بررسی خواص مهندسی بتن خود تراکم حاوی نانو ذراتها در دماهای بالا

بابک وفائی[۱]، ناصر عرفاتی[۲]، محمد علی برخورداری[۳]، امیرحسین مالکی[٤]

۱- کارشناس ارشد ژئوتکنیک

Babak.vafaii@gmail.com

۲- استادیار، دانشکده عمران دانشگاه تفرش

Nasser.arafati@gmail.com

-۳

۴- کارشناس ارشد ژئوتکنیک

maleki.ah@gmail.com

خلاصه

افزودنی های موجود برای بتن همیشه تمامی مشخصات بتن را بهبود نمی بخشد.فناوری نانو نشان داده است که قابلیت بهبود عملکرد بتن را به صورت همه جانبه داشته و ذرات نانو با توجه به ابعادشان می توانند نقش پر کننده حفرات را بازی کنندنانوذرات به عنوان موادی پوزولانی برای تهیه بتنی با توانمندی بالا بدلیل تأثیر مهم بدست آمده در ناحیه بین خمیر و دانه های سیمان همواره مورد توجه محققین بوده است. از سوی دیگر، از آنجاکه امروزه از بتن های خود تراکم در کاربردها و اهداف فراوانی چه در حجم های بالا و چه در حجم های کم استفاده می شود، دانستن خصوصیات سخت شده بتن های خود تراکم حاوی نانو ذرات می تواند برای طراحان مفید باشد. بنابراین بررسی خصوصیات رئولوژیکی و مکانیکی بتن خودتراکم حاوی نانو ذرات سیلیس، مس و آهن قبل از کاربرد آن ضروری بنظر می رسد. در این مقاله یک سری آزمایش های آزمایشگاهی بر منظور بررسی اثر افزودنی های نانو ذرات سیلیس، مس و آهن در دماهای بالا بر روی خصوصیات مکانیکی و رئولوژیکی بتن خود تراکم ارائه می شود. بطور کلی با اضافه نمودن نانو ذرات به بتن خودتراکم مقاومت فشاری افزایش یافته است افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ذرات نانو سیلیس در سنین مختلف بین 12% - 8% ، افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ذرات نانو مس در سنین مختلف بین 37% - 26% و افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ذرات نانو آهن در سنین مختلف بین 56% - 22% می‌باشد.

کلمات کلیدی: بتن خود متراکم، نانوذرات، دماهای بالا

۱. مقدمه

بتن خود تراکم (SCC) به عنوان یک پیشرفت در ساخت بتن در دهه اخیر معرفی شد. با این که در آغاز توسعه این بتن نیروی کار متخصص برای آن بسار کمیاب بود اما با این حال امتیازات اقتصادی بسیار زیادی را یه اثبات رساند. در ابتدا تکنولوژی ساخت بتن خود تراکم در کشور ژاپن توسعه پیدا کرد و امکان ساخت آن با رشد و توسعه فوق روان کننده ها به سرعت فراهم شد. هم اکنون بتن خود تراکم در سراسر اروپا مورد استقبال قرار گرفته و هم برای کارهای ساختمانی و هم ساخت قطعات پیش ساخته استفاده فراوان دارد. ژاپنی ها از سال ۱۹۹۰ به بعد از بتن خود تراکم که نیاز به هیچ ویبره ای نداشت و به تراکم کامل می رسید در ساخت پل ها، تونل ها و ساختمان ها استفاده کردند.[۲و۳]

Ncelam pathare, Rahat Siddique (2012) به بررسی ویژگی های بتن خود تراکم (SCC) مانند مقاومت فشاری مقاومت کششی ، سرعت نفوذ پذیری کلر، تخلخل و جرم از دست رفته در حین اعمال دماهای معین پرداختند. در این تحقیق نمونه ها از ۳ در صد مختلف خاکستر بادی در

محدوده ۳۰ تا ۵۰ درصد برای مقایسه با نمونه بدون خاکستر بادی تهیه شده است. متغیرها شامل اثرات دماهای مختلف شامل ۲۰ oc,۱۰۰ oc, ۲۰۰ oc, ۳۰۰ درجه سانتی گراد با استفاده از سیمان پرتلند معمولی قرار گرفته است. نمونه های بتن خود متراکم ۲۸ روزه تحت مقاومت های فشاری در محدوده ۲۱,۴۳ مگاپاسکال تا ۴۰,۶۰ مگاپاسکال و مقاومت کششی از ۱,۳۵ مگاپاسکال تا ۳,۶۰ مگاپاسکال قرار گرفته اند. نتایج به طور واضح نشان می دهد که بهبود کمی در مقاومت فشاری در محدوده دماهای ۳۰۰- ۲۰۰درجه سانتی گراد در مقایسه با محدوده ۲۰۰- ۲۰ درجه سانتی گراد به وجود می آید در حالی که کمی کاهش در مقاومت کششی در محدوده دمای بین ۲۰ تا ۳۰۰ oc و افزایش درصد خاکستر بادی وجود دارد. نتایج مطالعه آزمایشگاهی نشان می دهد اگرچه خاکستر بادی مقاومت را کاهش می دهد، اما هنوز امکان این وجود دارد که بتن خود تراکم با مقاومت کافی را ایجاد کند. تمام بتن های بامقادیر زیاد خاکستر بادی کیفیتی مناسبی را برای تولید بتن خود تراکم و ویژگی هایی نظیر بهره وری آن ها دارای تطابق خوبی با استانداردها و راهنماها و آیین نامه های اروپایی هستند. از سوی دیگر این بتن ها مقاومت بالایی را در برابر جداشدگی از خود نشان داده و دارای قابلیت جریان و عبور خوبی هستند.[۴] در مطالعه دیگر Ncelam pathare Rahat Siddique (2012) ماسه مصرف شده در ریخته گری و خاکستر بادی بروی خصوصیات بتن خود متراکم مانند مقاومت فشاری، مقاومت کشش، تخلخل و کاهش جرم در حالیکه تحت اثر دماهای معین قرار می گیرد را مورد بررسی قرار دادند. اثر خاکستر به عنوان جایگزین بخشی از سیمان و ماسه مصرف شده در ریخته گری به عنوان جایگزین ماسه بتن مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه مخلوطها با ۳ اندازه مختلف خاکستر بادی که در محدوده بین ۳۰تا ۵۰ درصد تهیه شده و دانه های با ٪۱۰ از ماسه مصرفی درریخته گری جایگزین شده است. وهرنمونه تحت درجه حرارت های مختلف ازجمله 27oC، 100 oC، 200 oC ، 300درجه سانتیگراد قرار گرفته اند . همچنین برای اطمینان از توزیع دمای یکنواخت بین نمونه ها دما بطور ثابت در بالاترین مقدار آن به مدت یک ساعت قبل از سرد کردن آن به نمونه ها اعمال شده است واز سیمان پرتلند معمولی استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که افزایش در حدود ٪۲۵،۲۴ در مقاومت فشاری ٪ ۲۲،۱۸ در مقاومت کششی برای ۲۸روز در حالیکه مقدارخاکستر بادی از مقدار ٪۵۰ به ٪۳۰ کاهش داده شده است ،مشاهده می شود . از سوی دیگر نتایج آزمایشگاهی بطور واضح نشان می دهد که بهبود کمی در مقاومت فشاری در محدوده دماهای 300_200 درجه سانتی گراد در مقایسه با 200-27 درجه سانتی گراد بوجود آمده است، این در حالی است که سرعت کاهش مقاومت کششی و مدول الاستیسته بیشتر از نرخ از دست رفتن مقاومت فشاری در دماهای معین و افزایش درصد مقدار خاکستر بادی است. بهرحال اگر چه ماسه مصرفی ریخته گری و ماسه بادی مقاومت را کاهش می دهند، این امکان وجود دارد که نمونه های بتن خود تراکم با مقاومت های فشاری در محدوده 30.69تا19.75مگا پاسگال و ۵۶,۳۹تا ۱۲,۲۹مگا پاسگال و ۳۵,۴۲تا ۳۱,۹۵مگا پاسگال به ترتیب برای ۲۸، ۹۱،۳۶۵روزه در دماهای بالابرده شده تولید شود[۶]. در تحقیق P.Dinakar- M. kartik Reddy - Mvdit sharma (2013) اثر خاکستر بادی به ویژگی های بتن خود تراکم مورد بررسی قرار گرفته است. سیمان پرتلند پوزولانی بطور نسبی با ٪۱۰-۷ خاکستر بادی جایگزین شده ونسبت آب به سیمان در نمونه ها ثابت وبرابر ۰,۳ در نظر گرفته شده است. ویژگیهایی شامل ویژگی های خود تراکم پذیری مثل اسلامپ، زمان V- Funnel، نسبت کمانش L – BoX ویژگیهای مکانیکی مانند مقاومت فشاری ، مقاومت کششی ، مدول الاستیسته و ویژگی های دوام پذیری و مانند جذب آب ، عمق نفوذ آب و نفوذ پذیری کلریدی در نظر گرفته شده است . نتایج بیانگر آنست که خاکستر بادی به همراه سیمان پورتلند پوزلانی می تواند در بتن خود تراکم SCC برای تولید بتن با مقاومت بالا و عملکرد بالا استفاده شود. جایگزین کردن ٪۳۰ از سیمان پورتلند پوزولانی با خاکستر بادی مقاومت در حدود۱۰۰مگا پاسگال را در ۵۶روز نتیجه می دهد . مقاومت کششی و مدول الاستیک نتایج مشابهی را به دنبال دارد . مقادیر با جذب آب بالا با افزایش مقدار خاکستر بادی بدست آمده است . تمامی نمونه ها جذب آب ابتدایی ٪۳-۱ازخود نشان دادند . عمق نفوذ آب دربتن های خود تراکم(SCC) برای نمونه هایی که از میزان ٪۱۰تا ٪۳۰خاکستر بادی استفاده کرده اند کمتر است اما این مقدار برای نمونه هایی با ٪۵۰ تا ٪۷۰ بیشتر است . نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن است که جایگزین کردن خاکستر بادی به میزان ٪۵۰- ۳۰ برای بهبود بتن خودتراکم (SCC)مناسب است . البته برای حالتی است که از سیمان پرتاند پوزولانی استفاده می شود . درصد هایی بیشتر از ٪۵۰ برای بتن های سیمان پرتلند پوزولانی را نمی توان استفاده کرد. جایگزینی ٪۳۰ خاکستر بادی بیشترین مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسته ر انشان می دهد . بنابراین درصد بهنیه استفاده از خاکستر بادی ٪۳۰ است که بیشترین مقاومت فشاری و کمترین میزان جذب کلر را دارد مصرفی می شود.[۷] Mucteba Uysal - Mansur Sumer (2011) سیمان پرتلند را با خاکستر

بادی سرباره کوره ذوب آهن دانه شده پودر سنگ آهک پودر بازالت پودر ماربل جایگزین کردند و در اثر مخلوط های معدنی برروی بهره وری مقاومت فشاری سرعت پالس صوت دانسیته و مقاومت در برابر سولفاته شدن را مورد بررسی قرار دادند. آزمایش های مقاومت سولفات شامل خوردگی در ۱۰ درصد سولفات منیزیم و ۱۰درصد سولفات سدیم برای یک دوره ۴۰۰ روزه است. نتایج آزمایش ها نشان می دهد که در میان مخلوط های معدنی مورد استفاده خاکستر بادی و سرباره کوره ذوب آهن به طور قابل توجهی بهره وری و مقاومت فشاری مخلوط های بتن خود تراکم را افزایش می دهد. جایگزین کردن ۲۵٪ خاکستر بادی به جای سیمان پرتلند مقاومت بیشتر از ۱۰۵ مگاپاسکال را برای ۴۰۰ روز نشان می دهد. به علاوه وجود مخلوط های معدنی دارای اثر مطلوب بر از دست رفتگی مقاومت در اثر حمله شیمیایی سولفات منیزیم سدیم دارد. به عبارت دیگر بهترین مقابله برای حمله شیمیایی سولفات سدیم و منیزیم از ترکیب ۴۰٪ سربار کوره ذوب آهن با ۶۰٪ سیمان پرتلند به دست می آید. در مطالعه Ali Nazari , Shadi Riahi (2010) مقاومت خمشی ویژگی های حرارتی ساختار ریز بتن خود تراکم با مقادیر مختلف نانو ذرات های sio2 مورد بررسی قرار دادند. نانو ذرات های sio2 با میانگین اندازه ذرات ۱۵ نانومتر به صورت نسبی به بتن خود تراکم اضافه شده اند و رفتارهای متفاوت نمونه ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که نانو ذرات های sio2 قادر به بهبود مقاومت خمشی و بتن خود تراکم بوده و همچنین معایب فوق روانی به مقاومت خمشی نمونه ها را از بین ببرند.[۷] افزایش نانو ذرات های sio2 بیشتر از 4wt% سبب کاهش مقاومت خمشی می شوند و علت آن انتشار نامناسب ذرات نانو در ماتریس بتن است. از سوی دیگر مقادیر نانو ذرات های sio2 بیشتر از 4wt% می توانند باعث افزایش خصوصیات مکانیکی و فیزیکی نمونه ها شوند و در نهایت نانو ذرات های sio2 ساختار خالص بتن را تقویت می کنند. Mostafa Jalal et.al (2011), ویژگی های مکانیکی، رئولوژیکی دوام پذیری و ساختار ریز بتن های خود تراکم شامل نانو ذرات ها و ذرات sio2 را مورد ارزیابی قرار گرفته داده اند. بدین منظور بخشی از سیمان با مقادیر متفاوت میکروسیلیس به ترتیب میزان های ۱۰٪و۲۰٪و۲٪و۲+۱۰٪جایگزین شده و یرای تمام ی نمونه ها نسبت آب به سیمان ثابت در نظر گرفته شده است. ویژگی های رئولوژیکی مانند اسلامپ بتن زمان جریان V-Funnle آزمایش های L-Box ویژگی های دوام پذیری شامل جذب آب جذب موئینگی درصد یون کلر و آزمایشهای خوردگی می باشد.نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن است که خصوصیات نمونه های بتن حاوی نانوسیلیس و میکروسیلیس بهبود می یابد. پیشرفت درصد یون کلر و نتایج مقاومتی نیز در نمونه های حاوی میکروسیلیس و نانوسیلیس قابل توجه است. از نقطه نظر ساختاری ریز بتن میکرو گراف های حاصل از اسکن میکروسکوپی الکترون نشان می دهد که در نمونه های حاوی میکروسیلیس دنانوسیلیس که خطرات ساختاری بتن به ویژه در سنین های بالا به طور قابل ملاحظه ای بهبود می یابد. افزودن میکروسیلیس و نانو سیلیس سبب کاهش ترک ها و جداشدگی ها در بتن می گردد. مقاومت های فشاری و کششی به طور قابل توجهی در نمونه های حاوی نانوسیلیس و میکرد سیلیس افزایش می یابد. نتایج جذب آب و جذب موئینگی بیانگر آن است که کاهش چشمگیر با افزودن افزودنی ها به ویژه ترکیب میکروسیلیس و نانوسیلیس به وجود می آید. [۸]

۲. روش تحقیق و برنامه آزمایشگاهی

جهت بررسی خصوصیات مکانیکی بتن خود تراکم حاوی نانو ذراتها در دماهای بالا دو طرح اختلاط و برای بتن خود تراکم نیز دو در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در کلیه طرح اختلاط ها از سیمان پرتلند نوع ۲ تولید کارخانه هگمتان استفاده شده است. آب مورد استفاده نیز آب شرب می باشد. فوق روان کننده مصرفی نیز P10-3R ساخت شرکت شیمی ساختمان بوده و سنگدانه ها نیز او نوع گرد گوشه و رودخانه ای با بزرگترین اندازه دانه 12/5mm می باشد. در این مقاله از نانو ذرات مس، آهن، سیلیس تولید کارخانه نانوساو استفاده شده است از سوی دیگر، از خاکستر بادی به عنوان پوزولان استفاده کردیم. . مشخصات نانو ذرات مس، آهن و سیلیس در جدول ۱ آمده است. جدول ۲ و ۳ تمامی طرح های اختلاط است که NS4, NC1, NT1 طرح های انتخابی نهایی ساخته شده برای هریک از نانو ها می باشد. دماهای نانو ذرات عبارتند از ۲۰۰ ، ۴۰۰، ۶۰۰ درجه سانتی گراد و البته در دماهای معمولی که تمامی نمونه ها از قبل در دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد در گرم خانه (Oven) قرار داده شده اند.

جدول ۱: مشخصات نانو ذرات

نانو ذرات	خلوص	سایز متوسط	فرمول و ترکیب	مورفولوژی

مس	99%	50-80 nm	Cu	پودری و کلوئید با ذرات کروی
آهن	99.9%	40-120 nm	Fe	تقریبا کروی با پوششهای مس و پالادیوم
سیلیس	98%	30-60 nm	Si	کریستالی به صورت کلوئیدی

جدول۲-الف: طرح های انتخابی نهایی ساخته شده برای هریک از نانو ها

Mix code	Cement $\frac{kg}{(m^3)}$	Fly Ash $\frac{kg}{(m^3)}$	Water $\frac{kg}{(m^3)}$	Sand $\frac{kg}{(m^3)}$	Gravel $\frac{kg}{(m^3)}$	Nano $\frac{kg}{(m^3)}$	Super Plasticizer $\frac{kg}{(m^3)}$	Super Plasticizer (%(C+FA))
CTRL	۳۱۵	۱۳۵	۱۷۱	۹۴۵	۷۸۰	۰	۳,۸۳	۰,۸۵
NS3	۳۰۵	۱۳۱	۱۷۱	۹۴۵	۷۸۰	۱۳,۵	۳,۷۱	۰,۸۵
NS4	۳۰۳	۱۲۹	۱۷۱	۹۴۵	۷۸۰	۱۸	۲,۳۸	۰,۵۵
NS5	۲۹۹	۱۲۸	۱۷۱	۹۴۵	۷۸۰	۲۲,۵	۲,۹۹	۰,۷
NS7	۲۹۳	۱۲۵	۱۷۱	۹۴۵	۷۸۰	۳۱,۵	۲,۹۳	۰,۷
NC1	۳۱۱	۱۳۴	۱۷۱	۹۴۵	۷۸۰	۴,۵	۳,۱۲	۰,۷
NC3	۳۰۵	۱۳۱	۱۷۱	۹۴۵	۷۸۰	۱۳,۵	۳,۰۵	۰,۷
NC4	۳۰۳	۱۲۹	۱۷۱	۹۴۵	۷۸۰	۱۸	۳,۰۲	۰,۷
NC5	۲۹۹	۱۲۸	۱۷۱	۹۴۵	۷۸۰	۲۲,۵	۲,۹۹	۰,۷
NI1	۳۱۱	۱۳۴	۱۷۱	۹۴۵	۷۸۰	۴,۵	۳,۱۲	۰,۷
NI2	۳۰۹	۱۳۲	۱۷۱	۹۴۵	۷۸۰	۹	۳,۰۹	۰,۷
NI3	۳۰۵	۱۳۱	۱۷۱	۹۴۵	۷۸۰	۱۳,۵	۳,۰۵	۰,۷
NI4	۳۰۳	۱۲۹	۱۷۱	۹۴۵	۷۸۰	۱۸	۳,۰۲	۰,۷

جدول۲-ب: طرح های انتخابی نهایی ساخته شده برای هریک از نانو ها

Mix code	Slump Flow (mm)	T50 (sec)	V-funnel (sec)	Blocking Ratio
CTRL	۷۶۵	۱,۸۷	۶,۸۲	۱
NS3	۷۴۰	۱,۹۵	۶,۱۷	۱
NS4	۶۵۵	۲,۰۹	۶,۹۷	۰,۷۸
NS5	۶۵۰	۲,۲۳	۷,۳۱	۰,۹۴
NS7	۷۲۵	۳,۰۲	۸,۴۴	۰,۹۵
NC1	۷۳۵	۱,۵۲	۸,۶۷	۰,۷۸
NC3	۷۲۵	۲,۱۲	۱۰,۰۷	۰,۸۴
NC4	۷۶۰	۲,۴۷	۱۰,۴۵	۰,۹۱
NC5	۷۴۰	۳,۱۵	۱۲,۲۹	۰,۹
NI1	۷۰۵	۱,۶۷	۱۲,۰۸	۰,۸۱
NI2	۷۰۵	۱,۹۳	۱۱,۱۸	۰,۹۲
NI3	۷۴۰	۲,۴۶	۱۳,۳۶	۰,۹۴
NI4	۶۹۰	۳,۲۲	۱۴,۴۱	۰,۷۸

برای انجام آزمایش فشاری از نمونه های مکعبی با ابعاد 10 سانتی متری استفاده گردید و برای آزمایش کششی غیر مستقیم از نمونه های استوانه ای به قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی متر و برای آزمایش مدول الاستیسیته نیز بر طبق استاندارد روش تعیین مدول الاستیسیته استاتیکی از نمونه های با قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی متر استفاده شد. تمام نمونه ها جهت انجام آزمایش مدول الاستیسیته و مقاومت کششی غیر مستقیم و نیمی از نمونه ها جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری در آب با درجه حرارت ۲±۲۰ عمل آوری شده و نیمی دیگر از نمونه های مربوط به آزمایش فشاری در هوا و در محیط

آزمایشگاه نگهداری شدند. ضمنا از هر مخلوط تعداد ۳ نمونه و در سنین ۳و۷و۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند و مقادیر میانگین گزارش گردید.معیار اصلی جهت بررسی کیفی بتن آزمایش خصوصیات مکانیکی می باشد. و مهمترین آزمایش های کنترل بتن شامل مقاومت فشاری کششی و مدول الاستیسیته می باشد. دراین تحقیق نیز این ۳ آزمایش مورد توجه بوده است.

۱- آزمایش مقاومت فشاری: در این مطالعه در سنین ۴۲ روز آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه های مکعبی انجام شده است.

۲- آزمایش مقاومت کششی: در این مطالعه در سنین ۴۲ روز آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه های استوانه ای انجام شده است. برای انجام آزمایش یک استوانه 150×300 میلیمتر را به طور افقی داخل دستگاه آزمایش مقاومت فشاری قرار داده به طوری که فشار در طول قطری از استوانه که به طور قائم قرار دارد وارد شود. به این ترتیب یک تنش کششی تقریبا یکنواخت در جهت عمود بر سطح بار به وجود آمد. مقدار تنش کششی که باعث دو نیم شدن استوانه شد از رابطه زیر به دست آمد.

$$f_t=\frac{2F}{\pi d l} \qquad (۱)$$

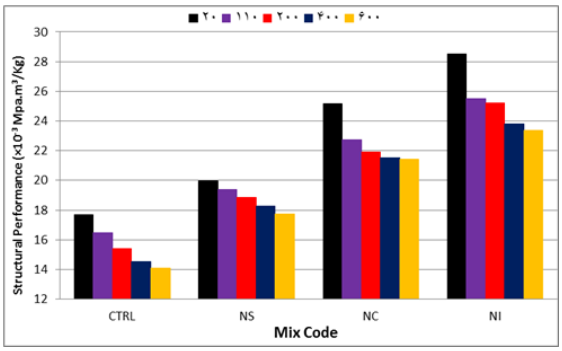
f_tدر رابطه فوق تنش کششی و Fحداکثر نیروی وارده می باشد و dقطر استوانه و lطول استوانه می باشد.

۳- آزمایش مدول الاستیسیته: در این تحقیق برای تعیین مدول الاستیسیته در اندازه گیری مقاومت فشاری با نصب کرنش سنج با دقت بسیار بالا (شکل ۳-۷) بر روی نمونه های استوانه ای 30× 15 سانتی متر امکان تعیین کرنش نمونه ها را دراثر نیروهای مختلف فراهم نمودیم. طبق استاندارد برای تعیین مدول الاستیسیته با کرنش مربوط به ۴۰٪ مقاومت نهایی و طبق رابطه۲ اقدام به محاسبه مدول الاستیسیته نمودیم.

$$E=\frac{\sigma_{40\%\sigma_{ir}}}{\varepsilon} \qquad (۲)$$

۳. تفسیر نتایج آزمایش‌ها

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار عملکرد سازه‌ای بتن خودتراکم فاقد نانو ذرات (که در دمای 20 °C اتفاق می‌افتد) از کمترین مقدار عملکرد سازه‌ای بتن خود تراکم حاوی نانو ذرات (نمونه حاوی نانو سیلیس در دمای 600 °C) ، کمتر است. این مسئله به خوبی نشان می‌دهد که استفاده از نانو ذرات سیلیس، مس و آهن تأثیر به سزایی در عملکرد سازه‌ای بتن خود تراکم می‌گذارد. به نحوی که در دمای600 °C عملکرد سازه‌ای بتن خود تراکم حاوی نانو سیلیس، مس و آهن به ترتیب 26% ، 52% و 66% از عملکرد سازه‌ای بتن خودتراکم فاقد نانوذرات در همین دما (600 °C) ، بیشتر است.



شکل ۱ . نتایج عملکرد سازه ای طرح های مختلف حاوی نانو ذرات سیلیس،مس و آهن بهینه در دماهای مختلف

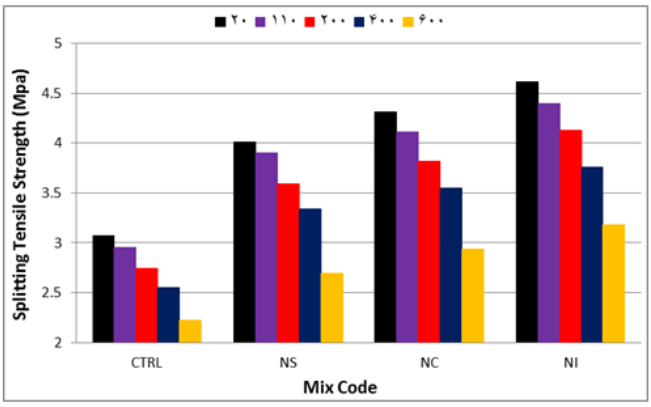
نتایج مقاومت کششی دو نیم‌شدگی بتن‌های خودتراکم حاوی نانو ذرات بهینه سیلیس، مس و آهن و بتن خودتراکم فاقد نانو ذرات در دماهای مورد مطالعه (20 °C ، 110 °C ، 200 °C ، 400 °C و 600 °C در سن ۴۲ روزگی در جدول ۴ ارائه شده است. همانطور که در جدول ۴مشاهده می-شود، بطور کلی با اضافه نمودن نانو ذرات به بتن خودتراکم مقاومت کششی افزایش یافته است. بیشترین مقاومت کششی در نمونه‌های حاوی نانو ذرات متعلق به NI20 با 4.62 Mpa می‌باشد. به طور کلی میانگین مقاومت‌های کششی بدست آمده در دماهای مختلف در نمونه‌های بتن خود تراکم حاوی نانو ذرات آهن، مس و سیلیس نسبت به نمونه‌های بتن خود تراکم فاقد نانو ذرات 48% ، 38% و 30% افزایش نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود نمونه‌های در معرض حرارت‌های بالا با افزایش دما دچار کاهش مقاومت کششی می‌شوند.

بررسی رابطه بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی

تغییرات مقاومت کششی بدست آمده از آزمایش دو نیم شدگی با مقاومت فشاری بتن‌های خودتراکم فاقد نانو ذرات و حاوی نانو ذرات سیلیس، مس و آهن در دماهای مختلف در شکل‌های ۳ تا ۴ ارائه شده است. برای مقاومت‌های فشاری بین 31.1-44.1 MPa یک ارتباط خطی مناسب بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی دو نیم‌شدگی، در بتن‌های خودتراکم فاقد نانو ذرات، بدست آمده است. که طبق آن مشاهده می‌شود که مقاومت کششی شکافتگی بصورت خطی مطابق با فرمول ارائه شده در شکل ۳ با کاهش مقاومت فشاری مکعبی، کاهش می‌یابد.

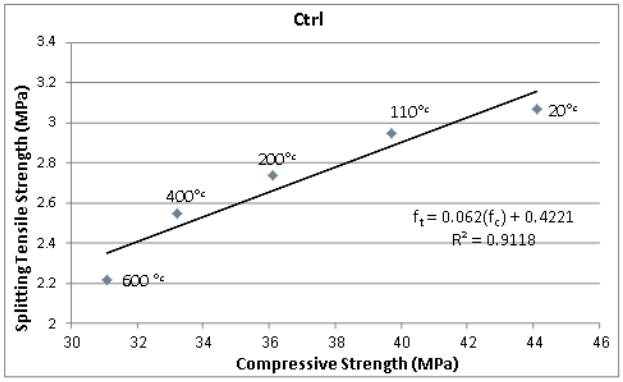
جدول ۴. نتایج مقاومت کششی دو نیم شدگی ۴۲ روزه

Mix Code	Splitting Tensile Strength (MPa)
Ctrl20	3.07
Ctrl110	2.95
Ctrl200	2.74
Ctrl400	2.55
Ctrl600	2.22
NS20	4.01
NS110	3.90
NS200	3.59
NS400	3.34
NS600	2.69
NC20	4.31
NC110	4.11
NC200	3.82
NC400	3.55
NC600	2.94
NI20	4.62
NI110	4.40
NI200	4.13
NI400	3.76
NI600	3.18

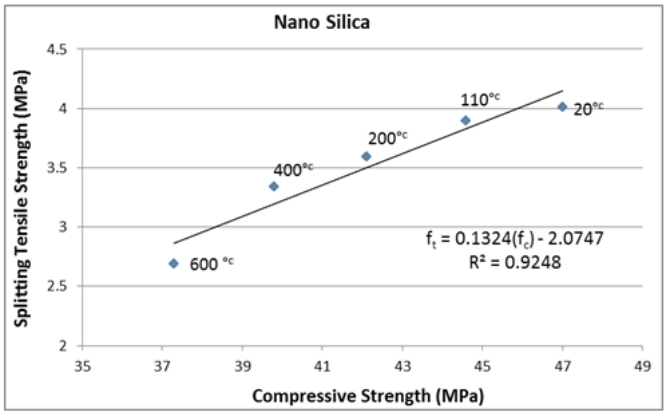


شکل ۲. تغییرات مقاومت کششی شکافتگی در نمونه های حاوی نانو ذرات

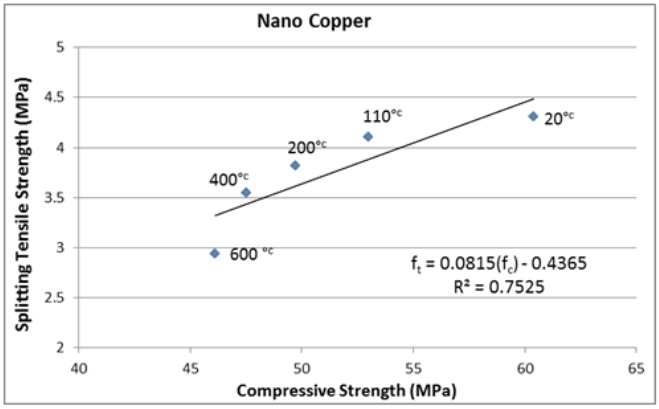
.برای مقاومت‌های فشاری بین 37.3-47 MPa یک ارتباط خطی مناسب بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی دو نیم‌شدگی، در بتن‌های خودتراکم حاوی نانو ذرات سیلیس، بدست آمده است که طبق آن مشاهده می‌شود که مقاومت کششی شکافتگی بصورت خطی مطابق با فرمول ارائه شده در شکل ۴، با کاهش مقاومت فشاری مکعبی، کاهش می‌یابد. برای مقاومت‌های فشاری بین 46.1-60.4 MPa یک ارتباط خطی مناسب بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی دو نیم‌شدگی، در بتن‌های خودتراکم حاوی نانو ذرات مس، بدست آمده است که طبق آن مشاهده می‌شود که مقاومت کششی شکافتگی بصورت خطی مطابق با فرمول ارائه شده در شکل ۵، با کاهش مقاومت فشاری مکعبی، کاهش می‌یابد.



شکل ۳. بررسی رابطه مقاومت فشاری و مقاومت کششی در نمونه‌های فاقد نانو ذرات در دماهای مختلف



شکل ۴. بررسی رابطه مقاومت فشاری و مقاومت کششی در نمونه‌های حاوی نانو ذرات سیلیس در دماهای مختلف



.شکل ۵. بررسی رابطه مقاومت فشاری و مقاومت کششی در نمونه‌های حاوی نانو ذرات مس در دماهای مختلف

برای مقاومت‌های فشاری بین 49.9-68.6 MPa یک ارتباط خطی مناسب بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی دو نیم‌شدگی، در بتن‌های خودتراکم حاوی نانو ذرات آهن، بدست آمده است که طبق آن مشاهده می‌شود که مقاومت کششی شکافتگی بصورت خطی مطابق با فرمول ارائه شده در شکل ۶، با کاهش مقاومت فشاری مکعبی، کاهش می‌یابد. ضرایب همبستگی بالای روابط ارائه شده، بیانگر معنادار بودن ارتباط بین این دو پارامتر و اعتماد بالا به برقراری رابطه بین آنها است.

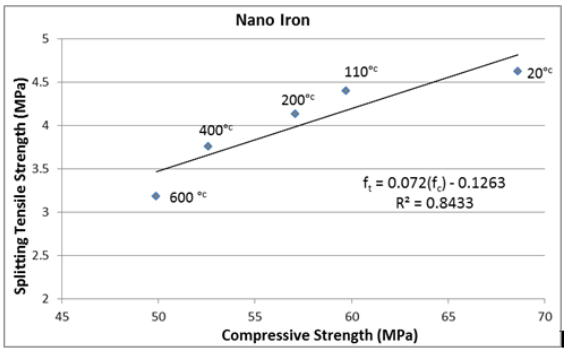
بررسی مدول الاستیسیته

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود در نمونه‌های در معرض حرارت‌های بالا با افزایش دما مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد.

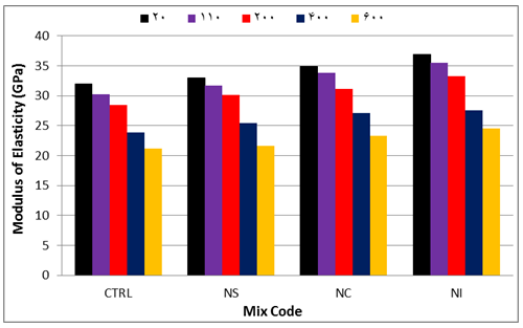
به طور کلی میانگین مدول الاستیسیته بدست آمده در دماهای مختلف در نمونه‌های بتن خود تراکم حاوی نانو ذرات آهن، مس و سیلیس نسبت به نمونه‌های بتن خود تراکم فاقد نانو ذرات 16%، 11% و 4% افزایش نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، به کارگیری نانو ذرات سیلیس،مس و آهن تأثیرگذاری بیشتری بر مقاومت کششی نسبت به مدول الاستیسیته دارد. نتایج مدول الاستیسیته بتن‌های خودتراکم حاوی نانو ذرات بهینه سیلیس، مس و آهن و بتن خودتراکم فاقد نانو ذرات در دماهای مورد مطالعه (20 °C، 110 °C، 200 °C، 400 °C و 600 °C در سن ۴۲ روزگی در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. نتایج مدول الاستیسیته نمونه در سن ۴۲ روزگی

Mix Code	Modulus Of Elasticity(GPa)
Ctrl20	31.94
Ctrl110	30.28
Ctrl200	28.45
Ctrl400	23.88
Ctrl600	21.18
NS20	32.97
NS110	31.67
NS200	30.16
NS400	25.42
NS600	21.63
NC20	34.83
NC110	33.85
NC200	31.18
NC400	27.09
NC600	23.28
NI20	36.95
NI110	35.46
NI200	33.22
NI400	27.58
NI600	24.51



شکل ۶. بررسی رابطه مقاومت فشاری و مقاومت کششی در نمونه‌های حاوی نانو ذرات آهن در دماهای مختلف



شکل ۷. تغییرات مدول الاستیسیته در نمونه های حاوی نانو ذرات

۴. نتایج

۱.با افزایش دما وزن نمونه‌ها کاهش می‌یابد به طوری که حداکثر افت وزن در دماهای 110 °c ، 200 °c، 400 °c و 600 °c به ترتیب برابر 3.3% ، 6% ، 8.4% و 11.5% می‌باشد.

۲.بطور کلی با اضافه نمودن نانو ذرات به بتن خودتراکم مقاومت فشاری افزایش یافته است. ضمناً با افزایش میزان مصرف نانو ذرات شاهد کاهش مقاومت در نمونه‌ها هستیم. افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ذرات نانو سیلیس در سنین مختلف بین 12% - 8% ، افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ذرات نانو مس در سنین مختلف بین 37% - 26% و افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ذرات نانو آهن در سنین مختلف بین 56% - 22% می‌باشد.

۳.کاهش مقاومت فشاری در نمونه‌های مختلف در دمای 110 °C بین 13% - 5% ، در دمای 200 °C بین 18% - 10% ، در دمای 400 °C بین 25% - 15% و کاهش مقاومت فشاری در نمونه‌های مختلف در دمای 600 °C بین 29% - 21% می‌باشد. آنچه قابل ذکر است، کمترین کاهش مقاومت فشاری در تمامی دماهای مورد مطالعه متعلق به نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی ذرات نانو سیلیس است.

۴.بیشترین مقدار عملکرد سازه‌ای بتن خودتراکم فاقد نانو ذرات (که در دمای 20 °C اتفاق می‌افتد) از کمترین مقدار عملکرد سازه‌ای بتن خود تراکم حاوی نانو ذرات (نمونه حاوی نانو سیلیس در دمای 600 °C) ، کمتر است. این مسئله به خوبی نشان می‌دهد که استفاده از نانو ذرات سیلیس، مس و آهن تأثیر به سزایی در عملکرد سازه‌ای بتن خود تراکم می‌گذارد. به نحوی که در دمای 600 °Cعملکرد سازه‌ای بتن خود تراکم حاوی نانو سیلیس، مس و آهن به ترتیب 26% ، 52% و 66% از عملکرد سازه‌ای بتن خودتراکم فاقد نانوذرات در همین دما (600 °C) ، بیشتر است.

۵.بطور کلی با اضافه نمودن نانو ذرات به بتن خودتراکم مقاومت کششی افزایش یافته است. بیشترین مقاومت کششی در نمونه‌های حاوی نانو ذرات متعلق به NI20 با 4.62 Mpa می‌باشد.

۱۲. مراجع

1. Khayat KH, Hu C, Monty H. Stability of self-consolidating concrete, advantages, and potential applications. In: Wallevik O, Nielsson I, editors. First international RILEM symposium, SCC. Stockholm: RILEM Publications; 1999. p. 134–42.
2. Skarendahl A, Petersson O, editors. Self-compacting concrete, stateof- the art report of RILEM Technical Committee 174-SCC, selfcompacting concrete. RILEM Publications; 1999.
3. Ozawa K, Maekawa K, Kunishima M, Okamura H. Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures. In: Okamura H, Shima H, editors. Second East-Asia and Pacific conference on structural engineering and construction, Kochi, Japan 1; 1988. p. 445–50.
4. Okamura H, Ozawa K. Mix-design for self-compacting concrete. Concr Library, Jpn Soc Civil Eng (JSCE) 1995;25:107–20.
5. Hayakawa M, Matsuoka Y, Shindoh T. Development and application of super workable concrete. In: Bartos PJ, editor. RILEM international workshop on special concretes: workability and mixing, Paisley: RILEM Publication; 1993. p. 183–90.
6. Loukili A, Khelidj A, Richard P. Hydration kinetics, change of relative humidity, and autogenous shrinkage of ultra-high-strength concrete. Cem Concr Res 1999;29(4):577–84.
7. Poppe AM. Influence of filler on hydration and properties of selfcompacting concrete [In Dutch], Ph.D. thesis, Gent: University of Ghent; 2004.
8. Okamura H, Ozawa K. Mix-design for self-compacting concrete. Concr Library Jpn Soc Civil Eng (JSCE) 1995;25:107–20.
9. Billberg P. Mix design model for self-compacting concrete. First North American conference on the design and use of self-consolidating concrete, November 12–13. ACBM Publication; 2002. p. 65–70.
10. Ambroise J, Pe´ra J. Design of self-leveling concrete. First North American conference on the design and use of self-consolidating concrete, November 12–13. ACBM Publication; 2002. p. 93–8.
11. Bager DH, Brandl M, Geiker MR, Thrane LN, Wallevik O. The effect of measuring procedure on the apparent rheological properties of self-compacting concrete. Cem Concr Res 2002;32(11):1791–5.
12. Akkaya Y, Bui van K, Shah SP. Rheological model for selfconsolidating concrete. ACI Mater J 2002;99(6):549–59.
13. PeterssonO¨ . Investigation on workability of SCC: effects of aggregate size, additives and admixtures. Swedish Cement and Concrete Research Institute; 1999.
14. Ferraris CF, Obla KH, Hill R. Influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. Cem Concr Res 2001;31(2):245–55.

15. Ye G. Experimental study and numerical simulation of the development of the microstructure and permeability of cementitious materials. Ph.D. thesis. Delft: Delft University of Technology; 2003.