات، روند افزایش مقاومت در سنین اولیه کندتر شده و میزان مذکور با افزایش سن (دوره ی عمل آوری)، رشد پیدا کرده است. فقط در نمونه ی حاوی ۲٪ در سن های ۳ و ۷ روز، کاهش مقاومت نسبت به مخلوط کنترل اتفاق می افتد که البته این افت مقاومت نیز در سن ۲۸ روز جبران و افزایش مقاومت مشاهده می شود.

بیشترین مقاومت فشاری کسب شده نیز مربوط به طرح اختلاط حاوی ۷۵٪ نانواکسیدروی در سن ۲۸ روز است. این در حالی است که در سن های ۳ و ۷ روز، مقاومت فشاری کمتری نسبت به نمونه ی حاوی ۵٪ نانواکسیدروی مشاهده می شود و با افزایش دوره ی عمل آوری در سن ۲۸ روز، مقاومت فشاری آن افزایش می یابد.

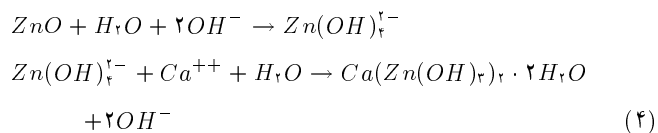
شاید بتوان یکی از علل پدیده ی مذکور را اثر کندکندگی شدید نانوذرات دانست. به طوری که کاهش سرعت گیرش در خمیرهای سیمانی، سبب شکل گیری آرام ریزساختار در مخلوط های مذکور شده است در نتیجه باعث ایجاد ساختار متراکم تر و مناسب تری در سنین بالا در مقایسه با سنین اولیه شده است، که این پدیده به وضوح در تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی بخش ۶.۴ مشاهده می شود. همچنین خود نانوذرات نیز می تواند به طور مجزا سبب کاهش تخلخل در محیط مواد پایه ی سیمانی نیز شود.

#### ۲.۴. تعیین روانی ملات سیمان هیدرولیکی

به منظور حفظ کارایی ملات های پایه ی سیمانی، طرح اختلاط اولیه (بدون نانواکسیدروی) به گونه یی انتخاب شد تا روانی آن در محدوده ی سیلان  $20 \pm 21$  میلی متر قرار گیرد. سپس نانوذرات اکسیدروی مطابق با طرح های اختلاط جدول ۵، اضافه و روانی آن توسط میز سیلان (شکل ۹) بررسی شد.

مطابق شکل ۹، اضافه شدن نانوذرات اکسیدروی، سبب کاهش روانی ملات ها می شود. به طوری که با افزایش درصد نانوذرات اکسیدروی در محیط ملات ها، کاهش بیشتر کارایی مشاهده می شود که احتمالاً دلیل این امر را می توان سطح ویژه ی بالای نانوذرات اکسیدروی دانست که بالطبع سبب افزایش نیاز آبی می شود و در پی آن روانی ملات را کاهش می دهد. به این نکته نیز باید توجه داشت که کاهش در روانی ملات ها به گونه یی نیست که از لحاظ کارایی تغییر محسوسی وجود داشته باشد. همچنین براساس بررسی های صورت گرفته (رابطه ی ۴)، حضور نانوذرات

اکسیدروی در محیط مواد پایه ی سیمانی، سبب واکنش با آب و در نهایت افزایش تولید محصولات هیدراسیون می شود،<sup>[۲۳]</sup> که این پدیده می تواند عاملی در جهت افزایش مصرف آب در محیط مواد پایه ی سیمانی حاوی نانوذرات اکسیدروی باشد و از طرف دیگر، سبب بهبود مشخصات مکانیکی و دوام نیز می شود که نیاز به بررسی های بیشتر دارد.



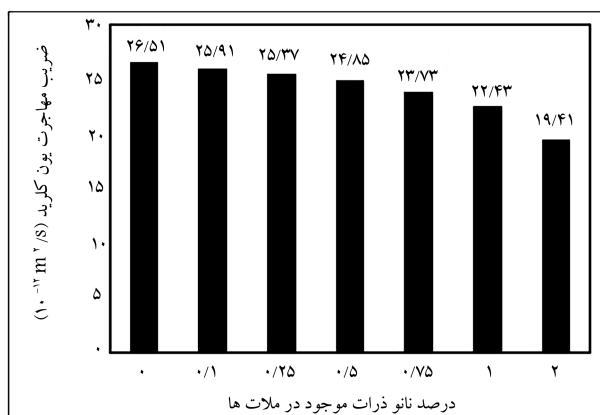
#### ۳.۴. مهاجرت تسریع شده ی یون های کلرید

در شکل ۱۰، نتایج حاصل از مهاجرت تسریع شده ی یون های کلرید مشاهده می شود. افزایش درصد جایگزینی نانوذرات اکسیدروی، سبب بهبود و ارتقاء عملکرد ملات ها در سن ۲۸ روز در برابر حملات کلریدی شده است. همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود، با افزایش درصد جایگزینی نانوذرات، ضریب مهاجرت یون های کلرید به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. چرا که با وجود منافذ و ریزترک هایی با شکل های نامنظم (بعضاً باریک و پهن) در فضای منفذی سیمان که به دلیل اندرکنش ها و فعل و انفعالات شیمیایی - فیزیکی رخ می دهد، آب می تواند به عنوان حاملی برای انتقال یون های مهاجم عمل کند و با نفوذ درون مواد پایه ی سیمانی، سبب ایجاد فرایندهای شیمیایی کاهنده ی کیفیت در آن ها شود. بر همین اساس به نظر می رسد که اضافه کردن نانوذرات اکسیدروی سبب ناپیوستگی منافذ موجود در فضای منفذی ملات ها می شود.

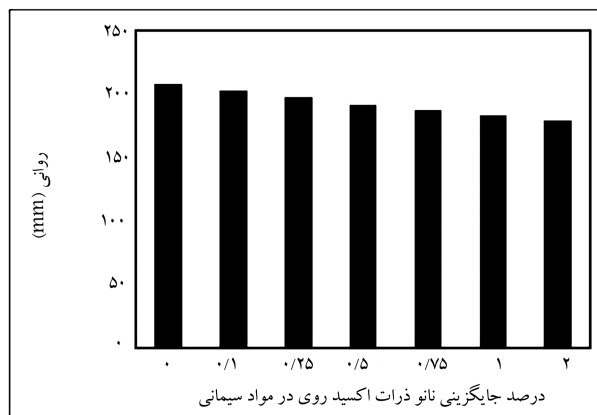
#### ۴.۴. جذب حجمی آب توسط ملات ها

به طور کلی استفاده از نانوذرات اکسیدروی سبب بهبود مقاومت ملات ها در برابر نفوذ آب شده است. همان طور که در شکل ۱۱ مشاهده می شود، افزایش درصد جایگزینی نانوذرات اکسیدروی سبب افزایش مقاومت ملات در برابر نفوذ آب شده و میزان مذکور در ۲٪ جایگزینی نانوذرات با سیمان، بهترین و مؤثرترین عملکرد را در بین سایر درصدهای جایگزین داشته است.

همچنین با توجه به شکل ۱۱ به نظر می رسد که استفاده از نانوذرات اکسیدروی سبب کاهش حجم و به عبارت دیگر، موجب ناپیوسته کردن فضاهای خالی موجود

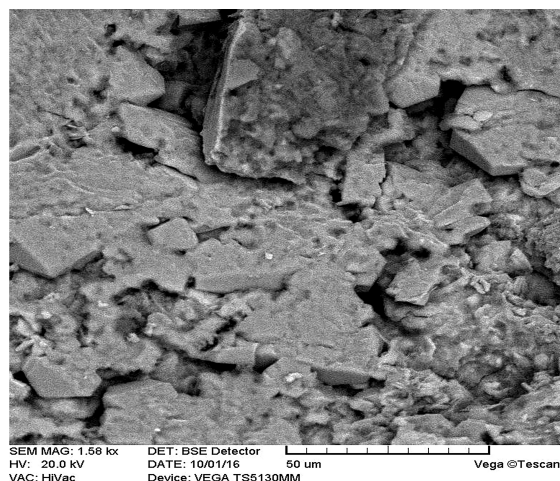


شکل ۱۰. نتایج مهاجرت تسریع شده ی یون کلرید (RCMT).

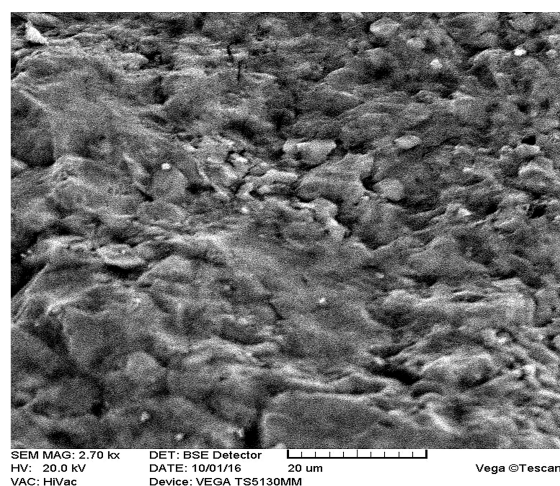


شکل ۹. نتایج آزمایش تعیین روانی ملات ها.





شکل ۱۳. تصویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به ملات بدون نانواکسیدروی در سن ۲۸ روز.

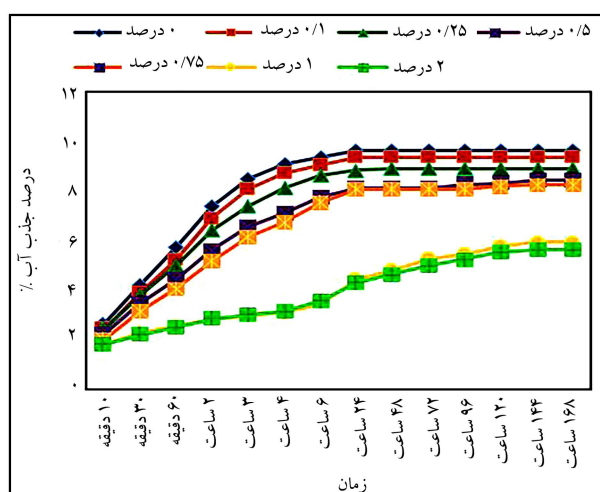


شکل ۱۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به ملات حاوی ۲٪ نانواکسیدروی در سن ۲۸ روز.

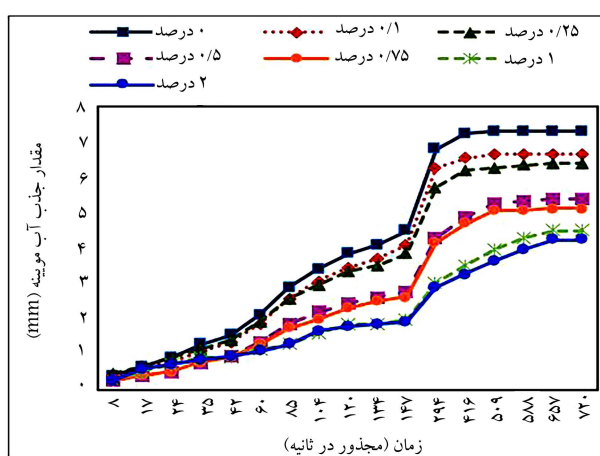
دانست (علت پرش در ناحیه ۱۴۷ تا ۲۹۴ آن است که نتایج از ۶ ساعت به ۲۴ ساعت انتقال یافته است. ضمناً نمودار حالت لگاریتمی دارد که تغییرات در آن حالت تشدید شده پیدا می‌کنند).

#### ۶.۴. تصاویر میکروسکوپ الکتونی روبشی

از تصویر برداری الکترونی به منظور بررسی آثار نانوذرات اکسیدروی در بهبود ریزساختار و بررسی بهتر علل کاهش نفوذپذیری ملات‌ها استفاده شد (شکل‌های ۱۳ و ۱۴). در آزمون حاضر به منظور بررسی آثار نانوذرات اکسیدروی در ریزساختار ملات، درصدهای جایگزینی ۲ و صفر در سن ۲۸ روز بررسی و ارزیابی شدند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جایگزینی ۲٪ نانواکسیدروی در ملات، سبب ایجاد ساختاری متراکم‌تر و منسجم‌تر در محیط مواد پایه‌ی سیمانی می‌شود. در نتیجه‌ی ساختار متراکم و منسجم اشاره شده، علاوه بر بهبود مشخصات مکانیکی از جمله مقاومت فشاری، سبب بهبود مشخصات دوام مانند کاهش میزان نفوذپذیری آب و سایر عوامل مخرب همچون یون کلرید به درون ساختار ملات‌ها می‌شود.



شکل ۱۱. نتایج آزمایش جذب حجمی آب در درصدهای مختلف ZnO.



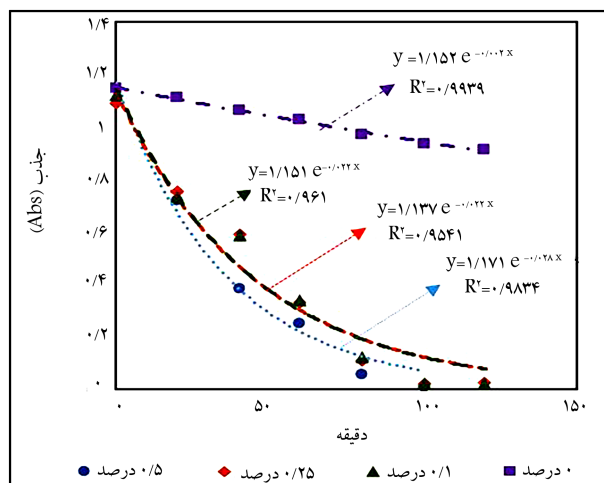
شکل ۱۲. نتایج آزمایش جذب موئینه‌ی آب در درصدهای مختلف ZnO.

در محیط ملات شده است. چرا که بر اساس شکل مذکور، نمودارهای مربوط به جذب حجمی آب در ملات شاهد و درصدهای پایین نانواکسیدروی (تا ۰.۷۵٪)، در زمان کوتاه‌تری ثابت شده است. حال آنکه با افزایش درصد نانوذرات (۱ و ۲ درصد)، روند نفوذ آب به درون ملات در زمان طولانی‌تری ثابت می‌شود. بر همین اساس می‌توان علت این پدیده را ناپیوسته کردن و کاهش حجم منافذ دانست.

#### ۵.۴. جذب آب موئینه توسط ملات‌ها

همان‌طور که از نتایج موجود در شکل ۱۲ بر می‌آید، جایگزینی نانوذرات اکسیدروی با سیمان، سبب کاهش میزان جذب آب و نفوذپذیری و بالطبع جایگزینی نانوذرات اکسیدروی با سیمان، عملکرد بهتر و مطلوب‌تر مخلوط‌های سیمانی در مقابل هجوم عوامل مخرب بیرونی و امثال آن را فراهم می‌کند. به‌طوری که در نمونه‌ی حاوی ۲٪ نانواکسیدروی نسبت به مخلوط کنترل حدود ۵۰٪ از میزان نفوذ موئینه‌ی آب کاسته شده است.

نتایج حاصل از آزمایش حاضر نیز تأییدکننده‌ی نتایج به‌دست آمده از آزمایش مهاجرت تسریع‌شده‌ی یون‌های کلرید و جذب حجمی است که علت این مسئله را نیز می‌توان افزایش ناپیوستگی و یا کاهش حجم فضاهای موئینه‌ی موجود در ملات



شکل ۱۷. منحنی رگرسیون حذف رنگ متیلن بلو تحت تابش نور خورشید در حضور غلظت‌های ۰٫۵، ۰٫۲۵، ۰٫۱ و ۰ درصد نانواکسیدروی نسبت به وزن سیمان (منحنی رگرسیون ۰٫۲۵ و ۰٫۱ بر یکدیگر منطبق‌اند).

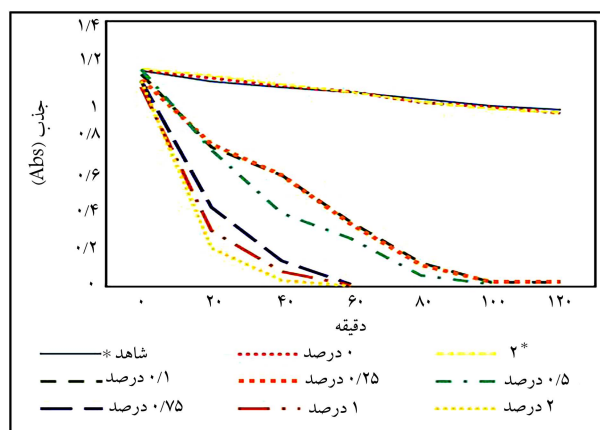


(a) تنها تحت تابش نور خورشید؛  
(b) تحت تابش نور خورشید همراه با خمیره ی سیمانی بدون نانو اکسید روی؛  
(c) تحت تابش نور خورشید همراه با خمیره ی سیمانی حاوی ۲ درصد نانو اکسید روی.  
شکل ۱۸. نمایش اثرگذاری پارامترهای مختلف در محلول متیلن‌بلو.

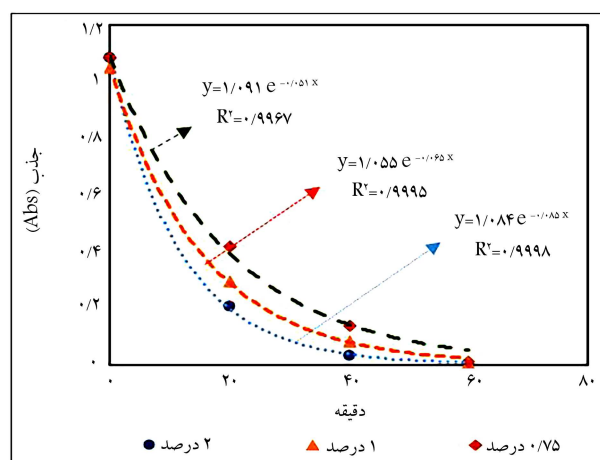
همان‌طورکه در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، منحنی رگرسیون خمیره‌های حاوی ۰٫۲۵ و ۰٫۱ درصد بر یکدیگر منطبق هستند که می‌توان نتیجه گرفت به‌طور متوسط دو میزان درصد ذکرشده، توانایی مشابهی در حذف متیلن‌بلو دارند و با توجه به ملاحظات اقتصادی به نظر می‌رسد استفاده از خمیره‌های حاوی ۰٫۱٪ نانواکسیدروی در حذف متیلن‌بلو مقرون‌به‌صرفه‌تر باشد.

بررسی‌های صورت‌گرفته بر روی شکل‌های ۱۵ الی ۱۷ نشان می‌دهد افزایش مقدار نانوذرات اکسیدروی (اکسیدکننده) سبب افزایش فعالیت نوری و در پی آن افزایش بازده فوتونی می‌شود، به‌طوری‌که قادر است درصد بیشتری از متیلن‌بلو موجود در محیط را تخریب و تجزیه کند که آن را می‌توان افزایش تولید رادیکال هیدروکسیل ( $OH\cdot$ ) و یون سوپراکسید ( $O_2^-$ ) دانست. همچنین به‌منظور آشکار شدن عینی عملکرد و میزان اثرگذاری سطوح حاوی نانوذرات اکسیدروی، در شکل ۱۸ مقایسه‌ی بین سطوح حاوی نانوذرات اکسیدروی و نمونه‌ی بدون حضور سیمان صورت گرفته است.

در همین راستا بررسی مطالعات صورت گرفته‌ی در سال ۱۹۹۹ [۲۴] نشان می‌دهد که افزایش عملکرد کاتالیست در غلظت‌های بیشتر ناشی از جایگاه‌های



شاهد: محلول متیلن بلو بدون آزمون ی سیمانی  
۲\* خمیره ی حاوی ۲ درصد اکسید روی بدون تابش نور خورشید (در تاریکی)  
شکل ۱۵. نمودار میله‌ی حذف متیلن‌بلو.



شکل ۱۶. منحنی رگرسیون حذف رنگ متیلن‌بلو تحت تابش نور خورشید در حضور غلظت‌های ۰٫۲ و ۰٫۷۵ درصد نانواکسیدروی نسبت به وزن سیمان.

#### ۷.۴. نتایج آزمایش تخریب متیلن‌بلو به‌وسیله‌ی خمیره‌های حاوی نانواکسیدروی

پس از انجام مراحل آزمایش مطابق آنچه بیان شد، هر ۲۰ دقیقه حدود ۲ سی‌سی از محلول مورد آزمایش استخراج و بلافاصله بدون آنکه در معرض تابش فوتون‌های نوری قرار بگیرد، بر روی آن آزمایش آشکارسازی متیلن‌بلو به‌وسیله‌ی دستگاه اسپکتروفوتومتر انجام شد. این تذکر لازم است که به‌منظور بررسی حذف متیلن‌بلو با اسپکتروفوتومتر، ابتدا دامنه‌ی طول موج ۲۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر برای دستگاه تعریف شد که پس از بررسی‌های صورت گرفته به‌منظور نمایش دامنه‌ی مناسب، محدوده‌ی ۵۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر انتخاب شد.

در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷، جذب متیلن‌بلو در محدوده‌ی ۵۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر، تحت شرایط و پارامترهای مختلف، به‌صورت نمودار میله‌ی در هر دوره‌ی زمانی نشان داده شده است؛ که شامل سطوح سیمانی با درصدهای مختلف نانواکسیدروی، نمونه‌ی شاهد، و نمونه‌ی حاوی ۲٪ اکسیدروی بدون تابش نور خورشید است. به‌منظور مدل‌سازی و تعیین ارتباط میان متغیرها از رگرسیون استفاده شد. به‌طوری‌که بتوان در هر زمان دلخواه، تخمینی از میزان جذب متیلن‌بلو به دست آورد و به‌عبارت دیگر، یک نمودار کلی از میزان متوسط جذب داشت.



کنند و این پرتوهای نوری به طور مجزا باعث حذف مقدار کمی از رنگ می شوند، که با مطالعه حاضر هم خوانی دارد.

## ۵. نتیجه گیری

جایگزینی نانوذرات اکسیدروی سبب افزایش مقاومت نمونه ها به خصوص در سنین بالاتر نسبت به نمونه ی شاهد شده است. تا سن ۲۸ روز، جایگزینی ۰/۷۵٪ نانواکسیدروی بیشترین اثر را در افزایش مقاومت دارد. در حالی که مقاومت فشاری نمونه ی حاوی ۲٪ اکسیدروی تا سن ۷ روز نسبت به نمونه ی شاهد، مقاومت فشاری کمتری دارد؛ اما با افزایش زمان دوره ی عمل آوری، شاهد ارتقاء بیشتر مقاومت است که احتمالاً به دلیل تشکیل بسیار آرام ریزساختار است.

بررسی های صورت گرفته نشان می دهد جایگزینی ۲٪ نانوذرات اکسیدروی در مخلوط خمیر سیمانی به ترتیب بیشترین اثر بخشی را در کاهش ضریب مهاجرت یون کلرید، نفوذ موینه و جذب حجمی آب داشته است. نتایج حاصل از آزمایش فوتوکاتالیستی نشان می دهد سطوح سیمانی حاوی نانوذرات اکسیدروی، توانایی بسیار بالایی در تخریب و تجزیه ی ترکیب های آلی محلول در آب همچون متیلن بلو دارد. در نتیجه می توان با بهره برداری از چنین سطوح توانمندی از ورود منابع آلوده کننده ی ذکر شده به آب شرب و مصرفی تا حد بسیار زیادی جلوگیری کرد.

## پانوشته ها

۱. نیمه هادی ها از نظر توانایی هدایت الکتریکی بین هادی ها و عایق ها قرار دارند. به طوری که انرژی الکتریکی را به خوبی از خود عبور نمی دهند و برای این کار به عوامل محرکی همچون نور، افزایش دما و یا افزودن ناخالصی نیازمندند.
۲. زمانی که انرژی فوتون برابر یا بیشتر از باند گپ نیمه هادی باشد، می تواند الکترون لایه ی ظرفیت را برانگیزد و به لایه ی هدایت انتقال دهد.
۳. اتروفیکاسیون دلالت بر غنی شدن پیکره ی آبی به وسیله ی مواد آلی ورودی و یا رواناب سطحی است که منجر به رشد شکوفه های بسیار سمی آلفا و در نهایت سبب کمبود اکسیژن در مناطق وسیع حوزه ی آبی می شود. این پدیده متعاقباً یک اختلال نامطلوب در تعادل ارگانیسم ها و کیفیت آب به وجود می آورد.

## منابع (References)

1. Fujishima, A., Zhang, X. and Tryk, D.A. "Heterogeneous photocatalysis: from water photolysis to applications in environmental cleanup", *Int. J. Hydrogen Energy*, **32**(14), pp. 2664-2672 (2007).
2. Chen, J. and Poon, C. "Photocatalytic construction and building materials: From fundamentals to applications", *Build. Environ.*, **44**(9), pp. 1899-1906 (2009).
3. Diamanti, M.V., Ormellese, M. and Pedferri, M. "Characterization of photocatalytic and superhydrophilic properties of mortars containing titanium dioxide", *Cem. Concr. Res.*, **38**(11), pp. 1349-1353 (2008).

فعال بیشتر در سطح کاتالیست است، به طوری که علت پدیده ی مذکور را می توان افزایش امکان پرتو دهی بر روی سطح کاتالیست نسبت داد. همچنین بررسی های صورت گرفته نشان می دهد با افزایش میزان کاتالیست (به صورت پودری و معلق در محلول)، به علت افزایش کدورت در سوسپانسیون، کاهش در نفوذ پرتو نوری رخ می دهد و می تواند باعث کاهش اثر فوتوکاتالیست شود، ولی آنچه حائز اهمیت است این نکته است که این اتفاق زمانی می افتد که نانوذرات در محیط معلق باشند، پس به نظر می رسد می توان با جایگزینی نانوذرات در سطوح سیمانی از پدیده ی ذکر شده به نحو قابل توجهی جلوگیری کرد.

آزمایش های انجام شده بر روی آثار حذف رنگ توسط کاتالیست نشان می دهد که حذف رنگ در تاریکی و تحت تأثیر جذب سطحی بر روی مصالح پایه ی سیمانی حاوی نانو فوتوکاتالیست اکسیدروی ناچیز و حتی قابل چشم پوشی است. همچنین نتایج به دست آمده نشان می دهد که به کارگیری تابش مستقیم نور نمی تواند اثر مشهودی در تغییر رنگ متیلن بلو داشته باشد. همچنین طی مطالعه ی (۲۰۰۶) گزارش شده است که واکنش های حذف رنگ و معدنی سازی به تنهایی تحت تابش اشعه ی فرابنفش در تولید رادیکال هیدروکسیل مؤثر نیست. [۲۵] نتایج مشابهی نیز گزارش شده است، [۲۷، ۲۶] به طوری که طی انجام آزمایش هایی در مورد رنگ ها با لامپ های UV این نتیجه به دست آمده است که فوتون های نوری به تنهایی نمی توانند عامل اصلی تجزیه کننده ی رنگ (رادیکال های هیدروکسیل) را به مقدار کافی تولید

4. Cassar, L., de Miguel, Y., Porro, A. and et al. "Nanotechnology and photocatalysis in cementitious materials", In *Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Symp. on Nanotechnology in Construction*, Bilbao, Spain, pp. 277-283 (2005).
5. Madani, H., Bagheri, A. and Parhizkar, T. "The poz-zolanic reactivity of monodispersed nanosilica hydrosols and their influence on the hydration characteristics of Portland cement", *Cement and Concrete Research*, **42**(12), pp. 1563-1570 (2012).
6. Li, B., Liu, T., Wang, Y. and Wang, Z. "ZnO/graphene-oxide nanocomposite with remarkably enhanced visible-light-driven photocatalytic performance", *J. Colloid Interface Sci.*, **377**(1), pp. 114-121 (2012).
7. Khodja, A.A., Sehili, T., Pilichowski, J.-F. and et al. "Photocatalytic degradation of 2-phenylphenol on TiO<sub>2</sub> and ZnO in aqueous suspensions", *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, **141**(2), pp. 231-239 (2001).
8. Lizama, C., Freer, J., Baeza, J. and et al. "Optimized photodegradation of Reactive Blue 19 on TiO<sub>2</sub> and ZnO suspensions", *Catal. Today*, **76**(2), pp. 235-246 (2002).
9. Mohamed, R.M., McKinney, D.L. and Sigmund, W.M. "Enhanced nanocatalysts", *Mater. Sci. Eng. R Reports*, **73**(1), pp. 1-13 (2012).
10. Malato, S., Fernandez-Ibanez, P., Maldonado, M.I. and et al. "Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: Recent overview and trends", *Catal. Today*, **147**(1), pp. 1-59 (2009).
11. Mekasuwandumrong, O., Pawinrat, P., Praserttham, P. and et al. "Effects of synthesis conditions and annealing

- post-treatment on the photocatalytic activities of ZnO nanoparticles in the degradation of methylene blue dye", *Chem. Eng. J.*, **164**(1), pp. 77-84 (2010).
12. Neppolian, B., Choi, H.C., Sakthivel, S. and et al. "Solar light induced and TiO<sub>2</sub> assisted degradation of textile dye reactive blue 4", *Chemosphere*, **46**(8), pp. 1173-1181 (2002).
13. INSO 2931, 1<sup>st</sup>.Revision, White Cement -Specifications and Conformity Criteria (2014).
14. ASTM C 33/C 33M, Standard Specification for Concrete Aggregates (2013).
15. Hüsken, G., Hunger, M. and Brouwers, H.J.H. "Experimental study of photocatalytic concrete products for air purification", *Build. Environ.*, **44**(12), pp. 2463-2474 (2009).
16. Bagheri, A., Parhizkar, T., Madani, H. and Raisghasemi, A.M. "The influence of different preparation methods on aggregation status of pyrogenic nanosilicas utilized in cement mixtures", *Materials and Structures*, **46**(1-2), pp. 135-143 (2013).
17. Sauter, C., Emin, M.A., Schuchmann, H.P. and Tavman, S. "Influence of hydrostatic pressure and sound amplitude on the ultrasound induced dispersion and deagglomeration of nanoparticles", *Ultrason. Sonochem.*, **15**(4), pp. 517-523 (2008).
18. BS 1881 Part 116, "Method for determination of compressive strength of concrete", British Standard (1983).
19. ASTM C1437-01, Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar (2001).
20. NT Build 492, "Concrete mortar and cement-based repair materials-chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments", NT Build 492 (1999).
21. ASTM C 642, *American Society for Testing Materials, Standard Test Method for Density, Absorption and Voids in Hardened Concrete*, Annual Book of ASTM standards (2015).
22. ASTM C 1585, *American Society for Testing Materials, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*, Annual Book of ASTM standards (2015).
23. Tashiro, C. and Oba, J. "The effects of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cu (OH)<sub>2</sub>, ZnO and PbO on the compressive strength and the hydrates of the hardened C3A paste", *Cem. Concr. Res.*, **9**(2), pp. 253-258 (1979).
24. Goncalves, M.S.T., Oliveira-Campos, A.M.F., Pinto, E.M.M.S. and et al. "Photochemical treatment of solutions of azo dyes containing TiO<sub>2</sub>", *Chemosphere*, **39**(5), pp. 781-786 (1999).
25. Monteagudo, J.M. and Duran, A. "Frensel lense to concentrate solar energy for the photocatalytic decoloration and mineralization of orange II in aqueous solution", *Chemosphere*, **65**(7), pp. 1242-1248 (2006).
26. Movahedian, A.H. and Rezaei, R. "Investigating the efficiency of advanced photochemical oxidation (APO) technology in degradation of direct azo dye by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process", *Water and Waste Water*, **17**(359), pp. 75-83 (2006).
27. Mahmoodi, N.M. and Arami, M. "Degradation and toxicity reduction of textile wastewater using immobilized titania nanophotocatalysis", *J. Photochem. Photobiol. B. Biol.*, **94**(1), pp. 20-24 (2009).