INSO
15509
1st Edition
2018

جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran
سازمان ملی استاندارد ایران
Iranian National Standardization Organization

استاندارد ملی ایران
۱۵۵۰۹
چاپ اول
۱۳۹۷

فناوری‌نانو- نانوذرات پودری و نانوکلوئیدهای مورد استفاده در مخلوط‌های سیمانی- ویژگی‌ها و روش‌های اندازه‌گیری

Nanotechnologies - Nanoparticles and nanocolloids used for cementitous mixtures - specifications and measurement methods

ICS: 07.030

استاندارد ملی ایران شماره۱۵۵۰۹(چاپ اول): سال ۱۳۹۷

سازمان ملی استاندارد ایران

تهران، ضلع جنوب غربی میدان ونک، خیابان ولیعصر، پلاک ۲۵۹۲

صندوق پستی: ۶۱۳۹-۱۴۱۵۵ تهران- ایران

تلفن: ۵-۸۸۸۷۹۴۶۱

دورنگار: ۸۸۸۸۷۰۸۰ و ۸۸۸۸۷۱۰۳

کرج، شهر صنعتی، میدان استاندارد

صندوق پستی: ۱۶۳-۳۱۵۸۵ کرج – ایران

تلفن: ۸-۳۲۸۰۶۰۳۱ (۰۲۶)

دورنگار: ۳۲۸۰۸۱۱۴ (۰۲۶)

رایانامه : standard@isiri.gov.ir

وبگاه: http://www.isiri.gov.ir

Iranian National Standardization Organization (INSO)

No.1294 Valiasr Ave., South western corner of Vanak Sq., Tehran, Iran

P. O. Box: 14155-6139, Tehran, Iran

Tel: + 98 (21) 88879461-5

Fax: + 98 (21) 88887080, 88887103

Standard Square, Karaj, Iran

P.O. Box: 31585-163, Karaj, Iran

Tel: + 98 (26) 32806031-8

Fax: + 98 (26) 32808114

Email: standard@isiri.gov.ir

Website: http://www.isiri.gov.ir

به نام خدا

آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب بند یک مادهٔ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ تنها مرجع رسمی کشور است که وظیفه تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی (رسمی) ایران را به عهده دارد.

نام موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب یکصد و پنجاه و دومین جلسه شورای عالی اداری مورخ ۹۰/۶/۲۹ به سازمان ملی استاندارد ایران تغییر و طی نامه شماره ۲۰۶/۳۵۸۳۸ مورخ ۹۰/۷/۲۴ جهت اجرا ابلاغ شده است .

تدوین استاندارد در حوزه‌های مختلف در کمیسیون‌های فنی مرکب از کارشناسان سازمان ، صاحب نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می‌شود وکوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانهٔ صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان، صادرکنندگان و وارد کنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان‌های دولتی و غیر دولتی حاصل می‌شود .پیش نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی نفع و اعضای کمیسیون‌های فنی مربوط ارسال می‌شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادها در کمیتهٔ ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب به عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می‌شود.

پیش‌نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان‌های علاقه مند و ذی صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می‌کنند درکمیتهٔ ملی طرح و بررسی و درصورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می‌شود .بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می‌شوند که بر اساس مفاد نوشته شده در استاندارد ملی ایران شمارهٔ ۵ تدوین و در کمیتهٔ ملی استاندارد مربوط که سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می‌دهد به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین المللی استاندارد (ISO)[1] ،کمیسیون بین المللی الکتروتکنیک (IEC)[2] و سازمان بین المللی اندازه شناسی قانونی (OIML)[3] است و به عنوان تنها رابط[4] کمیسیون کدکس غذایی (CAC)[5] در کشور فعالیت می‌کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی‌های خاص کشور ، از آخرین پیشرفت‌های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین‌المللی بهره‌گیری می‌شود .

سازمان ملی استاندارد ایران می‌تواند با رعایت موازین پیش بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و/یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری نماید. سازمان می‌تواند به منظور حفظ بازارهای بین المللی برای محصولات کشور، اجرای استاندارد کالاهای صادراتی و درجه-بندی آن را اجباری نماید. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده کنندگان از خدمات سازمان‌ها و مؤسسات فعال در زمینهٔ مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدورگواهی سیستم‌های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست‌محیطی، آزمایشگاه‌ها و مراکز کالیبراسیون (واسنجی) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد ایران این گونه سازمان‌ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می‌کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامهٔ تأیید صلاحیت به آن‌ها اعطا و بر عملکرد آن‌ها نظارت می‌کند. ترویج دستگاه بین المللی یکاها، کالیبراسیون (واسنجی) وسایل سنجش، تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است.

1- International Organization for Standardization
2 - International Electrotechnical Commission
3- International Organization of Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legale)
4 - Contact point
5 - Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد
«فناوری نانو- نانوذرات پودری و نانوکلوئیدهای مورد استفاده در مخلوط‌های سیمانی: ویژگی‌ها و روش‌های اندازه‌گیری»

رئیس:	**سمت و/یا محل اشتغال:**
رمضانیان پور، علی اکبر (دکتری مهندسی عمران)	عضو هیئت علمی- دانشگاه صنعتی امیرکبیر
دبیر:	
حجت کاشانی، عطا (دکتری مهندسی عمران)	عضو هیئت علمی- دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب
اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)	
بزرگمهر، سعید (دکتری مهندسی عمران)	مدیر تحقیق و توسعه - شرکت آپتوس ایران
پوی پوی، حسن (کارشناسی ارشد شیمی)	کارشناس ستاد ویژه توسعه فناوری نانو
چوخاچی زاده مقدم، امین (کارشناسی ارشد نانوفناوری)	کارشناس ستاد ویژه توسعه فناوری نانو
حسینی، سید قوام الدین (کارشناسی ارشد مهندسی عمران)	مجری طرح متروی فرودگاه امام خمینی – شرکت راه آهن شهری تهران و حومه
رهایی، علیرضا (دکتری مهندسی عمران)	عضو هیئت علمی- دانشگاه صنعتی امیرکبیر
عسکری نژاد، آزاده (دکتری شیمی)	عضو هیئت علمی - مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
مستغنی، پوریا (کارشناسی ارشد مهندسی عمران)	مدیرعامل- شرکت فرایند سازه ابنیه نصب

نجم الدین، نجمه
(دکتری مهندسی مواد)
عضو هیئت علمی- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

یوسفی، محمد
(کارشناسی ارشد مهندسی عمران)
کارشناس ستاد ویژه توسعه فناوری نانو

ویراستار:

سیفی، مهوش
کارشناسی ارشد مدیریت دولتی
کارشناس استاندارد- نایب رئیس کمیته فنی متاظر فناوری نانو

فهرست مندرجات

عنوان	صفحه
پیش گفتار	ز
۱ هدف و دامنه کاربرد	۱
۲ مراجع الزامی	۱
۳ اصطلاحات، تعاریف و اختصارات	۲
۴ موارد مهم در ارتباط با افزودن نانومواد به مخلوط‌های سیمانی	۶
۵ ویژگی‌های نانوذرات پودری مورد استفاده در مخلوط‌های سیمانی	۷
۶ ویژگی‌های نانوذرات کلوئیدی مورد استفاده در مخلوط‌های سیمانی	۸
۷ خواص مخلوط‌های سیمانی حاوی نانوذرات و بررسی آزمون‌های عملکرد آن‌ها	۹
۸ پیوست‌ها	۱۱
۹ کتاب‌نامه	۱۷

پیش‌گفتار

استاندارد «فناوری‌نانو- نانوذرات پودری و نانوکلوئیدهای مورد استفاده در مخلوط‌های سیمانی: ویژگی‌ها و روش‌های اندازه‌گیری» که پیش‌نویس آن بر اساس پژوهش انجام شده تهیه و تدوین شده است، پس از بررسی در کمیسیون های مربوط، در شصت و پنجمین اجلاسیه کمیتهٔ ملی استاندارد فناوری نانو مورخ ۱۳۹۷/۴/۴ تصویب شد. اینک به استناد بند یک مادهٔ ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

استانداردهای ملی ایران براساس استاندارد ملی ایران شماره ۵(استانداردهای ملی ایران-ساختارو شیوه نگارش)تدوین می شوند.برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینهٔ صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در مواقع لزوم تجدیدنظر خواهد شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح و تکمیل این استانداردها ارائه شود، هنگام تجدیدنظر در کمیسیون فنی مربوط مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدیدنظر استانداردهای ملی استفاده کرد.

منابع و مآخذی که برای تهیه و تدوین این استاندارد مورد استفاده قرار گرفته به شرح زیر است:

۱- استاندارد ملی ایران شماره ۲۱۰۸۲: ۱۳۹۵، اندازه‌گیری مقاومت فشاری ملات‌ها، دوغاب‌ها، رویه‌های یک‌پارچه و بتن‌های پلیمری مقاوم به مواد شیمیایی

۲- استاندارد ملی ایران شماره ۲۱۰۸۷: سال ۱۳۹۵، تعیین مقاومت خمشی و مدول ارتجاعی ملات‌ها، دوغاب‌ها، رویه‌های یک‌پارچه و بتن‌های پلیمری مقاوم به مواد شیمیایی

۳- استاندارد ملی ایران شماره ۱۳۲۷۸: سال ۱۳۹۵، دوده سیلیس (میکروسیلیس) مورداستفاده در مخلوط‌های سیمانی

۴- استاندارد ملی ایران شماره ۳-۱۸۸۰۷: سال ۱۳۹۳، روش‌های آزمون سیمان- قسمت ۳: تعیین زمان گیرش و تعیین سلامت (انبساط) به روش لوشاتلیه

5- ISO 9277:2010, Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption - BET method

6- BS EN 1052-1:1999, Methods of test for masonry. Determination of compressive strength

7- BS EN 1052-2:2016, Methods of test for masonry. Determination of flexural strength

8- BS EN 1015-11:1999, Methods of test for mortar for masonry. Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar

9- ASTM C305:2014, Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency

10- Sanchez, F. and K. Sobolev, "*Nanotechnology in concrete – A review, Construction and Building Materials*", 2010. 24(11): p. 2060-2071.

11- M. Sobolev and M. F. Gutiérrez, *"How Nanotechnology Can Change the Concrete World"*, Oct. 2005.
12- E. García-Taengua, M. Sonebi, K.M.A. Hossain, M. Lachemi, J. Khatib. *"Effects of the addition of nanosilica on the rheology, hydration anddevelopment of the compressive strength of cement mortars, Composites*" Part B 81 (2015) 120-129.
13- Deyu Kong, David J. Corr, Pengkun Hou, Yang Yang, Surendra P. Shah. "*Influence of colloidal silica sol on fresh properties* of cement paste as compared to nano-silica powder *with agglomerates in micron-scale*", Cement and Concrete Composites, 2015.
14- P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro. *"Concrete: Microstructure, Properties, and Materials"*, third ed., Mc-Graw hill Education, 2006.
15- M. Mahdikhani , A.A. Ramezanianpour, *"Mechanical properties and durability of self consolidating Cementitious materials incorporating nano silica and silica* fume" Computers and Concrete, Vol. 14, No. 2, June 12,2014. 175-191.

مقدمه

مخلوط‌های سیمانی شامل خمیر سیمان و ملات سیمان است که از مصالح پرکاربرد در حوزه‌های عمرانی از جمله زمینه‌های مرمت و مقاوم‌سازی است. مخلوط‌های سیمانی شامل عناصر سیمان، سنگدانه‌ها (شن و ماسه) و آب است. برای بهبود خواص و کارائی این مخلوط‌ها از انواع افزودنی‌های پودری (مواد پوزولانی) و مایع (فوق روان‌کننده‌ها) استفاده می‌شود. در دهه گذشته از نانومواد با هدف بهبود خواص مخلوط‌های سیمانی مانند کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام استفاده شده است. تحقیقات گسترده علمی و نتایج کاربردهای صنعتی گزارش‌شده در ارتباط با استفاده نانومواد در مخلوط‌های سیمانی، حاکی از بهبود و ارتقاء خواص و ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی مختلف در این نوع محصولات می‌باشد.

دو دسته از نانوذرات پودری و کلوئیدی مانند نانوپودر اکسیدآلومینیوم (آلومینا)، نانوپودر اکسیدآهن، نانوپودر دی‌اکسیدتیتانیوم (تیتانیا)، نانوپودر اکسیدروی، نانوپودر دی‌اکسید سیلیسیم (سیلیس)، نانوپودر کربنات کلسیم، نانوپودر رس، نانو اکسید مس و نانولوله کربنی (نانوالیاف کربنی) و نانوکلوئیدهای آن‌ها، به‌عنوان افزودنی‌های ارتقاءدهنده ویژگی‌ها و خواص مورد استفاده گسترده قرارگرفته است. چنین افزودنی‌هایی با رعایت الزامات مرتبط با دانش فنی فناوری مخلوط‌های سیمانی منجر به بهبود خواص و ویژگی‌های ذیل می‌شود (پیوست پ):

۱- خواص مکانیکی شامل مقاومت کششی، فشاری، خمشی و مدول ارتجاعی[1]؛

۲- دوام در برابر عوامل فیزیکی - مکانیکی و شیمیایی شامل کاهش جذب آب، کاهش نفوذپذیری یون‌هایی مانند کلراید و سولفات، مقاومت در برابر چرخه‌های یخ زدن و آب شدن و سایش.

به‌علاوه مطالعات علمی انجام شده در ارتباط با استفاده از نانومواد در مخلوط‌های سیمانی حاکی از ایجاد قابلیت‌هایی مانند خود ترمیمی، خود احساسی، خود تمیزشوندگی و کنترل ترک خوردگی نیز می‌باشد که نویدبخش توسعه هرچه گسترده‌تر به‌کارگیری این فناوری در حوزه عمرانی در آینده نزدیک می‌باشد.

با توجه به تاثیرات بسیار قابل‌توجه پارامترهای فیزیکی و شیمیایی نانوذرات برخواص مختلف مخلوط‌های سیمانی، استاندارد حاضر به تبیین ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و ساختاری نانوذرات پودری و کلوئیدی مورد استفاده در مخلوط‌های سیمانی و روش‌های اندازه‌گیری آن‌ها می‌پردازد. همچنین اثر نانومواد مذکور بر خواص مکانیکی و دوام مخلوط‌های سیمانی موردتوجه قرار می‌گیرد. به‌علاوه این استاندارد برخی از ملاحظات کاربردی جهت افزودن نانومواد و فراوری مخلوط‌های سیمانی را مورد بررسی قرار می‌دهد.

1- Modulus of Elasticity

فناوری نانو- نانوذرات پودری و نانوکلوئیدهای مورد استفاده در مخلوط‌های سیمانی: ویژگی‌ها و روش‌های اندازه‌گیری

۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، تعیین ویژگی‌های نانوذرات پودری و کلوئیدی متداول مورداستفاده در مخلوط‌های سیمانی شامل خمیر سیمان و ملات سیمان حاوی نانوذرات با تاکید بر کاهش نفوذپذیری، افزایش دوام و همچنین معرفی روش‌های اندازه‌گیری مرتبط می‌باشد. به‌علاوه این استاندارد ملاحظات کاربردی جهت افزودن نانومواد و فراوری مخلوط‌های سیمانی را موردتوجه قرار می‌دهد.

این استاندارد شامل اصول ایمنی برای استفاده از نانومواد نمی‌شود، لذا قبل از استفاده آن‌ها حتما باید راهنمای ایمنی که توسط شرکت‌های تولیدکننده نانومواد ارائه می‌شود و همچنین الزامات استاندارد ملی ایران شماره ۱۲۳۲۵ در حوزه ایمنی مطالعه شود و مبنای کار قرار گیرد.

۲ مراجع الزامی

در مراجع زیر ضوابطی وجود دارد که در متن این استاندارد به‌صورت الزامی به آن‌ها ارجاع داده شده است. بدین‌ترتیب، آن ضوابط جزئی از این استاندارد محسوب می‌شوند.

درصورتی‌که به مرجعی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده باشد، اصلاحیه‌ها و تجدیدنظرهای بعدی آن برای این استاندارد الزام‌آور نیست. در مورد مراجعی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آن‌ها ارجاع داده شده است، همواره آخرین تجدیدنظر و اصلاحیه‌های بعدی برای این استاندارد الزام‌آور است.

استفاده از مراجع زیر برای کاربرد این استاندارد الزامی است:

۲-۱ استاندارد ملی ایران شماره ۲۱۱۴۵: سال ۱۳۹۵، فناوری نانو- واژه نامه- شاخص‌های علم، فناوری و نوآوری

۲-۲ استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱-۸۰۰۰۴: سال ۱۳۹۵، فناوری نانو- واژه نامه- قسمت۱: اصطلاحات اصلی

۲-۳ استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۲-۸۰۰۰۴:سال ۱۳۹۵، فناوری نانو- واژه نامه- قسمت ۲: نانواشیاء

۳ اصطلاحات، تعاریف و کوته نوشت‌ها

۳-۱ اصطلاحات و تعاریف

در این استاندارد اصطلاحات با تعاریف زیر نیز به‌کار می‌رود:

۳-۱-۱

نانوماده

nanomaterial

ماده‌ای که هر بعد خارجی آن نانومقیاس است یا ساختار داخلی یا ساختار سطحی آن نانومقیاس است.

[منبع: استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱-۸۰۰۰۴]

۳-۱-۲

نانومقیاس/مقیاس نانو

nanoscale

محدوده اندازه تقریبی ۱nm تا ۱۰۰nm است.

[منبع: استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱-۸۰۰۰۴]

۳-۱-۳

نانوشیء

nano-object

هر قطعه مجزا از ماده با یک، دو و یا سه بعد خارجی در نانومقیاس است.

[منبع: استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱-۸۰۰۰۴]

۳-۱-۴

نانوذره

nanoparticle

نانوشیئی با تمام ابعاد خارجی در مقیاس نانو که در آن طول بلندترین و کوتاه‌ترین محورهای نانوشیء به‌طور قابل ملاحظه‌ای با یکدیگر تفاوت نداشته باشد.

[منبع: استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۲-۸۰۰۰۴]

۳-۱-۵

نانو ساختار

nanostructure

ترکیبی از اجزای تشکیل‌دهنده مرتبط با هم که یک یا بیشتر از یک جزء آنها در محدوده نانومقیاس قرار دارند.

[منبع: استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱-۸۰۰۰۴]

۳-۱-۶

نانو پودر

nanopowder

مجموعه‌ای از نانوذرات خشک است.

[منبع: استاندارد ملی ایران شماره ۱۲۰۹۸]

۳-۱-۷

نانو کلوئید

nanocolloid

کلوئیدهای نانومقیاس که در آن نانوذرات درون فاز مایع پراکنده شده است.

[منبع: استاندارد ملی ایران شماره ۱۲۰۹۸]

۳-۱-۸

فناوری نانو/نانو فناوری

nanotechnology

استفاده از دانسته‌های علمی در دستکاری و کنترل ماده، غالبا در نانومقیاس برای بهره برداری از پدیده‌ها و خواص وابسته به ساختار و اندازه است. این خواص متمایز با خواص اتم‌ها و مولکول‌های منفرد و غیرقابل برون‌یابی (استنتاج) از شکل توده همان ماده هستند.

[منبع: استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱-۸۰۰۰۴]

۳-۱-۹

نسبت منظری

aspect ratio

نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک در یک ذره است که می‌تواند هنگامی که محور بزرگ از مرز یک ذره عبور نمی‌کند، مورد استفاده قرار گیرد.

یادآوری- محور بزرگ، بزرگترین محور بیضی منطبق‌شده بر ذرات غیرکروی است.

[منبع: استاندارد ملی ایران شماره ۲۱۲۵۹]

۳-۱-۱۰

مساحت سطح ویژه

specific surface area

نسبت مساحت سطح مطلق نمونه به جرم نمونه است.

[منبع: ISO 9277:2010]

۳-۱-۱۱

مقاومت خمشی

flexural strength

از جمله خواص مکانیکی نمونه‌ها و عضوهای سازه‌ای است و عبارت است از مقاومت نمونه و عضو موردنظر تحت بارگذاری خمشی.

[منبع: استاندارد ملی ایران شماره ۲۱۰۸۷]

۳-۱-۱۲

مقاومت فشاری

compressive strength

از جمله خواص مکانیکی نمونه‌ها و عضوهای سازه‌ای است و عبارت است از مقاومت نمونه و عضو موردنظر تحت بارگذاری فشاری.

[منبع: استاندارد ملی ایران شماره ۲۱۰۸۲]

۳-۱-۱۳

مقاومت پیوستگی ملات

bond strength of mortar

از جمله خواص مکانیکی نمونه‌ها و عضوهای سازه‌ای است و عبارت است از مقاومت پیوستگی نمونه و عضو موردنظر.

[منبع: استاندارد BS EN 1052-3]

۳-۱-۱۴

مقاومت چسبندگی ملات

adhesive strength of mortar

از جمله خواص مکانیکی نمونه‌ها و عضوهای سازه‌ای است و عبارت است از مقاومت چسبندگی نمونه و عضو مورد نظر برروی سطوح.

[منبع: استاندارد BS EN 1015]

۳-۱-۱۵

آزمون ثبات ملات

consistence of mortar test

آزمونی که در آن خواص فیزیکی از جمله پایداری نمونه و عضو موردنظر توسط میز جریان[1] بررسی می‌شود.

[منبع: استاندارد BS EN 1015]

1- Flow table

۳-۱-۱۶

مدول ارتجاعی (مدول یانگ)

modulus of elasticity (Young's Modulus)

از جمله مشخصات مکانیکی مصالح و عبارت است از شیب منحنی تنش-کرنش تحت کشش یا فشار وارده به مصالح

[منبع: استاندارد ملی ایران شماره ۲۱۰۸۷]

۳-۱-۱۷

کلوخه

agglomorate

مجموعه‌ای از ذرات با اتصال سست یا انبوهه‌ها یا مخلوط‌های دوتایی که مساحت سطح خارجی منتجه آن مشابه مجموع مساحتهای سطح تک تک اجزا است.

[منبع: استاندارد ملی ایران- ایزو شماره ۱-۸۰۰۰۴]

۳-۲ کوته نوشت‌ها

XRD	X-Ray Diffraction	پراش پرتو ایکس
SEM	Scanning Electron Microscopy	میکروسکوپ الکترونی روبشی
FESEM	Field Emission Scanning Electron Microscopy	میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی
TEM	Transmission Electron Microscopy	میکروسکوپ الکترونی عبوری
SAED	Selected Area Electron Diffraction	پراش الکترونی سطح انتخابی
DLS	Dinamic Light Scattering	پراکندگی نور دینامیکی
BET	Brunauer-Emmett-Teller method	هم دما برونوئر- امت- تلر (روش آنالیز سطح ویژه)
ICP	Inductive Coupled Plasma	پلاسمای جفت‌شده القائی
AAS	Atomic absorption spectrometry	طیف سنجی جذب اتمی

EDS	Energy Dispersive Spectroscopy	آنالیز طیف‌سنجی پرتو ایکس بر اساس توزیع انرژی
XRF	X-Ray Fluorescence	آنالیز فلوئورسانس پرتو ایکس
XPS	X-ray photoelectron spectrometry	طیف‌بینی فوتوالکترونی پرتو ایکس
FTIR	Fourier Transform Infra-Red Spectroscopy	طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه

۴ موارد مهم در ارتباط با افزودن نانومواد به مخلوط‌های سیمانی

مخلوط‌های سیمانی عموما حاوی عنصر اصلی سیمان می‌باشند که به همراه آب، محصولات واکنش را تشکیل داده و موجب پیوستگی کل مجموعه مخلوط می‌شود. تحقیقات گسترده انجام شده در ارتباط با افزودن نانوذرات به مخلوط‌های سیمانی حاکی از آن است که ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و ساختاری نانوذرات مانند اندازه ذرات، ریخت‌شناسی[1] ذرات، سطح ویژه نانوذرات، ساختار بلوری و درجه بلورینگی بر خواص آنها تاثیرات قابل توجهی دارد. باتوجه به تنوع اجزاء مخلوط‌های سیمانی و پیچیدگی‌های فرآیند مخلوط شوندگی نانوذرات و واکنش‌های شیمیایی مرتبط، تبیین کمی و دقیق مقادیر پارامترهای فوق آسان نیست. البته ملاحظات مهم ذیل در ارتباط با فرآوری تکرارپذیر مخلوط‌های سیمانی حاوی نانوذرات باید موردتوجه قرار گیرد:

الف- نانومواد عموما به‌صورت نانوذرات و یا نانوکلوئیدها به این مخلوط‌ها به هنگام آمیزه‌سازی افزوده می‌شود. اندازه نانوذرات در خواص مکانیکی نمونه‌های تهیه‌شده نقش مهمی را ایفا می‌کند. با توجه به سازوکارهای عملکرد نانوذرات در بهبود خواص سیمان (پیوست ت)، با انتخاب مناسب اندازه سطح ویژه و ریخت‌شناسی نانوذرات می‌توان به یک ساختار متراکم با مقاومت بالا دست یافت. درحالی‌که کلوخه‌شدن نانوذرات و یا عدم اختلاط و توزیع و پراکندگی نامناسب نانوذرات در خمیر مخلوط‌های سیمانی، منجر به اثرات نامطلوبی بر روی خواص و عملکرد مخلوط‌های سیمانی می‌شود. لذا انتخاب بهینه پارامترهای فوق الذکر و طراحی مناسب فرایند اختلاط جهت دستیابی به شرائط بهینه خواص مکانیکی محصولات تولیدی ضروری می‌باشد. در مورد استفاده از نانو سیلیس به تنهایی به‌عنوان پرکاربردترین نانوذرات در صنعت سیمان، تحقیقات گسترده انجام شده موید موارد ذیل می‌باشند:

۱- نوع، غلظت (درمورد نانوکلوئیدها) و اندازه نانوذرات تاثیر مهمی بر مقاومت فشاری مخلوط‌های سیمانی دارند. با افزایش درصد به‌کارگیری نانوذرات سیلیس تا حد مشخصی مقاومت فشاری مخلوط‌های سیمانی افزایش می‌یابد.

1- Morphology

۲- حضور نانوذرات سیلیس حتی در مقادیر کم، نفوذپذیری دربرابر آب و یون‌های کلراید را در مخلوط‌های سیمانی کاهش می‌دهد.

ب- غالبا نحوه اضافه کردن نانوذرات به دو صورت انجام می‌شود: به‌صورت جایگزینی جزئی[1] با سیمان و به‌صورت افزونه[2] به مقدار سیمان که در هر دو حالت این مقدار براساس درصد وزنی سیمان محاسبه می‌شود. در بخش‌های بعد و پیوست ب، روش‌های معمول جهت مخلوط کردن همگن و یکنواخت نانوذرات در مخلوط‌های سیمانی ارائه شده است.

پ- نانوذرات مورد استفاده می‌توانند حاوی گروه‌های عاملی[3] در سطح باشند.

۵ ویژگی‌های نانوذرات پودری مورد استفاده در مخلوط‌های سیمانی

مشخصات ساختاری، فیزیکی و شیمیایی انواع نانوذرات پودری مورد استفاده در مخلوط‌های سیمانی شامل محدوده اندازه ذرات، سطح ویژه، چگالی، خلوص نانوذرات مورد استفاده در مخلوط‌های سیمانی در جداول ۱ تا ۳ ارائه شده است.

جدول ۱ - ویژگی‌های ساختاری نانوذرات پودری شکل

خواص / ویژگی‌ها	روش‌های اندازه گیری توصیه شده/ استانداردهای مرتبط	سایر روش‌ها/ استانداردهای مرتبط
ساختار بلوری	XRD	TEM (SAED)
	ISIRI 21951-1 EN 13925-1 EN 13925-2 EN 13925-3	ISIRI 21950-2

جدول ۲ - ویژگی‌های فیزیکی نانوذرات پودری شکل

خواص / ویژگی‌ها	روش‌های اندازه گیری توصیه شده / استانداردهای مرتبط	سایر روش‌ها / استانداردهای مرتبط
اندازه نانوذرات	SEM/FESEM	TEM/FESEM
	ISIRI 21259	ISIRI 21950-2 ISIRI 8201-3 ISO 9276-2
توزیع اندازه ذرات	SEM/FESEM	-
	ISIRI 21259	

1- Partial replacement

2 - Admixture

3- Functional group

نسبت منظری	SEM/FESEM	TEM
	ISIRI 21259	ISIRI 21950-2
ریخت‌شناسی	SEM/ FESEM	TEM
	ISIRI 21259	ISIRI 21950-2 ISO 9276-6
مساحت سطح ویژه	BET	-
	ISIRI 12658 (مخصوص پودرهای سرامیکی) ISO 9277	
چگالی	-	-
	ISIRI 12668-1 ISIRI 12668-2 (پودر سرامیکی)	

جدول ۳ - ویژگی‌های شیمیایی نانوذرات پودری شکل

خواص / ویژگی‌ها	روش‌های اندازه گیری توصیه شده/ استانداردهای مرتبط	سایر روش‌ها/ استانداردهای مرتبط
ترکیب شیمیایی	ICP SEM/EDX	XRF/XPS/AAS
	ISIRI 14095 (استاندارد EDX مخصوص نانولوله‌های کربنی)	ISO 20903
خلوص شیمایی	ICP/AAS	ICP mass
	-	-
گروه‌های عاملی	FTIR	XPS
	-	-

۶ ویژگی‌های نانوذرات کلوئیدی مورد استفاده در مخلوط‌های سیمانی

در جداول ۴ و ۵ مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانوذرات کلوئیدی به همراه روش‌های آزمون آن‌ها ارائه شده است.

از جمله نانوذرات کلوئیدی متداول و مورداستفاده جهت بهبود خواص ملات‌های سیمانی، نانو سیلیس کلوئیدی می‌باشد. خواص فیزیکی نوعی از نانو سیلیس کلوئیدی و تاثیر آن بر خواص مکانیکی و دوام مخلوط‌های سیمانی در جداول پ-۳ و پ-۴ ارائه شده است.

جدول ۴ - ویژگی‌های فیزیکی نانوذرات کلوئیدی

خواص / ویژگی‌ها	روش‌های اندازه گیری توصیه شده / استانداردهای مرتبط	سایر روش‌ها / استانداردهای مرتبط
اندازه نانوذرات	SEM/ FESEM Image analysis	TEM Image analysis
	ISIRI 21259	ISIRI 21950-2 ISIRI 8201-3 ISO 9276-2
قطر هیدرودینامیکی نانوذرات/ توزیع اندازه ذرات	DLS	-
	ISIRI 21304 ISO 22412:2017	
ریخت شناسی	SEM/ FESEM	TEM
	ISIRI 21259	ISIRI 21950-2 ISO 9276-6

جدول ۵ - ویژگی‌های شیمیایی نانوکلوئید

خواص / ویژگی‌ها	روش‌های اندازه‌گیری	سایر روش‌ها
ترکیب شیمیایی	ICP	XRF/XPS/AAS
	-	ISO 20903
pH	pH متر	-
غلظت	ICP/ AAS	-
پایداری	ISO/TR 13097:2013	-

۷ خواص مخلوط‌های سیمانی حاوی نانوذرات و بررسی آزمون‌های عملکرد آن‌ها

با توجه به تاثیر انواع نانوذرات بر خواص مخلوط‌های سیمانی از قبیل خمیر سیمان سخت‌شده و ملات سیمانی، در جداول ۷ و ۸ خواص مکانیکی و آزمون‌های عملکرد مخلوط‌های سیمانی ارائه شده است.

یادآوری- لازم به ذکر است از آنجا که نانوذرات به‌عنوان یک افزودنی به مخلوط‌های سیمانی اضافه می‌شود، جهت ارزیابی آزمون‌های عملکردی این مخلوط‌ها، می‌توان از استانداردهایی که پیش‌تر در این زمینه تدوین شده است، استفاده نمود.

جدول ۶ - خواص فیزیکی ملات‌های سیمانی

خواص / ویژگی‌ها	روش‌های اندازه‌گیری توصیه شده/ استانداردهای مرتبط
تخلخل	ISIRI 12658 ISO 9277

جدول ۷ - خواص مکانیکی ملات‌های سیمانی

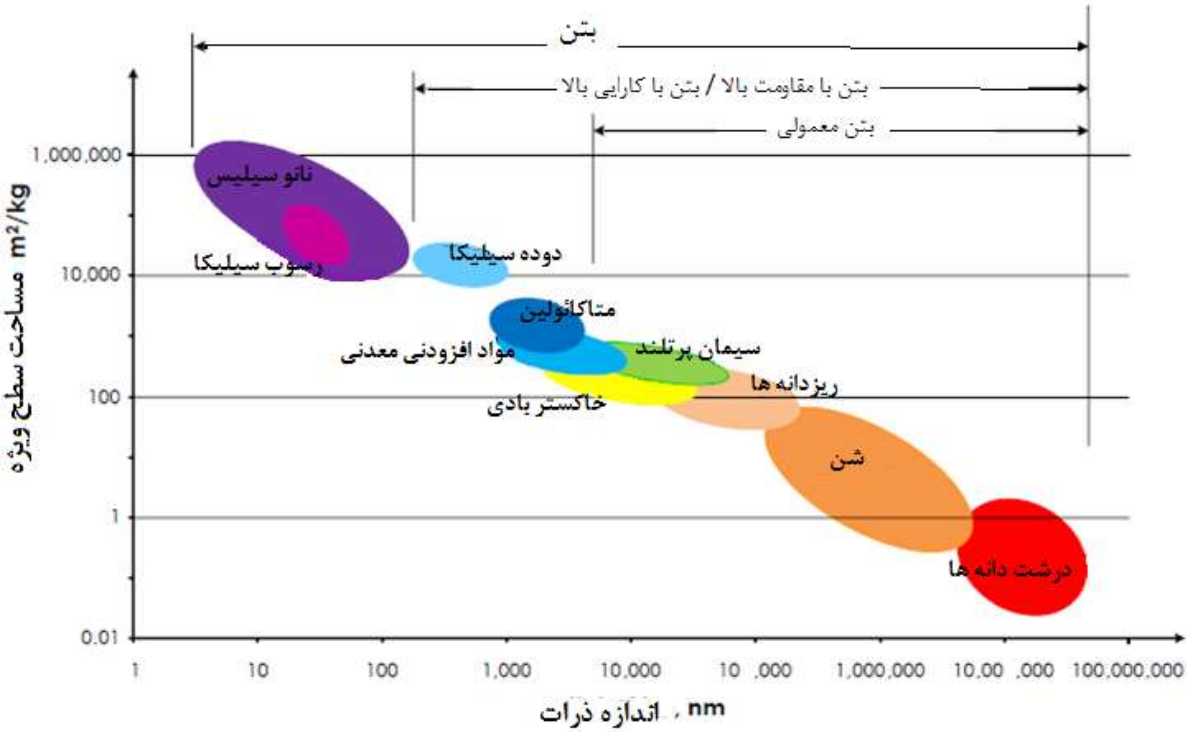
خواص / ویژگی‌ها	استانداردهای مرتبط
مقاومت خمشی	ISIRI 21087
مقاومت فشاری	ISIRI 21082
مقاومت پیوستگی	BS EN 1052-3
مقاومت چسبندگی	BS EN 1015
مدول ارتجاعی	ISIRI 21087

جدول ۸ - آزمون‌های عملکرد مخلوط‌های سیمانی (ملات)

خواص / ویژگی‌ها	روش‌های اندازه گیری	استانداردهای مرتبط
پایداری	استفاده از میز جریان	BS EN 1015
دوام	نفوذ آب	BS EN 1015-18
	نفوذ بخار آب	BS EN 1015-19
	تسریع مهاجرت یون‌های کلراید	RCMT
	نفوذپذیری یون‌های سولفات	ASTM C 1012
مقاومت در برابر یخ زدگی	چرخه‌های یخ زدن و آب شدن	ISIRI 19227
جذب آب	حجمی موئینگی	ISIRI 19895
مقاومت دربرابر حرارت	-	BS EN 13501-1
سایش	-	BS EN 13892-4(1)

پیوست الف
(پیوست آگاهی‌دهنده)
مشخصات فیزیکی برخی از انواع نانوپودرها

الف-۱ اندازه ذرات و مساحت سطح ویژه مربوط به مصالح بتنی در شکل الف-۱ نشان داده شده است [1].



شکل الف-۱- نمودار اندازه ذرات و مساحت سطح ویژه مربوط به مصالح بتنی

الف-۲ اندازه نانوذرات مورداستفاده دراغلب گزارش‌های معتبر علمی کمتر از ۵۰ nm و غالبا در محدوده زیر ۲۰ nm مطرح گردیده است. در جدول زیر متداول‌ترین نانوذرات مورد استفاده در مخلوط‌های سیمانی به همراه مشخصات فیزیکی آن‌ها که در مراجع گزارش شده، گردآوری شده است [3],[2].

جدول الف-۱- محدوده مشخصات فیزیکی برخی از انواع نانوپودرهای مورد استفاده در مخلوط‌های سیمانی

نانو پودر	خلوص شیمیایی ٪	متوسط اندازه ذرات (قطر) nm	چگالی پودری g/cm^3	مساحت سطح ویژه m^2/g
نانو سیلیس	۹۹/۹	۵-۴۰	۰/۰۵-۰/۱۵	۵۰-۷۰۰
نانو تیتانیا	۹۹/۹	۱۰-۲۰	۰/۰۴-۰/۰۶	۱۹۰-۲۹۰
نانو آلومینا	۹۹/۹	۱۰-۴۰	۰/۱-۰/۱۲	۱۵۰-۲۰۰
نانو اکسیدآهن	۹۹/۹	۵-۲۰	۰/۰۵-۰/۱۵	۱۵۰-۷۰۰
نانو اکسیدروی	۹۹/۹	۵-۴۰	۰/۰۵-۰/۱۵	۵۰-۷۰۰
نانو کربنات کلسیم	۹۹/۹	۵-۴۰	۰/۰۵-۰/۱۵	۵۰-۷۰۰
نانورس	۹۹/۹	۵-۴۰	۰/۰۵-۰/۱۵	۵۰-۷۰۰
نانولوله کربنی	۹۹/۹	۰/۴-۱/۲	(خمیرسیمان به‌همراه نانولوله) ۲/۱۷-۲/۲۹	(خمیرسیمان به‌همراه نانولوله) ۲۵

پیوست ب
(آگاهی دهنده)
روش‌های اختلاط

ب- ۱ روش‌های اختلاط همگن و یکنواخت (پخش) نانوذرات پودری و نانوکلوئیدی در مخلوط‌های سیمانی

در این بخش نحوه و روش‌های پخش یکنواخت نانوذرات معرفی می‌شود. این روش‌ها مبتنی بر شکستن ناگهانی کلوخه‌های بزرگ به ذرات کوچک با اعمال فشار بسیار زیاد و یا اعمال جدایش به‌طور پیوسته بر ذرات کوچک‌تر در محدوده فشار کمتر است. عموما روش مورد استفاده در این ارتباط پراکندگی نانوذرات در آب و پس از آن اختلاط محلول مذکور در سیمان می‌باشد.

براساس ادبیات علمی مرتبط با موضوع آمیزه سازی و اختلاط نانوذرات پودری و نانوکلوئیدی عمدتا دو روش مبتنی بر اختلاط مکانیکی توسط همزن‌های مکانیکی و روش اختلاط فراصوت می‌باشد. در ذیل به اختصار در مورد هر یک از روش‌های فوق توضیحاتی ارائه گردیده است. لازم به ذکراست که این روش‌ها عمدتا در مقیاس آزمایشگاهی و نیمه صنعتی مورد استفاده قرار گرفته اند.

ب-۲ اختلاط نانوپودرها و آب به روش مکانیکی

در این روش از مخلوط کن‌های مکانیکی استفاده می‌شود. روند کامل نحوه اختلاط به این روش در استاندارد ASTM C305 برای مخلوط‌های سیمانی ذکر شده است.

ب-۳ اختلاط نانوپودرها و آب به روش فراصوتی

در این روش نانوپودرها و آب از طریق انرژی فراصوتی که از طریق کاوند[1] دستگاه فراصوتی به آب منتقل می‌شود با هم مخلوط می‌شوند.

به‌منظور بهبود پراکندگی نانوذرات در خمیرهای سیمانی از ماده فعال‌کننده سطحی که منجر به پخش یکنواخت نانومواد می‌شود نیز می‌توان استفاده کرد. در این روش به دلیل حضور نیروهای بین ذره‌ای شامل نیروهای الکتروستاتیکی و استریک[2] در سطوح نانوذرات، امکان توزیع یکنواخت نانوذرات فراهم می‌شود.

همچنین، لازم به ذکر است که استفاده از فوق روان‌کننده‌های مناسب به عنوان یک روش متداول جهت پخش یکنواخت نانوذرات در خمیر سیمان مورداستفاده قرار می‌گیرد. عموما نانوذرات کارائی ملات‌های سیمانی را کاهش می‌دهند.

1- Probe
2 - Steric and Electrostatic forces

پیوست پ
(آگاهی دهنده)
تاثیر نانوذرات بر مخلوط‌های سیمانی

تاثیر نانوذرات در مخلوط‌های سیمانی در جداول پ-۱ تا پ-۴ نشان داده شده است.

جدول پ-۱- تاثیر نانوذرات پودری بر خواص خمیر سیمان سخت شده [6]،[33] ،[34]

نانومواد	مدول ارتجاعی	نفوذپذیری یون‌های کلرید	مقاومت کششی	مقاومت خمشی	مقاومت فشاری
نانو سیلیس	*	کاهش	*	افزایش	افزایش
نانو تیتانیا	*	کاهش	*	*	افزایش
نانو آلومینا	*	کاهش	*	*	*
نانو اکسیدآهن	*	کاهش	*	*	*
نانو اکسیدروی	*	کاهش	*	*	*
نانو کربنات کلسیم	*	*	*	*	*
نانورس	*	کاهش	*	*	*
نانو اکسید مس	*	کاهش	*	*	*
نانولوله کربنی/نانوالیاف کربنی	افزایش	کاهش	افزایش	افزایش	افزایش

* اطلاعات کافی نیست.

جدول پ-۲- تاثیر نانوذرات پودری بر خواص ملات سیمان [6]،[8] ،[33] ،[34]

نانو مواد	مدول ارتجاعی	نفوذپذیری یون‌های کلرید	مقاومت کششی	مقاومت خمشی	مقاومت فشاری
نانو سیلیس	*	کاهش	افزایش	افزایش	افزایش
نانو تیتانیا	*	کاهش	*	*	*
نانو آلومینا	*	کاهش	افزایش	افزایش	افزایش
نانو اکسیدآهن	*	کاهش	افزایش	افزایش	افزایش
نانو اکسیدروی	*	کاهش	*	*	افزایش
نانو کربنات کلسیم	*	*	*	*	*
نانورس	*	کاهش	افزایش	*	افزایش
نانو اکسید مس	*	کاهش	*	*	*
نانولوله کربنی/نانوالیاف کربنی (پخش شدگی یکنواخت بدون انباشتگی و کنترل مناسب جمع شدگی)	افزایش	کاهش	افزایش	افزایش	افزایش

* اطلاعات کافی نیست.

جدول پ-۳- خواص فیزیکی نوعی نانو سیلیس کلوئیدی مورد استفاده جهت بهبود خواص مخلوط‌های سیمانی [18]، [20]، [21]، [24]

سیلیس (٪)	چگالی g/cm^3	متوسط اندازه ذرات nm	مساحت سطح ویژه m^2/g	وزن مخصوص
۹۹/۴	۱/۲	۵۰-۶۰	۸۰	۱/۴

جدول پ-۴- تاثیر نوعی نانو سیلیس کلوئیدی بر خواص مخلوط‌های سیمانی [18]، [20]، [21]، [24]

مقاومت دربرابر سایش	دوام در برابر نفوذپذیری یون‌های کلرید	مقاومت خمشی	مقاومت کششی	مقاومت فشاری
افزایش	بهبود	افزایش	افزایش	افزایش

پیوست ت
(آگاهی دهنده)
ساز و کار عملکرد نانوذرات در بهبود خواص سیمان

نانوذرات با ترکیبات شیمیایی مختلف، ساز و کارهای عملکردی متفاوتی در مخلوط‌های سیمانی دارند. برای مثال نانوذرات اکسیدهای برخی فلزات مانند تیتانیم، آهن، سیلیسیم، آلومینیم علاوه بر اثر پرکنندگی حفرات می‌توانند در واکنش‌های پوزولانی[1] شرکت کنند و منجر به تشکیل بیشتر ژل‌های مشابه کلسیم-سیلیکات – هیدرات (C-S-H) شوند. در واقع نانوذرات به دلیل نسبت سطح به حجم بالا آنها واکنش پوزولانی را تسریع می‌کنند. اثر پرکنندگی و واکنش پوزولانی به میزان قابل‌توجهی فعالیت شیمیایی را تسهیل می‌بخشد. بنابراین، ساختار حفرات ماده با تشکیل یک میکروساختار فشرده بهبود می‌یابد. از طرفی، پیوند بین سنگ دانه‌ها و خمیر سیمان در منطقه انتقال میانا[2] (ITZ) توسط نانوذرات تقویت می‌شود و در نهایت منجر به بهبود خصوصیات مقاومت پیوند در مخلوط می‌شود. سختی، مقاومت خمشی، برشی و کششی مواد پایه سیمانی در حضور نانوذرات در مقایسه با نمونه‌های مرجع (نمونه‌های بدون استفاده از نانوذرات) بهبود می‌یابد و حضور این نانوذرات از رشد ترک جلوگیری کرده و اثرات قفل کنندگی مابین صفحات لغزشی ایجاد می‌کند. همچنین، سطح ویژه نسبتا بالای نانوذرات، در فرایند آبگیری سیمان (هیدراسیون)[3] بسیار موثر است. نانومواد منجر به پیشرفت سریع فرآیند آب‌گیری سیمان می‌شوند. به‌علاوه، تشکیل ژل‌های C-S-H و مشابه آن، میکروحفرات را در خمیر پر می‌کند. همچنین، در مورد نانولوله‌های کربنی، نقشی شبیه به الیاف مسلح کننده را ایفا می‌کنند و یا نانورس‌ها عملکرد پرکنندگی و قرارگیری در تخلخل‌های نانومتری موجود در ریزساختار خمیر سیمان را دارند که تا حدی منجر به بهبود ویژگی‌های مقاومتی و دوام ملات می‌شوند.

1 - Pozzolanic reaction
2 - Interfacial transition zone
3 - Hydration

کتابنامه

[1]. Sobolev K, Ferrada-Gutiérrez M. How nanotechnology can change theconcrete world: Part 1. Am Ceram Soc Bull 2005;84(10):14–7.9. Hosseini et al. , Effects of nanoclay particles Vol. 21, No. 2, 127–147

[2]. Jo, B.-W., et al., *Characteristics of cement mortar with nano-SiO2 particles.* Construction and Building Materials, 2007. **21**(6): p. 1351-1355.

[3]. Zhang, M.-h. and H. Li, *Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement.* Construction and Building Materials, 2011. **25**(2): p. 608-616.

[4]. Zhang, M.-H. and J. Islam, *Use of nano-silica to reduce setting time and increase early strength of concretes with high volumes of fly ash or slag.* Construction and Building Materials, 2012. **29**: p. 573-580.

[5]. Shekari, A.H. and M.S. Razzaghi, *Influence of Nano Particles on Durability and Mechanical Properties of High Performance Concrete.* Procedia Engineering, 2011. **14**: p. 3036-3041.

[6]. Sanchez, F. and K. Sobolev, *Nanotechnology in concrete – A review.* Construction and Building Materials, 2010. **24**(11): p. 2060-2071.

[7]. Khotbehsara, M.M., et al., *Effect of nano-CuO and fly ash on the properties of self-compacting mortar.* Construction and Building Materials, 2015. **94**: p. 758-766.

[8].Siddique, R. and A. Mehta, *Effect of carbon nanotubes on properties of cement mortars.* Construction and Building Materials, 2014. **50**: p. 116-129.

[9]. Siddique R. et. al. , Effect of carbon nanotubes on properties of cement mortars, Construction and Building Materials, 2014.

[10]. Li H, Zhang M-h, Ou J-p. Abrasion resistance of concrete containing nanoparticles for pavement. Wear 2006;260(11–12):1262–6.

[11]. Li H, Zhang M-h, Ou J-p. Flexural fatigue performance of concrete containing nano-particles for pavement. Int J Fatig 2007;29(7):1292–301.

[12]. Li Z, Wang H, He S, Lu Y, Wang M. Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite. Mater Lett 2006;60(3):356–9.

[13]. Ajayan PM. Nanotubes from carbon. Chem Rev 1999;99:1787–99.

[14]. Salvetat J-P, Bonard J-M, Thomson NH, Kulik AJ, Forro L, Benoit W, et al. Mechanical properties of carbon nanotubes. Appl Phys Mater Sci Process 1999;69:255–60.

[15]. Srivastava D, Wei C, Cho K. Nanomechanics of carbon nanotubes and composites. Appl Mech Rev 2003;56:215–30.

[16]. Makar JM, Margeson J, Luh J. Carbon nanotube/cement composites – early results and potential applications. In: Banthia N, Uomoto T, Bentur A, Shah SP, editors. Proceedings of 3rd international conference on construction materials: performance, innovations and structural implications. Vancouver, BC August 22–24, 2005. p. 1–10.

[17]. Li GY, Wang PM, Zhao X. Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites. Cem Concr Compos 2007;29(5):377–82.

[18]. S. Chithra, S.R.R. Senthil Kumar, K. Chinnaraju. The effect of Colloidal Nano-silica on workability, mechanicaland durability properties of High Performance Concrete with Copper slag as partial fine aggregate, Construction and Building Materials 113 (2016) 794–804

[19]. E. García-Taengua, M. Sonebi, K.M.A. Hossain, M. Lachemi, J. Khatib. Effects of the addition of nanosilica on the rheology, hydration anddevelopment of the compressive strength of cement mortars, Composites Part B 81 (2015) 120-129.

[20]. Deyu Kong, David J. Corr, Pengkun Hou, Yang Yang, Surendra P. Shah. Influence of colloidal silica sol on fresh properties of cement paste as compared to nano-silica powder with agglomerates in micron-scale, *Cement and Concrete Composites, 2015*
[21]. R. Bani Ardalan, N. Jamshidi, H. Arabameri , A. Joshaghani, M. Mehrinejade, P. Sharafi. Enhancing the permeability and abrasion resistance of concrete using colloidal nano-SiO2 oxide and spraying nanosilicon practices, Construction and Building Materials 146 (2017) 128–135
[22]. Shama Parveen, Sohel Rana, and Raul Fangueiro, A Review on Nanomaterial Dispersion, Microstructure,and Mechanical Properties of Carbon Nanotube and Nanofiber Reinforced Cementitious Composites, Journal of Nanomaterials, Hindawi Publishing Corporation, 2013.
[23]. Z. S. Metaxa, J.-W. T. Seo, M. S. Konsta-Gdoutos, M. C.Hersam, and S. P. Shah, "Highly concentrated carbon nanotube admixture for nano-fiber reinforced cementitious materials, *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, no. 5, pp. 612–617, 2012.
[24]. S. Chithra , S.R.R. Senthil Kumar , K. Chinnaraju , The effect of Colloidal Nano-silica on workability, mechanical and durability properties of High Performance Concrete with Copper slag as partial fine aggregate, Construction and Building Materials, 2016.
[25]. B.H. Bharatkumar, R. Narayanan, B.K. Raghuprasad, D.S. Ramachandramurthy, Mix proportioning of high performance concrete, Cem. Concr. Compos. 23 (1) (2001) 71–80.
[26]. Ping.-Kun. Chang, Yaw.-Nan. Peng, Influence of mixing techniques on properties of high performance concrete, Cem. Concr. Res. 31 (1) (2001) 87–95.
[27]. A.M. Neville, Properties of Concrete, fourth ed., Pearson Education, 2008.
[28]. P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, third ed., Mc-Graw hill Education, 2006.
[29]. P.C. Aitcin, High Performance Concrete, E & FN SPON, 1998.
[30]. Gao Peiwei, Deng Min, Feng Naiqian, The influence of superplasticizer and superfine mineral powder on the flexibility, strength and durability of HPC, Cem. Concr. Res. 31 (2001) 703–706.
[31]. Mathialagan Sumesh, U. Johnson Alengaram, Mohd Zamin Jumaat, Kim Hung Mo, Mohammed Fouad Alnahhal, Incorporation of nano-materials in cement composite and geopolymer based paste and mortar – A review, Construction and Building Materials, 2017.
[32]. M. Mahdikhani , A.A. Ramezanianpour, "Mechanical properties and durability of self consolidating Cementitious materials incorporating nano silica and silica fume" Computers and Concrete, Vol. 14, No. 2, June 12,2014. 175-191
[33]. M. Zahedi, A.A. Ramezanianpour, A.M. Ramezanianpour, "Evaluation of the mechanical properties and durability of cement mortars containing nanosilica and rice husk ash under chloride ion penetration", Construction and Building Materials78(2015)354-361
[34]. H. Asgari, A.A. Ramezanianpour, H. Butt, "effect of water and nano-silica solution on the early stages cement hydration", Construction and building materials, 129 (2016) 11-24
[35]. M. Jafarbeglou, M. Abdouss, A.A. Ramezanianpour,"Nanoscience and Nano Engineering in Concrete Advances A Review", Int. J. Nanosci. Nanotechnol., Vol.11, No.4, Dec. 2015, pp.261-272
[36]. A.H. Korayem, N. Tourani , M. Zakertabrizi, A.M. Sabziparvar , W.H. Duan, "A review of dispersion of nanoparticles in cementitious matrices:Nanoparticle geometry perspective", Construction and Building Materials, vol 153, 2017, pp. 346-357.
[۳۷] مصطفی آدرسی و همکاران، بررسی تاثیر نانولوله کربن بر عملکرد دینامیک حسگرهای هوشمند بتنی، مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، سال دوم، شماره سوم، پائیز ۹۵