



مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



جمهوری اسلامی ایران
وزارت راه و شهرسازی

تأثیر استفاده از نانو سوسپانسیون‌های سیلیس و تینانویم بر خواص بتن

مهندس امیر مازیار رئیس قاسمی

دکتر طیبہ پرهیزکار

(عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی)

مهندس سعیده صیاد قبادی

مهندس میثم نجیمی

گزارش تحقیقاتی

شماره نشر: ۵- ۶۸۸

چاپ اول: ۱۳۹۲

عنوان و نام پدیدآور	تأثیر استفاده از نانوسوسپانسیون‌های سیلیس و تیتانیوم بر خواص بتن لامیرمازیار رئیس قاسمی... و دیگران
مشخصات نشر	تهران: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۲.
مشخصات ظاهری	۲۸۸ص: مصور، جدول، نمودار.
شابک	۹۷۸-۶۰۰-۵۳۹۲-۸۸-۳
وضعیت فهرست‌نویسی	فیا
یادداشت	امیرمازیار رئیس قاسمی، طیبه پرهیزکار، سعیده صیاد قبادی، میثم نجیمی.
یادداشت	کتابنامه
موضوع	بتن - افزودن
موضوع	بتن
موضوع	مواد نانو ساختار
شناسه افزوده	رئیس قاسمی، امیرمازیار، ۱۳۵۰-
شناسه افزوده	مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
رده‌بندی کنگره	TP۸۸۴/الف۷:۲ ۱۳۹۲
رده‌بندی دیوئی	۶۶۶/۸۹۳
شماره کتابشناسی ملی	۳۲۱۷۸۴۸
مصوبه شماره ۹۲/۷۰ چاپ کتاب شورای علمی انتشارات مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی	

مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

تأثیر استفاده از نانوسوسپانسیون‌های سیلیس و تیتانیوم بر خواص بتن

مهندس امیرمازیار رئیس قاسمی، دکتر طیبه پرهیزکار، مهندس سعیده صیاد قبادی،

مهندس میثم نجیمی

شماره نشر: گ - ۶۸۸ چاپ اول: ۱۳۹۲

ناشر: انتشارات مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

تنظیم برای چاپ: نسرين مقدس

شمارگان: ۵۰۰ نسخه

بها: ۵۰۰۰۰ ریال

لیتوگرافی، چاپ و صحافی: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

مسئولیت صحت دیدگاه‌های علمی بر عهده ناگردندگان محترم می‌باشد

کلیه حقوق چاپ و انتشار اثر به ناشر تعلق دارد.

نشانی: تهران، بزرگراه شیخ فضل‌آلنوری، روبروی فاز ۲ شهرک فرهنگیان، خیابان نارگل، خیابان شهید علی مروی،

خیابان حکمت صندوق پستی: ۱۶۹۶-۱۳۱۴۵

تلفن: ۸۸۲۵۵۹۴۲-۶ دورنگار: ۸۸۲۵۵۹۴۱

صفحه الکترونیکی: <http://www.bhrc.ac.ir>

پست الکترونیکی: president@bhrc.ac.ir

ISBN: 978-600-5392-88-3

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۵۳۹۲-۸۸-۳

فناوری نانو به عنوان تکنولوژی برتر قرن حاضر، تأثیر بسیار زیادی در عرصه علم و فناوری، و گسترش مرزهای دانش داشته است. این فناوری، همچنین در شناخت فرآیندها و ساخت و فرآوری محصولات جدید بسیار مؤثر بوده است.

در این میان، بتن یکی از پُرکاربردترین مصالح ساختمانی است که با وجود تحقیقات فراوان، هنوز روایی ناشناخته بسیار زیادی دارد. امروزه با استفاده از فناوری نانو می‌توان خواص بتن و ملات را بیش از پیش بهبود بخشید. از جمله نانو ذراتی که امروزه تحقیقات گسترده‌ای در زمینه کاربرد آن در ملات و بتن انجام شده است، نانو سیلیس و نانو دی‌اکسید تیتانیوم می‌باشد.

تحقیقات انجام شده در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن بر روی کاربرد نانو سوسپانسیون TiO_2 در ملات‌های پایه سیمانی، به نتایج بسیار ارزنده‌ای در خصوص ایجاد خاصیت کاهش‌دهندگی آلودگی‌های هوا (پالایش آلودگی)، خود تمیزشوندگی و افزایش مقاومت فشاری و خمشی در ملات‌های حاوی نانو سوسپانسیون TiO_2 منجر شده است. این نتایج نه تنها نشان‌دهنده عملکرد مثبت کاربرد TiO_2 بود، بلکه به دلیل استفاده از نانو سوسپانسیون (به جای پودر، برای اولین بار) و توزیع بهتر TiO_2 ، در مقایسه با تحقیقات انجام شده در دیگر کشورها، نتایج بسیار بهتری حاصل گردید.

امید است مجموعه حاضر که ابتدا مروری اجمالی به کاربرد نانو در بتن پرداخته و سپس نتایج تحقیقات انجام شده در خصوص کاربرد دو نوع نانو در بتن و ملات پرداخته است، کمک شایانی به شناخت و توسعه کاربرد این فناوری در بتن و ملات نماید.

سید محمود فاطمی عقدا

رئیس مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	بخش اول - کلیات
۳	فصل اول: تعاریف و برخی از کاربردهای نانو ذرات در بتن
۳	۱-۱ مقدمه.....
۵	۲-۱ تعاریف و اصطلاحات.....
۱۲	۳-۱ ساختار نانومتری سیمان هیدراته.....
۱۴	۴-۱ مروری بر مطالعات انجام شده درباره تأثیر کاربرد برخی از نانو ذرات در بتن (بجز نانو سیلیس و نانو تیتانیوم).....
۲۴	۵-۱ هدف از انجام تحقیق.....
۲۵	بخش دوم: کاربرد نانو ذرات SiO_2 در بتن
۲۶	کلیات.....
۲۷	فصل دوم: بررسی مطالعات انجام شده
۲۷	۱-۲ کلیات.....
۲۷	۲-۲ بررسی مطالعات انجام شده درباره تأثیر کاربرد نانو ذرات سیلیس در بتن.....
۴۵	فصل سوم: مطالعات آزمایشگاهی
۴۵	۱-۳ کلیات.....
۴۵	۲-۳ مواد و مصالح مصرفی.....
۴۵	۱-۲-۳ سنگدانه‌ها.....
۴۹	۲-۲-۳ سیمان.....
۵۰	۳-۲-۳ ماده افزودنی فوق روان کننده.....
۵۱	۴-۲-۳ دوده سیلیس.....
۵۱	۵-۲-۳ نانو سیلیس.....
۵۳	۳-۳ طرح اختلاط.....
۵۴	۱-۳-۳ تعیین نسبت‌های اختلاط.....
۵۶	۴-۳ برنامه آزمایشگاهی.....

۵۶	۳-۴-۱ شکل و ابعاد نمونه‌ها
۵۷	۳-۴-۲ ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها
۵۸	۳-۵-۵ آزمایش‌های بتن تازه و نتایج آن
۵۸	۳-۵-۱ تعیین وزن مخصوص
۵۸	۳-۵-۲ تعیین روانی به روش آزمون اسلامپ
۵۸	۳-۵-۳ تعیین درصد هوای موجود
۵۹	۳-۶-۶ آزمایش‌های بتن سخت‌شده و نتایج آن
۵۹	۳-۶-۱ تعیین مقاومت فشاری
۶۰	۳-۶-۲ تعیین عمق نفوذ آب تحت فشار
۶۱	۳-۶-۳ نفوذپذیری کلرید در بتن به روش تسریع شده (RCPT)
۶۲	۳-۶-۴ تعیین یون کلرید در اعمال مختلف بتن (تهیه پروفیل نفوذ)
۶۵	۳-۶-۵ ضریب انتشار یون کلرید در بتن سخت‌شده
۶۶	۳-۶-۶ بررسی ریزساختار بتن به روش تخلخل‌سنج جیوه (MIP)
۷۳	۳-۷-۷ بررسی و تجزیه و تحلیل نتایج
۷۳	۳-۷-۱ مقاومت فشاری
۷۶	۳-۷-۲ تعیین عمق نفوذ آب تحت فشار
۷۸	۳-۷-۳ نفوذپذیری یون کلرید به روش تسریع شده
۸۱	۳-۷-۴ ضریب انتشار یون کلرید
۸۳	۳-۷-۵ بررسی ریزساختار بتن به روش تخلخل‌سنج جیوه
۸۴	۳-۸ سازگاری نانو سوسپانسیون سیلیس با فوق‌روان‌کننده
۹۱	۳-۹ نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

بخش سوم: کاربرد نانو ذرات TiO_2 در ملات یا بتن

۹۴	مقدمه
----	-------

فصل چهارم: بررسی مطالعات انجام شده

۹۵	۴-۱ خاصیت فتوکاتالیستی
۹۵	۴-۲ برخی از کاربردهای دی اکسید تیتانیوم
۱۰۱	۴-۲-۱ خودتمیزشوندگی
۱۰۲	۴-۲-۲ استفاده در پیل‌های خورشیدی (PEC)
۱۰۴	۴-۲-۳ تصفیه (گندزدایی) آب
۱۰۴	۴-۲-۴ کاربرد در کشاورزی
۱۰۵	۴-۲-۵ تصفیه هوای آلوده
۱۰۶	۴-۲-۶ استفاده در روکش کردن جاده‌ها



۷-۲-۴	سطوح خود ضد عفونی کننده (استریلیزه)	۱۰۷
۸-۲-۴	کاربرد در شیشه‌های خود تمیز شونده و ضد مه	۱۰۷
۹-۴-۲	کاربرد در سیستم‌های انتقال حرارت	۱۰۸
۱۰-۲-۴	کاربرد در سیستم‌های خنک کننده برج‌ها	۱۰۹
۱۱-۲-۴	پوشش محافظ در برابر خوردگی	۱۰۹
۱۲-۲-۴	زیست‌سازگار بودن برای لیتوگرافی	۱۱۰
۱۳-۲-۴	شیشه هوشمند	۱۱۱
۳-۴	بررسی تحقیقات انجام شده روی کاربرد نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم	۱۱۱
۱-۳-۴	شرح جزییات و نتایج پروژه PICADA	۱۳۷
۲-۳-۴	آزمایش در مقیاس آزمایشگاهی	۱۳۸
۳-۳-۴	آزمایش در مقیاس ماکرو	۱۴۰
۴-۳-۴	آزمایش پایلوت (درجا) - خیابان باریک کانتیری	۱۴۲
۵-۳-۴	آزمایش پایلوت - پارکینگ	۱۴۵

فصل پنجم: مواد فعال کننده سطح و ساخت نانو سیال

۱-۵	کلیات	۱۴۷
۲-۵	سورفکتانت‌ها (مواد فعال کننده سطح)	۱۴۸
۱-۲-۵	کاربرد سورفکتانت‌ها	۱۵۰
۲-۲-۵	سازوکار عملکرد سورفکتانت	۱۵۱
۳-۲-۵	طبقه بندی سورفکتانت‌ها	۱۵۲
۴-۲-۵	ساختار سورفکتانت و پایداری سوسپانسیون یا کلوئید	۱۵۸
۳-۵	مایسل و غلظت بحرانی مایسل	۱۶۲
۱-۳-۵	عوامل مؤثر بر CMC	۱۶۷
۲-۳-۵	انواع مایسل	۱۷۱
۳-۳-۵	عوامل مؤثر بر هندسه مایسل	۱۷۲
۴-۳-۵	انرژی تشکیل مایسل	۱۷۶
۵-۳-۵	اثر متقابل مایسل‌ها	۱۷۶
۴-۵	تهیه نانوسیالات	۱۷۷
۱-۴-۵	محلول‌های مغناطیسی نانو	۱۷۸
۲-۴-۵	جلوگیری از توده‌ای شدن نانو لوله‌ها	۱۷۹
۳-۴-۵	تهیه نانوسیال TiO_2	۱۸۰
۵-۵	روش‌های اندازه‌گیری میزان پایداری نانوسوسپانسیون‌ها و تعیین اندازه آنها در مقیاس نانو	۱۹۱
۱-۵-۵	اندازه‌گیری پتانسیل زتا	۱۹۱

۵-۲ اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات به روش DLS..... ۱۹۴

فصل ششم: مطالعات آزمایشگاهی

۱-۶ کلیات.....	۱۹۷
۲-۶ ساخت نانوسپانسیون پایدار و سازگار با ملات/بتن.....	۱۹۹
۱-۲-۶ مشخصات مواد و مصالح.....	۱۹۹
۲-۲-۶ دستگاه‌ها و ابزار مورد نیاز.....	۲۰۴
۳-۲-۶ تهیه نانوسپال TiO_2 به روش آزمایشگاهی.....	۲۰۷
۴-۲-۶ بررسی و تجزیه و تحلیل نتایج.....	۲۱۷
۳-۶ بررسی تأثیر استفاده از نانو سوسپانسیون TiO_2 بر برخی خواص ملات.....	۲۲۲
۱-۳-۶ کلیات.....	۲۲۲
۲-۳-۶ مواد و مصالح مصرفی.....	۲۲۴
۳-۳-۶ برنامه آزمایشگاهی.....	۲۲۹
۴-۳-۶ تعیین نسبت اختلاط اجزاء اندود.....	۲۲۹
۵-۳-۶ روش ساخت و اختلاط اندودها.....	۲۳۱
۶-۳-۶ تعیین خواص اندود در حالت سخت‌شده.....	۲۳۱
۷-۳-۶ تخریب آلودگی‌های سطحی (خودتمیزشوندگی).....	۲۳۳
۸-۳-۶ بررسی و تجزیه و تحلیل نتایج.....	۲۳۶
۷-۶ نتیجه‌گیری.....	۲۴۸

فهرست شکل‌ها

عنوان شکل

صفحه

- شکل ۱-۱ نانو پودر سیلیکون ۵
- شکل ۲-۱ تصویر TEM از نانو الماس ۶
- شکل ۳-۱ به ترتیب از چپ به راست: کلونید، محلول، سوسپانسیون ۱۱
- شکل ۴-۱ تصویر میکروسکوپ اتمی (AFM) از سیمان هیدراته سخت شده در تماس با یک بلور انعطاف پذیر ۱۳
- شکل ۵-۱ تصویر میکروسکوپ اتمی (AFM) از ژل سیلیکات کلسیم هیدراته ($Ca/Si=1.5$) ۱۳
- شکل ۶-۱ الگوی به دست آمده از آزمایش XRD برای ژل C-S-H ۱۳
- شکل ۷-۱ تغییرات مقاومت الکتریکی در بتن حاوی ۳ درصد از نانوذرات Fe_2O_3 ۱۵
- شکل ۸-۱ تغییرات مقاومت الکتریکی در بتن حاوی صفر درصد نانوذرات Fe_2O_3 ۱۵
- شکل ۹-۱ تغییرات مقاومت الکتریکی در بتن حاوی ۳ درصد از نانوذرات Fe_2O_3 ۱۵
- شکل ۱۰-۱ مدار DC معادل نمونه‌های دارای ترک کششی و نمونه فاقد ترک کششی ۱۶
- شکل ۱۱-۱ تغییرات مدول الاستیک بتن حاوی نانوذرات آلومینا ۱۶
- شکل ۱۲-۱ تغییرات مقاومت فشاری بتن حاوی نانوذرات آلومینا ۱۷
- شکل ۱۳-۱ تصاویر میکروسکوپ الکترونی - شکل ۸، حاوی صفر درصد نانو آلومینا و شکل B، حاوی ۵ درصد نانو آلومینا ۱۷
- شکل ۱۴-۱ نتایج طیف EDS روی ملات (اطراف سنگدانه‌ها) - ۸ حاوی صفر درصد نانو آلومینا ۱۸
- شکل ۱۵-۱ اثر استفاده از درصد‌های مختلف NM در مقاومت فشاری ملات (در سنین مختلف) ۱۸
- شکل ۱۶-۱ نتایج نفوذپذیری و تأثیر استفاده از درصد‌های مختلف NM بر آن ۱۸
- شکل ۱۷-۱ منحنی DSC خمیر سیمان سخت شده - A بدون NM B حاوی ۰/۶ درصد NM ۱۹
- شکل ۱۸-۱ منحنی NMR خمیر سیمان سخت شده - A بدون NM B حاوی ۰/۶ درصد NM ۱۹
- شکل ۱۹-۱ منحنی‌های نفوذ جیوه MIP - حجم حفرات در مقابل اندازه حفرات برای ملات سیمان سخت شده، A بدون NM B حاوی ۰/۶ درصد NM ۲۰
- شکل ۲۰-۱ منحنی‌های نفوذ جیوه MIP - توزیع اندازه حفرات در مقابل اندازه حفرات برای ملات سیمان سخت شده، A بدون NM B حاوی ۰/۶ درصد NM ۲۰
- شکل ۲۱-۱ نتایج تجزیه به روش TG ذرات خالص سدیم میکرو MMT ۲۲
- شکل ۲۲-۱ نتایج تجزیه به روش TG ذرات میکرو OMMT ۲۲



- شکل ۱-۲۳ منحنی حجم حفرات در مقابل اندازه حفرات برای ملات‌های حاوی صفر، ۰/۵ و ۲ درصد ذرات میکرو رس اصلاح شده OMMT..... ۲۳
- شکل ۱-۲۴ تغییرات ضریب نفوذپذیری ملات‌های حاوی درصدهای مختلف رس اصلاح شده OMMT با نسبت آب به سیمان ۰/۴۸۵..... ۲۳
- شکل ۲-۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) از ریز ساختار ملات ماسه سیمان معمولی..... ۲۹
- شکل ۲-۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) از ریز ساختار ملات ماسه سیمان با ۳ درصد نانو اکسید آهن..... ۲۹
- شکل ۲-۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) از ریز ساختار ملات ماسه سیمان با ۳ درصد نانوسیلیس..... ۳۰
- شکل ۲-۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) از ریز ساختار ملات ماسه سیمان با ۱۰ درصد نانو اکسید آهن..... ۳۱
- شکل ۲-۵ تغییرات دمای هیدراسیون در طی زمان (PCC: بتن معمولی، HFAC: بتن حاوی خاکستر بادی، SHFAC: بتن حاوی خاکستر بادی و نانوسیلیس)..... ۳۳
- شکل ۲-۶ تغییرات مقاومت فشاری در طی زمان..... ۳۴
- شکل ۲-۷ اندازه حفرات در سن ۲۸ روز..... ۳۴
- شکل ۲-۸ اندازه حفرات در سن ۲ سال..... ۳۵
- شکل ۲-۹ تصویر میکروسکوپ الکترونی محیطی (ESEM) از ریز ساختار بتن معمولی حاوی خاکستر بادی در سن ۲۸ روز..... ۳۷
- شکل ۲-۱۰ تصویر میکروسکوپ الکترونی محیطی (ESEM) از ریز ساختار بتن نانوسیلیسی حاوی خاکستر بادی در سن ۲۸ روز..... ۳۷
- شکل ۲-۱۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی محیطی (ESEM) از ریز ساختار بتن معمولی حاوی خاکستر بادی در سن ۱۸۰ روز..... ۳۸
- شکل ۲-۱۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی محیطی (ESEM) از ریز ساختار بتن نانوسیلیسی حاوی خاکستر بادی در سن ۱۸۰ روز..... ۳۸
- شکل ۲-۱۳ عکس میکروسکوپ الکترونی (SEM) بلورهای هیدروکسید کلسیم در سطح مشترک خمیر سیمان با شیشه..... ۴۱
- شکل ۲-۱۴ عکس میکروسکوپ الکترونی (SEM) بلورهای هیدروکسید کلسیم در سطح مشترک خمیر سیمان و دوده سیلیس با شیشه..... ۴۱
- شکل ۲-۱۵ عکس میکروسکوپ الکترونی (SEM) بلورهای هیدروکسید کلسیم در سطح مشترک خمیر سیمان و نانوسیلیس با شیشه..... ۴۲
- شکل ۳-۱-۱ منحنی دانه‌بندی سنگدانه ریز و الزامات استاندارد ایران..... ۴۶



- شکل ۲-۳- منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌درشت (شن نخودی) و الزامات استاندارد ایران ۴۷
- شکل ۳-۳- منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌درشت (شن بادامی) و الزامات استاندارد ایران ۴۷
- شکل ۴-۳- منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌درشت (ترکیب شن بادامی و نخودی) و الزامات استاندارد ایران ۴۸
- شکل ۵-۳- عکس TEM تهیه شده از نانوسیلیس مصرفی (Cembinder 8) ۵۳
- شکل ۶-۳- نتایج آزمایش XRF روی نانوسیلیس مصرفی (Cembinder 8) ۵۳
- شکل ۷-۳- منحنی توزیع اندازه ذرات مجموع سنگدانه‌های ریز و درشت ۵۵
- شکل ۸-۳- نتایج عمق نفوذ یون کلرید در آزمون‌های مخلوط NS0-SF0 ۶۳
- شکل ۹-۳- نتایج عمق نفوذ یون کلرید در آزمون‌های مخلوط NS2.25-SF0 ۶۳
- شکل ۱۰-۳- نتایج عمق نفوذ یون کلرید در آزمون‌های مخلوط NS0.75-SF3 ۶۳
- شکل ۱۱-۳- نتایج عمق نفوذ یون کلرید در آزمون‌های مخلوط NS0-SF4.5 ۶۴
- شکل ۱۲-۳- نتایج عمق نفوذ یون کلرید در آزمون‌های مخلوط NS1.5-SF4.5 ۶۴
- شکل ۱۳-۳- نتایج عمق نفوذ یون کلرید در آزمون‌های مخلوط NS0.75-SF6 ۶۴
- شکل ۱۴-۳- نتایج عمق نفوذ یون کلرید در آزمون‌های مخلوط NS0-SF7.5 ۶۴
- شکل ۱۵-۳- مایع ترک‌کننده و غیر ترک‌کننده سطح [149] ۶۸
- شکل ۱۶-۳- منحنی‌های جمع تجمعی نفوذ جیوه در برابر ۶۹
- شکل ۱۷-۳- منحنی‌های جمع تجمعی نفوذ جیوه در برابر ۶۹
- شکل ۱۸-۳- منحنی‌های جمع تجمعی نفوذ جیوه در برابر ۷۰
- شکل ۱۹-۳- منحنی‌های جمع تجمعی نفوذ جیوه در برابر ۷۰
- شکل ۲۰-۳- منحنی‌های جمع تجمعی نفوذ جیوه در برابر، الف) فشار، ب) شعاع حفرات و ج) قطر ذرات نمونه NS0.75-SF6 ۷۱
- شکل ۲۱-۳- منحنی‌های جمع تجمعی نفوذ جیوه در برابر، الف) فشار، ب) شعاع حفرات و ج) قطر ذرات نمونه NS2.25-SF0-1 ۷۲
- شکل ۲۲-۳- منحنی‌های جمع تجمعی نفوذ جیوه در برابر، الف) فشار، ب) شعاع حفرات و ج) قطر ذرات نمونه NS2.25-SF0-2 ۷۲
- شکل ۲۳-۳- نتایج مقاومت فشاری کلیه مخلوط‌ها در سنین ۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روز ۷۳
- شکل ۲۴-۳- تغییرات مقاومت فشاری مخلوط‌های حاوی نانو و یا دوده‌سیلیس نسبت به مخلوط شاهد ۷۴
- شکل ۲۵-۳- تغییرات مقاومت فشاری مخلوط‌ها نسبت به مخلوط‌های حاوی دوده‌سیلیس تنها (در رده جایگزینی مشابه) ۷۵



- شکل ۳-۲۶- تغییرات مقاومت فشاری کلیه مخلوط‌ها نسبت به مخلوط NS0.75-SF3 (حاوی ۰/۷۵ درصد نانو سیلیس و ۳ درصد دوده سیلیس) ۷۶
- شکل ۳-۲۷- نتایج عمق نفوذ آب کلیه مخلوط‌ها در سنین ۲۸ و ۹۰ روز ۷۷
- شکل ۳-۲۸- تغییرات عمق نفوذ آب مخلوط‌ها نسبت به مخلوط‌های حاوی دوده سیلیس تنها (در رده جایگزینی مشابه) ۷۷
- شکل ۳-۲۹- تغییرات عمق نفوذ آب کلیه مخلوط‌ها نسبت به مخلوط NS0.75-SF3 (حاوی ۰/۷۵ درصد نانو سیلیس و ۳ درصد دوده سیلیس) ۷۸
- شکل ۳-۳۰- نتایج نفوذپذیری یون کلرید کلیه مخلوط‌ها در سنین ۲۸ و ۹۰ روز ۷۹
- شکل ۳-۳۱- تغییرات نفوذپذیری یون کلرید مخلوط‌های حاوی نانو و یا دوده سیلیس نسبت به مخلوط شاهد ۷۹
- شکل ۳-۳۲- تغییرات نفوذپذیری یون کلرید مخلوط‌ها نسبت به مخلوط‌های حاوی دوده سیلیس تنها (در رده جایگزینی مشابه) ۸۰
- شکل ۳-۳۳- تغییرات نفوذپذیری یون کلرید کلیه مخلوط‌ها نسبت به مخلوط NS0.75-SF3 (حاوی ۰/۷۵ درصد نانو سیلیس و ۳ درصد دوده سیلیس) ۸۱
- شکل ۳-۳۴- نتایج ضریب انتشار یون کلرید کلیه مخلوط‌ها در سنین ۲۸ و ۹۰ روز ۸۲
- شکل ۳-۳۵- تغییرات ضریب انتشار یون کلرید مخلوط‌های حاوی نانو و یا دوده سیلیس نسبت به مخلوط شاهد ۸۲
- شکل ۳-۳۶- تغییرات ضریب انتشار یون کلرید کلیه مخلوط‌ها نسبت به مخلوط NS0.75-SF3 (حاوی ۰/۷۵ درصد نانو سیلیس و ۳ درصد دوده سیلیس) ۸۳
- شکل ۳-۳۷- مقایسه نتایج مقاومت فشاری (۲۸ روز) طرح‌های متناظر در دانشگاه امیرکبیر و مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی ۸۶
- شکل ۳-۳۸- مقایسه نتایج عمق نفوذ آب (۲۸ روز) طرح‌های متناظر در دانشگاه امیرکبیر و مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی ۸۷
- شکل ۳-۳۹- مقایسه نتایج نفوذپذیری یون کلرید (۲۸ روز) طرح‌های متناظر در دانشگاه امیرکبیر و مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی ۸۷
- شکل ۳-۴۰- نتایج پتانسیل زتا، توزیع اندازه ذرات به روش DLS، هدایت پذیری و قابلیت انتقال نانوسوسپانسیون مورد استفاده، با و بدون فوق‌روان‌کننده ۹۰
- شکل ۴-۱- فتوکاهش O_2 در محلول‌های آبی در تماس با نانوذرات فاز آنتاز یا روتایل به روش MIR ۹۹
- شکل ۴-۲- طرح شماتیک سازوکار خودتمیزشوندگی از سطح هیدروفیلیک دی‌اکسید تیتانیوم ۱۰۲
- شکل ۴-۳- برج MM در یوکوهامای ژاپن با سطح خود تمیز شونده- ۲۰۰۸ ۱۰۳



- شکل ۴-۴ سقف خودتمیزشونده در ایستگاه قطار Motosumiyoshi - ۲۰۰۸ - ژاپن ۱۰۳
- شکل ۵-۴ مقایسه سطوح با قابلیت تمیزشوندگی که به مدت حدود ۲/۵ سال در معرض آلودگی قرار گرفتند (عکس ۲۳ آپریل ۲۰۰۷) ۱۰۴
- شکل ۶-۴ استفاده از پوشش‌های تیتانیوم برای تصفیه هوا در جاده‌ها، ۱۰۶
- شکل ۷-۴ ساختمان کمپانی Matsushita Densu پوشیده شده با شیشه‌های خودتمیزشونده ۱۰۸
- شکل ۸-۴ کاربرد شیشه‌های با قابلیت خودتمیزشوندگی و عایق صوت در ژاپن - ۲۰۰۸ ۱۰۸
- شکل ۹-۴ صرفه جویی در مصرف انرژی با استفاده از نور خورشید و آب باران ذخیره شده در فصل بارش ۱۰۹
- شکل ۱۰-۴ عملکرد پوشش‌های حاوی TiO_2 ، سمت راست حاوی TiO_2 و سمت چپ بدون نانو ۱۱۲
- شکل ۱۱-۴ خاصیت ضد آلودگی آئینه حاوی TiO_2 ، آئینه بغل ماشین، شکل سمت راست حاوی TiO_2 ۱۱۳
- شکل ۱۲-۴ نمایی از کلیسای Dives در Misericordia ساخته شده با سیمان با قابلیت خودتمیزشوندگی ۱۱۷
- شکل ۱۳-۴ کاربرد پوشش در ژاپن ۱۱۸
- شکل ۱۴-۴ ارزیابی تغییر رنگ a^* در مقابل زمان برای مواد پایه سیمانی ۱۲۰
- شکل ۱۵-۴ ارزیابی سرعت تخریب رنگدانه برای موادی که به آنها TiO_2 اضافه شده است ۱۲۰
- شکل ۱۶-۴ سرعت تخریب VOCs در مقابل غلظت BTEX برای ملات CEN که در آن TiO_2 اضافه شده است ۱۲۱
- شکل ۱۷-۴ فعالیت فتوکاتالیزوری مواد بر پایه سیمان با غلظت جزئی 300 mg/l BTEX ۱۲۱
- شکل ۱۸-۴ دستگاه اضمحلال آلودگی‌های آلی به روش VOCs ۱۲۲
- شکل ۱۹-۴ تصویر شماتیک از دستگاه، تجهیزات کنترل و تجزیه‌گرهای NO_x در شرایط جریان ثابت هوا ۱۲۶
- شکل ۲۰-۴ اضمحلال NO_x در تاریکی برای مخلوط‌های با و بدون TiO_2 ۱۲۷
- شکل ۲۱-۴ اضمحلال NO_x در نور برای مخلوط‌های با و بدون TiO_2 ۱۲۷
- شکل ۲۲-۴ میزان تشکیل استن بعد ۶ و ۲۳ ساعت، در معرض نور UV به عنوان محصول واکنش در طی فرایند تجزیه فوتونی دو پروپانول در حضور مواد مورد آزمایش (P: معرف پودر و S: معرف سوسپانسیون) ۱۲۸
- شکل ۲۳-۴ تغییرات رنگ نمونه‌های مورد آزمایش بوسیله کنترل پارامتر ΔE ابتدا تحت شرایط آلودگی‌های شهری و پس از ۷۰ روز جذب آلودگی انتقال به اطاق تحت کنترل ۱۲۹



- شکل ۴-۲۴ تغییرات رنگ نمونه‌های مورد آزمایش بوسیله کنترل پارامتر ΔL^* (از تن سفید به تن خاکستری)، ابتدا تحت شرایط آلودگی‌های شهری و پس از ۷۰ روز جذب آلودگی انتقال به اطاق تحت کنترل ۱۳۰
- شکل ۴-۲۵ تغییرات رنگ نمونه‌های مورد آزمایش بوسیله کنترل پارامتر Δb^* ابتدا تحت شرایط آلودگی‌های شهری و پس از ۷۰ روز جذب آلودگی انتقال به اطاق تحت کنترل ۱۳۰
- شکل ۴-۲۶ پتانسیل زتا، قطر مؤثر و سرعت رسوب کردن ذرات TiO_2 در یک محلول NaCl به عنوان تابعی از PH بعد از ۳ و ۲۴ ساعت از زمان ساخت ۱۳۲
- شکل ۴-۲۷ قطر مؤثر به عنوان تابعی از پتانسیل زتا ذرات TiO_2 در محلول NaCl در PH نزدیک به PH ایزوالکتریک ۱۳۳
- شکل ۴-۲۸ جزئیات نصب و ابعاد قالب ۱۳۴
- شکل ۴-۲۹ دستگاه تجزیه گر NO_x ۱۳۵
- شکل ۴-۳۰ شکل سمت چپ، غلظت‌های NO/NO_2 در مقابل زمان، شکل سمت راست، تبدیل NO در مقابل زمان ۱۳۵
- شکل ۴-۳۱ شکل سمت چپ، غلظت‌های NO/NO_2 در مقابل زمان، شکل سمت راست، تبدیل NO در مقابل زمان ۱۳۵
- شکل ۴-۳۲ تأثیر غلظت NO روی تبدیل NO ۱۳۶
- شکل ۴-۳۳ دستگاه با مقیاس ماکرو نصب شده در اتاق Indoortron ۱۴۱
- شکل ۴-۳۴ پایلوت خیابان باریک ۱۴۲
- شکل ۴-۳۵ نصب تجیزات و تجزیه‌گرها در پایلوت خیابان باریک ۱۴۳
- شکل ۴-۳۶ غلظت‌های میانگین NO_x اندازه‌گیری شده و محاسبه شده برای جهت‌های مختلف وزش باد ۱۴۵
- شکل ۵-۱ مولکول سورفکتانت ۱۴۹
- شکل ۵-۲ مولکول آمفیپاتیک ۱۵۰
- شکل ۵-۳ یک نوع شوینده ۱۵۰
- شکل ۵-۴ یک نوع چربی ۱۵۱
- شکل ۵-۵ سورفکتانت آنیونی ۱۵۲
- شکل ۵-۶ روش صابونی شدن ۱۵۳
- شکل ۵-۷ سورفکتانت کاتیونی ۱۵۵
- شکل ۵-۸ سورفکتانت غیر یونی ۱۵۶
- شکل ۵-۹ خاصیت تعادل هیدروفیلیک/لیپوفیلیک ۱۵۹
- شکل ۵-۱۰ تعیین نوع سوسپانسیون/کلوئید با پارامتر HLB ۱۶۰



- شکل ۵-۱۱ تشکیل مایسل ۱۶۳
- شکل ۵-۱۲ شکل یک مایسل (چپ) و غلظت بحرانی مایسل (راست) ۱۶۵
- شکل ۵-۱۳ نمای جانبی یک مایسل ۱۶۵
- شکل ۵-۱۴ اندازه‌گیری کشش سطحی ۱۶۶
- شکل ۵-۱۵ نمودار کشش سطحی بر حسب غلظت سورفکتانت ۱۶۷
- شکل ۵-۱۶ کشش سطحی بر حسب غلظت سولفونات آلکیل سدیم با طول‌های مختلف زنجیر هیدروکربنی ۱۶۸
- شکل ۵-۱۷ نمای از مایسل معمولی (راست) و مایسل معکوس (چپ) ۱۷۱
- شکل ۵-۱۸ پارامترهای مؤثر بر N_{A} برای SDS ۱۷۲
- شکل ۵-۱۹ اشکال مختلف مایسل ۱۷۳
- شکل ۵-۲۰ مایسل کروی ۱۷۳
- شکل ۵-۲۱ مایسل استوانه‌ای ۱۷۳
- شکل ۵-۲۲ مایسل دو لایه‌ای قبل از انعطاف ۱۷۴
- شکل ۵-۲۳ مایسل دو لایه‌ای مسطح و صفحه‌ای ۱۷۴
- شکل ۵-۲۴ مایسل معکوس ۱۷۵
- شکل ۵-۲۵ لایه استرن ۱۷۷
- شکل ۵-۲۶ قرارگیری نانوذره در درون مایسل ۱۷۹
- شکل ۵-۲۷ روتایل (راست)، آاناتاز (وسط)، بروکیت (چپ) ۱۸۰
- شکل ۵-۲۸ اسکن ریزنگار الکترونی پودرهای تجاری TiO_2 ۱۸۲
- شکل ۵-۲۹ شکل بالا ریزنگار انتقال الکترون برای محلولی بدون سورفکتانت و التراسونیک و شکل پایین با سورفکتانت و التراسونیک ۱۸۵
- شکل ۵-۳۰ وابستگی PH با جذب TiO_2 -SDS ۱۸۶
- شکل ۵-۳۱ ریزنگار الکترونی از TiO_2 -SDS در $\text{PH}=5.9$ ۱۸۷
- شکل ۵-۳۲ وابستگی PH با جذب TiO_2 -C₁₂DAO ۱۸۷
- شکل ۵-۳۳ تأثیر زمان پرتوافکنی التراسونیک با مولد UT300 روی (الف) ویسکوزیته محلول (ب) توزیع اندازه ذره در محلول معلق حاوی نانوذرات TiO_2 از نوع P25 - نقطه چین اندازه اولیه ذره که به روش مساحت سطح ویژه محاسبه شده است را تعیین می‌کند- توزیع اندازه ذره توسط یک X-ray particle analyzer به دست آمده است. ۱۸۹
- شکل ۵-۳۴ اختلاف زمان در توزیع اندازه ذره در محلول معلق حاوی نانوذرات TiO_2 (الف) مقایسه روش آسیاب دانه‌ای $50 \mu\text{m}$ با کسر جامد ۱ درصد با سرعت 4 m/s و روش التراسونیک با کسر جامد ۱۵ درصد (ب) روش آسیاب دانه‌ای با سرعت 8 m/s و روش التراسونیک ۱۹۱

- شکل ۵-۳۵ منحنی توابع ارتباط برای ذرات کوچک و بزرگ..... ۱۹۵
- شکل ۵-۳۶ نمودار توزیع اندازه ذرات..... ۱۹۶
- شکل ۶-۱ تصویری شماتیک از شهرهای آینده و کاربرد نانو اکسید تیتانیوم در اضمحلال برخی آلودگی‌های زیست محیطی..... ۲۰۴
- شکل ۶-۲ تصویر شماتیک از نحوه عملکرد التراسونیک برای خرد کردن کلوخه‌ها..... ۲۰۴
- شکل ۶-۳ دستگاه التراسونیک برای از بین بردن کلوخه‌ها..... ۲۰۵
- شکل ۶-۴ دستگاه اندازه‌گیری pH..... ۲۰۵
- شکل ۶-۵ دستگاه رئواساز Nano-ZS..... ۲۰۶
- شکل ۶-۶ کشش سطحی M₂P..... ۲۱۰
- شکل ۶-۷ نتایج توزیع اندازه ذرات به روش DLS برای سورفکتانت‌های M2P و LDAO در محیط اسیدی..... ۲۱۱
- شکل ۶-۸ تأثیر PH، مدت زمان و روش التراسونیک بر نحوه توزیع ذرات نانو سوسپانسیون‌های حاوی سورفکتانت..... ۲۱۲
- شکل ۶-۹ تأثیر PH، مدت زمان و روش التراسونیک بر نحوه توزیع ذرات نانو سوسپانسیون‌های بدون سورفکتانت..... ۲۱۲
- شکل ۶-۱۰ دستگاه التراسونیک به همراه حمام آب سرد..... ۲۱۴
- شکل ۶-۱۱ تأثیر مدت زمان، توان و توالی پرتوافکنی با التراسونیک..... ۲۱۵
- شکل ۶-۱۲ تأثیر PH در نمونه‌هایی که در دو زمان ۳۰ و ۱۰ دقیقه و با توان‌های ۵۰ و ۷۰ درصد پرتو افکنی شده‌اند (نمونه‌های حاوی سورفکتانت)..... ۲۱۵
- شکل ۶-۱۳ نتایج پتانسیل زتا و توزیع اندازه ذرات (به روش DLS) برای سوسپانسیون‌های پایدار..... ۲۱۶
- شکل ۶-۱۴ نمودار پتانسیل زتا برای سوسپانسیون‌های TiO₂-LDAO در محیط‌های اسیدی، خنثی و قلیایی..... ۲۱۸
- شکل ۶-۱۵ نحوه عملکرد سورفکتانت غیر یونی (LDAO) در محیط‌های قلیایی تا اسیدی و تشکیل مایسل (یا همی مایسل)..... ۲۱۹
- شکل ۶-۱۶ تغییرات پتانسیل زتا در برابر PH (برای محیط قلیایی)..... ۲۲۰
- شکل ۶-۱۷ تغییرات PH در کلوئیدی شدن TiO₂..... ۲۲۱
- شکل ۶-۱۸ نانو سوسپانسیون‌های پایدار، با و بدون سورفکتانت در محیط قلیایی، و مقایسه آن با یک سوسپانسیون پایدار در محیط اسیدی با سورفکتانت - عملکرد مثبت سورفکتانت غیر یونی در محیط اسیدی و قلیایی..... ۲۲۲
- شکل ۶-۱۹ منحنی دانه‌بندی سنگدانه ملات مورد مصرف و الزامات استاندارد ASTM..... ۲۲۴
- شکل ۶-۲۰ زنجیره پلیمر ES..... ۲۲۶



- شکل ۶-۲۱ خواص کاربردی ES 3dI25HE ۲۲۸
- شکل ۶-۲۲ محفظه اعمال و نگهداری آزمون‌ها در معرض تابش نور UV ۲۳۲
- شکل ۶-۲۳ رابطه تغییرات a^* ، b^* و L^* با تغییرات رنگ در سیستم CIE ۲۳۵
- شکل ۶-۲۴ تغییرات شاخص a^* در طی زمان برای مخلوط‌های مختلف (در معرض نور UV) ۲۳۵
- شکل ۶-۲۵ تغییرات شاخص L^* در طی زمان برای مخلوط‌های مختلف (در معرض نور UV) ۲۳۵
- شکل ۶-۲۶ نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی صفر، ۲، ۳/۵ و ۵ درصد نانو TiO_2 ۲۳۷
- شکل ۶-۲۷ افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۲، ۳/۵ و ۵ درصد نانو نسبت به نمونه شاهد ۲۳۷ ۲۳۷
- شکل ۶-۲۸ مقاومت فشاری مخلوط‌های حاوی ۲۹۰ و 414 kg/m^3 سیمان و ۳/۵، ۲ و ۵ درصد نانو ۲۳۸
- شکل ۶-۲۹ تأثیر توأم استفاده از مواد افزودنی پلیمری (اترسلولزی و استناتر) و نانو سوسپانسیون TiO_2 ۲۳۹
- شکل ۶-۳۰ نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف نانو TiO_2 ۲۴۰
- شکل ۶-۳۱ افزایش مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی نانو، نسبت به نمونه شاهد (T_0)، در سن ۲۸ روز ۲۴۰
- شکل ۶-۳۲ تأثیر استفاده توأم از نانو TiO_2 در حالت سوسپانسیون و مواد افزودنی پلیمری (استناتر و اترسلولزی) ۲۴۱
- شکل ۶-۳۳ سرعت تخریب a^* همه مخلوط‌ها پس از سه ساعت در معرض نور UV ۲۴۴
- شکل ۶-۳۴ سرعت تخریب نرمال شده a^* مخلوط‌های حاوی ۲۰، ۳/۵ و ۵ درصد نانو پس از سه ساعت در معرض نور UV ۲۴۴
- شکل ۶-۳۵ شدت تخریب a^* مخلوط‌های حاوی ۲۰، ۳/۵ و ۵ درصد نانو پس از ۲۸ ساعت در معرض نور UV ۲۴۵
- شکل ۶-۳۶ سرعت تخریب نرمال شده a^* مخلوط‌های حاوی ۰ و ۳/۵ درصد نانو و مواد افزودنی پلیمری پس از سه ساعت در معرض نور UV ۲۴۵
- شکل ۶-۳۷ شدت تخریب a^* مخلوط‌های حاوی ۰ و ۳/۵ درصد نانو و مواد افزودنی پلیمری پس از ۲۸ ساعت در معرض نور UV ۲۴۶
- شکل ۶-۳۸ شدت تخریب E_d مخلوط‌های حاوی ۲۰، ۳/۵ و ۵ درصد نانو پس از ۲۸ ساعت در معرض نور UV ۲۴۶
- شکل ۶-۳۹ شدت تخریب E_d مخلوط‌های حاوی ۰ و ۳/۵ درصد نانو و مواد افزودنی پلیمری پس از ۲۸ ساعت در معرض نور UV ۲۴۷
- شکل ۶-۴۰ تأثیر «مقدار نانو» و «درصد نانو» در شدت تخریب E_d مخلوط‌های حاوی نانو پس از ۲۸ ساعت در معرض نور UV ۲۴۸