مجلهٔ تحقیقات بتن
زمستان۸۹، سال سوم، شمارهٔ۲
ص۱۶-۹
تاریخ دریافت: ۸۹/۹/۲ ۵
تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۱/۳۰

توسعهٔ ساخت المان‌های کم‌ضخامت سازه‌ای با بهره‌گیری از نانو ذرات SiO_2

علیرضا خالو
استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
پیام حسینی
مسؤول واحد پژوهش، انستیتو بتن و مصالح پیشرفته، مرکز تحقیقات فناوری‌های پیشرفته طلوع، دانشگاه صنعتی شریف
p.hosseini@civil.sharif.edu
عباس بوشهریان
مسؤول بخش پژوهش‌های بنیادی، انستیتو بتن و مصالح پیشرفته، مرکز تحقیقات فناوری‌های طلوع، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

در این مقاله به بررسی عملکرد ملات با کارایی بالا جهت استفاده در بتن‌ریزی المان‌های کم ضخامت فروسمنت با بـه‌کـارگیری ذرات نانوسیلیس، پرداخته شده است. پارامترهای متغیر شامل مقدار نانو سیلیس نسبت به مقدار سیمان در مخلوط ملات سیمان پرتلند معمولی (۱٪-۲٪-۳٪) و فوق روان‌کنندهٔ کاهندهٔ آب برای رسیدن به کارپذیری یکسان هستند. برای مقایسهٔ مخلوط‌ها بـا هـم، مـلات‌هـایی بـا کارایی بالا و یکسان ساخته شد که این امر در جهت پمپ‌پذیری یکسان آنها برای ساخت المان‌های فروسمنت می‌باشد. عملکرد ملات‌ها با بررسی مقاومت فشاری و روند کسب مقاومت فشاری صورت گرفت. همچنین ریز ساختار ملات‌ها با انجام تست میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: فرو سمنت، نانو سیلیس، مقاومت فشاری، SEM، روند کسب مقاومت.

۱- مقدمه

فروسمنت یکی از انواع دیوارهای بتن مسلح جدار نازک می‌باشد. این نوع دیوارها از ملات‌های سیمان هیدرولیکی که توسط توری‌هایی سراسری و با قطر کم که در فواصل بسیار نزدیک به هم قرار گرفته‌اند، تشکیل می‌گردد [۱]. توری‌های مورد استفاده معمولاً از نوع فلزی، پلاستیکی یا پارچه‌های بافته شده می‌باشند[۲-۴]. فروسمنت‌ها با توجه به قابلیت‌های بالای خود نظیر درجات زبری مختلف، شکل‌پذیری، دوام، مقاومت‌های مکانیکی و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی، بیشتر از انواع دیگر بتن‌هایی که در ساخت‌وساز به‌کار می‌روند، دارای کاربردهای متنوعی هستند [۴،۵]. از جمله قابلیت‌های فروسمنت‌ها می‌توان به کاربرد آنها در صنایع برای ساخت اولیهٔ ساختمان‌های صنعتی اشاره کرد[۶]. از طرفی به عنوان یک مادهٔ بسیار مناسب در ساخت خانه‌های ارزان قیمت نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند[۷،۸]. هم‌چنین می‌توانند به همراه سنگدانه‌های سبک در ساخت ساندویچ پانل‌های سازه‌ای سبک مورد استفاده قرار گیرد[۹]. بر همین اساس کارهای ساختمانی با فروسمنت در سراسر جهان در حال افزایش می‌باشد. کشورهایی نظیر آمریکا، کانادا، استرالیا، چین، هند، اندونزی، تایلند هم‌اکنون از این تکنولوژی استفاده می‌کنند. لازم به ذکر است عامل قیمت پایین و سادگی ساخت‌وساز سبب گردیده که این ماده در کشورهای در حال توسعه با رشد چشمگیری در ساخت مواجه گردد[۱]. موارد کاربرد عام این نوع بتن‌های مسلح شامل ساخت تانکر نگهداری آب، قایق‌ها و کشتی‌ها، سقف‌ها، سیلوها، سازه‌های دریایی شناور و لوله‌ها می‌شود[۱۳-۱۰].

در مقایسه با سایر بتن‌های مسلح، فروسمنت دارای یکنواختی و تقارن در دو جهت می‌باشد. این موضع سبب مقاومت خمشی و مدول گسیختگی بالا و همچنین مقاومت فوق‌العاده در مقابل ترک‌خوردگی فروسمنت می‌گردد[۱]. علاوه‌براین، به علت وجود بیش از حد توری و در نتیجهٔ آن، بالا رفتن مقاومت چسبندگی بین ملات و آرماتورها، نهایتاً ترک‌هایی با عرض کم را شاهد خواهیم بود[۴]. ساختار کلی فروسمنت بیش از ۹۵٪ به شرایط نمونهٔ نهایی به‌دست آمده بستگی دارد[۱۴]، که آن هم کاملاً به ترکیب و ساختار ملات آن وابسته است[۱۵]. بر همین اساس محققان زیادی بر روی خواص ملات‌های مورد کاربرد در ساخت فروسمنت پژوهش نموده‌اند[۱۹-۱۵].

نانو فناوری هم گرچه زمان اندکی است که در عرصهٔ بتن وارد گردیده، لیکن مقالات و تحقیقات بسیاری بر اثر بخش بودن نانو مواد و نانو پودرها بر ریزساختار و کلان ساختار بتن، دلالت دارند [۲۱ و ۲۰]. به دلیل اندازهٔ بسیار ریز نانوذرات، این مواد ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی منحصربه‌فردی نسبت به مصالح عادی از خود نشان می‌دهند. بر همین اساس، تمرکز بر روی کاربرد نانوذرات درشاخه‌های گوناگون مهندسی بسیار فزونی یافته است[۲۲]. با توجه به این موضوعات، محققان بسیاری اثرات کاربرد نانوذرات را در بتن بررسی کرده‌اند[۲۵-۲۳].

با توجه به مباحث مطرح شده، در این مقاله با کاربرد نانوذرات سیلیس به عنوان یک سوپرپوزولان در ملات‌های مورد کاربرد در فروسمنت، به بررسی رفتار این مواد در ساختار ملات‌های ویژه مورد نظر پرداخته شده است. به همین منظور، تست مقاومت فشاری به عنوان مهمترین ویژگی مکانیکی ملات و بتن، تست جذب آب به عنوان یک تست ساده و کارآمد جهت بررسی ویژگی‌های نفوذپذیری و دوامی و تست ریزساختار میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)[۱] جهت بررسی رفتار نانوذرات سیلیس در ماتریس ملات صورت پذیرفته است.

۲- مصالح، روند اختلاط و تست‌ها

۲- ۱- مصالح

مصالح مورد استفاده در این پژوهش عبارت‌انداز سیمان پرتلند Type I که مطابق با استاندارد ۳۸۹ ایران و توسط شرکت سیمان تهران ساخته شده است، ماسهٔ معمولی رودخانه‌ای با ۱٪ جذب آب که از معدن متوساک تهیه گردید. فوق‌روان کنندهٔ کاهندهٔ آب از نوع نفتالین سولفونات بوده که جهت پخش مناسب نانوذرات و دستیابی به کارایی بالا برای ملات‌ها به‌کار برده شد. این ماده از شرکت کیمیا نشان تاک تهیه گردیده است. هم‌چنین نانوذرات سیلیس مورد کاربرد از کشور هندوستان تهیه شده و دارای ۳۰٪ ذرات جامد محلول در آب می‌باشد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سیمان در جدول ۱ و نانوذرات سیلیس در جدول ۲ ذکر گردیده است.

۲-۲- روند اختلاط

طرح‌اختلاط ملات‌های فروسمنتی بر اساس آیین‌نامهٔ ACI 549 [۲،۳]، طراحی گردید. بر همین اساس، در ساخت نمونه‌ها، دو نسبت ماسه به سیمان ۲ و ۲/۵در نظر گرفته شد. همچنین برای هریک از این دو نسبت ۴ طرح اختلاط مختلف جهت بررسی کاربرد نانوذرات سیلیس ساخته شد. در هر دو سری طرح اختلاط، نسبت آب به مواد سیمانی برابر ۰/۳۵ و ثابت در نظر گرفته شد. از طرفی در هر سری، به ترتیب ۰، ۱، ۲ و ۳٪ نانوذرات سیلیس جایگزین عیار اولیهٔ سیمان ($۴۵۰\ kg/m^3$) گردیده است. نمودار دانه‌بندی ریزدانهٔ مصرفی مطابق محدودهٔ ذکر شده در ACI 549 در نمودار ۱ ذکر گردیده است. همچنین طرح‌های اختلاط مورد بررسی در این پژوهش در جدول ۳ بیان شده است. لازم به ذکر است که مقادیر مختلفی از فوق‌روان‌کننده کاهنده آب مورد استفاده قرار گرفته که این موضوع در جهت به‌دست آمدن ملات‌هایی با کارپذیری یکسان در نظر گرفته شد. چراکه ملات‌هایی که در فروسمنت به‌کار می‌روند معمولاً به صورت پاششی بر روی سطح مورد نظر افشانده می‌شوند و در نتیجه مقایسهٔ ملات‌هایی با کارپذیری یکسان می‌تواند معیار مناسبی برای مقایسهٔ ملات‌های فروسمنتی باشد.

برای ساخت ملات‌های مورد نظر، ابتدا آب اختلاط، فوق‌روان کنندهٔ کاهندهٔ آب و کلوییـد نانوسیلیس (در صورت وجود) با یکدیگر مخلوط گردیده، سپس به سیمان اضافه شده و در مخلوط‌کن ملات به مدت ۳۰ ثانیه با دور کند با یکدیگر مخلوط شدند. در نهایت ماسه در حالت اشباع با سطح خشک به خمیر به‌دست آمده اضافه گردید (در این حالت ماسه مرطوب ظرف مدت ۳۰ ثانیه به مخلوط‌کن در حال چرخش که در آن خمیر سیمان وجود داشت اضافه گردید.) و مجموعه با دور متوسط به مدت ۲ دقیقهٔ دیگر مخلوط شدند.

پس از ساخت، ملات‌های مورد نظر در قالب‌های مکعبی با ابعاد ۵۰ میلی‌متر ریخته شد. بعد از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از قالب خارج شده و برای عمل‌آوری مرطوب در آب قرار داده شدند. تست مقاومت فشاری در سنین مختلف عمل‌آوری (۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز) و تست جذب آب در سن ۲۸ روز، صورت پذیرفت. مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ASTM C109/C109M-02 و جذب آب بر اساس استاندارد BS 1881:Part122:1993 مورد آزمایش قرار گرفتند. در تست جذب آب، نمونه‌های ملات به مدت ۳۰ دقیقه در فشار اتمسفر در آب غوطه‌ور گردیده و با اندازه‌گیری اختلاف جرم در حالت خیس و خشک، مقدار جذب آب اندازه‌گیری شد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان

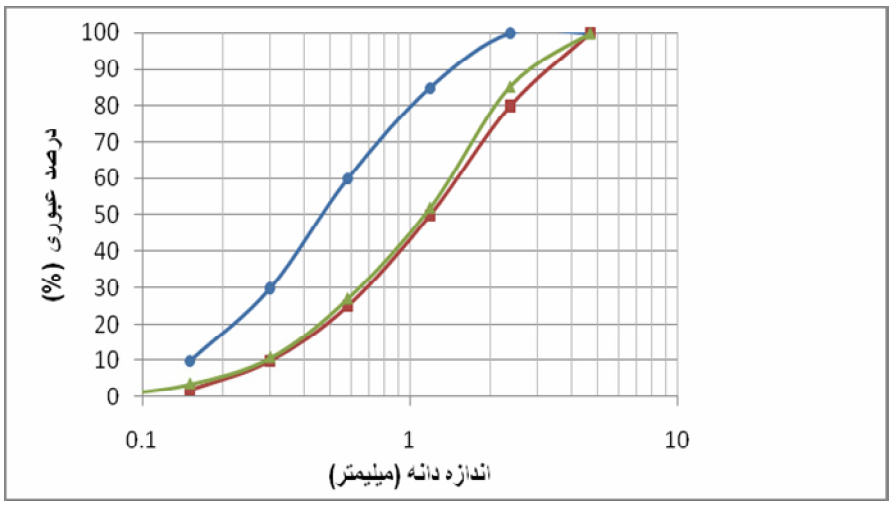
مصالح سیمانی	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Cl	SO_3	K_2O+Na_2O	L.O.I	اندازهٔ دانه (mm)	سطح ویژه (m^2/g)
سیمان	۲۱/۴	۶	۳/۴	۶۴	۱/۸	–	۱/۴	۱	۳	–	۳۱۱۰

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانوذرات سیلیس

چگالی ظاهری (gr/cm^3)	SiO_2 (%)	میانگین اندازهٔ ذرات (nm)	سطح ویژه (m^2/g)
۰/۲	> ۹۹/۹	۱۵±۵	۲۵۰۰۰۰±۲۰۰۰

جدول ۳- طرح‌اختلاط ملات‌های ساخته شده

شماره طرح	نسبت آب به مواد سیمانی	نسبت ماسه به سیمان	سیمان (gr)	آب (gr)	ماسه (gr)	نانوسیلیس (مقدار ذرات جامد) (gr)	فوق‌روان‌کننده کاهنده آب (gr)
۱	۰/۳۵	۲	۴۵۰	۱۵۷/۵	۹۰۰	۰	۰
۲	۰/۳۵	۲	۴۴۵/۵	۱۵۷/۵	۹۰۰	۴/۵	۰/۶۷۵
۳	۰/۳۵	۲	۴۴۱	۱۵۷/۵	۹۰۰	۹	۱/۵۷۵
۴	۰/۳۵	۲	۴۳۶/۵	۱۵۷/۵	۹۰۰	۱۳/۵	۲/۲۵
۵	۰/۳۵	۲,۵	۴۵۰	۱۵۷/۵	۱۱۲۵	۰	۰/۹
۶	۰/۳۵	۲,۵	۴۴۵/۵	۱۵۷/۵	۱۱۲۵	۴/۵	۱/۸
۷	۰/۳۵	۲,۵	۴۴۱	۱۵۷/۵	۱۱۲۵	۹	۲/۷
۸	۰/۳۵	۲,۵	۴۳۶/۵	۱۵۷/۵	۱۱۲۵	۱۳/۵	۳/۶



نمودار ۱- دانه‌بندی ماسه مطابق ACI 549

۳- نتایج و تحلیل

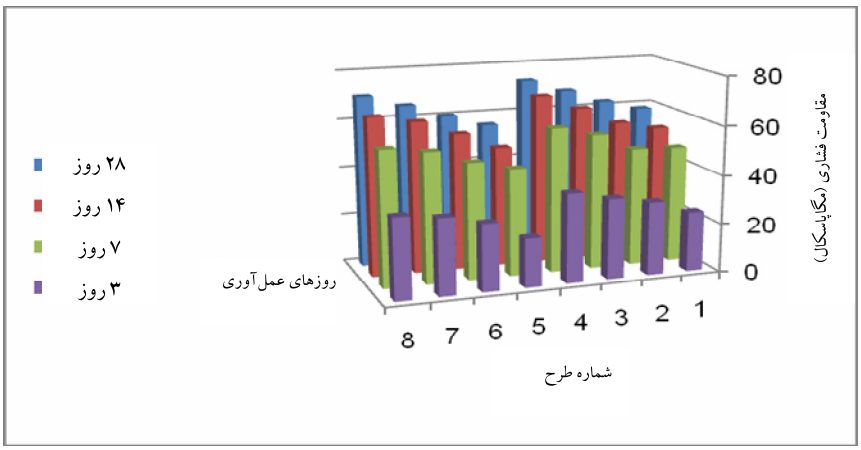
نتایج تست مقاومت فشاری و جذب آب در جدول ۴ و نمودارهای ۲ و۳ بیان گردیده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، با افزایش درصد نانوذرات سیلیس (از ۰٪ به ۳٪) مقاومت فشاری و جذب آب در هر سری از طرح‌های اختلاط بهبود می‌یابند. البته باید توجه کرد که مقدار بهبود یافته (افزایش در مقاومت فشاری و کاهش در جذب آب) در هر سری نسبت به سری دیگر و هر طرح نسبت به طرح دیگر متفاوت است. نکتهٔ قابل‌توجه کاهش مقاومت و افزایش جذب آب هر طرح در سری دوم (نسبت ماسه به سیمان ۲/۵) نسبت به طرح متناظر در سری اول (نسبت ماسه به سیمان ۲) می‌باشد.

از دلایل بهبود ویژگی‌های ملات‌ها (افزایش مقاومت و کاهش جذب آب) با افزایش درصد جایگزینی سیمان با نانوذرات سیلیس می‌توان به بهبود ریزساختار ملات‌ها در اثر حضور نانوذرات سیلیس اشاره کرد. نانوذرات سیلیس با توجه به عملکرد

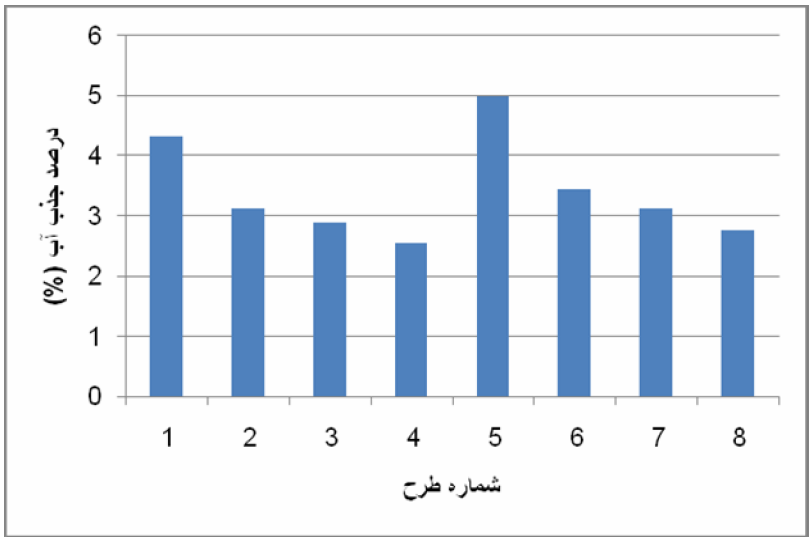
پوزولانی خود که دارای یک مکانیزم سه مرحله‌ای می‌باشد، به بهبود ریزساختار و در نتیجه ناحیهٔ انتقالی[۲] (ITZ) خمیر و سنگدانه کمک می‌کنند [۲۶]. اشکال ۱ تا ۳ به‌ترتیب تصویر SEM از ITZ طرح‌های ۱، ۲ و ۴ را نشان می‌دهند. با توجه به عملکرد سوپر پوزولانی نانوذرات سیلیس، ITZ دارای تخلخل کمتر و تراکم بیشتر و در نتیجه مقاومت بالاتر می‌گردد[۲۷،۲۲]. لذا همانگونه که در اشکال ۱تا ۳ مشاهده می‌گردد، با افزایش درصد نانوذرات سیلیس تخلخل ITZ کاهش یافته و این ناحیه متراکم‌تر می‌گردد. از طرفی افزایش مقاومت ITZ سبب بهبود مقاومت و ویژگی‌های دوامی خواهد گردید[۲۷،۲۲]. لذا با افزایش نانوذرات سیلیس تا مقادیر جایگزینی مشخص و کوچک، ویژگی‌های دوامی ملات بهبود خواهد یافت. نکتهٔ قابل توجه که در قبل بدان اشاره گردید، کاهش مقاومت و افزایش جذب آب هر طرح در سری دوم (نسبت ماسه به سیمان ۲,۵) نسبت به طرح متناظر در سری اول (نسبت ماسه به سیمان ۲) می‌باشد. از دلایل اصلی این موضوع می‌توان به کمبود مقدار سیمان مورد نیاز جهت چسباندن سنگدانه‌ها به یکدیگر در اثر افزایش مقدار سنگدانه‌ها با وجود مقدار ثابت سیمان اشاره کرد. همچنین افزایش ITZها در اثر افزایش مقادیر ریزدانه نیز امری مؤثر و قابل‌ملاحظه می‌باشد که از تأثیر مثبت مقدار مشخصی از نانوذرات سیلیس خواهد کاست. چراکه نانوذرات بیشتری (کمی بیشتر) به علت افزایش سطح سنگدانه‌ها در ملات و در نتیجه افزایش ITZها برای دستیابی به ویژگی‌های مقاومتی و دوامی یکسان مورد نیاز خواهند بود.

جدول ۴- نتایج تست‌های مقاومت فشاری و جذب آب ملات‌های فروسمنتی

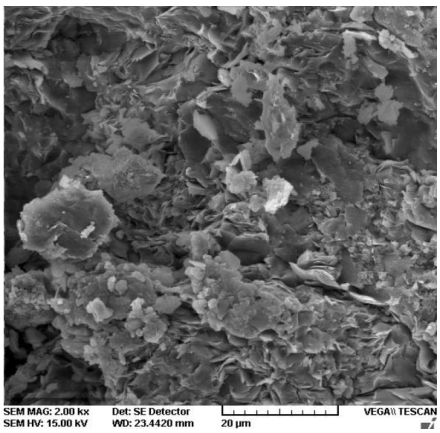
شمارهٔ طرح	روزهای عمل‌آوری				جذب آب (٪)
	۳	۷	۱۴	۲۸	
۱	۲۴/۶	۴۷/۹	۵۳/۱	۵۸/۷	۴/۳۲
۲	۳۰/۲	۴۸/۵	۵۶/۳	۶۲/۷	۳/۱۱
۳	۳۳/۱	۵۵/۵	۶۳/۵	۶۸/۲	۲/۸۸
۴	۳۶/۷	۵۹/۳	۶۹/۵	۷۳/۳	۲/۵۴
۵	۲۰/۱	۴۴/۱	۴۹/۳	۵۵/۷	۴/۹۸
۶	۲۷/۶	۴۷/۹	۵۶/۱	۶۰/۵	۳/۴۴
۷	۳۱/۴	۵۳/۴	۶۲/۲	۶۵/۸	۳/۱۲
۸	۳۳/۳	۵۵/۶	۶۵/۱	۷۰/۵	۲/۷۵



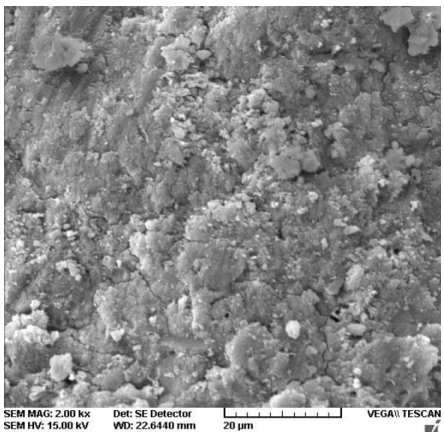
نمودار ۲- روند کسب مقاومت فشاری تمامی طرح‌ها



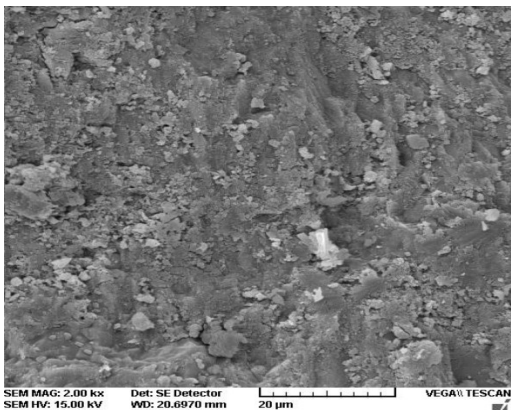
نمودار ۳- درصد جذب آب نمونه‌های ۲۸ روزه تمامی طرح‌ها



شکل ۱- ITZ طرح ۱



شکل ۲- ITZ طرح ۲



شکل ۳- ITZ طرح ۴

٤- نتیجه‌گیری

با توجه به نتیجه تست‌ها و بحث‌های مطرح شده، نتایج حاصله از انجام این پژوهش به شرح زیر می‌باشند:

- با افزایش نسبت ماسه به سیمان، مقاومت فشاری کاهش یافته و جذب آب ملات‌های فروسمنتی افزایش می‌یابد که البته این موضوع حتی با کاربرد نانوذرات سیلیس در ماتریس ملات‌ها نیز صادق است و تنها شدت آن تغییر می‌کند.

- با افزایش درصد جایگزینی سیمان با نانوذرات سیلیس (از ۰٪ به ۳٪)، ویژگی‌های ملات (مقاومت فشاری به عنوان نمایندهٔ ویژگی‌های مکانیکی و جذب آب به عنوان نمایندهٔ ویژگی‌های دوامی) بهبود می‌یابند.

- کاربرد نانوذرات سبب متراکم‌تر شدن و در نتیجه پرمقاومت شدن ITZ می‌گردد.

- روند کسب مقاومت در یک طرح اختلاط خاص با افزایش مقدار نانوذرات سیلیس تا حد ۳٪، افزایش یافته است.

٥- قدردانی

نویسندگان این مقاله برخود لازم می‌دانند از جناب آقای مهندس دهبیدی، مسؤول مرکز رشد فناوری‌های پیشرفته دانشگاه صنعتی شریف و دکتر آرام مسؤول مرکز تحقیقات فناوری‌های پیشرفته طلوع دانشگاه صنعتی شریف، به سبب حمایت‌های مادی و معنوی آنها تقدیر و تشکر نمایند.

٦-پانوشت

۱. Scanning Electron Microscopy

۲. Interfacial Transition Zone

۷- مراجع

[1].Shannag, M. J., Ziyyad, T.B.," Flexural response of ferrocement with fibrous cementitious matrices, "Construction and Building Materials, 1198-1205,21, 2007.

[2].ACI Committee 549, "State of the Art Report on Ferrocement," ACI 549–R97, in Manual of Concrete Practice, ACI, Detroit, pp. 26, 1997.

[3].ACI Committee 549-IR-93, Guide for the Design, Construction and Repair of Ferrocement, ACI 549-IR-88 and IR 93, in Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michiganand, p. 27, 1993, 1988.

[4].Naaman AE. "Ferrocement and laminated cementitious composites. Ann Arbor," Michigan: Techno Press 3000, p. 372; 2000.

[5].Memon NA, Salihuddin RS. "Ferrocement: a versatile composite structural material," Mehran University Research Journal of Engineering and Technology;25(1):9–18, 2006.

[6].Memon NA, Salihuddin RS. "Evolution of cement based composites," Proceedings of the third international conference on innovation in architecture, engineering and construction, vol. 1. Rotterdam: The Netherlands, p. 303–10; 2005.

[7].Mattone R. "Ferrocement in low cost housing: an application proposal (use of ferrocement in rural housing project)," Journal of Ferrocement 22(2):181–7, 1992.

[8].Arif M, Kaushik SK, Pankaj. "Experimental and analytical studies on flexural behaviour of ferrocement plates," Proceedings of sixth international symposium on ferrocement, FERRO-Michigan, USA: University of Michigan;. p. 233–49, 1998.

[9].Memon NA, Salhuddin RS, Mahyuddin R. "Ferrocement encased lightweight aerated concrete sandwich with variable core size and wire mesh layers," Proceedings of Ferro-8, eighth international symposium and workshop on ferrocement and thin reinforced cement composites. Bangkok, Thailand; p. 153–64, 2006.

[10].Shah S, Balaguru P, Ferrocement PN. In: Swamy RN, editor. "New reinforced concrete," vol.2. Glasgow: Blackie and Sons Limited; p. 5–24,1984.

[11].Naaman AE, Al-Shannag J. "Ferrocement with Fiber Reinforced Plastic Meshes: Preliminary Investigation." In: Nedwell P, Swamy NR, editors. Proceedings of the fifth international symposium on ferrocement, Manchester, England, E and FN Spon, London, September 1994.

[12].Arif M, Pankaj, Kaushik SK. "Mechanical behavior of ferrocement composites: an experimental investigation." Cement Concrete Composit;21:301–12, 1999.

[13].Wang S, Naaman AE, Li VC. "Bending response of hybrid ferrocement plates with meshes and fibers." J Ferrocement;34(1):275–88, 2004.

[14].Agarwal SK, Irshad M. "Effect of superplasticizer in rich mortar mixes containing locally available sands." Journal of Ferrocement;37(4):351–7, 1991.

[15].Memon, N.A., Sumadi, S.R., Ramli, M., "Performance of high wokability slag-cement

mortar for ferrocement," Building and Environment, 42, 2710-2717, 2007.
[16].Kumar PR., Seshu DR, Rao CBK., "Studies on high performance mortar mixes (Part I: strength and flow characteristics)." Journal of Ferrocement;32(3):205–14, 2002.
[17].Kumar PR., Seshu DR, Rao CBK., "Studies on high performance mortar mixes (Part II: shrinkage and sorptivity characteristics)." Journal of Ferrocement;32(3):215–31, 2002.
[18].Arif MP, Kaushik SK., "Mortar modulus for ferrocement—a comparisons of strategies." Journal of Ferrocement;29(3):179–87, 1996.
[19].Zhong YL., "The new manual plastering process and mechanism for ferrocement mortar in the presence of superplasticizers." Journal of Ferr - ocement;15(2):140–9, 1985.
[۲۰].حسینی، پیام؛ اسلامی، ابراهیم. «بهبود عملکرد سازه‌های بتنی با مصالح پیشرفته با رویکرد نانو،» مجلهٔ فضای نانو، شمارهٔ ۱۷، صفحات ۹-۳.
[۲۱].حسینی، پ و اسلامی، ا. ،«کاربرد فناوری نانو در مهندسی عمران»، مجله عمران شریف، شمارهٔ ۳۶، ۶۸-۶۶، ۱۳۸۶.
[22].Li, H., Xiao, H.G., Yuan, J., Ou, J. "Microstructure of cement mortar with nano-particles. Composite: Part B," 35, pp.185-189, 2004.
[23].Li, H., Zhang, M.H., Ou, J.P., "Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement," Wear, 260, pp.1262-1266, 2006.
[24].Li, H., Zhang, M.H., Ou, J.P., "Flexural performance containing nano-particles for pavement," International Journal of Fatigue, 29, 1292-1301, 2007.
[25].Chang, P.K., Hou, W.M., Hwang, C.L., "A study on the microstructure of the nano concrete composite materials," Materials Research Society, Vol.791, 2004.
[۲۶].خالو. علیرضا، حسینی. پیام، «بررسی رابطه بین مقاومت فشاری و ریزساختار ملات سیمان حاوی انواع پوزولان و نانوذرات»، فصلنامه انجمن بتن ایران، شمارهٔ ۳۰، ۱۳۸۷.
[27].Ji, T., "Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO_2," Cement and concrete Research, 35, 1943-1947, 2005.