

بررسی اثرات افزایش دما بر عملکرد بتن سبک سازه‌های حاوی درصد‌های مختلفی از نانو سیلیس

سید حمید هاشمی*

استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه اراک

علی نوروژی ازکوینی

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک

چکیده

رفتار بتن سبک در درجه حرارت‌های بالا از نظر تأمین ایمنی سازه تحت بارهای مشخص و یا بارهای بهره‌برداری خاص از درجه اهمیت بالایی برخوردار است. این مطالعه به بررسی اثرات حرارت بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن سبک حاوی لیکا از قبیل مقاومت فشاری، جذب حجمی آب، افت وزن و خرده و پوسته شدن سطح بتن می‌پردازد. بدین منظور با بهره‌گیری از روش طراحی آزمایشات تاگوچی برای دستیابی به طرح اختلاط بهینه از نظر مقاومت فشاری، نمونه‌های ساخته شده با درصد‌های مختلفی از نانوسیلیس بعد از سن ۲۸ روز در معرض حرارت ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتیگراد قرار گرفتند و با بتن عمل‌آوری شده در دمای محیط مقایسه شدند. نتایج حاکی از افت شاخصه‌های فیزیکی بتن سبک همچون نفوذپذیری تا درجه حرارت ۶۰۰ درجه سانتیگراد و بعضاً بهبود در برخی از شاخصه‌های مکانیکی بتن سبک مانند مقاومت فشاری در دماهای اولیه بعد از قرارگیری در معرض حرارت است.

واژه‌های کلیدی: افزایش دما و بتن سبک سازه‌ای، اثر دما، بتن سبک و نانوسیلیس، روش طراحی آزمایشات تاگوچی، بتن سبک سازه‌ای و طرح اختلاط بهینه.

* نویسنده مسئول: h-hashemi@araku.ac.ir

۱- مقدمه

استحکام و مدول الاستیسیته و افزایش ضریب انبساط حرارتی و هدایت حرارتی می‌گردد، در نتیجه با ضعیف شدن ساختار بتن همراه می‌شود [۸]. از طرفی با انجام تحقیقاتی روی خصوصیات حرارتی بتن سبک اسفنجی نیز، مشاهده گردید که درجه حرارت بالا بر روی آب آزاد در منافذ و نیز بر آب پیوند شیمیایی در سیمان هیدراته اثر می‌گذارد [۹].

بسطامی و همکاران عملکرد بتن پرمقاومت در درجه حرارت‌های بالا را مورد بررسی قرار دادند. آنان به این نتیجه رسیدند که کاهش مقاومت فشاری یکی از مهمترین تغییرات خواص است که در هنگام حرارت‌دهی بالا بعلاوه خروج آب فیزیکی و شیمیایی حادث می‌شود. مقاومت فشاری بتن پرمقاومت در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد فاجعه‌آمیز است که تا حدود ۸۰ درصد کاهش می‌یابد [۱۰]. Won و همکاران با بررسی ترکیبات پلیمری سیمانی با سنگدانه‌های مختلف سبک حاوی الیاف پلی‌پروپیلن متوجه شدند که مخلوط حاوی پرلیت منبسط شده در دمای بالا کمترین کاهش وزن و ریزش بیشترین کاهش وزن را در بر داشته‌اند. همچنین بیشترین مقاومت فشاری سن ۷ روزه متعلق به طرح حاوی پرلیت با ۰/۲ درصد الیاف پلی‌پروپیلن است [۱۱].

در آزمایشی در سال ۲۰۱۲ به بررسی اثرات حرارت بر بتن خودتراکم سبک پرداخته شد. مدول الاستیسیته نمونه‌ها بطور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر نوع سنگدانه‌ها قرار گرفت. در حضور مصالح متخلخل، رفتار نفوذپذیری نمونه‌های بتنی با کاهش نسبت آب به سیمان کنترل می‌شوند و با افزایش درجه حرارت برای کلیه نمونه‌ها از دست دادن وزن نیز رخ می‌دهد که علت آن تشکیل بخار در داخل دانه‌ها و حفره‌ها و از دست رفتن آب استنباط می‌شود [۱۲]. Kaur و Siddique با آزمایش بتن حاوی روباره کوره‌های بلند متوجه شدند تا دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد کاهش وزن ناچیز می‌باشد، ولی بیش از ۱۰۰ درجه کاهش وزن محسوس بوده و دما بر مدول الاستیسیته اثر گذار می‌باشد. در بین نمونه‌های حاوی روباره، نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد GGBFS^۲ بیشترین مقاومت فشاری در دمای ۲۷ درجه و همین‌طور پایان آزمایش و در دمای ۳۵۰ درجه دارند، در

بتن به عنوان یکی از مصالح ساختمانی قرن حاضر و از پر مصرف‌ترین آن‌ها است. سبک‌سازی و تولید مصالح سبک و در عین حال مقاوم، تحول عظیمی در صنعت ساختمان ایجاد نموده است. بتن‌های سبک غیرسازه‌ای و سازه‌ای توانسته‌اند با داشتن خواص مناسب نظیر سبکی، عایق حرارتی، هزینه‌های کمتر تولید و حمل و نیز مقاومت کافی در مقابل نیروهای زلزله جایگاه ویژه‌ای در صنعت ساختمان داشته باشند. ساخت این گونه بتن‌ها در کشورمان از چند دهه گذشته شروع شد که از پوک‌های سنگ‌های طبیعی نظیر پرلیت و برخی توف‌ها در ساخت بتن‌های سبک استفاده شد [۱]. در واقع بتن به واسطه‌ی برخورداری از توانایی بالقوه در تحمل درجه حرارت بالا و آتش، به علت کم بودن هدایت حرارتی و گرمای ویژه مشهور است. این امر در مورد بتن سبک نیز صادق است. اما این بدان معنی نمی‌باشد که دمای بالا بدون هر گونه اثر بر روی بتن سبک است. دمای بالا ممکن است باعث تغییر رنگ شدید، تغییر در مقاومت فشاری بتن، مدول الاستیسیته و تغییر در ظاهر بتن گردد [۶-۲].

در تحقیقات صورت گرفته در سال ۲۰۰۲ نشان داده شد، خواص و رفتار مهندسی بتن با مقاومت بالا^۱ (HSC) نسبت به بتن معمولی تحت شرایط یکسان در برابر درجه حرارت بالا کاملاً متفاوت می‌باشد و دو تفاوت عمده بین این دو وجود دارد: ۱- از دست دادن مقاومت نسبی در درجه حرارت ۱۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد. ۲- میزان خرد شدن و کسر وزن در معرض حرارت ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد. از لحاظ از دست دادن مقاومت در حرارت متوسط بین ۱۰۰ و ۴۰۰ درجه سانتیگراد، مقاومت فشاری HSC نزدیک به ۴۰ درصد کاهش می‌یابد در حالیکه این کاهش مقاومت در بتن معمولی با همان شرایط ۲۰ تا ۳۰ درصد را به خود اختصاص می‌دهد [۷].

در آزمایشی در سال ۲۰۰۸ با ساخت نمونه‌هایی از بتن سبک و قرار دادن آن‌ها در دماهای ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد، مشاهده کردند با افزایش درجه حرارت کاهش مقاومت مشهود است که دلیل آن تبخیر و آبگیری از بتن بوده که باعث کاهش

¹ High strength concrete

² Ground-granulated blast-furnace slag

این دماها بتن فاقد GGBFS مقاومت فشاری بیشتری را از خود نشان می‌دهد. در بین نتایج حاصل افزایش در مقاومت فشاری نمونه‌ها با وجود افزایش دما توجه بیشتری را به خود جلب کرده است [۱۳]. Morsy و همکاران نیز با آزمایش بر روی رفتار سیمان آمیخته شده در ملات حاوی متاکائولن در دمای بالا نیز پس از مشاهده‌ی یک افزایش اولیه در مقدار مقاومت فشاری در دمای ۲۵۰ درجه کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقدار مقاومت فشاری نمونه‌ها را گزارش کردند [۱۴].

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی [۱۵].

درصد ترکیب شیمیایی سیمان	ترکیب شیمیایی سیمان	درصد تشکیل دهنده	ترکیب شیمیایی سیمان
۶/۰	K ₂ O	۲۰/۹	SiO ₂
۰/۰۱۶	Cl	۵	Al ₂ O ₃
۹۳/۰	LOI	۴/۰۳	Fe ₂ O ₃
۸/۶۰	C ₃ S	۶۵/۰۲	CaO
۶	C ₃ A	۱/۸	SO ₃
۱۳	C ₄ AF	۱/۰۲	MgO
۱۴/۱	C ₂ S	۰/۳۲	Na ₂ O

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی و ویژگی‌های آن‌ها

در این تحقیق برای ساختن نمونه‌های بتنی از سیمان پرتلند نوع دو دلیجان با چگالی دانه‌ای (gr/cm³) ۳/۱ و مشخصات شیمیایی مندرج در جدول ۱، دوده سیلیس ساخت کارخانه صنایع فروآلیاژ ازنا با چگالی دانه‌ای (gr/cm³) ۲ و مشخصات مندرج در جدول ۲، نانوسیلیس مورد استفاده از نوع کلئیدی محلول در آب با غلظت ۵۰ درصد ساخت شرکت وند شیمی با مشخصات مندرج در جدول ۳، فوق‌روان کننده نسل سوم نوع M63 بر پایه ملامین سولفونات با وزن مخصوص (kg/lit) ۱/۰۹۸، همچنین از ماسه شسته شده طبیعی عبوری از الک ۴/۷۵ میلیمتر با وزن مخصوص

جدول ۲- مشخصات دوده سیلیس مصرفی [۱۵].

شکل ظاهری	افت سرخ شدن (%)	درصد کربن	حداقل سطح ویژه (m ² /gr)	SiO ₂ (%)
پودر خاکستری	۱/۴۴	۰/۵	۲۰	۹۴/۰۴

جدول ۳- مشخصات نانوسیلیس مورد استفاده [۱۵].

شکل ظاهری	وزن مخصوص	درصد وزنی SiO ₂	PH	ویسکوزیته	میانگین اندازه ذرات	درصد سیلیس در فاز جامد	سطح ویژه (m ² /gr)
مایع سفید رنگ	1.403	49.515	9.1	15 MAX	34mm	99.7%	70-100

جدول ۴- مشخصات فیزیکی سبکدانه لیکا [۱۵].

شماره الک	اندازه دانه‌ها (mm)	چگالی دانه‌ای gr/cm ³	درصد جذب آب (ساعت)	
			۰/۵	۲۴
۳-۸	۹/۵-۱۲/۵	۰/۷۴	۹/۵	۱۲/۵۲
۴	۴/۷۵-۹/۵	۰/۷۵		
۸	۲/۳۸-۴/۷	۰/۹۷		

۲-۲- روش اختلاط بتن

به منظور یکسان نمودن شرایط ساخت و افزایش دقت نتایج آزمایش‌ها، روش اختلاط ثابتی برای ساخت طرح‌های اختلاط به کار گرفته شد. برای ساخت بتن بعد از وزن‌کشی دقیق مصالح، ابتدا سیمان و میکروسیلیس به خوبی با هم مخلوط شدند. سپس این مخلوط همگن به دانه‌های لیکا که به مدت ۳۰ ثانیه با ماسه در داخل مخلوط‌کن مخلوط شده بودند اضافه گردید، ۱/۵ دقیقه بعد آب و فوق‌روان کننده به خوبی با هم مخلوط گشته و نیمی از آن ابتدا به کل مصالح در حال اختلاط اضافه شد و ۲ دقیقه بعد نیمی دیگر به همراه نانوسیلیس اضافه گردید و عمل اختلاط ۲ دقیقه دیگر ادامه یافت و به خاتمه رسید.

۳-۲- نحوه عمل آوری نمونه‌های بتنی

به منظور عمل آوری نمونه‌های بتنی پس از ساخت، به مدت ۲۴ ساعت در قالب و زیر پوشش نایلونی جهت حفظ رطوبت و سپس داخل حوضچه آب با دمای ۱۹-۲۳ درجه سانتیگراد قرار گرفتند. پس از رسیدن نمونه‌ها به سن ۲۸ روزه، از حوضچه آب خارج شدند و پس از خشک شدن در محیط آزمایشگاه در کوره حرارتی که با نرخ حرارت‌دهی ۳ درجه بر دقیقه تنظیم شده بود قرار گرفتند و نمونه‌ها به دماهای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتیگراد رسانده شدند و جهت رسیدن به حالت پایداری حرارتی هریک به مدت یک ساعت در دماهای مشخص شده نگهداری شدند، سپس جهت سرد شدن با همان نرخ به دمای محیط برده شدند و در محیط آزاد قرار گرفتند.

۴-۲- روش تعیین نسبت‌های طرح اختلاط

تعیین طرح‌های اختلاط با روش حجمی^۱ ACI213R-03 می‌باشد. در این روش حجم بتن تازه تهیه شده با جمع حجم‌های مطلق مواد سیمانی، سنگدانه‌ها، آب مؤثر، هوای محبوس و سایر مواد افزودنی مساوی در نظر گرفته می‌شود. تعیین نسبت‌های اختلاط با استفاده از این روش نیازمند تعیین میزان جذب آب و چگالی دانه‌ای سنگدانه‌ها با اندازه‌های متفاوت است [۱۶]. برای به کارگیری طرح اختلاط بهینه، هم از نظر وزنی و هم از نظر مقاومت فشاری از روش طراحی آزمایش‌های تاگوچی بهره

گرفته شد. بدین منظور ابتدا با استفاده از روش تاگوچی پارامترها و سطوح مختلف آنها تعیین گردید و سپس تمامی آزمایش‌ها برای همه طرح‌ها انجام شد. با معرفی متغیرهای مؤثر بر مقاومت فشاری بتن سبک که عبارتند از:

۱- نسبت آب به مواد سیمانی ۲- عیارسیمان ۳- درصد میکروسیلیس به سیمان ۴- نسبت لیکا به کل سنگدانه‌ها، چهار کمیت سه‌سطحی در نظر گرفته شد. مقادیر مناسب برای متغیر نسبت آب به مواد سیمانی طبق مطالعات صورت گرفته اعداد ۰/۳۰، ۰/۳۵ و ۰/۴۰ همچنین برای متغیر عیار سیمان اعداد ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ کیلوگرم در مترمکعب و نیز برای متغیر درصد نسبت میکروسیلیس به سیمان اعداد ۰/۰، ۵٪ و ۱۰٪ است که جای‌گزین بخشی از سیمان مصرفی می‌گردد و در نهایت نسبت حجمی لیکا به کل سنگدانه که مقادیر ۰/۵، ۰/۶۵ و ۰/۸۵ را شامل می‌شود، استفاده می‌کنیم. مقدار فوق‌روان کننده نیز به میزان ۲٪ وزن مواد سیمانی برای ثابت نگه داشتن روانی در تمام طرح‌ها اضافه می‌شود.

پس از وارد کردن سطوح متغیرهای فوق به نرم‌افزار Qualitek-4 [۱۷] که بر پایه روش آماری تاگوچی استوار است، نرم افزار آرایه L-9 را که مخصوص حالت ۴ کمیت ۳ سطحی است، انتخاب می‌کند. در نهایت نتیجه‌ی پیشنهادی نرم افزار ۹ طرح اختلاط بود که با حفظ اسلامپ ۱۲-۷ سانتی متر در شرایط یکسان از هر یک از این ۹ طرح ۳ نمونه مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ cm ساخته و در سن ۷ روز مقاومت فشاری آنها اندازه گیری شد. با انجام تحلیل واریانس ANOVA، نرم افزار طرح بهینه پیشنهادی خود را برای بدست آوردن بالاترین مقاومت فشاری ارائه می‌کند.

با بررسی تاثیر سطوح پارامترهای مختلف در بهینه شدن طرح از نظر مقاومت فشاری بیشتر مشخص گردید که برای داشتن بالاترین مقاومت فشاری درصد میکروسیلیس بیشترین تاثیر را از خود بر جای می‌گذارد. چنین روندی در تحقیقات هاشمی و صدیقی، با مشاهده‌ی افزایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه در طرح حاوی (kg/m^3) ۴۵ میکروسیلیس (که بیشترین مقدار میکروسیلیس نسبت به سایر طرح‌ها را داراست) گزارش گردید [۱۸]. از طرح پیشنهاد شده توسط نرم افزار برای مقاومت حداکثر (T10)، که در جدول ۵ آمده است، تعداد ۳

³ ACI 213R-03 Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete

مقدار پیشنهادی ۰/۷۹٪ اختلاف داشته و نسبت مقاومت به وزنی ۱۳/۵۵٪ دارد، با توجه به نسبت مقاومت به وزن که پارامتری مهم در بتن سبک سازه‌ای محسوب می‌شود، برای ادامه این مطالعه طرح اختلاط T10 مطابق با تحقیقات هاشمی و میرزایی مقدم به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شد [۱۵]. جدول ۵ جزئیات طرح اختلاط بتن سبک سازه‌ای با مقاومت انتظاری (kg/cm^2) ۳۲۰ مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

با مشخص شدن طرح اختلاط اولیه ۶ دسته طرح اختلاط مورد آزمایش قرار گرفتند که مقادیر اجزای آنها در جدول ۶ ارائه شده است لازم به ذکر است LWplain معرف بتن سبک شاهد فاقد نانوسیلیس و N1.5 و N3 و N5 و N10 به ترتیب بیانگر حضور ۱/۵ و ۳ و ۵ و ۱۰ درصد نانوسیلیس هستند که جایگزین بخشی از سیمان مصرفی می‌شوند و برای بررسی اثر نانوسیلیس به هر طرح در معرض حرارت اضافه می‌گردند. در طرح LWN10M0 به منظور بررسی اثرات حضور میکروسیلیس، میکروسیلیس از طرح اختلاط به طور کامل حذف شده است.

جدول ۶- مقادیر هر یک از اجزای تشکیل دهنده هر طرح اختلاط $(\frac{kg}{m^3})$

شماره طرح	نوع طرح	سیمان	میکرو سیلیس	نانو سیلیس	آب	فوق روان کننده	لیکا $\frac{3}{8}$	لیکا ۴	لیکا ۸	ماسه
۱	LWplain	۳۶۰	۴۰	-	۱۴۰	۱۰	۵۹/۷	۱۹۹/۶۶	۱۵۶/۲۲	۷۳۴/۲۲
۲	LWN1.5	۳۵۴/۶	۴۰	۵/۴	۱۴۰	۱۰	۵۹/۷	۱۹۹/۶۶	۱۵۶/۲۲	۷۳۴/۲۲
۳	LWN3	۳۴۹/۲	۴۰	۱۰/۸	۱۴۰	۱۰	۵۹/۷	۱۹۹/۶۶	۱۵۶/۲۲	۷۳۴/۲۲
۴	LWN5	۳۴۲	۴۰	۱۸	۱۳۱	۱۰	۵۹/۷	۱۹۹/۶۶	۱۵۶/۲۲	۷۳۴/۲۲
۵	LWN10	۳۲۰	۴۰	۴۰	۱۲۰	۱۰	۵۹/۷	۱۹۹/۶۶	۱۵۶/۲۲	۷۳۴/۲۲
۶	LWN10M0	۳۶۰	-	۴۰	۱۲۰	۱۰	۵۹/۷	۱۹۹/۶۶	۱۵۶/۲۲	۷۳۴/۲۲

آشکار است با افزایش دما شاهد کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن سبک هستیم. در دمای ۲۰۰ درجه شاهد ۷٪ کاهش مقاومت نسبت به دمای ۲۰ درجه هستیم. این افت مقاومت در دماهای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه به ترتیب ۲۸٪ و ۳۹٪ می‌رسد. آب فیزیکی در دمای ۱۲۰ درجه کاملاً متصاعد شده و خارج می‌گردد، در دمای بین ۱۸۰

نمونه مکعبی $10 \times 10 \times 10$ cm در آزمایشگاه ساخته شد و در سن ۷ روز مقدار میانگین مقاومت فشاری (kg/cm^2) ۳۰۲ و البته با میانگین وزن $1761/5gr$ بدست آمد، که با مقدار پیشنهادی ۵/۶٪ اختلاف داشته و نسبت مقاومت به وزن ۱۷/۱۴٪ دارد.

جدول ۵- مقادیر اجزای تشکیل دهنده طرح اختلاط پیشنهادی نرم افزار برای مقاومت فشاری حداکثر (kg/m^3) طرح T10

سیمان	۳۶۰
میکروسیلیس	۴۰
آب	۱۴۰
فوق روان کننده	۱۰
لیکا $\frac{3}{8}$	۵۹/۷
لیکا ۴	۱۹۹/۶۶
لیکا ۸	۱۵۶/۲۲
ماسه	۷۳۴/۲۲

همچنین طرح پیشنهادی تاگچی برای وزن حداقل نیز به مقاومت ۷ روزه (kg/cm^2) ۲۰۵ با وزن $1512gr$ رسید که با

۳- نتایج آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل آنها

۳-۱- بررسی مقاومت فشاری و وزن نمونه فاقد نانو سیلیس
آزمایش مقاومت فشاری مطابق با استاندارد BS1881-88 در دماهای ۲۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتیگراد بر روی نمونه‌ها انجام شد که نتایج آن در شکل ۱ ارائه شده است. همان‌طور که

⁴ BS 1881 British Standards Testing Concrete

تا ۳۰۰ درجه سانتی گراد آب پیوند شیمیایی از بین خواهد رفت. درجه حرارت بالا در محدوده ۴۰۰-۶۰۰ سانتیگراد منجر به تجزیه محصولات هیدراتاسیون و شروع تخریب ژل C-S-H خواهد شد که این خود سبب افت مقاومت فشاری می‌گردد [۱۹]. اگر بخواهیم با بیانی دقیق‌تر کاهش مقاومت بتن همراه با افزایش دما را توجیه کنیم، می‌توان گفت چنین کاهش در مقاومت متأثر از کاهش نیروهای واندروال بین لایه‌های C-S-H می‌باشد. این امر سبب کاهش در انرژی سطحی C-S-H و شکل‌گیری گروه‌های سیلانول Si-OH:OH-S می‌شود که دارای انرژی پیوند کمتری هستند.

۳-۲- بررسی مقاومت فشاری و افت وزن بتن با درصدهای گوناگون نانو سیلیس

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری و چگالی بتن خشک شده در دماهای ۲۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی گراد در جداول ۷ و ۸ ارائه شده‌اند.

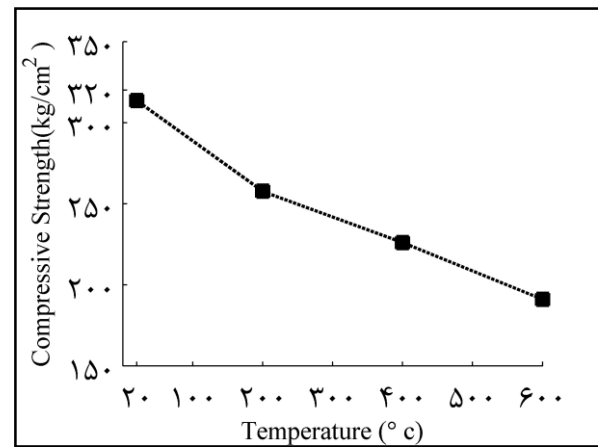
جدول ۷- نتایج آزمایش مقاومت فشاری در دماهای مختلف

نوع طرح	مقاومت فشاری (kg/cm ²)			
	دما (°C) ۲۰	۲۰۰	۴۰۰	۶۰۰
Lwplain	۵/۳۱۳	۶/۲۵۷	۲۲۶	۱۹۱
LWN1.5	۳۴۰	۹/۳۱۱	۲۷۶	۵/۱۹۲
LWN3	۳۱۵	۹/۲۶۴	۳/۲۳۲	۳/۲۰۴
LWN5	۲۹۰	۵/۲۴۴	۷/۲۱۲	۷/۲۲۸
LWN10	۲۸۰	۷/۲۵۲	۲۱۶	۳/۲۱۹
LWN10M0	۴/۲۶۴	۱/۲۰۷	۱۷۴	۷/۱۶۲

جدول ۸- وزن نمونه‌ها در دماهای مختلف

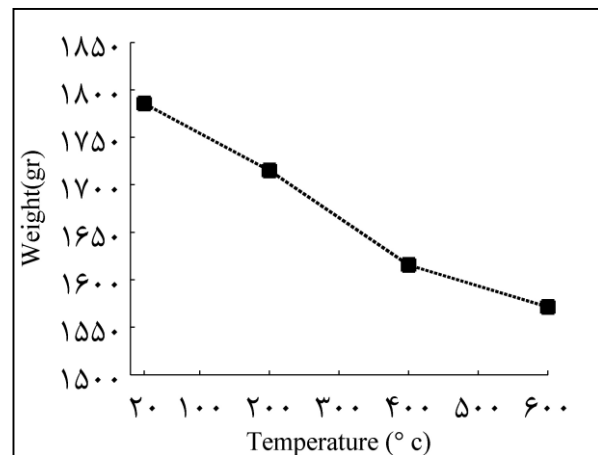
نوع طرح	وزن (gr)			
	دما (°C) ۲۰	۲۰۰	۴۰۰	۶۰۰
Lwplain	۱۷۸۵/۵	۱۷۱۵	۱۶۱۵/۵	۱۵۷۱
LWN1.5	۱۷۰۵	۱۶۵۵	۱۵۸۹	۱۵۴۴
LWN3	۱۷۱۵	۱۶۵۰	۱۵۸۰	۱۵۶۹
LWN5	۱۷۲۰	۱۶۵۵	۱۵۷۰	۱۵۵۸
LWN10	۱۷۳۰	۱۶۶۰	۱۵۸۸	۱۵۷۳
LWN10M0	۱۷۴۰	۱۶۶۵	۱۵۸۸/۱	۱۵۵۵

با تأملی در جداول ۷ و ۸، می‌توان گفت در دمای معمولی وزن- مخصوص ۲۸ روزه بتن خشک شده و مقاومت فشاری ۲۸ روزه تمامی طرح‌ها برای احراز مشخصات بتن سبک سازه‌ای طبق^۱ *ACI 213R-87* قابل پذیرش است. همچنین حفظ مقاومت فشاری بالای ۱۷ مگاپاسکال تا دمای ۶۰۰ درجه برای



شکل ۱- نمودار تغییرات مقاومت فشاری بتن سبک فاقد نانو

سیلیس با افزایش دما



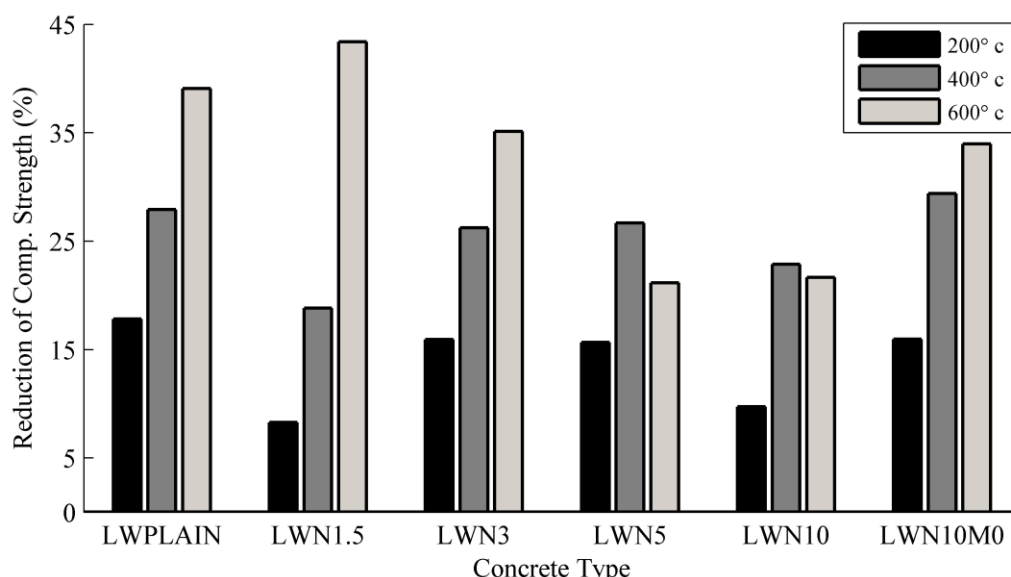
شکل ۲- تغییرات وزن بتن سبک فاقد نانو سیلیس با افزایش دما

تبخیر آب سبب کاهش وزن نمونه‌های بتنی نیز می‌گردد که این موضوع نیز در شکل ۳ مشهود است. با افزایش دما از ۲۰ به ۲۰۰ درجه شاهد ۴٪ کاهش وزن نسبت به دمای محیط هستیم که این

⁵ ACI 213R-87 Guide for Structural Lightweight Concrete

هر طرح در شکل ۳، درصد کاهش مقاومت فشاری تمام نمونه‌ها در دماهای مختلف نسبت به دمای ۲۰ درجه، در کنار یکدیگر آورده شده است. با توجه به شکل ۳ که به مقایسه درصد کاهش مقاومت هر طرح در دمای محیط با مقاومت همان طرح در دماهای بیشتر می‌پردازد، هویدا است که در دمای ۲۰۰ و ۴۰۰ درجه سانتیگراد کمترین افت مقاومت نسبت به طرح پایه به ترتیب با مقادیر ۸/۸٪ و ۱۸٪ متعلق به طرح LWN1.5 است. در دمای ۶۰۰ درجه طرح LWN5 با ۲۱/۱٪ کمترین افت مقاومت را دارد. اما در همین دما اتفاق متفاوتی می‌افتد و درصد افت مقاومت در طرح‌های LWN5 و LWN10 کاهش مقاومت کمتری نسبت به دمای ۴۰۰ درجه نشان می‌دهد.

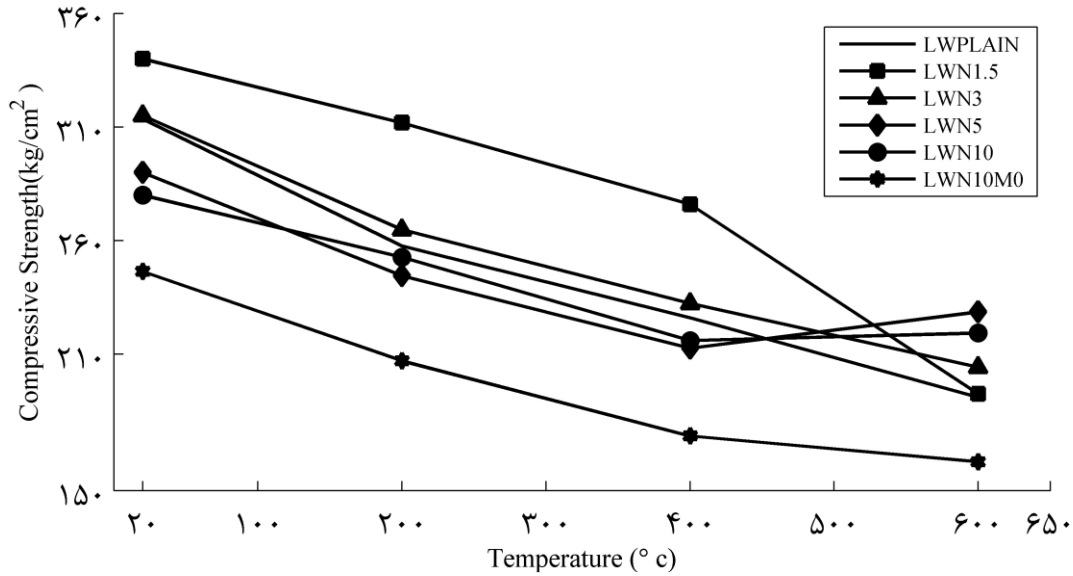
همه طرح‌ها بجز طرح LWN10M0 رخ داده است. این امر مؤید این نکته است که با افزایش دما ممکن است بتن سبک سازه‌ای از رده‌ی سازه‌ای خارج شود و مهم‌تر آن که افزایش نانوسیلیس در طرح‌های فاقد میکروسیلیس چندان سودمند نخواهد بود، نتیجه‌ای که در تحقیقات هاشمی و صدیقی نیز با مشاهده‌ی افزایش مقاومت فشاری فقط به هنگام افزایش توأمان مقدار نانوسیلیس و میکروسیلیس بکار رفته در طرح‌های اختلاط مورد تأیید قرار گرفته است [۱۸]. همان‌طور که از جدول ۷ مشخص است افزایش دما سبب کاهش مقاومت فشاری تمام نمونه‌های بتنی می‌گردد، اما این افت مقاومت در طرح‌های مختلف بسته به درصد افزودن نانوسیلیس متفاوت است. برای بررسی بهتر افت مقاومت فشاری



شکل ۳- نمودار درصد کاهش مقاومت فشاری هر طرح نسبت به دمای ۲۰ درجه سلسیوس

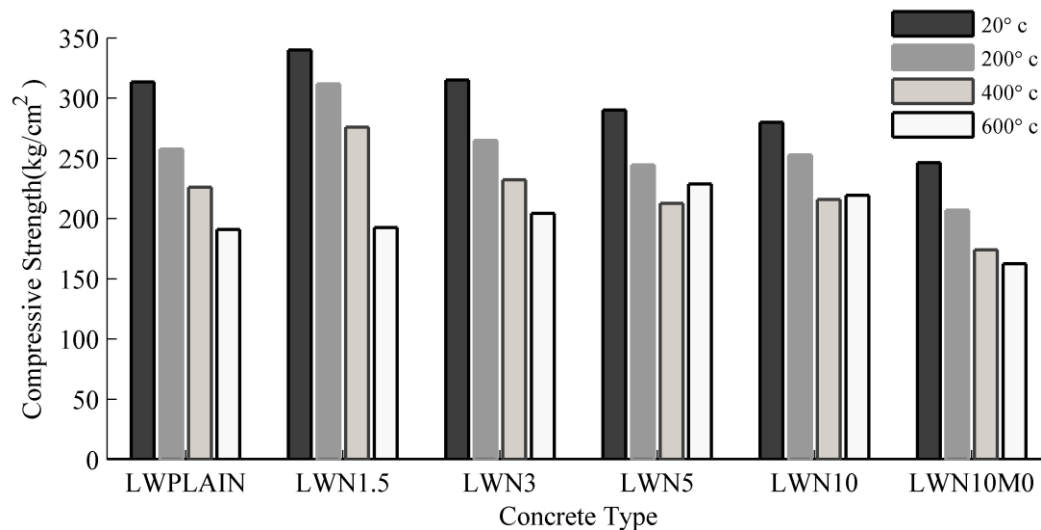
سانتیگراد کاملاً متصاعد شده و خارج می‌گردد، در دمای بین ۱۸۰ تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد آب پیوند شیمیایی از بین خواهد رفت و در درجه حرارت بالا در محدوده ۴۰۰-۶۰۰ سانتیگراد تجزیه محصولات هیدراتاسیون و شروع تخریب ژل C-S-H را داریم، که این خود سبب افت مقاومت فشاری می‌گردد [۹]. نکته مهم در این نمودار تغییر در روند کاهش می‌باشد که مقاومت فشاری آنها در ۶۰۰ درجه از دمای ۴۰۰ درجه بیشتر است و این با بقیه طرح‌ها هم‌خوانی ندارد. در نتایج تحقیقات Siddique و Kaur روی بتن‌های حاوی روبراه کوره آهن‌گدازی نیز افزایش مقاومت فشاری در دماهای ۳۵۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس نسبت به دمای ۱۰۰ درجه مشاهده می‌شود [۱۳].

با توجه به نمودار شکل ۴ کاملاً واضح است که کمترین مقاومت در طول آزمایش مربوط به طرح فاقد میکروسیلیس می‌باشد، که خود نشان دهنده تاثیر خوب این ماده در بهبود دوام بتن است. تا دمای ۴۰۰ درجه بیشترین مقاومت فشاری مربوط به طرح LWN1.5 است. در نگاه اول شاهد وجود یک روند در کاهش مقاومت فشاری با افزایش دما هستیم که همانند آنچه برای نمونه فاقد نانوسیلیس ذکر شد می‌توان گفت چنین کاهشی متأثر از کاهش نیروهای واندروال بین لایه‌های C-S-H است. این امر انرژی سطحی C-S-H را کاهش داده و سبب شکل‌گیری گروه‌های سیلاتول Si-OH:OH-S می‌شود که دارای انرژی پیوند کمتری هستند. از طرفی مطابق تحقیقات صورت گرفته می‌توان گفت: آب فیزیکی در دمای ۱۲۰ درجه



شکل ۴- نحوه تغییرات مقاومت فشاری با افزایش دما

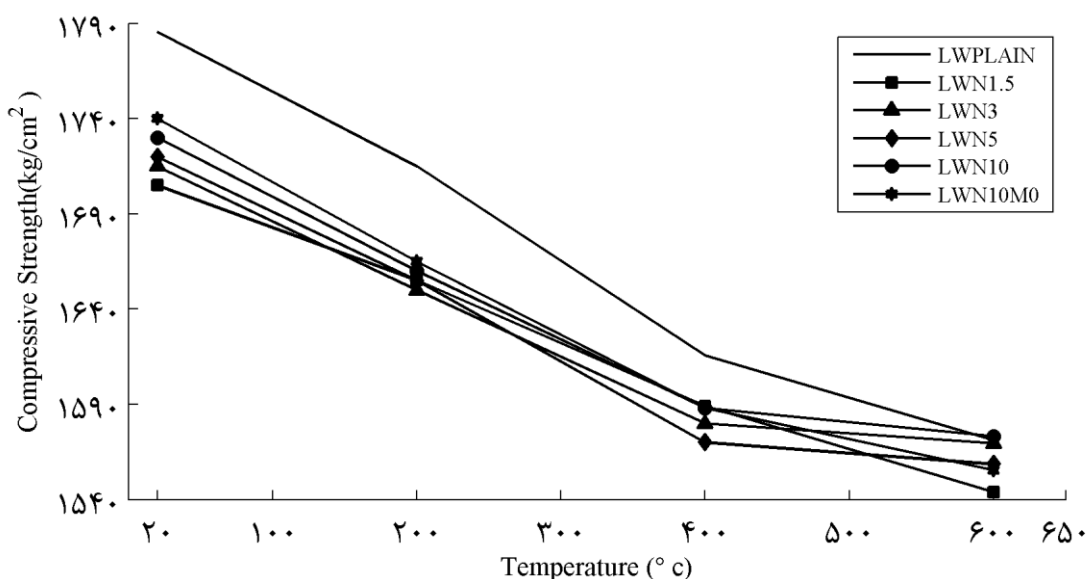
در تحقیقات Morsy و همکاران نیز افزایش مقاومت فشاری در دمای ۲۵۰ درجه همزمان با افزایش نانومتاکائولن نسبت به دمای محیط دیده می‌شود. اما در توجیه این افزایش مقاومت با وجود افزایش دما با تأملی در تحقیقات مذکور می‌توان به این نتیجه رسید که دلیل این گونه افزایش مقاومت در هیدراته شدن دانه‌هایی از سیمان است که تا قبل از رسیدن به چنین دمایی در هیدراسیون شرکت نکرده‌اند [۱۴]. نتایج تحقیقات مذکور را می‌توان مترادف با این موضوع دانست که به دلیل انتقال آب میان حفره‌ها هیدراته شدن دوباره ملات را خواهیم داشت. همچنین می‌توان گفت گروههای سیلانول در مجاورت آب بخشی از پیوندهای خود را از دست داده و باعث شکل‌گیری عناصر Si-O-Si کوتاه‌تر و قوی‌تر می‌شوند. از طرفی نباید از اثر هرچند کم ولی مثبت، بوجود آمدن ترک‌ها که با کاهش در تنش‌های حرارتی متناظر با افزایش دما همراه هستند چشم‌پوشی کرد. با در نظر گرفتن نتایج آزمایش مقاومت فشاری در دمای ۶۰۰ درجه می‌توان به تأثیر مثبت افزودن نانوسیلیس پی برد. افزودن ۱/۵٪ نانوسیلیس سبب افزایش ۰/۸٪ مقاومت فشاری گشته است. به همین ترتیب افزودن ۳٪، ۵٪ و ۱۰٪ نانوسیلیس به ترتیب سبب افزایش ۷٪، ۱۹/۷٪ و ۱۴/۸٪ نسبت به طرح پایه گشته است. شکل ۵ نیز موارد مذکور را مورد تایید قرار می‌دهد.



شکل ۵- نمودار میله ای تغییرات مقاومت فشاری در دماهای مختلف

بدست آمد که بیشترین مقاومت نمونه حاوی ۲۰ درصد میکروسیلیس در تمام دماهای مورد نظر (از ۲۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد) رخ می‌دهد [۸]. در مجموع می‌توان گفت که نانوسیلیس با مصرف $Ca(OH)_2$ و تبدیل آن به ژل C-S-H موجب استحکام و دوام بیشتر بتن در درجه حرارت‌های بالا می‌گردد و رشد بلورهای C-S-H طولانی و نازک و اشغال فضای کمتر در ماتریس بتن در درجه حرارت بالا می‌شود و در نتیجه تراکم ریزساختار کاهش میکرو ترک‌ها در زمان تنش‌های حرارتی را در پی دارد. مورد دیگری که در طول انجام این آزمایش مشاهده شد، کاهش وزن نمونه‌های بتنی با افزایش دما بود که این تغییرات نیز در نمودار شکل ۶ آورده شده است.

چنین تأثیر مثبتی از افزودن نانوسیلیس در افزایش مقاومت فشاری در تحقیقات هاشمی و صدیقی نیز مورد تایید قرار گرفته است [۱۷]. اما اینکه چرا افزایش مقاومت در طرح LWN10M0 همانند آنچه که در طرح LWN10 اتفاق افتاد رخ نداد ناشی از حذف میکروسیلیس بوده که این امر مؤید نتیجه‌ی حاصل از روش تاگوچی است که به نوعی بیانگر اثر بسزای میکروسیلیس در افزایش مقاومت فشاری است. اثرات مثبت مواد پوزولانی در مقیاس میکرو و نانو در بهبود مقاومت فشاری باقی‌مانده بتن در معرض حرارت می‌تواند به نتایج تحقیقات صورت گرفته بر روی بتن سبک حاوی میکروسیلیس اشاره کرد. با بررسی مقاومت‌های بدست آمده در نمونه‌های آن تحقیق، این نتیجه



شکل ۶- روند تغییرات وزن نمونه‌ها با افزایش دما

و ۱۲٪ است. بیشترین افت وزن در دمای ۲۰۰ درجه با مقدار ۴/۳٪ متعلق به طرح LWN10M0 می‌باشد. مشخص است که به دلیل وجود ترکیبات کلوییدی بیشتر نسبت به سایر طرح‌ها و تبخیر آب، این طرح بیشترین افت وزن را نشان می‌دهد. کمترین افت وزن در دماهای ۲۰۰ و ۴۰۰ مربوط به طرح LWN1.5 با ۲/۹٪ و ۶/۸٪ است. در دمای ۶۰۰ درجه کمترین افت را نمونه LWN3 با ۸/۵٪ دارد.

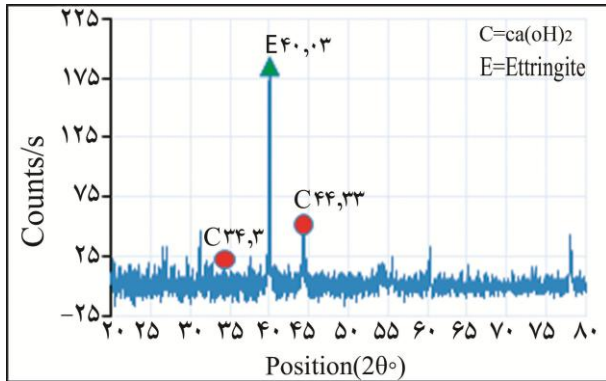
همان‌گونه که در نمودارهای شکل ۶ نمایان است افزایش دما باعث تبخیر آب موجود در نمونه‌ها شده است که در پی آن کاهش وزن اتفاق افتاده است. بیشترین وزن در طول آزمایش مربوط به طرح شاهد است. کمترین وزن نیز در ابتدا و انتهای آزمایش مربوط به طرح LWN1.5 است. از بررسی شکل ۶ می‌توان به این موضوع پی برد که با جای‌گزين کردن سیمان با نانوسیلیس کاهش وزن محسوسی در نمونه‌های بتنی رخ می‌دهد و با افزایش دما تا ۶۰۰ درجه نیز این روند ادامه دارد که این اختلاف بسیار کم می‌شود. نکته مهم در نمودارهای این شکل، تغییر شیب نمودار تمام طرح‌ها در افزایش دما از ۴۰۰ به ۶۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد، به جز طرح‌های LWN3، LWN5 و LWN10 که با شیب بسیار ملایم‌تری افت وزن از خود نشان می‌دهند. بیشترین افت وزن در دماهای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه مربوط به نمونه طرح شاهد به ترتیب با ۹/۵٪

۳-۳- آزمایش پراش اشعه ایکس

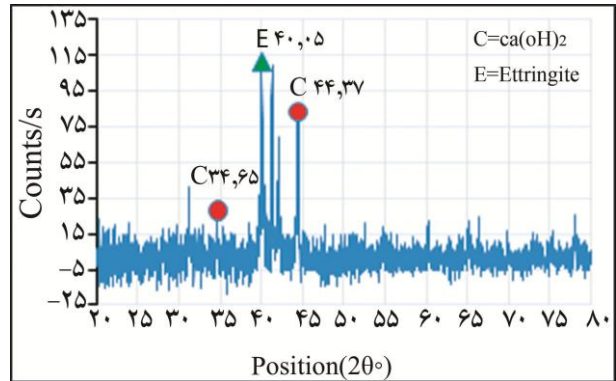
طیف‌های مورد بررسی در این آزمایش به وسیله دستگاه پراش اشعه ایکس مدل Xpert-pw3373 در دانشگاه اراک با تابش $(cu-k\alpha\lambda=1.54056\text{\AA})$ گرفته شده است. در تمامی طیف‌ها ولتاژ دستگاه 40Kv و جریان آن برابر 35mA بود. همچنین طول

مطالعه تمرکز روی تغییرات کریستال‌های هیدروکسید کلسیم است و حداکثر پیک حاصل از کریستال Ca(OH)_2 در زوایای 2θ برابر $33/5^\circ$ ، $44/5^\circ$ می‌باشد که با استفاده از پایگاه‌های اطلاعاتی بدست آمده است. در شکل‌های ۷ تا ۱۲ طیف‌های حاصل از آنالیز آزمایش XRD بر روی نمونه‌های حاوی درصد‌های متفاوت نانوسیلیس قرار گرفته در معرض 600°C درجه حرارت ارائه شده است.

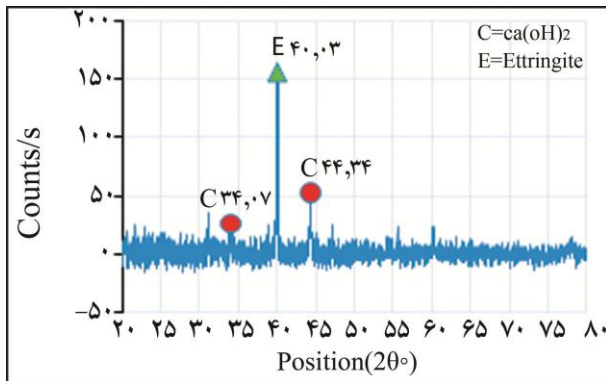
گام‌ها برای تغییر زاویه $0/2^\circ$ درجه و زمان توقف در هر گام برابر $0/1$ ثانیه در نظر گرفته شده است. جهت انجام این آزمایش ابتدا قطعاتی از مرکز نمونه‌های فشاری 10×10 جدا شده و این نمونه‌ها کاملاً به صورت پودری یکنواخت و همگن درآمده و مورد آزمایش قرار گرفتند. این آزمایش روی هر 6 طرح اختلاط که میزان نانوسیلیس در آنها از $0/0$ تا $10/0$ متغیر بود در دمای 600°C درجه انجام گرفت. در این



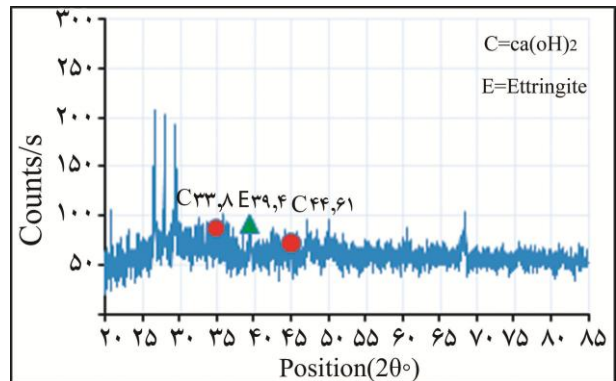
شکل ۱۰- نمونه حاوی ۵٪ نانوسیلیس (LWN5)



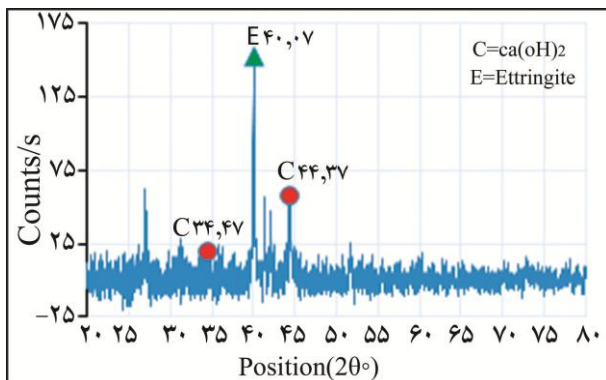
شکل ۷- نمونه شاهد (LWplain)



شکل ۱۱- نمونه حاوی ۱۰٪ نانوسیلیس (LWN10)

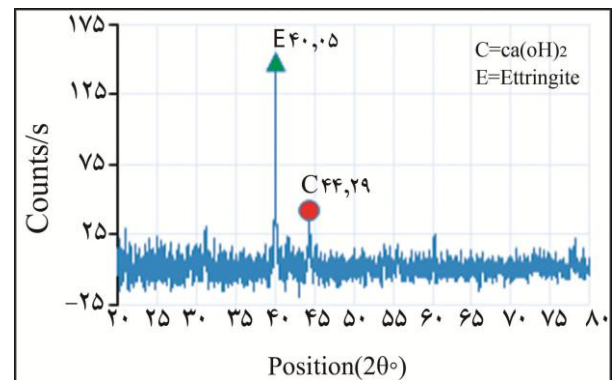


شکل ۸- نمونه حاوی ۱/۵٪ نانوسیلیس (LWN1.5)



شکل ۱۲- نمونه حاوی ۱۰٪ نانوسیلیس و فاقد میکروسیلیس

(LWN10M0)



شکل ۹- نمونه حاوی ۳٪ نانوسیلیس (LWN3)

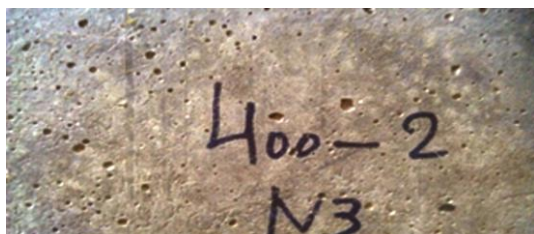
بسیار کمتر است. شکل ۱۵-الف تغییرات ظاهری نمونه LWN3 در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد که در مقایسه با نمونه شاهد (شکل ۱۳) ترک و تغییر رنگ کمتری را از خود نشان می‌دهد. شکل ۱۵ تغییر رنگ و ظاهر نمونه‌های حاوی نانوسیلیس در دماهای بالا را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- سطح ظاهری بتن LWplain در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد



شکل ۱۴- سطح ظاهری بتن LWplain در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد



شکل ۱۵-الف- بتن LWN3 در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد



شکل ۱۵-ب- بتن LWN1.5 در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد

شکل ۱۵-ب نیز نشان دهنده عملکرد بهتر بتن حاوی ۱/۵٪ نانوسیلیس نسبت به نمونه شاهد در دمای ۶۰۰ درجه است. با تأملی در روند حادث شده در سطح ظاهری بتن استنتاج این امر که با افزایش درجه حرارت بتن سبک در مقابل پدیده خورد و پوسته شدن

۳-۳-۱- بررسی طیف‌های حاصل از آزمایش XRD همان‌طور که در نمودار شکل‌های ۷ تا ۱۲ مشاهده می‌گردد، افزایش نانوسیلیس در درجه حرارت‌های بالا نیز در کاهش پیک‌های هیدروکسید کلسیم موجود در ساختار خمیر سیمان مؤثر بود، چنین کاهش در تعداد پیک‌های هیدروکسید کلسیم در پژوهش هاشمی و صدیقی همزمان با افزایش نانوسیلیس از ۱/۵٪ به ۳٪ نیز گزارش شد [۱۸].

حذف میکروسیلیس با افزایش مجدد پیک‌های هیدروکسید کلسیم همراه است. این مطلب با مطالعه پیک حاصل شده در زاویه ۲θ برابر ۳۳/۵ درجه در نمونه LWN1.5 به میزان ۹۵ مرتبه مشاهده می‌گردد که در نمونه LWN3 و نیز در نمونه LWN5 به میزان ۱۷ مرتبه محدود می‌گردد، البته مشخص گردید که افزودن نانوسیلیس به میزان ۱۰ درصد و حذف میکروسیلیس باعث بالارفتن مجدد پیک هیدروکسید کلسیم تا ۷۶ مرتبه می‌گردد، که این امر خود توجیه‌کننده کاهش مقاومت رخ داده در این طرح به دلیل حذف میکروسیلیس می‌باشد. در زاویه ۲θ برابر ۴۴/۵ درجه در نمونه‌های LWplain و LWN1.5 حداکثر پیک هیدروکسید کلسیم ۸۳ مرتبه مشاهده می‌گردد که با افزایش نانوسیلیس به میزان ۳ و ۵ درصد این پیک ایجاد شده به ترتیب به ۴۲ و ۵۲ مرتبه کاهش می‌یابد. باز هم مشاهده می‌گردد حذف میکروسیلیس از طرح حاوی ۱۰ درصد نانوسیلیس سبب افزایش این پیک تا ۵۸ مرتبه می‌شود.

۴-۳- اثرات حرارت بر ظاهر بتن سبک

با بررسی تصاویر سطح نمونه‌ها بعد از قرارگیری در معرض حرارت که در شکل‌های ۱۳ الی ۱۵ ارائه شده‌اند، اولین نکته‌ای که به چشم می‌خورد تغییر رنگ نمونه‌های شاهد است. در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد نمونه‌ها تغییر رنگ خاصی ندارند، اما با بالاتر رفتن دما در ۴۰۰ درجه سانتیگراد رنگی مایل به زرد به خود می‌گیرند و در ۶۰۰ درجه به رنگ سفید میل می‌کنند. بررسی تغییر رنگ نمونه‌ها همزمان با افزایش دما در تحقیقات در سال ۲۰۰۸ [۸] و بسطامی و همکاران [۱۰] نیز مد نظر قرار گرفته است و نتایج مشابهی در پی داشته است. نکته دوم رشد ترک‌هاست، همزمان با افزایش دما رشد ترک‌ها نیز افزایش می‌یابد که در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس

¹ X-ray Power Diffraction (XRD)

در نتایج تحقیقات اسماعیل نیا عمران و بهمند به تاثیرات مثبت استفاده از مواد پوزولانی در کاهش نفوذپذیری بتن در دماهای بالا پرداخته می شود [۱۹]. در مجموع می توان اظهار داشت که افزودن نانوسیلیس در درصدهای کم والبته بصورت کنترل شده می تواند اثری مثبت بر نفوذپذیری نمونه بتن سبک داشته باشد که در این پژوهش با جایگزینی ۱/۵٪ نانوسیلیس به این مهم دست یافتیم.

جدول ۹- جذب حجمی نیم ساعته آب کلیه طرح ها

نوع طرح	جذب آب در مدت نیم ساعت (%)		
	۲۰°C	۴۰°C	۶۰°C
LWplain	۱/۲۰	۵/۳۱	۶/۱۰
LWN1.5	۱/۰۰	۴/۵۲	۶/۱۱
LWN3	۱/۱۸	۵/۲۶	۶/۰۳
LWN5	۱/۰۴	۵/۷۵	۶/۰۷
LWN10	۱/۴۹	۵/۶۶	۵/۷۸
LWN10M0	۱/۳۰	۴/۷۷	۶/۱۴

جدول ۱۰- جذب حجمی ۲۴ ساعته آب کلیه طرح ها

نوع طرح	جذب آب در مدت ۲۴ ساعت (%)		
	۲۰°C	۴۰°C	۶۰°C
LWplain	۱/۵۳	۱۰/۲۱	۱۰/۸۵
LWN1.5	۱/۳۶	۸/۷۹	۱۰/۸۱
LWN3	۱/۴۵	۱۰/۰۴	۱۰/۷۸
LWN5	۱/۵۲	۱۰/۴۵	۱۰/۵۴
LWN10	۲/۰۵	۱۰/۳۳	۱۰/۶۷
LWN10M0	۲/۱۹	۱۰/۵۶	۱۱/۱۸

جدول ۱۱- جذب حجمی ۴۸ ساعته آب کلیه طرح ها

نوع طرح	جذب آب در مدت ۴۸ ساعت (%)		
	۲۰°C	۴۰°C	۶۰°C
LWplain	۱/۹۰	۱۴/۱۳	۱۱/۵۶
LWN1.5	۱/۳۸	۹/۲۰	۱۱/۴۸
LWN3	۱/۸۲	۱۱/۱۲	۱۱/۴۱
LWN5	۱/۵۷	۱۰/۷۲	۱۱/۱۶
LWN10	۲/۰۷	۱۱/۲۰	۱۱/۳۸
LWN10M0	۲/۲۵	۱۱/۴۱	۱۱/۶۰

(Spalling) از خود ضعف نشان می دهد قابل پذیرش است و می توان به این نتیجه رسید که با افزودن درصد نانوسیلیس در ترکیب می توان تا حدودی رخدادهای این ضعف را تحت کنترل قرار داد.

۳-۵- آزمایش جذب حجمی آب

آزمایش جذب حجمی آب بر روی نمونه های مکعبی ۱۰×۱۰ سانتیمتری در دماهای مورد نظر انجام گرفت و نتایج حاصل از میانگین گیری بین ۳ نمونه در جداول ۹ الی ۱۱ ارائه شده اند. در ابتدا با نگاهی دوباره به نتایج آزمایش XRD و یادآوری کاهش تعداد پیک های $Ca(OH)_2$ از آنجایی که این کاهش یعنی تولید بیشتر ژل متراکم C-S-H و به دنبال آن متراکم تر شدن ساختمان ملات، در نهایت می توان انتظار داشت که نفوذپذیری هم کاهش یابد. حال با تأمل در نتایج جداول ۹ تا ۱۱ مشخص می شود که افزایش دما سبب افزایش چشمگیر تخلخل و نفوذپذیری و در نتیجه افزایش جذب حجمی آب نمونه ها می شود. این افزایش نفوذپذیری در ۲۴ ساعت از دمای ۲۰ تا ۴۰ درجه به ۶/۵ برابر نیز می رسد. پیداست که در دماهای ۲۰ و ۴۰ درجه طرح LWN1.5 کمترین نفوذپذیری را دارد. از طرفی افزودن نانوسیلیس در درصدهای بالا و حذف میکروسیلیس از طرح اختلاط سبب ضعف عملکرد بتن سبک در برابر حرارت های بالا می گردد. در دمای ۲۰ درجه افزودن تنها ۱/۵ نانوسیلیس سبب کاهش ۲۷٪ جذب حجمی آب می گردد ولی افزودن ۱۰٪ نانوسیلیس در حضور میکروسیلیس موجب افزایش ۹٪ جذب حجمی آب می گردد و چنانچه میکروسیلیس نیز از طرح اختلاط حذف شود این افزایش به ۱۸/۶٪ هم می رسد.

با تأمل بیشتر در جداول مشخص می گردد که با گذشت ۰/۵ ساعت از شروع آزمایش در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد نمونه های حاوی ۱۰٪ نانوسیلیس بیشترین نفوذپذیری را دارند. همچنین با گذشت ۲۴ ساعت، این نمونه ی LWN10M0 است که در تمام دماها و همینطور پس از ۴۸ ساعت بیشتر از سایر طرح ها از خود نفوذپذیری نشان می دهد. همانگونه که مشخص است از دمای ۴۰ درجه با تجزیه هیدروکسید کلسیم موجود در ترکیبات سیمانی و تخریب ماتریس بتن، رشد تخلخل و افزایش جذب آب اتفاق می افتد، نتیجه ای که مرجع [۱۹] نیز بدان می رسد. نانوسیلیس با مصرف $Ca(OH)_2$ و تبدیل آن به کلسیم سیلیکات هیدرات که دمای ذوب آن ۹۰۰ درجه است موجب بهبود دوام بتن در برابر دماهای بالا می گردد.

۴- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این مطالعه بررسی تغییرات به وجود آمده در خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن سبک همراه با افزایش دما و واکاوی تأثیرات مثبت و منفی درصد‌های مختلف نانوسیلیس و میزان اثرگذاری این درصد‌های مختلف در ایجاد تغییر در خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن سبک همراه با افزایش دما می‌باشد، نتایج حاصل به شرح ذیل می‌باشد:

۱- افزایش دما سبب کاهش مقاومت فشاری تمام نمونه‌های بتنی می‌گردد که این افت مقاومت در طرح‌های مختلف بسته به درصد افزودن نانوسیلیس متفاوت است با افزایش درصد نانوسیلیس میزان افت مقاومت نسبت به دمای اتاق در مقایسه با نمونه فاقد نانوسیلیس هم افزایش می‌یابد ولی به واسطه‌ی افزایش درصد نانوسیلیس مقاومت نهایی طرح همراه با این افزایش دما نسبت به نمونه فاقد نانوسیلیس افزایش می‌یابد، به عبارتی نانوسیلیس با افزایش دما نقش مثبت خود را بر روی مقاومت فشاری بصورتی پررنگ‌تر ایفا می‌کند.

۲- همزمان با افزایش درصد نانوسیلیس در طرح‌های دارای میکروسیلیس پیش‌بینی افزایش و یا حداقل عدم کاهش در مقاومت فشاری به دلیل کامل شدن هیدراسیون که درصد بالایی از نانوسیلیس را هم به همراه دارند چندان دور از انتظار نیست، حال آنکه این کامل شدن در هیدراسیون ممکن است در سایر طرح‌ها هم رخ دهد، ولی به دلیل کمتر بودن درصد نانوسیلیس افزایش مقاومت فشاری ناشی از کامل شدن هیدراسیون نمی‌تواند کاهش مقاومت فشاری ناشی از افزایش دما را جبران کند.

۳- با افزودن نانوسیلیس می‌توان روند حرکت بتن سبک به سمت نشان دادن ضعف در مقابل کنده شدن یا Spalling را کند کرد.

۴- با افزودن نانوسیلیس بصورتی کاملاً محدود و کنترل شده می‌توان ضعف بتن سبک در برابر افزایش نفوذپذیری با افزایش دما را برطرف کرد.

۵- افزودن نانوسیلیس موجب کاهش در میزان شدت پیک‌های هیدروکسید کلسیم می‌گردد. افزودن بیشتر نانوسیلیس تأثیری بیشتر در کاهش شدت پیک‌های هیدروکسید کلسیم موجود در نمونه‌های بتنی دارد. از طرفی به دلیل کاهش در شدت پیک‌های هیدروکسید کلسیم همزمان با افزایش درصد نانوسیلیس و تولید ژل C-S-H ساختمان سیمان متراکم‌تر شده لذا مقاومت بتن افزایش و نفوذپذیری آن کاهش می‌یابد.

۵- مراجع

- [1]. رضایانپور، ع.ا.، بتن سبک از تحقیق تا کاربرد، اولین کنفرانس ملی بتن سبک، دانشگاه تهران، ۱۳۹۰.
- [2] Bamonte P, Gambarova PG, Meda P., Today's concretes exposed to fire-test results and sectional analysis. *Struct Concr* 2008; 9(1): 19-29.
- [3] Morsy MS, Rashad AM, El-Nouhy HA., Effect of elevated temperature on physico-mechanical properties of metakaolin blended cement mortar. *Struct Eng Mech* 2009; 31: 1-10.
- [4] Morsy MS, Rashad AM, Shebl SS., Effect of elevated temperature on compressive strength of blended cement mortar. *Build Res J* 2008; 56: 173-85.
- [5] Morsy MS, Othman TA, Abo-El-Enein SA. Effect of fire on physiothermal properties of admixed cement. *Disaster Management and safety of building in Arab countries, Riyadh, Kingdom of Saudi Arabia, March 29-April 01, 2008.*
- [6] Arioiz O. Effect of elevated temperature on properties of concrete. *Fire Saf J* 2007; 42: 516-22.
- [7] Phan LT, Carino Nj. Effect of test conditions on behavior of high-strength concrete exposed to high temperature, *ACI Material Journal*, 99(1): 54-66, 2002.
- [8] Tanyildizi H , Coskun A. Performance of lightweight concrete with silica fume after high temperature, *Construction and Building Materials*, NO 22 (2008): 2124-2129.
- [9] Othuman MA, Wang YC. Elevated- temperature thermal properties of light- Weight foamed concrete, *Construction and Building Materials*, 25 (2011): 705-716.
- [10] Bastami M, Chaboki-Khiabani A, Baghbadrani, M. Kordi, "Performance of high strength concretes at elevated temperatures, *Scientia Iranica A*(2011) 18 (5): 1028-1036.
- [11] Won JP, Kang HB, Lee SW, Kan JW. Thermal characteristics of high-strength polymer-cement composites with light weight aggregate and polypropylene fiber, *Construction and Building Materials* 25 (2011): 3810-3819.
- [12] Andic-Cakır O, Hızal S. Influence of elevated temperatures on the mechanical properties and microstructure of self consolidating lightweight aggregate concrete *Construction and Building Materials*, 34 (2012): 575-583.
- [13] Siddique R, Kaur D. Properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag at elevated temperatures, *Journal of Advanced Research* (2012) 3: 45-51.

[14] Morsy M.S., . Al-salloum Y.A, Abbas H. , Alsayed S.H.. Behavior of blended cement mortars containing Nano-Metakaolin at elevated temperature, Construction and Building materials, 35 (2012) 900-905.

[15] Hashemi S.H., MirzaeiMoghadam I.. Influence of Nano-silica and Polypropylene Fibers on Bond Strength of Reinforcement And Structural Lightweight Concrete IJE TRANSACTIONS B: Applications Vol. 27, No.2, (February 2014) 261-268

[16] ACI 213R, Guide for Structural Light-weight Aggregate Concrete, ACI 213R; 1998

[17] Automatic Design and Analysis of Taguchi Experiments, Nutek, Inc.

[۱۸] هاشمی، سید حمید. و صدیقی، حمیدرضا. ، کاربرد روش تاگوچی در پیش‌بینی طرح اختلاط بهینه‌ی بتن سبک حاوی نانوسیلیس و میکروسیلیس. مجله تحقیقات بتن، سال پنجم، شماره دوم، ص ۵۳-۴۵، زمستان ۹۱.

[۱۹] اسماعیل نیا عمران، محمد. و نوریان بهمند، محسن. ، اثر پوزولان‌های طبیعی کشور بر دوام بتن خودتراکم در برابر درجه حرارت بالا. اصفهان: نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان اردیبهشت ۱۳۹۱.

High Temperatures and Nano-Silica Effects on Mechanical Properties of Structural Lightweight Concrete

Seyed Hamid Hashemi*

Assistant Professor, Faculty of Engineering, Arak University, Arak.

Ali Noroozi Arkavini

Department of Civil Engineering, Arak University, Arak, Iran.

Abstract

The behavior of light weight concrete at elevated temperature is of significant importance in providing safety of structures in response to certain accidents or particular service conditions. This paper deals with the physical and mechanical properties of light weight concrete “containing leca” such as: compressive strength, water absorption, mass loss and spalling. Specimens with different amount of Nano Silica by applying the Taguchi method for an optimal mix design had been made and after curing for 28 days and being subjected to 200, 400 and 600°C specimens had been compared with the specimen without Nano silica and cured at room temperature. It was found that by increase temperature to 600°C physical properties of light weight concrete like water absorption goes bad and in some condition an improvement in mechanical properties like compressive strength had been emerged surprisingly.

Keywords: High Temperature and Lightweight Concrete, Elevated temperature effects, Lightweight Concrete and Nano-Silica, Taguchi Method, Lightweight Concrete and Optimal mix design.

*Corresponding Author: h-hashemi@araku.ac.ir