



بررسی خواص مکانیکی، فوتوکاتالیستی و واکنش‌زایی نانو ذرات اکسیدروی در محیط سیمانی

سید حسام مدنی*، امیر خاقانی بروجنی، امین پورجهانشاهی

دانشکده مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فن‌آوری پیشرفته، کرمان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۸ دی ۱۳۹۵
بازنگری: ۱۲ اسفند ۱۳۹۵
پذیرش: ۴ اردیبهشت ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۲۶ اردیبهشت ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

نانو اکسیدروی
مواد پایه سیمانی
خواص مکانیکی
ریزساختار
فوتوکاتالیست

چکیده: در این مقاله نویسندگان به منظور ارتقا توانمندی‌های سطوح پایه سیمانی، ابتدا اقدام به سنتز نانو ذرات اکسیدروی کرده، سپس با استفاده از آنالیز پراش اشعه ایکس و میکروسکوپ الکترونی روشی صحت نحوه سنتز و مشخصات نانو ذرات تولیدشده را مشخص کردند. پس از آن به منظور بررسی عملکرد و اثربخشی این نانو ذرات بر مشخصات مکانیکی، ریزساختاری و فوتوکاتالیستی در مواد پایه سیمانی اقدام به انجام آزمایش‌های مختلف نظیر مقاومت فشاری، میزان واکنش‌پذیری با هیدروکسیدکلسیم، انقباض، آنالیز ریزساختاری به کمک طیف‌سنجی مادون‌قرمز و پراش اشعه ایکس شده و در انتها به منظور بررسی توانایی این سطوح در تخریب و اضمحلال ترکیبات آلی از محلول متیلن بلو استفاده شد. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد نانو ذرات اکسیدروی سبب افزایش مقاومت فشاری نهایی ملات‌ها گردیده و از قدرت واکنش‌زایی مناسبی با هیدروکسیدکلسیم برخوردار است. همچنین عملکرد این ماده در فضای منفذی سیمان به گونه‌ای است که سبب کاهش انقباض ملات‌ها شده است. بررسی‌های ریزساختاری نیز بیانگر تشکیل هیدروکسیدکلسیم روی در محیط مواد پایه سیمانی و افزایش تولید واحدهای پلیمریزاسیون بود. در انتها بررسی و آنالیز خواص فوتوکاتالیستی این سطوح در تخریب و اضمحلال آلاینده صنعتی، بیانگر قدرت بالای مواد پایه سیمانی در حذف متیلن بلو بود.

۱- مقدمه

امروزه گسترش علوم و دانش در صنایع مختلف سبب گردیده تا محققان درصدد به‌کارگیری علوم و فنون جدید در رشته‌های مختلف برآیند. بر همین اساس محققان و دانشمندان علم تکنولوژی بتن نیز در راستای ارتقا و بهبود خواص مصالح پایه سیمانی اقدام به جانشینی و استفاده از مواد در مقیاس نانو کردند. چراکه تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد مواد در مقیاس نانو از خود خواص جدید و منحصر به فردی نشان می‌دهند [۱].

گروهی از این نانو ذرات شامل اکسیدهای نیمه‌هادی است که در خانواده نانو مواد فوتوکاتالیستی قرار می‌گیرند. در این میان اکسیدهای نیمه‌هادی همچون TiO_2 ، WO_3 ، Fe_2O_3 و ZnO قادرند به‌عنوان فوتوکاتالیست در فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته به کار گرفته شوند و بتوان از آن‌ها به‌عنوان روشی نوین و کارآمد در محیط‌های آلوده، بهره‌برداری و استفاده کرد [۲ و ۳]. در این روش الکترون‌های موجود در لایه ظرفیت نانو فوتوکاتالیست، تحت تابش نور (فرابنفش) برانگیخته شده و با گذر از باند انرژی (باند گپ) به

لایه هدایت انتقال می‌یابند^۱. در نتیجه این برانگیختگی، جفت الکترون-حفره پدید می‌آید که قادر است طی یکسری واکنش اکسایش-کاهش، از طریق تولید گونه‌های اکسیژن فعال O_2^- و رادیکال هیدروکسیل OH^\cdot محدوده وسیعی از آلاینده‌های آلی، باکتری‌ها و قارچ‌ها را تخریب و تجزیه نماید [۴]. همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد یکی از این اکسیدهای نیمه‌هادی نانو ذرات اکسیدروی است که دارای باند انرژی در حدود $\frac{3}{2}$ الکترون‌ولت است که قادر بوده بر اثر تابش فوتون‌های نوری به‌راحتی دچار برانگیختگی الکترونی شود و مطابق با مکانیسم توضیح داده‌شده سبب اضمحلال محدوده وسیعی از عوامل آلاینده گردد. در مطالعات صورت گرفته توسط دیگر محققین نیز نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم (TiO_2) مورد اقبال گسترده‌ای قرار گرفته است. حال آنکه در برخی مطالعات صورت گرفته، برای اکسیدروی تحرک الکترونی بیشتری قائل شده [۵] و محققان این رشته معتقدند، نانو ذرات فوتوکاتالیستی اکسیدروی گاهی از کارایی و فعالیت الکترونی بیشتری نسبت به نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم برخوردارند [۵ و ۶].

بر همین اساس با توجه به آن که مصالح پایه سیمانی سطح وسیعی

۱ زمانی که انرژی فوتون برابر یا بیشتر از باند گپ نیمه‌هادی باشد؛ می‌تواند الکترون لایه ظرفیت را برانگیخته و به لایه هدایت انتقال دهد.

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: h.madani@kgut.ac.ir

به دست آمده از آزمایش مشابه با دوده سیلیسی، سرباره مس و پودر سیلیس به عنوان سه ماده پوزولانی مورد استفاده و اقبال محققین پرداخته شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تولید نانو ذرات اکسیدروی به روش رسوبدهی شیمیایی

نانو ذرات اکسیدروی به کاررفته در این مطالعه توسط خود محققین سنتز و تهیه گردید.

در مطالعه حاضر، به منظور سنتز نانو ذرات اکسیدروی از روش رسوبدهی شیمیایی استفاده شد. برای تحقق این مهم، ابتدا دو گروه متشکل از محلول هیدروکسیدسدیم (NaOH)، ساخت شرکت مرک آلمان) و محلول نیترات روی ۶ آبه $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ، ساخت شرکت مرک آلمان) تهیه شد. در این روش مواد اولیه (هیدروکسیدسدیم و نیترات روی) به نحوی در آب مقطر حل گردیدند که محصول به دست آمده در این فرآیند محلولی همگن، شفاف و بی‌رنگ باشد. در مرحله بعد محلول هیدروکسیدسدیم به محلول نمک روی اضافه گردید. سپس جهت خشک شدن آب فیزیکی، رسوبات درون آن با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. پس از این مرحله جهت خروج آب شیمیایی موجود در ساختار هیدروکسیدروی $Zn(OH)_2$ ، رسوبات خشک شده در مرحله قبل، درون کوره قرار گرفتند تا آب از ساختار شیمیایی آن‌ها خارج شده و محصول نهایی نانو ذرات اکسیدروی (ZnO) حاصل شود.

۲-۲- سیمان مصرفی

به منظور بررسی بهتر اثرات فوتوکاتالیستی نانو ذرات اکسیدروی در محیط سیمان، از سیمان سفید استفاده شد.

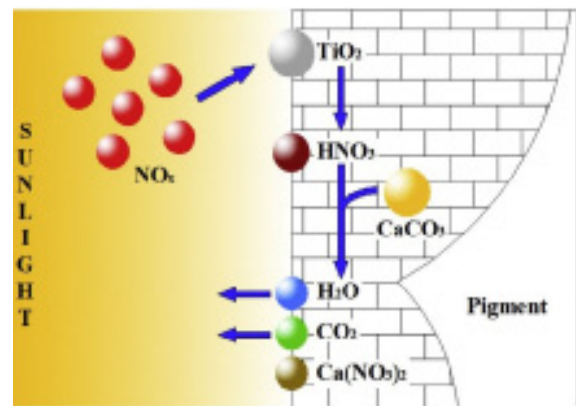
در این مقاله از سیمان سفید، تولید کارخانه شرق، برای ساخت مخلوط‌های آزمایشی استفاده شد. آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی نیز در جدول ۱ نشان داده شده است.

سایر مشخصات سیمان مصرفی نیز از انطباق مناسبی با استاندارد ملی ایران ۲۹۳۱ (UNE 80305) [۸] برخوردار بود.

۲-۳- دوده سیلیسی، سرباره مس و پودر سیلیس

به منظور درک بهتر میزان واکنش‌پذیری اکسیدروی با هیدروکسیدکلسیم، قابلیت واکنش‌پذیری آن با سه نوع پوزولان^۱، دوده سیلیسی، سرباره مس و پودر سیلیس که در سال‌های اخیر مورد اقبال محققین تکنولوژی بتن بوده است مقایسه شد [۹ و ۱۰]. در جدول ۱ آنالیز شیمیایی دوده سیلیسی^۲، سرباره مس^۳ و پودر سیلیس^۴ مصرفی نشان داده شده است.

از محدوده زندگی و جوامع شهری را در برمی‌گیرند به نظر می‌رسد علاوه بر عملکرد محصورکنندگی نانو ذرات توسط ماتریس سیمان، بتوان از آن به عنوان پتانسیلی بالقوه در حذف آلودگی‌های آلی در بزرگراه‌ها و زیرگذرهای با دیواره‌های بلند که سبب به دام انداختن گاز آلاینده NOx، حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی می‌شود بهره فراوانی برد. چراکه بررسی‌های صورت گرفته بر روی سطوح سیمانی حاوی نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم نشان می‌دهد، ابتدا گاز آلاینده NOx در تماس با سطوح مذکور به اسید نیتریک تبدیل شده و سپس در اثر بارش باران شسته و یا در واکنش با ترکیبات قلیایی موجود در محیط سیمان خنثی می‌گردد [۷].



شکل ۱: اثر سطوح سیمانی حاوی TiO₂ در خنثی کردن آلودگی ناشی از خودروها به وسیله تابش نور خورشید [۷]

Fig. 1. The influence of TiO₂ modified cement surfaces on the neutralization of Nox compounds owing to sunlight

با توجه به آن که عملکرد نانو اکسیدروی و دی‌اکسید تیتانیوم مشابه یکدیگر می‌باشند می‌توان همین انتظار را نیز مطابق شکل ۱ از سطوح سیمانی حاوی نانو اکسیدروی دانست؛ اما نکته‌ای که وجود دارد قبل از هر چیز باید عملکرد این نانوذره در محیط سیمان و اثرگذاری آن بر مشخصات مصالح پایه سیمانی بررسی شود و پس از شناخت و درک درستی از خصوصیات و اثربخشی این نانوذره به طور گسترده‌ای از آن استفاده کرد. بر همین اساس نویسندگان در این مقاله علاوه بر سنتز نانو ذرات اکسیدروی به بررسی مقاومت فشاری، تعیین میزان واکنش‌پذیری نانو ذرات اکسیدروی با کلسیم هیدروکسید، اثرات نانو اکسیدروی بر انقباض مواد پایه سیمانی، آنالیز خمیره سیمانی حاوی نانو ذرات اکسیدروی به کمک طیف‌سنجی مادون قرمز و پراش اشعه ایکس و در نهایت بررسی واکنش فوتوکاتالیستی مواد پایه سیمانی حاوی نانو ذرات در تخریب و تجزیه متیلن بلو محلول در آب پرداختند.

لازم به ذکر است جهت درک بهتر و مشخص شدن میزان واکنش‌پذیری این ماده در فضای منفذی سیمان به مقایسه نتایج این آزمایش با نتایج

- 1 Pozzolan
- 2 Silica Fume
- 3 Copper Slag
- 4 Silica Powder

جدول ۱: آنالیز شیمیایی مصالح مصرفی

Table 1. Chemical analysis of the materials

مواد / ترکیبات	سیمان	SF1	CS2	SP3
SiO ₂	۲۳/۱	۹۳	۳۴	۸۹
Al ₂ O ₃	۴/۲	۰/۹	۲	۱/۲۰
Fe ₂ O ₃	۰/۴۲	۰/۸	۴۷	۰/۰۳
MgO	۲/۵	۱/۲۵	-	۰/۰۱
CaO	۶۵/۲	۱۹	۶/۵	۰/۵
SO ₃	۲	-	-	-
NaO ₂	۰/۲۵	۰/۴	-	۰/۰۷
K ₂ O	۰/۳۵	۰/۳	-	-
MnO	-	۰/۵	۳	-
LOI%	۱/۵	۱/۷	۰/۱	۲/۵
Specific gravity (g/m ³)	۴/۸۵	۲/۳۰	۳/۴۰	۲/۶۵

۲-۴- آماده‌سازی نانو اکسید روی

برای تولید ترکیبات سیمانی حاوی نانو ذرات برخی از محققین توصیه می‌کنند [۱۱] به منظور پراکندگی بهتر این نانو ذرات در مخلوط بتن، ابتدا آن‌ها را با آب مخلوط کرده و سپس به مخلوط سیمان اضافه گردد. همچنین تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهند، زمانی که نانو ذرات در محلول پراکنده می‌شوند اندازه هیدرودینامیکی آن‌ها به دلیل تمایل به متراکم شدن و کلوخه‌زایی به مراتب بزرگ‌تر از اندازه اولیه می‌گردد [۱۲]. بر همین اساس ابتدا نانو ذرات اکسیدروی با آب مخلوط گردید و سپس به منظور کاهش اندازه هیدرودینامیکی و جدا شدن آگلومره شده، بر روی آن‌ها عمل پخش صورت گرفت.

بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد هنگامی که امواج فراصوت توسط سرامیک پیزوالکتریک^۱ در یک میله التراسونیک^۲ یا حمام پاک‌سازی تولید می‌شود، از میان مایع عبور می‌کند و با سیکل‌های گسترده یک فشار منفی به مایع وارد می‌کند. حال اگر این فشار منفی وارد شده، به اندازه کافی قوی باشد که بتواند بر نیروی واندروالسی بین مولکول‌های مایع غلبه کند خلأهای کوچک یا میکرو حباب‌های گازی تشکیل می‌شوند. زمانی که میکرو حباب‌ها شکل می‌گیرند، با جذب انرژی از امواج فراصوت رشد می‌کنند تا به مرحله‌ای برسند که دیگر قادر به دریافت انرژی به‌طور مؤثر نخواهند بود، بنابراین با قطع ورود انرژی حباب دیگر نمی‌تواند مقاومت کند و منفجر می‌شود. شوک

حاصل از ترکیدن حباب‌ها موجب خرد شدن و از هم جدا شدن ذرات آگلومره شده و درنهایت باعث پخش شدن بهتر نانو ذرات می‌گردد. بر همین اساس به‌منظور ایجاد مخلوطی همگن و پراکندگی مناسب نانو ذرات در محیط سیمان، سوسپانسیونی حاوی غلظت‌های مختلف نانو ذرات اکسیدروی در آب تهیه گردید و به مدت ۳۰ دقیقه با همزن مغناطیسی هم زده شد. سپس با استفاده از اولتراسونیک پراب‌دار با فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز به مدت ۳۰ دقیقه تحت امواج مافوق صوت قرار داده شد تا نانو ذرات اکسیدروی کاملاً در محیط محلول پراکنده شوند.

۲-۵- سنگدانه ریز

در این مطالعه از سنگدانه‌های طبیعی سیلیسی در ساخت ملات‌ها استفاده شد. همچنین به‌منظور توزیع اندازه سنگدانه‌ها از روش استاندارد ISO 6274 [۱۳] بهره گرفته شد که دانه‌بندی آن از انطباق مناسبی با محدوده دانه‌بندی استاندارد ASTM C 33/C 33M [۱۴] برخوردار بود. بررسی‌های صورت گرفته بر روی مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها نیز حاکی از این مهم بود که در حالت اشباع با سطح خشک^۳ وزن مخصوص سنگدانه‌های مصرفی و جذب آب در آن‌ها به ترتیب برابر ۲/۵۶ و ۱/۲ درصد بوده و درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ برابر ۰/۳ درصد است.

1 Piezoelectric
2 Ultrasonication

3 SSD

۲-۶- طرح اختلاط

با توجه به آن که در مطالعه حاضر، هدف بررسی عملکرد نانو ذرات اکسیدروی بر روی خواص مکانیکی، ریزساختاری و فوتوکاتالیستی نمونه‌های پایه سیمانی بود بر همین اساس تأثیر درصدهای مختلف این نانو ذرات در محیط مواد پایه سیمانی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. در این مطالعه از ۷ طرح اختلاط با درصد نانو ذرات متفاوت (صفر، ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ و ۲ درصد نسبت به وزن مواد سیمانی) جهت ساخت ملات و خمیره سیمانی استفاده شد. مشخصات طرح اختلاط ملات و خمیر به ترتیب در جدول ۲ و ۳ ارائه شده است.

جدول ۲: نسبت‌های طرح اختلاط مخلوط‌های ملات در یک مترمکعب
Table 2. Mix proportions of mortars (kg/m³)

ردیف	طرح	سیمان	نانو اکسید روی	ماسه	آب
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 ۳: نسبت‌های طرح اختلاط خمیره‌های سیمانی

Table 3. Mix proportions of mortars

ردیف	طرح	سیمان	نسبت نانو اکسیدروی جایگزین سیمان	نسبت آب به مواد سیمانی
۱	Control	۱	۰	۰/۳
۲	Z - ۰/۱	۱	۰/۰۰۱	۰/۳
۳	Z - ۰/۲۵	۱	۰/۰۰۲۵	۰/۳
۴	Z - ۰/۵	۱	۰/۰۰۵	۰/۳
۵	Z - ۰/۷۵	۱	۰/۰۰۷۵	۰/۳
۶	Z - ۱	۱	۰/۰۱	۰/۳
۷	Z - ۳	۱	۰/۰۳	۰/۳

لازم به ذکر است نسبت وزن آب به مواد سیمانی در کلیه طرح‌های اختلاط ملات، برابر ۰/۴۸ در نظر گرفته شد و جهت بررسی مقاومت فشاری در قالب‌های قالب‌گیری شدند. خمیره‌های سیمانی مورد استفاده جهت آزمایش تخریب متیلن بلو نیز

به‌گونه‌ای قالب‌گیری شدند که سطح مقطع در تماس با محیط اطراف در آن‌ها حدود باشد.

۳- روش‌ها

در این بخش به قواعد و نحوه انجام استاندارد آزمایش‌ها اشاره می‌شود. ۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری
این آزمایش بر طبق استاندارد BS1881-116 [۱۵] با استفاده از نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۵ سانتی‌متر در سنین مختلف انجام شد.

۳-۲- بررسی واکنش‌زایی مواد با هیدروکسید کلسیم

به‌منظور بررسی میزان واکنش‌پذیری مواد مختلف با هیدروکسید کلسیم روش‌های متعدد زیادی در تحقیقات گزارش شده است که می‌توان آن‌ها را در دو گروه روش‌های مستقیم و غیرمستقیم طبقه‌بندی کرد. روش‌های مستقیم با کنترل میزان و کاهش آن‌ها که نشان از واکنش با هیدروکسید کلسیم است انجام می‌گیرد؛ مانند روش پراش اشعه ایکس (XRD)، آنالیز حرارتی (TGA) و تجزیه شیمیایی. روش‌های غیرمستقیم با اندازه‌گیری یک خاصیت فیزیکی از ماده که نشان دهنده واکنش‌زایی با هیدروکسید کلسیم است بیان می‌شود

که شامل اندازه‌گیری مقاومت فشاری، رسانایی الکتریکی و غیره است. در مقایسه با سایر روش‌های بیان شده، روش رسانایی الکتریکی، سریع‌ترین روش برای بررسی واکنش پوزولانی مواد می‌باشد. برخی محققین از این روش برای بررسی واکنش پوزولانی خاکستر بادی استفاده کردند. این روش به آنها اجازه می‌داد که میزان سیلیس حل شده را در یک محلول اسید هیدروفلوریک که یک ماده پراکنده‌کننده فعال است اندازه‌گیری نمایند. این روش دستیابی به شاخص پوزولانی ۱۰ دقیقه زمان احتیاج داشت [۱۶].

گروهی دیگر نیز یک روش سریع‌تر را برای بررسی خاصیت واکنش‌پذیری با هیدروکسید کلسیم پیشنهاد کردند. آن‌ها با اندازه‌گیری رسانایی الکتریکی اولیه و نهایی در یک محلول حاوی هیدروکسید کلسیم و مواد مورد آزمون واکنش‌پذیری مواد مختلف را بررسی کردند. چراکه کاهش رسانایی الکتریکی در این روش به معنای تثبیت هیدروکسید کلسیم توسط ذرات مواد مورد بررسی است [۱۷].

اخیراً نیز روشی بر پایه رسانایی الکتریکی برای بررسی خاصیت پوزولانی پیشنهاد شده که اساس این روش مشابه روش قبل است با این تفاوت که اندازه‌گیری تغییرات رسانایی الکتریکی محلول در بازه زمان‌های مختلف بررسی می‌شود [۱۸].

در این روش ابتدا یک محلول از انحلال ۱۲۰ میلی‌گرم هیدروکسید کلسیم در ۱۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر در یک ظرف ۲۵۰ میلی‌لیتری تهیه شد. سپس ۵ گرم از ماده مورد بررسی را در حین هم‌زدن دائم مخلوط توسط همزن مغناطیسی به آن افزوده شد. از یک دستگاه رسانایی سنج شکل ۲ برای ثبت تغییرات رسانایی نسبت به زمان استفاده نموده و تغییرات رسانایی

$$LC = \frac{(Ca)_0 - (Ca)_t}{(Ca)_0} \times 100 \quad (2)$$

$(Ca)_0$: رسانایی اصلاح شده در زمان صفر دقیقه
 $(Ca)_t$: رسانایی اصلاح شده در زمان دلخواه (در طول ۱۲۰ دقیقه)
 LC: درصد کاهش رسانایی الکتریکی

۳-۳- انقباض

این آزمایش مطابق استاندارد ASTM C490/C490M [۱۹] باهدف بررسی تأثیر و عملکرد نانو ذرات اکسیدروی، بر میزان تغییرات طول در ملات‌های سخت شده شکل ۳ صورت گرفت؛ که تغییرات طول خمیره‌های سیمانی با درصد‌های مختلف نانو اکسیدروی در هر سنی بر اساس رابطه ۳ محاسبه شد.

$$L = \frac{(L_x - L_i)}{G} \times 100 \quad (3)$$

L : تغییر طول نمونه در سن X؛
 L_x : خوانش نمونه در مقایسه‌گر در سن X منهای خوانش میله مرجع در مقایسه‌گر در سن X بر حسب میلی‌متر؛
 L_i : خوانش اولیه نمونه در مقایسه‌گر منهای خوانش میله مرجع در مقایسه‌گر در همان زمان بر حسب میلی‌متر؛
 G : اندازه‌گیری اسمی طول اندازه‌گیر؛



شکل ۳: ساخت ملات جهت آزمون انقباض

Fig. 3. The mortar specimen used in shrinkage test

۳-۴- طیف‌سنجی مادون‌قرمز با تبدیل فوریه

طیف‌سنجی مادون‌قرمز با تبدیل فوریه (FTIR) ابزاری قدرتمند است؛ که بر اساس جذب تابش و بررسی جهش‌های ارتعاشی مولکول‌ها و یون‌های چنداتمی به مطالعه گروه‌های عاملی موجود در ترکیبات مختلف می‌پردازد. در این روش برهم‌کنش تابش مادون‌قرمز با یک نمونه، باعث تغییر انرژی ارتعاشی پیوند در مولکول‌های آن می‌گردد. در نتیجه در اثر جذب فرکانس تابیده شده بر ترکیب، پیوندهای موجود در آن، دچار یکسری حرکات ارتعاشی می‌شوند که به واسطه نوع ارتعاش و فرکانس آن می‌توان نوع گروه‌های عاملی و ساختار مولکولی گونه شیمیایی مورد بررسی را تعیین کرد. این ارتعاشات شامل ارتعاش کششی (دور و نزدیک) و ارتعاش خمشی (زاویه پیوندی) است

3 Fourier transform infrared

را در زمان‌های مختلف تا مدت ۱۲۰ دقیقه ثبت می‌گردد. به منظور دستیابی به منحنی رسانایی صحیح و به دلیل وجود یک سری ناخالصی‌ها^۱ در مواد پوزولانی که سبب افزایش رسانایی می‌شوند، روند بالا برای یک محلول حاوی ۵ گرم ماده مورد بررسی و ۲۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر تکرار شد.



شکل ۲: دستگاه رسانایی سنج

Fig. 2. The conductivity meter device

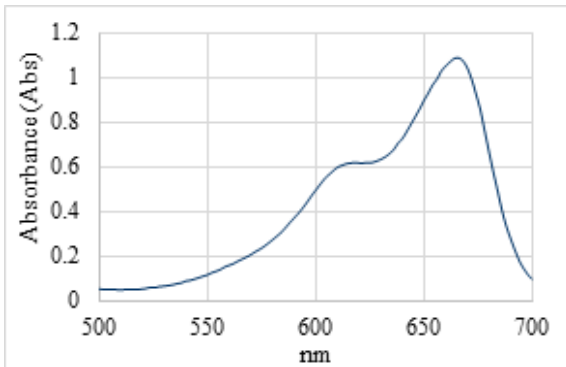
انحلال آهک $Ca(OH)_2$ در آب سبب آزادسازی مقادیر زیادی از یون‌های Ca^{2+} و OH^{1-} در محیط محلول می‌گردد، در نتیجه رسانایی محلول در طول فرایند انحلال کامل هیدروکسید کلسیم افزایش می‌یابد. افزودن مواد پوزولانی به این محلول و آغاز واکنش‌زایی آنها با هیدروکسید کلسیم، سبب تثبیت شدن یون‌ها و کاهش رسانایی محلول می‌گردد. همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد پس از انحلال کامل هیدروکسید کلسیم، مواد مورد آزمایش (نانو اکسیدروی، دوده سیلیسی، سرباره مس و پودر سیلیس) به محلول اشباع هیدروکسید کلسیم افزوده گردیده و میزان تغییرات رسانایی الکتریکی محلول در پارامتر A_t ثبت شد؛ که در پی آن با تثبیت یون‌های آزاد در محلول، رسانایی الکتریکی کاهش یافت. البته قبل از این مرحله تغییرات رسانایی مواد مورد بررسی در آب مقطر که ناشی از وجود ناخالصی‌هایی همچون نمک‌ها بود در پارامتر B_t لحاظ گردید. در نهایت مقادیر رسانایی ناشی از ناخالصی‌ها (B_t) را از مقادیر رسانایی که ناشی از انحلال مواد مورد آزمون در آب مقطر در هر بازه زمانی بود (A_t) کم کرده تا مقدار رسانایی اصلاح شده $(Ca)_t$ به دست آید (رابطه ۱).

$$(Ca)_t = A_t - B_t \quad (1)$$

برای بررسی میزان واکنش‌پذیری مواد مختلف با هیدروکسید کلسیم از پارامتر درصد کاهش رسانایی LC^2 استفاده شد؛ که هرچه عدد پارامتر LC رابطه ۲ بیشتر باشد نشان از واکنش‌پذیری بیشتر ماده مورد بررسی با هیدروکسید کلسیم است.

2 Loss in conductivity

^۱ شامل نمک سدیم، پتاسیم و سایر ترکیبات مشابه



شکل ۴: منحنی جذب متیلن بلو در محدوده ۵۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر

Fig. 4. The 500-700 nm absorption curve of methylene blue

که خود به زیرشاخه‌های دیگری همچون ارتعاش کششی متقارن و نامتقارن تقسیم می‌شوند [۲۰]. معمولاً حرکت‌های کششی ناشی از فرکانس‌های جذبی در یک گروه عاملی خاص، به‌مراتب بیشتر از فرکانس‌های خمشی برای آن پیوند است.

برای انجام این آزمایش، در مورد ترکیبات جامد، معمولاً از روش قرص KBR استفاده می‌شود [۲۱]. در این روش، ابتدا خمیره سیمانی ۱۵ دقیقه در استون و سپس به مدت ۲۴ ساعت درون آن با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا به‌طور کامل خشک گردد. سپس در مقداری پودر سفیدرنگ KBR کاملاً ساییده شده و در سل مربوطه به‌صورت کامل پرس گردید. این کار باعث می‌گردد تا نمونه‌ی مورد آزمایش به‌صورت یک فیلم نازک (قرص) درآید که قادر است طیف‌های IR را برای پیوندهای مختلف موجود در ترکیبات شیمیایی در محدوده ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ اندازه‌گیری نماید.

۳-۵- پراش اشعه ایکس

به‌منظور بررسی و تشخیص نوع، فاز و خصوصیات کریستالی نانو ذرات سنتز شده اکسیدروی و همچنین ترکیبات تشکیل شده حاصل از هیدراسیون خمیره‌های سیمانی، بر روی آن‌ها آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) صورت گرفت. به‌منظور انجام این آزمایش از دستگاه XRD مدل Philips X'Pert Pro تولید شرکت Philips استفاده شد. آنالیزها در محدوده زاویه ۱۰ تا ۸۰ درجه با افزایش گام برابر ۰/۰۲ برای ۲θ انجام گردیده است.

۳-۶- حذف آلاینده صنعتی توسط مواد پایه سیمانی حاوی نانو اکسیدروی
به‌منظور بررسی خاصیت فوتوکاتالیستی مواد پایه سیمانی حاوی نانو ذرات اکسیدروی اثربخشی این سطوح بر روی محلول متیلن بلو مورد ارزیابی قرار گرفت.

در این روش مقدار رنگدانه باقی‌مانده در محلول متیلن بلو (MB) در فواصل منظم (هر ۲۰ دقیقه یک‌بار) در طول دوره تابش نور خورشید، با استفاده از طیف‌سنج UV/visible تعیین شد. جهت تعیین بیشینه جذب محلول متیلن بلو ابتدا جذب آن در گستره $\lambda = 500 \text{ nm}$ تا $\lambda = 700 \text{ nm}$ مطابق شکل ۴ تعیین گردید. سپس با توجه به آن که بیشینه جذب محلول متیلن بلو مطابق شکل ۴ در طول موج ۶۶۵ نانومتر بود؛ میزان جذب متیلن بلو در زمان‌های مختلف در این طول موج قرائت شد.

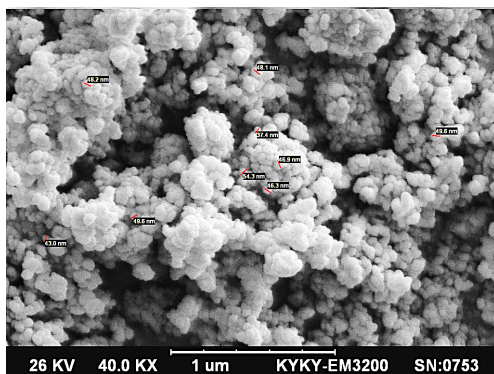
۴- نتایج

۴-۱- نانو اکسیدروی

به‌منظور بررسی ویژگی‌های نانو ذرات تولیدشده، با استفاده از دستگاه طیف‌سنج پراش اشعه ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مشخصات نانو ذرات تعیین گردید.

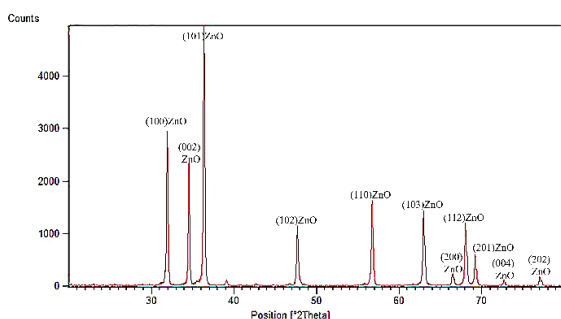
- 1 Potassium bromide
- 2 Methylene blue

بررسی اطلاعات حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی شکل ۵، اندازه متوسط نانو ذرات تولیدشده در حدود ۴۰ تا ۵۰ نانومتر است. بررسی نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز پراش اشعه ایکس در شکل ۶ نیز نشان می‌دهد، پیک‌های نانو ذرات تولیدشده کاملاً شارپ بوده و نانو ذرات اکسیدروی سنتز شده کریستالیزه می‌باشند.



شکل ۵: تصویر SEM نانو ذرات اکسید روی

Fig. 5. The SEM image of zinc oxide nano particles



شکل ۶: نمودار پراش اشعه ایکس نانو اکسیدروی

Fig. 6. The XRD of nano zinc oxide particles

۴-۲- مقاومت فشاری

الکتريکی و انجام اصلاحاتی که در بخش ۳-۲ اشاره شد، می‌توان معیاری از میزان واکنش‌زایی ماده با هیدروکسید کلسیم به دست آورد. به‌منظور درک بهتر از مراحل مختلف اندازه‌گیری رسانایی الکتريکی مطابق آنچه پیش‌تر در بخش ۳-۲ ارائه شد؛ نتایج آزمایش برای دوده سیلیسی در شکل ۷ نشان داده شده است.

نتایج به‌دست‌آمده در شکل ۸ نیز نشان می‌دهد که نانو ذرات اکسیدروی از واکنش‌پذیری مناسبی با هیدروکسید کلسیم برخوردار می‌باشند. به‌طوری‌که پس از گذشت مدت انجام فرآیند آزمایش (۱۲۰ دقیقه) درصد کاهش رسانایی الکتريکی (LC) برای نانو اکسیدروی برابر ۲۱/۸ درصد و برای دوده سیلیسی، پودر سرپاره مس و پودر سیلیس به ترتیب برابر ۳۲/۴، ۱۵/۲ و ۱۵/۴ درصد ثبت گردیده است. در نتیجه می‌توان دریافت که نانو ذرات اکسیدروی در مقایسه با دوده سیلیسی که جزو معروف‌ترین و پرمصرف‌ترین مواد پوزولانی است و یک سوپر پوزولان معرفی می‌شود به میزان ۳۳ درصد قدرت واکنش‌زایی کمتری با هیدروکسید کلسیم دارد و از طرف دیگر قدرت واکنش‌زایی آن نسبت به سرپاره مس و پودر سیلیس به میزان ۴۵ درصد بیشتر از این مواد می‌باشد. پس با توجه به آن‌که این نانو ذره در یک حد متوسطی بین این سه ماده پوزولانی قرار می‌گیرد می‌توان از آن قابلیت واکنش‌زایی مطلوبی با هیدروکسید کلسیم را انتظار داشت و در پی آن شاهد بهبود مشخصات مکانیکی و دوام مواد پایه سیمانی بود.

جدول ۴ بیانگر نتایج مقاومت فشاری ملات با درصد‌های مختلف نانو اکسیدروی می‌باشد که در آن آزمون‌ها بر اساس استاندارد EN 12390-3 [۲۲] شکسته شده است.

جدول ۴: نتایج مقاومت فشاری ملات (بر حسب مگاپاسکال) با درصد‌های مختلف نانو ZnO

Table 4. The compressive strength test results of cement mortars

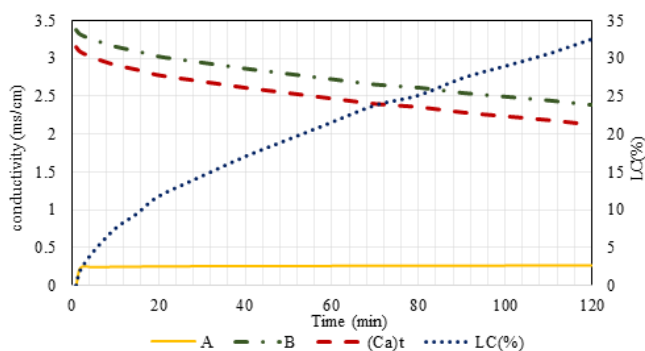
سن درصد ZnO	۳ روز	۷ روز	۲۸ روز	۹۰ روز
۰	۳۶/۵	۴۵/۱	۵۶	۶۳/۲
۰/۱	۳۹/۷	۵۳/۲	۶۵/۱	۷۳
۰/۲۵	۴۲/۱	۵۴/۸	۶۵/۹	۷۴/۲
۰/۵	۴۴/۸	۵۷/۹	۷۱/۶	۷۶/۲
۰/۷۵	۴۳/۳	۵۷/۶	۷۲/۴	۷۷/۶
۱	۴۰/۱	۵۴/۴	۶۹/۶	۷۵/۵
۲	۳	۴۲/۱	۶۵/۲	۷۲/۴

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از جدول ۴ می‌توان دریافت که با افزایش نسبت نانو ذرات مصرفی در ملات، روند افزایش مقاومت در سنین اولیه کندتر گردیده و این میزان با افزایش سن (دوره عمل‌آوری) رشد پیدا می‌کند. تنها در نمونه حاوی ۲ درصد نانو اکسیدروی در سن ۳ و ۷ روز، با کاهش مقاومت فشاری نسبت به مخلوط کنترل روبه‌رو هستیم که البته این افت مقاومت نیز در سن ۲۸ روز جبران شده و بعد از آن افزایش مقاومت مشاهده می‌گردد.

بیشترین مقاومت فشاری کسب‌شده در ملات‌ها نیز مربوط به طرح اختلاط حاوی ۰/۷۵ درصد نانو اکسیدروی در سن ۹۰ روز است. این در حالی است که در سنین ۳ و ۷ روز، دارای مقاومت فشاری کمتری نسبت به نمونه حاوی ۰/۵ درصد نانو اکسیدروی است و با افزایش دوره عمل‌آوری، در سن ۹۰ روز، مقاومت فشاری آن افزایش می‌یابد.

۴-۳- تعیین میزان واکنش‌پذیری با هیدروکسید کلسیم

هدف از انجام این آزمایش تعیین کیفی میزان واکنش‌زایی نانو اکسیدروی در مقایسه با سایر پوزولان‌ها همچون دوده سیلیسی، سرپاره مس و پودر سیلیس بود. در این آزمایش مطابق آنچه پیش‌تر بیان شد ابتدا هیدروکسید کلسیم در آب حل‌شده و سپس مواد مورد آزمون به آن اضافه گردید. با افزودن پوزولان، این ماده با هیدروکسید کلسیم واکنش داده که در نتیجه رسانی الکتريکی در محلول کاهش می‌یابد. با ثبت تغییرات رسانایی



شکل ۷: منحنی تغییرات رسانایی دوده سیلیسی A: محلول حاوی پوزولان و آب مقطر و B: محلول حاوی پوزولان، آب مقطر و هیدروکسید کلسیم (Ca)_t: تغییرات رسانایی اصلاح شده (LC): درصد کاهش رسانایی الکتريکی

Fig. 7. Variations in conductivity of silica fume dispersion a) solution with pozzolan and distilled water, b) solution with pozzolan, distilled water and calcium hydroxide, (Ca)_t: modified variations in conductivity, (LC): percentage of reduced electrical conductivity

۴-۴ نتایج آزمون انقباض

نتایج کرنش‌های ناشی از جمع‌شدگی ملات کنترل و ملات‌های حاوی نانو ذرات اکسیدروی تا سن ۹۰ روز در شکل ۹ نشان داده شده است. البته لازم به ذکر است که سنین مذکور از زمان باز کردن قالب انقباض و گیرش کامل ملات در نظر گرفته

شد. با نگاهی اجمالی به این شکل می‌توان به عملکرد مناسب نانو ذرات اکسیدروی در محیط ملات پی برد. به طوری که با افزایش درصد جایگزینی این نانو ذره در فضای منفذی سیمان کاهش انقباض به طرز قابل توجهی مشاهده می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود میزان انقباض در ملات حاوی ۲ درصد نانو اکسیدروی کمترین مقدار را داشته و در مقایسه با ملات کنترل، در حدود نصف می‌باشد.

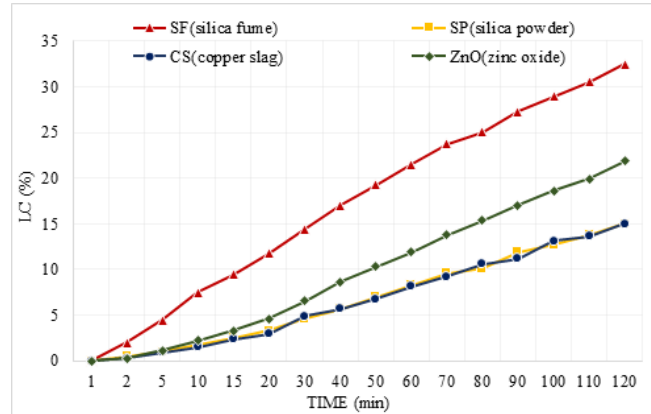
حتی در ۰/۱ درصد جایگزینی نانو اکسیدروی در مواد پایه سیمانی افت قابل توجه مقدار انقباض به میزان ۲۵ درصد پس از ۹۰ روز خشک شدن نسبت به مخلوط کنترل مشاهده می‌گردد که نشان از عملکرد مناسب نانو ذرات اکسیدروی در کاهش انقباض مواد پایه سیمانی است.

۴-۵- طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه

در شکل ۱۱ طیف مربوط به FTIR خمیره سیمان در دو طرح اختلاط و دو زمان عمل‌آوری نمایش داده شده است. نمودار A و C مربوط به خمیره کنترل (بدون نانو اکسیدروی) و نمودار B و D مربوط به خمیره سیمانی حاوی ۳ درصد نانو اکسیدروی می‌باشند، با این تفاوت که نمودارهای A و B به مدت ۲۴ ساعت و نمودارهای C و D به مدت ۷ شبانه‌روز عمل‌آوری شده‌اند.

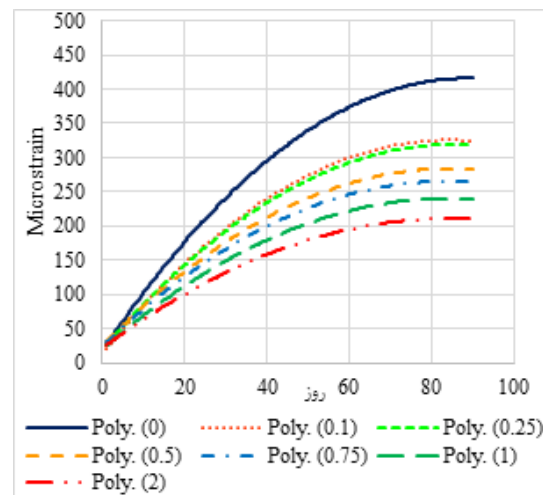
مقایسه طیف FTIR در خمیره سیمانی حاوی نانو اکسیدروی با خمیره کنترل در سن ۷ روز بیانگر وجود تعدادی پیک‌های کوتاه اضافی در محدوده فرکانس ۳۴۰۰ تا ۳۶۰۰ در نمونه حاوی ۳ درصد نانو اکسیدروی است. بررسی‌های بیشتر نیز نشان می‌دهد این پیک‌های اضافی در خمیره حاوی ۳ درصد نانو اکسیدروی در سن ۷ روز وجود دارد، حال آن‌که در سن ۱ روز چنین پیک‌هایی مشاهده نمی‌شود. همین امر نشان از تشکیل ترکیباتی جدید در سن ۷ روز در خمیره حاوی نانو اکسیدروی دارد که می‌تواند ناشی از تشکیل پیوند فلزی و پیوندهای هیدروژنی هیدروکسید کلسیم $Ca(OH)_2$ باشد که توسط کوک^۱ و همکارانش مشخص گردیده است [۲۳].

در مطالعه حاضر نیز به منظور تشخیص ترکیب $Ca(OH)_2 \cdot 2H_2O$ در سن ۲۸ روز، از خمیره سیمانی حاوی نانو اکسیدروی در بخش ۴-۶ آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) گرفته شد که بیانگر حضور این ترکیب در ساختار خود است. همچنین با مصرف کلسیم و هیدروکسید مطابق فرمول‌های شیمیایی ۴ و ۵ هیدروکسیدروی آمورف به کریستال‌های هیدروکسید کلسیم روی تبدیل می‌شود [۲۴].



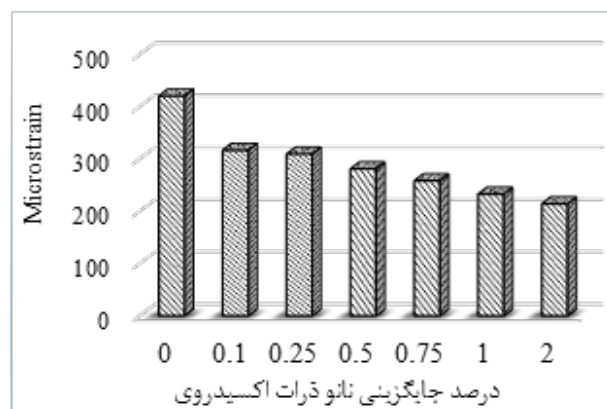
شکل ۸: درصد کاهش رسانایی (LC)

Fig. 8. Reduced percentage of conductivity (LC)



شکل ۹: نتایج آزمون انقباض

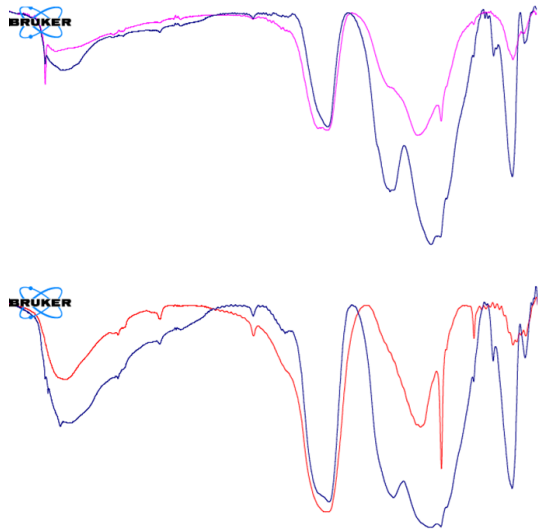
Fig. 9. The shrinkage test results



شکل ۱۰: نمودار مقایسه‌ای حداکثر انقباض

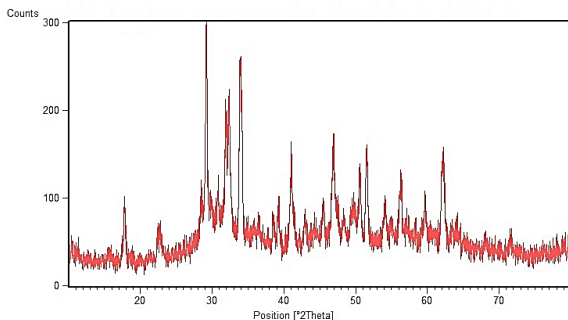
Fig. 10. Comparison of maximum shrinkage contents

مدت زمان حذف متیلن بلو از محلول کاهش می‌یابد به طوری که در نمونه حاوی ۲ درصد نانو اکسیدروی، متیلن بلو موجود در محلول ظرف مدت ۱ ساعت به طور کامل حذف گردید. نکته حائز اهمیت دیگر آن است که قرارگیری نانو ذرات اکسیدروی در ماتریس سیمان مانع از رهاسازی آن‌ها در محیط‌زیست می‌گردد در نتیجه میزان دوره بهره‌برداری از این نانو ذرات به میزان چشمگیری افزایش می‌یابد.



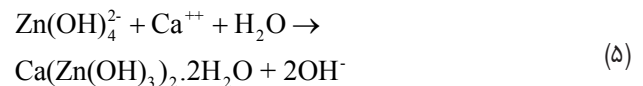
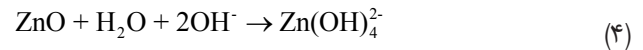
شکل ۱۱: طیف FTIR خمیره سیمانی، A خمیره سیمانی بدون نانو اکسیدروی (کنترل) با یک روز عمل‌آوری، B خمیره سیمانی با ۳ درصد نانو اکسیدروی با یک روز عمل‌آوری، C خمیره سیمانی بدون نانو اکسیدروی (کنترل) با ۷ روز عمل‌آوری، D خمیره سیمانی با ۳ درصد نانو اکسیدروی با ۷ روز عمل‌آوری

Fig. 11. FTIR curves of cement paste, a) cement paste without nano zinc oxide after 1 day curing, b) cement paste with 3% nano zinc oxide after 1 day curing, c) cement paste without nano zinc oxide after 7 days curing, cement paste with 3% nano zinc oxide after 7 days curing



شکل ۱۲: آنالیز پراش اشعه ایکس خمیره حاوی ۳ درصد نانو اکسیدروی

Fig. 12. XRD of cement paste with 3% nano zinc oxide



بررسی‌های دقیق‌تر بر روی طیف FTIR نشان می‌دهد پیوند کششی و نامتقارن که ناشی از الیت و یا بلیت می‌باشد در نمونه مرجع نسبت به نمونه حاوی اکسیدروی به فرکانس بالاتر انتقال یافته است؛ به طوری که در گراف A و B از $923/90 \text{ cm}^{-1}$ به $985/44 \text{ cm}^{-1}$ و در گراف C و D از $926/73 \text{ cm}^{-1}$ به $976/06 \text{ cm}^{-1}$ انتقال یافته است

که نشان از افزایش واحدهای پلیمریزاسیون ناشی از تشکیل بیشتر C-S-H در طول فرآیند هیدراسیون است [۲۵]. همچنین بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد کاهش شدت پیک، ناشی از ارتعاش خمشی نامتقارن در محدوده فرکانس $520 - 524 \text{ cm}^{-1}$ و همچنین افزایش شدت پیک در محدوده $458 - 463 \text{ cm}^{-1}$ در نمونه حاوی اکسیدروی نشان‌دهنده کاهش حرکت آزادانه واحدهای SiO_4^{4-} به دلیل پلیمریزاسیون می‌باشد [۲۶]. به طور کلی بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد استفاده از نانو ذرات اکسیدروی در محیط مواد پایه سیمانی سبب افزایش واحدهای پلیمریزاسیون و بالتبع آن افزایش طول زنجیره‌های C-S-H به واسطه حضور ترکیبات سیلیسی می‌گردد، بر همین اساس در چنین محیط‌هایی می‌توان انتظار بهبود خواص مکانیکی و دوام سطوح سیمانی را داشت.

۴-۶- پراش اشعه ایکس XR

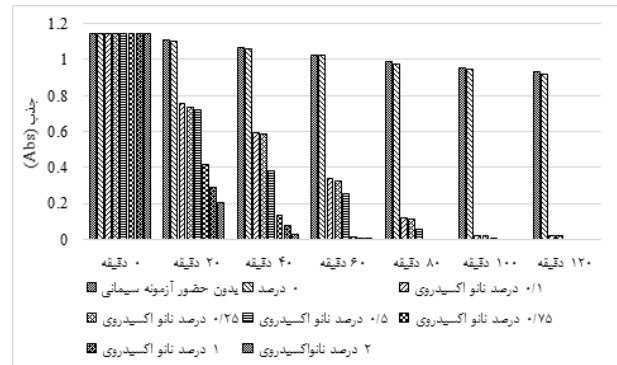
بررسی‌های صورت گرفته به کمک پراش اشعه ایکس بر روی فازهای تشکیل شده در خمیره سیمانی حاوی ۳ درصد نانو اکسیدروی پس از ۷ روز عمل‌آوری نشان می‌دهد، مطابق آنچه کوک و همکارانش بیان داشتند فاز $\text{Ca}(\text{Zn}(\text{OH})_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ در خمیره سیمانی تشکیل گردیده که تصدیق کننده نتایج به دست آمده در بخش ۴-۵ است. (این پیک در محدوده 2θ برابر 38 درجه قابل مشاهده است). همچنین سایر فازهای سیمان هیدراته شده نیز در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

۴-۷- بررسی عملکرد مواد پایه سیمانی در حذف آلاینده صنعتی

به منظور بررسی اثرات فوتوکاتالیستی مواد پایه سیمانی حاوی نانو ذرات اکسیدروی تحت تابش نور خورشید، اثر بخشی آن بر روی محلول متیلن بلو با غلظت ۵ میلی‌گرم در لیتر، به وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر در ماکزیمم طول موج جذب متیلن بلو (665 نانومتر) مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود نتایج آزمایش‌ها، نشان‌دهنده عملکرد مؤثر این سطوح در حذف رنگ محلول متیلن بلو است. به طوری که حتی در خمیره حاوی $0/1$ درصد نانو اکسیدروی پس از گذشت 100 دقیقه متیلن بلو کاملاً از محیط حذف گردیده و رنگ محلول به رنگ آب طبیعی تغییر حالت می‌دهد. همچنین با افزایش درصد جایگزینی نانو ذرات

مراجع

- [1] H. Madani, A. Bagheri, T. Parhizkar, The pozzolanic reactivity of monodispersed nanosilica hydrosols and their influence on the hydration characteristics of Portland cement, *Cement and Concrete Research* 42(2012) 1563–1570
- [2] H. Madani, A. Khaghani, Investigation on the role of Titanium Di-Oxide on reducing the environmental pollution and increasing the photocatalytic and mechanical properties of cement mortars, the first conference on nanotechnology application in concrete industry, Garmsar, Alaoldoleduniversity, 2015.
- [3] R.M. Mohamed, D.L. McKinney, W.M. Sigmund, Enhanced nanocatalysts, *Materials Science Engineering R Reports*, 73 (2012) 1–13.
- [4] S. Malato, P. Fernández-Ibáñez, M. I. Maldonado, J. Blanco, W. Gernjak, Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: recent overview and trends, *Catalysts Today*, 147 (2009) 1–59.
- [5] A. A. Khodja, T. Sehili, J.-F. Pilichowski, P. Boule, Photocatalytic degradation of 2-phenylphenol on TiO₂ and ZnO in aqueous suspensions, *Photochemistry and Photobiology. A Chemistry*, 141 (2001) 231–239.
- [6] C. Lizama, J. Freer, J. Baeza, H. D. Mansilla, Optimized photodegradation of Reactive Blue 19 on TiO₂ and ZnO suspensions, *Catalysis Today*, 76 (2002) 235–246.
- [7] D. Spasiano, R. Marotta, S. Malato, P. Fernandez-Ibáñez, I. Di Somma, Solar photocatalysis: materials, reactors, some commercial, and pre-industrialized applications. A comprehensive approach, *Applied Catalysis B: Environmental*, 170 (2015) 90–123.
- [8] UNE 80305:2012, White Cement - Specifications and Conformity Criteria.
- [9] W.A. Moura, J.P. Gonçalves, M.B.L. Lima, Copper slag waste as a supplementary cementing material to concrete". *J. Mater. Sci*, 42 (2007) 2226–2230.
- [10] H. Vikan, H. Justnes, Rheology of cementitious paste with silica fume or limestone, *Cement and Concrete Research* 37(2007) 1512–1517.
- [11] G. Hüsken, M. Hunger, H. J. H. Brouwers, Experimental study of photocatalytic concrete products for air purification, *Building and Environment*, 44 (2009) 2463–2474.
- [12] J. Jiang, G. Oberdörster, P. Biswas, Characterization of size, surface charge, and agglomeration state of nanoparticle dispersions for toxicological studies, *Nanoparticle Res.earch*, 11 (2009), 77–89.
- [13] ISO 6274:1982 Concrete -- Sieve analysis of aggregates.
- [14] ASTM C 33/C 33M, Standard Specification for Concrete



شکل ۱۳: نمودار میله‌ای حذف آلاینده صنعتی

Fig. 13. Removing the industrial pollutant

۵- نتیجه گیری

۱. جایگزینی نانو ذرات اکسیدروی سبب افزایش مقاومت نمونه‌ها به‌خصوص در سنین بالاتر نسبت به نمونه شاهد شده است. به‌طوری‌که تا سن ۹۰ روز، جایگزینی ۰/۷۵ درصد نانو اکسیدروی در ملات بیشترین اثر برافزایش مقاومت را داراست. درحالی‌که مقاومت فشاری نمونه حاوی ۲ درصد نانو اکسیدروی تا سن ۷ روز نسبت به نمونه شاهد از مقاومت فشاری کمتری برخوردار است؛ اما با افزایش زمان دوره عمل‌آوری، ارتقا مقاومت مشاهده می‌گردد.
۲. نتایج آزمایش واکنش‌پذیری با هیدروکسیدکلسیم نیز، نشان از واکنش‌پذیری مناسب نانو ذرات اکسیدروی با هیدروکسیدکلسیم دارد که خود می‌تواند عاملی در جهت بهبود مقاومت در سنین بالاتر و دوام سطوح پایه سیمانی باشد.
۳. استفاده از نانو ذرات اکسیدروی در فضای منفذی سیمان سبب کاهش قابل‌توجه انقباض گردیده که این پدیده در نمونه حاوی ۲ درصد نانو اکسیدروی بیشتر مشاهده می‌شود. البته در درصد‌های جایگزینی پایین‌تر نیز کاهش انقباض مشهود است.
۴. بررسی آنالیز نتایج طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR) حاکی از تولید هیدروکسیدکلسیم روی و واحدهای پلیمریزاسیون است که می‌تواند عاملی در جهت ارتقاء مشخصات مهندسی سطوح پایه سیمانی باشد. همچنین نتایج آزمون پراش اشعه ایکس (XRD) نیز تأییدکننده نتایج آزمون FTIR بوده و نشان دهنده تولید هیدروکسیدکلسیم روی بود.
۵. خمیرهای سیمانی حاوی نانو ذرات اکسیدروی، پتانسیل بالقوه‌ای در تخریب و تجزیه مواد آلی همچون متیلن بلو دارند. به‌طوری‌که سطوح پایه سیمانی حاوی این نانو ذرات قادرند علاوه بر حذف متیلن بلو از محیط، با قرار دادن نانو ذرات در ماتریس سیمان مانع از رهاسازی آن‌ها در محیط شوند.

- [21] M. Y. A. Mollah, W. Yu, R. Schennach, D. L. Cocke, A. Fourier transform infrared spectroscopic investigation of the early hydration of Portland cement and the influence of sodium lignosulfonate, *Cement and Concrete Research*, 30 (2000) 267–273.
- [22] BS EN 12390-3, Testing hardened concrete-Part 3: Compressive strength of test specimens, British Standards, 2009.
- [23] M. Yousuf, A. Mollah, P. Palta, T. R. Hess, R. K. Vempati, D. L. Cocke, Chemical and physical effects of sodium lignosulfonate superplasticizer on the hydration of Portland cement and solidification/stabilization consequences, *Cement and Concrete Research*, 25 (1995) 671–682.
- [24] F. F. Ataie, M. C. G. Juenger, S. C. Taylor-Lange, K. A. Riding, Comparison of the retarding mechanisms of zinc oxide and sucrose on cement hydration and interactions with supplementary cementitious materials, *Cement and Concrete Research*, 72 (2015) 128–136.
- Aggregates, Annual book of ASTM standards, 2013.
- [15] BS 1881 Part 116, Method for determination of compressive strength of concrete, British Standards, 1983.
- [16] E. Raask, M. C. Bhaskar, Pozzolanic activity of pulverized fuel ash, *Cement and Concrete Research*, 5 (1975), 363–375.
- [17] M. P. de Luxán, F. Madruga, J. Saavedra, Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement, *Cement and Concrete Research*, 19(1989) 63–68.
- [18] J. Paya, M. V Borrachero, J. Monzo, E. Peris-Mora, F. Amahjour, Enhanced conductivity measurement techniques for evaluation of fly ash pozzolanic activity”. *Cement and Concrete Research*, 31 (2001) 41–49.
- [19] ASTM C490 / C490M, Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete, , Annual book of ASTM standards, 2013.
- [20] B. Stuart, Infrared spectroscopy. Wiley Online Library, 2005.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

H. Madani, A. Khaghani Boroujeni, A. Pourjhan Shahi, Mechanical Properties and Photocatalytic Reactions of Zinc Oxide Nanoparticles in the Cement Environment, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(2) (2018) 257-268.

DOI: 10.22060/ceej.2017.12333.5194



