بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه سیستان و بلوچستان

تحصیلات تکمیلی

پایان نامه کارشناسی ارشد در (رشته مهندسی مواد- نانو مواد)

عنوان:

سنتز نانو ذرات سیلیس و بررسی تأثیر مورفولوژی های مختلف آن بر روی مقاومت فشاری ملات ماسه سیمان

اساتید راهنما:

دکتر مهدی شفیعی

دکتر مهدی قهاری

استاد مشاور:

دکتر محمدرضا سهرابی

تحقیق و نگارش:

مطهره مظفری نایینی

(این پایان نامه از حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه سیستان و بلوچستان بهرمند شده است)

شهریور ۱۳۹۲

بـسمـه تـعـالـي

این پایان نامه با عنوان پایدارسازی نانو سیلیس مورد مصرف در بتن و بررسی رفتـار رئولـوژیکی آن قسـمتی از برنامه آموزشی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد_نانو مواد توسط دانشجو مطهره مظفری نایینی تحت راهنمایی اساتید پایان نامه دکتر مهدی شفیعی آفارانی و دکتر مهدی قهاری و مشاور دکتر محمدرضـا سـهرابی تهیه شده است. استفاده از مطالب آن به منظور اهداف آموزشی با ذکر مرجع و اطلاع کتبی به حوزه تحصـیلات تکمیلی دانشگاه سیستان و بلوچستان مجاز می باشد.

مطهره مظفری نایینی

این پایان نامه ۶ واحد درسی شـناخته مـی شـود و در تـاریخ ..... توسـط هیئـت داوران بررسـی و درجـه ..... به آن تعلق گرفت.

	نام و نام خانوادگی	**امضاء**	**تاریخ**
استاد راهنما:	دکتر مهدی شفیعی آفارانی		
استاد راهنما:	دکتر مهدی قهاری		
استاد مشاور:	دکتر محمدرضا سهرابی		
داور ۱:	دکتر قدرت الله رودینی		
داور ۲:	دکتر رضا ریاحی فر		
نماینده تحصیلات تکمیلی:	طاهره فنایی شیخ الاسلامی		

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب مطهره مظفری نایینی تأیید می کنم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آن استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این پایان نامه پیش از این برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه سیستان و بلوچستان می باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: مطهره مظفری نایینی

امضاء

تقدیم به :

زینت بخش های آسمان زندگیم

خورشید وجود پدرم

و مهربان ماه مادرم

که همواره مرهون حمایت های بی دریغ ایشان هستم

سپاسگزاری

سپاس مخصوص پروردگار یکتایست که انسان را با علم لایزال خود در حد کمال آفرید و برای خروج او از جهل و تاریکی فرمان به خواندن داد، و به کمک برگزیدگانش، بشر را علم آموخت. و همواره با عنایت خـود، چشـمان در جستجو حقیقت را هر بار با گوشه ای از عظمت علم بی منتها خود آشنا می نماید. در ادامه لازم می دانـم از پدر و مادرم بزرگوارم که همواره مشوق و حامی من در ادامه این مسیر بودند صـمیمانه تشـکر نمـایم و اسـاتید راهنمای گرانقدر و بزرگوارم جناب آقایان دکتر مهدی شفیعی آفارانی و دکتر مهدی قهاری که مرا در انجام این پایان نامه و در سختی های آن یاری نمودند؛ کمال تشکر و قدردانی را نمایم. همچنین از زحمات آقایـان دکتـر محمدرضا سهرابی که مشاور اینجانب بودند، جناب آقا دکتر امـین بهزادمهـر ریاسـت محتـرم پژوهشـکده نـانو فناوری، جناب دکتر امیرمسعود اعرابی و دکتر فرهود نجفی عضو هیئت علمی موسسه پژوهشی علوم و فنـاوری رنگ ، و سرکار خانم مهندس شیرین جبلی و کلیه مسئولین محترم آزمایشگاه نـانو موسسـه پژوهشـی علـوم و فناوری رنگ، و تمامی کسانی که به نوعی در انجام این پایان نامه نقش داشته اند تشکر می نمایم. امید دارم که پرودگارمان به نحوی شایسته یاری کنندگان راه علم را مدد و زحماتشان را جبران نماید.

چکیده:

در این پژوهش کنترل مورفولوژی و بررسی اثر آن بر خواص مکانیکی ملات ماسه سیمان بررسی شد. در این راستا نانو ذرات سیلیس به روش سل-ذرات با دو مورفولوژی، کروی و لوله ای سنتز شدند. به منظور دستیابی به مورفولوژی میله ای اثر پارامترهای مختلف مانند اثر مقدار آمونیاک، اثر تغییرات دمایی، میزان اسید سیتریت و نوع PVP موجود در واکنش بر نحوه رشد نانو ذرات بررسی گردید. در ادامه نانو سیلیس کروی و نانو سیلیس لوله ای سنتز شده در ملات ماسه سیمان به عنوان ماده افزودنی جایگزین مقادیر ۰/۵، ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی اضافه شدند و تأثیر این افزودنی بر مقاومت فشاری ۷ روزه آن بررسی گردید. ریز ساختار نانو ذرات توسط میکروسکوپ های الکترونی روبشی (SEM) و عبوری (TEM) مطالعه گردید، ریز ساختاری نمونه های سیمانی به وسیله تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد وجود PVP (۲۵K) در واکنش سل-ذرات باعث بهبود مورفولوژی مورد نظر لوله ای می شود، بررسی اثر مقدار اسیدسیتریت در واکنش نشان داد که اسید سیتریت در مقادیر کمتر در حدود ml ۰/۵ باعث ایجاد شرایط بهینه بر تشکیل مورفولوژی لوله ای دارد، در صورتی که افزایش اسید سیتریت در حدود ml ۱، همراه با افزایش دما در حدود ۴۰°C و ۵۰°C باشد اثر مطلوبی بر تشکیل نانو لوله ها می گذارد، همچنین برای تشکیل نانو ذرات لوله ای بررسی اثر مقدار بهینه آن، مقدار ml ۰/۲ است. نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۷ روزه نشان داد نمونه های ملات ماسه سیمان حاوی ٪۲ نانو سیلیس کروی و ٪۰/۵ نانو سیلیس لوله ای به ترتیب با مقاومت ۲۴/۱۲ و ۱۹/۶ مگا پاسکال، بالاترین مقاومت فشاری را در بین سایر نمونه های حاوی نانو سیلیس کروی و لوله ای داشته اند.

کلمات کلیدی: ملات ماسه سیمان- نانو سیلیس- سل ژل- مورفولوژی لوله ای شکل- PVP

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اوّل: کلیات ۱

۱-۱مقدمه ۲

۱-۲- تاثیر نانوتکنولوژی بر بهبود نفوذپذیری و مقاومت بتن ۳

۱-۳- هدف از انجام پژوهش ۴

۱-۴- مراحل انجام کار ۴

۱-۵- ساختار پایان نامه ۵

فصل دوم: مروری بر منابع مطالعاتی ۶

۲-۱- مقدمه ۷

۲-۲- پوزلان ها ۸

۲-۳- واکنش پوزلانی و عوامل مؤثر برآن ۹

۲-۴- مزایای فنی و تحقیقات آزمایشگاهی پوزلان ها ۹

۲- ۵- نانو سیلیس ۱۱

۲-۶ -نانو سیلیس کروی ۱۱

۲- ۷- نانو سیلیس میله ای ۱۴

۲- ۸- مکانیسم رشد نانو سیلیس میله ای ۱۴

۲- ۹- عوامل موثر بر سنتز نانو سیلیس میله ای ۱۶

۲- ۹- ۱- تأثیر دما ۱۶

۲- ۹- ۲- تأثیر آمونیاک ۱۷

۲-۱۰- پلیمر PVP ۱۷
۲-۱۱- نانو سیلیس لوله ای ۱۸
۲-۱۲- اثر افزایش یون Na^+ بر مورفولوژی نانو ذرات سیلیس ۲۱
۲-۱۳- کاربرد نانو مواد در بتن ۲۳
۲-۱۴- تاثیر مواد نانو بر ریز ساختار مواد سیمانی ۲۵
۲-۱۵- بهبود مقاومت فشاری ۲۷
۲-۱۶- خصوصیت های فیزیکی ملات سیمان بهبود یافته با نانو مواد ۲۸
۲-۱۷- سرعت و نرخ گرمای هیدراسیون در طی فرآیند گیرش ۲۸
۲-۱۷-۱- بهبود در مقاومت خمشی ۲۸
۲-۱۷-۲- کارایی ملات سیمان بهبود یافته ۲۹
۲-۱۸- بهبود مقاومت در برابر فرسایش ۳۰
فصل سوم: مواد و روش های آزمایشگاهی ۳۱
۳-۱- مقدمه ۳۲
۳-۲- مواد اولیه ۳۳
۳-۳- سنتز نانو ذرات سیلیس با تأثیر مقادیر مختلف اسید ستریت ۳۳
۳-۴- سنتز نانو ذرات سیلیس با تأثیر مقادیر مختلف آمونیاک ۳۴
۳-۵- سنتز نانو ذرات سیلیس با وزن مولکولی مختلف PVP ۳۴
۳-۶- تأثیر دما بر سنتز نانو ذرات سیلیس ۳۴
۳-۷- سنتز نانو ذرات کروی سیلیس ۳۵
۳-۸- مشخصات مصالح مصرفی ۳۵
۳-۸-۱- مشخصات ماسه استاندارد بین المللی ISO ۳۵
۳-۸-۲- مصالح چسبنده ۳۷
۳-۸-۲-۱- سیمان ۳۷
۳-۸-۲-۲- پوزلان نانو سیلیس ۳۸

۳-۸-۳- آب اختلاط ۳۸
۳-۸-۴- فوق روان کننده ۳۸
۳-۹- آماده سازی ملات ۳۹
۳-۹-۱- طرح اختلاط ملات ۳۹
۳-۹-۲- اختلاط ملات ۴۰
۳-۱۰- آماده سازی آزمونه ها ۴۱
۳-۱۰-۱- اندازه آزمونه ها ۴۱
۳-۱۰-۲- قالبگیری آزمونه ها ۴۱
۳-۱۱- شرایط آزمون ها ۴۱
۳-۱۱-۱- حمل و نقل و نگهداری قبل از خارج کردن ملات از قالب ۴۱
۳-۱۱-۲- خارج کردن آزمونه ها از قالب ۴۱
۳-۱۱-۳- عمل آوری (نگهداری) آزمونه ها در آب ۴۱
۳-۱۲- سن آزمونه ها برای انجام آزمایش مقاومت ۴۲
۳-۱۳- آنالیزهای انجام شده ۴۲
۳-۱۴- روش آزمایش مقاومت فشاری ۴۳
فصل چهارم: نتایج آزمایشها و تحلیل آنها ۴۴
۴-۱- مقدمه ۴۵
۴-۲- تاثیر پارامتر متغییر اسیدسیتریت بر شکل ذرات ۴۵
۴-۳- تاثیر پارامتر متغییر آمونیاک بر شکل ذرات ۴۶
۴-۴- تاثیر پارامترهای دما بر شکل ذرات ۴۸
۴- ۵- اثر وزن مولکولی PVP بر مورفولوژی نانو ذرات سیلیس ۴۹
۴-۶- مکانیزم تشکیل نانو ذرات سیلیس لوله ای ۵۲
۴-۷- ارائه ی نتایج آزمایش فشاری و مقایسه ی آنها ۵۳
۴-۸- معرفی طرح های اختلاط در این تحقیق ۵۳

۴-۹- مقاومت فشاری..... ۵۳

۴-۱۰- تاثیر افزودن نانو سیلیس کروی و لوله ای در مقاومت فشاری ۷ روزه..... ۵۴

۴-۱۱- تحلیل ریز ساختاری نمونه های سیمانی ساخته شده در طرح..... ۵۶

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها..... ۶۰

۵-۱- نتیجه گیری..... ۶۱

۵-۲- پیشنهادها..... ۶۲

مراجع..... ۶۳

فهرست جدول ها

عنوان جدول	صفحه
جدول ۳-۱ مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق	۳۳
جدول ۳-۲. مشخصات دانه بندی ماسه استاندارد	۳۶
جدول ۳-۳. برخی از مشخصات فیزیکی سیمان پرتلند تیپ II بکار رفته در تحقیق حاضر	۳۷
جدول ۳-۴. نتایج آنالیز شیمیایی و سیمان پرتلند نوع II	۳۷
جدول ۳-۵. مشخصات فوق روان کننده استفاده شده	۳۸
جدول ۳-۶. نسبت اختلاط ملات ماسه سیمان	۳۹
جدول ۳-۷. سنین موردنظر آزمایش و رواداری آنها	۴۰

فهرست شکل ها

عنوان جدول	صفحه
شکل ۲-۱. افزودنی های مواد سیمانی. از چپ به راست، خاکستر بادی (class C)، رس کلسینه شده، فوم سیلیس، خاکستر بادی (class F)، گدازه آتشفشانی، صدف کلسینه شده	۸
شکل ۲-۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، (الف تا ج) میله ها با قطرات امولسیون پیوسته شده در مدت رشد، به ترتیب بعد از ۰، ۳۰ و ۱۸۰ دقیقه. (د تا و) میله ها در یک مسیر متفاوت به ترتیب بعد از ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه در مقیاس ۱۰۰nm	۱۵
شکل ۲-۳. طول و قطر میله ها در مدت رشد نسبت به زمان. نرخ رشد در طول به طور معناداری بالاتر از نرخ رشد قطر است	۱۶
شکل ۲-۴. (الف) میله های کوتاه، (ب) میله های بلند (ج) میله های مجعد، مقیاس ۳ μm	۱۷
شکل ۲-۵. ترکیب شیمیایی PVP	۱۸
شکل ۲-۶. تصاویر TEM، (الف) CNTs؛ (ب) CNTs کامپوزیت شده با سیلیس متخلخل، (ج- د) نانو لوله های سیلیس متخلخل	۱۹
شکل ۲-۷. شماتیک رشد نانو لوله های سیلیس	۲۰
شکل ۲-۸. تصاویر TEM، (الف) ترکیب نانو میله های نیکل- هیدرازین شده و (ب) ساختار پوسته- هسته نیکل- هیدرازین شده با سیلیس	۲۱
شکل ۲-۹. شماتیک مکانیزم پدیده گلویی دادن سیلیس به وسیله Na+	۲۲
شکل ۲-۱۰. تصاویر SEM ذرات گلویی داده سیلیس	۲۲

شکل ۲-۱۱. ریز ساختاری ملات سیمان معمولی ۲۴

شکل ۲-۱۲. تصویر SEM بافت بلورین و ریزساختاری ملات سیمان بهبود یافته با مقدار ٪۳ نانو آهن ۲۵

شکل ۲-۱۳. تصویر SEM بافت بلورین و ریز ساختار ملات سیمان بهبود یافته با ٪۱۱ نانو آهن ۲۵

شکل ۲-۱۴. تصویر SEM بافت بلورین و ریز ساختار ملات سیمان بهبود یافته با ٪۱۱ نانو آهن ۲۶

شکل ۲-۱۵. مقایسه واکنش نانو سیلیس و میکرو سیلیس با هیدروکسیدکلسیم در نمونه های ۲۸ روزه ۲۷

شکل ۲-۱۶ منحنی گرمای هیدراسیون ۲۹

شکل ۳-۱. دانه بندی ماسه استاندارد ۳۶

شکل ۳-۲. شمای کاسه و تیغه مخلوط کن ۴۰

شکل ۴-۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی شامل سنتز نمونه ها با مقادیر مختلف اسیدسیتریت (الف) نمونه ۱ (۰/۵ ml)، ب) نمونه ۲ (۱ ml)، نمونه ۳ (۲ ml)، نمونه ۴ (۴ ml) ۴۶

شکل ۴-۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی شامل سنتز نمونه ها با مقادیر مختلف آمونیاک (الف) نمونه ۱ (۰/۱ ml)، ب) نمونه ۲ (۰/۵ ml)، نمونه ۳ (۱ ml) ۴۷

شکل ۴-۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در دماهای مختلف، (الف) نمونه ۱ (۱۰ °C)، ب) نمونه ۲ (۲۸°C)، نمونه ۳ (۴۰ °C)، نمونه ۴ (۵۰ °C) ۴۹

شکل ۴-۴. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (الف) نمونه۱: PVP با وزن مولکولی = ۲۵۰۰۰ (ب) نمونه ۲:PVP با وزن مولکولی = ۴۰۰۰۰، نمونه ۳:PVP با وزن مولکولی = ۳۶۰۰۰۰۰ ۵۰

شکل ۴-۵. تصاویر TEM نمونه شبه میله ای سنتز شده در حضور PVP با وزن مولکولی ۲۵۰۰۰۰ ۵۱

شکل ۴-۶. شماتیک رشد نانو سیلیس لوله ای ۵۲

شکل ۴-۷. تاثیر نانوسیلیس کروی و نانوسیلیس میله ای بر مقاومت فشاری ۷ روزه ملات ماسه سیمان ۵۴

شکل ۴-۸. تصویر SEM نمونه شاهد ۵۶

شکل ۴-۹. تصویر SEM نمونه حاوی ۲ درصد نانو سیلیس کروی ۵۷

شکل ۴-۱۰. تصویر SEM نمونه حاوی ۰/۵ درصد نانو سیلیس لوله ای ۵۷

شکل ۴-۱۱. تصویر SEM نمونه حاوی ۲ درصد نانو سیلیس لوله ای ۵۸

فهرست علائم

علامت	نشانه
PVP	پلی وینیل پیرولیدون
TEOS	تترا اورتو سیلیکات
ml	میلی لیتر
MPa	مگا پاسکال
g	گرم
OPC	سیمان پرتلند معمولی
SNT	نانو سیلیس لوله ای
SNS	نانو سیلیس کروی

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

بتن ماده ای ساختمانی با کاربرد بسیار وسیعی است که به طور متداول از مخلوط سیمان پرتلند، شن، ماسه، سنگ شکسته و آب ساخته شده است. در مقاله ای از برنارد و ال- ای- کوپلند[۱] چاپ شده در سال ۱۹۶۴ آمده است؛ " بتن مصرفی کل جهان در سال گذشته سه بیلیون تن یا تنها ده تن برای زندگی هر بشر تخمین زده شده است. انسان هیچ ماده ای جز آب را به این اندازه عظیم مصرف نمی کند[۱]." در حال حاضر میزان بتن مصرفی بسیار بالاتر از ۵۰ سال پیش شده است. در سال ۲۰۰۰ رتبه بتن مصرفی در جهان ۱۱ بیلیون تن متر در سال بوده است. مقدار تجارت جهان وابسته شده به بتن در حدود ۱۳ تا ۱۴ تریلیون دلار تخمین زده شده است که اشتغال ۱ در صد از جمعیت جهان را فراهم می کند[۲].

بعد از گذشت صد سال، پیشرفت مهم بتن در کیفیت و کارایی مرهون علم و ابداعات تکنولوژیکی در این زمینه بوده است. و توجه کمتری به خواص بتن در مقیاس میکرو و نانو که کنترل کننده خواصی مهم بتن از جمله مقاومت[۲]، انقباض[۳]، شکل پذیری[۴] شده است[۲].

بتن ماده ای منتخب برای ساختن ساختمان های بلند، آسفالت جاده ها، پل ها و غیره است. به علاوه تقاضای زیادی برای تعمیر این سازه های بتنی وجود دارد. مطابق با برآورد سازمان حمل و نقل ایالات متحده بودجه لازم برای تعمیر بزرگراه های این کشور که تحت بار ترافیکی سنگین و سیکل یخ زدن و آب شدن های زیاد در اثر شرایط آب و هوایی نامساعد قرار دارند در حدود ۴۹۵ بیلیون دلار است. از این رو صنعت ساختمان مواجه با یک نیاز رو به افزایش برای کاراایی بالا و پایایی بتن است[۲].

بر طبق آمار مرکز تحقیقات مسکن، متوسط عمر بتن تولید شده در ایران ۱۰ سال است، در حالی که متوسط عمر بتن تولیدی در کشورهای اروپایی ۱۰۰ سال است، همین عمر بالای بتن تولیدی باعث شده تا عمر ساختمان در این کشورها ۱۰۰ سال و در ایران کمتر از ۳۰ سال باشد. در حالی که هر ۶۰ ساعت ۳ میلیارد تومان در بخش مسکن سرمایه گذاری می شود و بیشترین میزان اتلاف انرژی مربوط به این بخش است. اگر

۱- L. E. Copeland
۲- Strength
۳- Shrinkage
٤- Ductility

عمر بتن تولید شده در کشور به ۱۰۰ سال افزایش یابد، صرفه جویی بالایی در منابع کشور بـه وجـود خواهـد آمد، زیرا مصرف سرانه سیمان در کشور بسیار بالاتر از سرانه جهانی و استاندارد است. سـرانه مصـرف سـیمان کشور از ۲۲۰ کیلوگرم در سال ۱۳۵۷ به بیش از ۷۰۰ کیلوگرم در سال ۱۳۸۸ است، این آمار نشان مـی دهـد که سرانه تولید بتن در ایران حداقل سه برابر بیشتر از میانگین سرانه جهانی آن است.

۱-۲- تاثیر نانوتکنولوژی بر بهبود نفوذپذیری[۱] و مقاومت بتن

نانوتکنولوژی، تکنولـوژی جدیـدی اسـت کـه در کاربردهـای فراوانـی اخـتلاط پیـدا کـرده اسـت از جملـه در الکترونیک، ارتباطات از راه دور، و بیوپزشکی، دستکاری در مقیاس نانو واکـنش هـای شـیمیایی، دمـا، خـواص الکتریکی و مغناطیس را تغییر می دهد[۳].

نانوتکنولوژی با ذراتی که تماما در یک اندازه ای تقریبی بین ۱ تا ۱۰۰ nm قرار دارند، سـرکار دارد[۴]. اخیـرا، نانوتکنولوژی در ساخت بتن به منظور کاهش نفوذپذیری به کاررفته اسـت، کـه ایـن مسـئله هـم در پیشـبرد خدمات زندگی ضروری است[۵]. به علاوه، اصلاح نانویی می تواند منجـر بـه بهبـود مقاومـت، انقبـاض، شـکل پذیری، و مقاومت به ضربه[۲] می شود[۳]. نانو ذرات گوناگون وقتی به عنوان ماده مکمـل سـیمانی (SCM)[۳] در بتن به کاربرده شود، زمینه سیمانی را بهبود می بخشد و متراکم می کنند، که منجـر بـه بهبـود نفوذپـذیری و مقاومت می گردد. نانو ذرات به عنوان هسته های[۴] میدانی عمل می کنند، و رفتار پوزلانی پیـدا مـی کننـد[۶]. این نانو ذرات می توانند جاهای خالی در زمینه را پر نمایند[۷]. پوزلان ها با هیدروکسید کلسیم آزاد شـده در طی هیدراتاسیون ترکیب سیمانی واکنش می دهند[۸]. سطح ویژه بالای نانو ذرات و تعداد زیاد آن ها به علـت اندازه کوچکشان واکنش های شیمیایی ضروری را تسهیل می کنند، تا یک زمینه سیمانی متراکم با سـیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) بیشتر و هیدروکسید کلسیم کمتر تولید کنند. این امر کارایی بتن را در تمام جهات بالا می برد. به طور کلی نانو ذرات، کوچکتر از معمول به کار رفته در SCM[۳] هـا هسـتند، آنهـا را فعـال تـر و موثرتر می سازند. شکل های مختلف نـانو سـیلیس (NS)[۵] و نـانو رس (NC)[۶] در خمیـر سـیمان بـا افـزایش مقاومت فشاری، کاهش نفوذپذیری، را نشان می دهد و منجر به یک تراکم ریز سـاختاری مـی شـوند[۵]. نـانو

۱- Permeability
۲- Impact Resistance
۳- Supplementary Cementitious Material
٤- Nuclei
٥- Nano- SiO_2
٦- Nano- Clay