

Evaluation of the effects of using nano silica, titanium and nano composites on mechanical properties of light weight concretes under high temperature by experimental investigation

Milad Khosrawi

Student, Department of Civil Engineering, Ahv.c, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Abdolkarim Abbasi Dezfouli*

Department of Civil Engineering, Ahv.c., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Ha.Abbas@iau.ac.ir

Keywords:

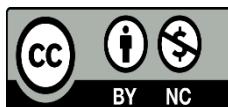
Light weight concrete,
Nano silica,
Nano titanium,
Nano composite,
High tempreture

Abstract

In this research, investigation of the effect of nano silica, nano titanium and nano composites on 28 days compressive strength of light weight concrete made by pearlite under high temperature were carried out. The results show that by increasing the nano materials the strength is increased. More strength increasement were achieved by nano silica (3% of cement used), this result is close to 3% of nano composite, however the 3% of nano silica has less weight therefore considered as more optimized mix. In the mix containing 3% nano silica in temperature 800, 600, 400, 200, 100°C the strength reduction was 84%, 74%, 42%, 15% and 14% respectively. In the mix containing 3% nano composite the strength reduction was 89%, 82%, 51%, 21% and 24% at the same range of temperature. At 200°C the reducing strength is not high, using nano materials even though slightly causing increasing strength. At 400°C however the strength is decreased in all light weight concrete made by the nano materials. In the testing of absorbed water in the specimens it was seen that by increasing nano the absorbed water is reduced this significantly seen in nano composite samples.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC است.



* Corresponding Author

بررسی تأثیر استفاده از مواد نانوسیلیس، نانو تیتانیوم و نانوکامپوزیت بر خواص مکانیکی بتن‌های سبک تحت اثر حرارت بالا با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی

میلااد خسروی حاجی‌وند

دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

عبدالکریم عباسی دزفولی*

دانشیار گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

hamiidabbasi0916@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۲۵ فروردین ۱۴۰۴

تاریخ دریافت: ۲۸ آذر ۱۴۰۳

چکیده

در این تحقیق به بررسی تأثیر استفاده از نانوسیلیس، نانو تیتانیوم و نانوکامپوزیت بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه و جذب آب بتن سبک ساخته شده از سبکدانه پرلیت تحت اثر حرارت بالا پرداخته شد. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داد که بطور کلی با افزایش مقادیر نانومواد در بتن سبک، مقاومت فشاری بتن افزایش یافته است و این میزان افزایش در حالت استفاده از ماده نانوکامپوزیت به میزان ۳ درصد سیمان مصرفی، نسبت به سایر نانومواد مقدار بیشتری دارد. با این وجود به دلیل نزدیک بودن مقاومت فشاری بتن حاوی ۳ درصد نانوسیلیس با بتن حاوی ۳ درصد نانوکامپوزیت و کمتر بودن وزن آن، طرح اختلاط بتن حاوی ۳ درصد نانوسیلیس به عنوان بهینه‌ترین طرح اختلاط انتخاب می‌شود. علاوه بر این، نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها تحت اثر حرارت‌های بالا نشان داد در ترکیب حاوی نانو سیلیس ۳٪ در حرارت ۸۰۰، ۶۰۰، ۴۰۰، ۲۰۰، ۱۰۰ درجه سانتیگراد شاهد کاهش مقاومت بترتیب به میزان ۸۴٪، ۷۴٪، ۴۲٪، ۱۵٪ و ۱۴٪ نسبت به دمای معمول بود. در بتن حاوی ۳ درصد نانو تیتانیوم روند کاهش مقاومت ۸۲٪، ۷۴٪، ۲۳٪، ۱۰٪ و ۵٪ (افزایش مقاومت) و برای بتن حاوی نانو کامپوزیت روند کاهش مقاومت تحت حرارت ذکر شده بالا بترتیب ۸۹٪، ۸۲٪، ۵۱٪، ۲۱٪ و ۲۴٪ بود. تا دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد، مقاومت بتن افت ناچیزی داشته و در برخی موارد حتی افزایش مقاومت فشاری نیز دیده می‌شود. اما از دمای ۴۰۰ درجه با شیب تصاعدی کاهش مقاومت فشاری بتن سبک اتفاق می‌افتد.

کلیدواژه‌گان: بتن سبک، پرلیت، مقاومت فشاری، نانوسیلیس، نانو تیتانیوم، نانوکامپوزیت

*نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

بتن، به عنوان یکی از کاربردی‌ترین مصالح ساختمانی، همواره دچار پیشرفت‌ها و تحولات زیادی شده است. سه عامل زمان، هزینه و کیفیت اجرا تأثیر مهمی در این صنعت دارند. همواره هرگونه پیشرفتی که باعث بهبود این سه عامل گردد، موردعلاقه مهندسين خواهد بود. با توسعه روزافزون سازه‌های بتنی، نیاز به تولید بتن‌های با مقاومت و کارایی بالا بیش‌ازپیش احساس می‌شود. مروری در استفاده از سه نوع مواد نانو مانند نانوسیلیس، نانو کربنات کلسیم و نانوتیوب و عملکرد آنها در ارتقای ریزساختار و تسریع در واکنش حرارت هیدراسیون و ارتقای سطح تماس و کارایی بتن صورت گرفت برای پروژه‌های معمول عمرانی نانو کربنات کلسیم به واسطه هزینه کمتر سفارش شد [۱]. در سال‌های اخیر استفاده از مواد افزودنی این امکان را برای محققین علم تکنولوژی بتن فراهم نموده است که بتوانند بتن‌های خاصی را برای شرایط مختلف طراحی نمایند [۲]. با توجه به پدیده زلزله، سبک‌سازی و کاهش وزن سازه‌های بتنی، امری ضروری بوده و همین امر لزوم استفاده از بتن‌های سبک را افزایش می‌دهد. روش‌های مختلفی جهت تولید بتن سبک به کار گرفته شده است. استفاده از سنگدانه‌های سبک در بتن یکی از راهکارهای مناسب جهت تولید بتن سبک می‌باشد. به طور معمول، سنگدانه‌های سبک پرلیت، پومیس و لیکا می‌توانند به عنوان سبکدانه در ساخت بتن سبک مورد استفاده قرار گیرند [۳]. علی‌رغم حل مشکل وزن بالای بتن توسط بتن‌های سبک، مقاومت فشاری نسبتاً کم و افت خشک‌شدگی زیاد بتن‌های سبک، استفاده از این نوع بتن‌ها را محدود کرده است. استفاده از افزودنی‌های مناسب می‌تواند به عنوان یک راهکار جدید برای کاهش همزمان وزن سازه‌ها، کاهش اثرات زیست‌محیطی منفی ناشی از تولید سیمان در صنعت ساخت و ساز و بهبود خواص بتن سبک سازه‌ای مدنظر قرار گیرد [۴].

از سبکدانه‌های طبیعی در ساخت فرآورده‌های سبک مانند انواع بتن‌های سبک، ملات‌ها و اندودها، فرآورده‌های قیری، خاک کشاورزی و... استفاده می‌شود. امروزه استفاده از مصالح قدیمی و روش‌های سنتی ساخت، جوابگوی سرعت موردنظر و نیازهای طراحی نمی‌باشد. از این‌رو استفاده از مصالح و تکنیک‌های نوین در ساخت‌وساز امری اجتناب‌ناپذیر است. سنگدانه‌های سبک به‌صورت طبیعی یا مصنوعی هستند. برخی از دانه‌های طبیعی سبک مانند پومیس (pumice) یا پوکه سنگ، اسکوریا (scoria) یا سنگ‌پا، خاکستر و توف‌ها منشأ آتشفشانی دارند و برخی مانند

دیاتومیت (diatomite) رسوبی هستند. محدودیت در استفاده از این سنگدانه‌ها غالباً به دلیل مشکلات دسترسی به منابع و مسائل حمل‌ونقل است. برخی از دانه‌های سبک طبیعی که به آن پوکه معدنی گفته می‌شود؛ مانند پومیس و اسکوریا وجود دارند که محصول انفجارهای آتشفشانی هستند.

پرلیت یک نوع سنگ شیشه غیر متبلور آتشفشانی است که در ابتدا دارای مقدار زیادی آب در ساختار خود است و معمولاً از هیدراسیون اسییدن (نوعی سنگ طبیعی آتشفشانی) تشکیل می‌شود. این سنگ به‌صورت طبیعی ساخته می‌شود و دارای این ویژگی غیرمعمول است که در صورت گرم‌شدن به شکل مناسب به مقدار قابل توجهی منبسط می‌شود. این ماده معدنی یک ماده صنعتی است و به دلیل چگالی بسیار پایین بعد از پردازش، کاربردهای تجاری بسیاری دارد. پرلیت زمانی که به درجه حرارت ۸۵۰ تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد می‌رسد نرم می‌شود. در این بازه دمایی آبی که در ساختار این سنگ وجود دارد تبخیر می‌شود و از آن خارج می‌گردد و این مسئله باعث می‌شود که این ماده معدنی به‌اندازه ۷ تا ۱۶ برابر حجم اصلی خود منبسط شود. ماده منبسط شده به‌خاطر وجود حباب‌های ایجاد شده در ساختارش به شکل قابل توجهی سفید و درخشان است. پرلیت پردازش نشده یا خام با چگالی ۱۱۰۰ کیلوگرم بر مترمربع بسیار سنگین است؛ اما بعد از پردازش و انبساط، این ماده در حالت پودری دارای چگالی تنها ۳۰ تا ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب بسته به نوع پردازش است.

برخی محققین [۵ و ۶] در تحقیقاتشان بر روی بتن‌های سبکدانه حاوی سبکدانه‌های طبیعی چون توف و پرلیت یا سبکدانه‌های مصنوعی چون رس منبسط شده یا شل مطالعه کرده‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که افزودنی‌هایی مانند خاکستر بادی، میکروسیلیس و پوزولان‌های طبیعی در بتن سبک، سبب بهبود مشخصات مختلفی در بتن می‌شود؛ چرا که واکنش‌های پوزولانی منجر به بهبود مشخصات مکانیکی می‌شود [۷]. مقاومت فشاری در بتن سبک سازه‌ای، ۲۱ تا ۲۸ مگا پاسکال است [۸]. در ایران هم به دلیل زلزله‌خیز بودن منطقه و گرایش به بلند مرتبه‌سازی، لزوم استفاده از مصالح سبک وزن سازه‌ای همراه با تکنولوژی روز دنیا، جهت بالا بردن خصوصیات مکانیکی محصول حاصل احساس می‌شود.

بر اساس آیین‌نامه مؤسسه بتن امریکا (ACI) بتن‌های سبک سازه‌ای بتن‌هایی هستند که ضمن دارا بودن چگالی کمتر از ۱۹۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت فشاری بیش از ۱۷ مگا پاسکال دارند [۹]. چگالی کمتر بتن سبک نسبت به بتن معمولی، راه حلی مناسب برای کاهش مشکلات

ناشی از وزن زیاد سازه‌های بتنی معرفی شده است. به همین دلیل استفاده از بتن سبک در ساخت سازه‌های مختلف مانند عرشه‌ی پل‌های با دهانه بلند، سقف ساختمان‌های بلندمرتبه، سکوها‌ی شناور، قطعات پیش‌ساخته بتنی و موارد نظیر آن کاربرد گسترده‌ای یافته است [۱۰].

بتن سبک بتنی است که وزن مخصوص آن کمتر از وزن مخصوص بتن معمولی باشد. این بتن در سه نوع طبقه‌بندی می‌شود که عبارت‌اند از بتن سبک غیرسازه‌ای، بتن سبک سازه‌ای و بتن سبک متوسط. بتن سبک غیرسازه‌ای دارای وزن مخصوص کمتر از ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. با وجود وزن مخصوص کم، مقاومت فشاری این بتن حدود ۳/۵ تا ۷ مگاپاسکال است. بتن سبک سازه‌ای دارای وزن مخصوصی بین ۱۴۰۰ تا ۱۹۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده و حداقل مقاومت فشاری مورد نیاز برای این نوع بتن ۱۷ مگاپاسکال است. وزن مخصوص و مقاومت فشاری بتن سبک متوسط در محدوده بین بتن‌های سبک غیرسازه‌ای و بتن سبک سازه‌ای قرار دارد. مقاومت فشاری این بتن‌ها بین ۷ تا ۱۷ مگاپاسکال و وزن مخصوص آنها بین ۸۰۰ تا ۱۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد [۱۱].

از زمان معرفی نانوتکنولوژی توسط ریچارد در سال ۱۹۵۹ به بعد پیشرفت‌های زیادی در علوم مختلف به وجود آمده که منجر به دستکاری مواد در مقیاس بسیار کوچک در حد نانو شده است [۱۲ و ۱۳]. در سال‌های اخیر نانو تکنولوژی در حد گسترده و با سرعت بالایی در تمامی زمینه‌ها و مواد به کار برده می‌شوند و توجه بسیاری از دانشمندان را به خود جلب کرده است. زیرا این علم توانایی استفاده از ذرات در اندازه نانو را در اختیار محققین و صنایع قرار می‌دهد تا محصولات جدیدی تولید کنند. این نانو موادی در ترکیب با خمیر سیمان مصرفی در بتن خصوصیات فیزیکی و مکانیکی جدیدی به آن می‌دهند [۱۴]. در چند سال اخیر تحقیقات بسیاری بر روی کاربرد فناوری نانو در تکنولوژی بتن با کاربردهای مختلف از جمله روسازی‌های بتنی انجام شده است [۱۵ و ۱۷-۲۰]. این فناوری به سبب خواص ویژه ذرات در این فاز، طرفداران زیادی بین محققین علم مواد و بتن پیدا نموده است. در این نوع بتن، محققین زیادی اکسیدهای مختلفی با مقیاس نانو را برای بهبود خواص فیزیکی، مکانیکی و دوام بتن استفاده نموده‌اند. از آن جمله می‌توان به نانو سیلیس (Nano-SiO_2)، نانو لوله‌های کربنی، نانو اکسید آلومینیوم ($\text{Nano-Al}_2\text{O}_3$)، نانو دی اکسید تیتانیوم (Nano-TiO_2)، نانو اکسید آهن ($\text{Nano-Fe}_2\text{O}_3$) و سایر موارد اشاره نمود. استفاده از این ذرات در بتن با توجه به ریزی، سطح مخصوص، واکنش

پذیری و قابلیت فعال سازی بالای آنها و از طرفی ساختار متخلخل بتن و وجود حفراتی در ابعاد نانو، می‌تواند به بهبود خواص بتن کمک نماید [۱۶]. در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی اثر استفاده از نانوکامپوزیت، نانوسیلیس و نانوتیتانیوم بر مقاومت فشاری و دوام بتن‌های سبک پرلیتی پرداخته شده است.

امروزه آتش‌سوزی به‌عنوان یکی از خطرناک‌ترین اتفاقاتی است که یک سازه ممکن است در حین ساخت یا بهره‌برداری تجربه کند. این موضوع می‌تواند باعث ایجاد خسارت‌های جانی و مالی فراوانی شود. پس در نظر گرفتن این موضوع در طراحی سازه و مقاوم‌سازی آن در برابر حرارت و آتش‌سوزی بسیار مهم و ضروری است. همواره افزایش مقاومت بتن یکی از موضوعات مهم در مهندسی عمران است و یکی از موضوعات روز دنیا پرداختن به مقاومت بتن در دماهای بالا است؛ بنابراین دستیابی به یک روش جدید و دوستدار محیط‌زیست برای افزایش مقاومت بتن در دماهای بالا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

بر اساس بررسی‌های صورت‌گرفته، تحقیق مستقل آزمایشگاهی جهت تأثیر حرارت بالا بر مقاومت فشاری بتن سبک حاوی نانومواد انجام نشده است. هدف از تحقیق حاضر، بررسی حرارت بالا بر مقاومت فشاری بتن حاوی نانومواد (نانوکامپوزیت، نانوسیلیس و نانو تیتانیوم) به مقادیر مختلف در معرض حرارت بالا است.

۲- تاریخچه تحقیق

تحقیقات متعددی به بررسی اقتصادی، زیست‌محیطی و دوام بتن‌های سبک و سبک الیافی پرداخته و آن‌ها را با بتن معمولی مقایسه کرده‌اند. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که بتن‌های سبک ساخته شده با رس منبسط شده، دوام نسبتاً کمتری نسبت به بتن معمولی دارند و در حوزه زیست‌محیطی آسیب‌های بیشتری به محیط وارد می‌کنند. با این حال، در حوزه اقتصادی، این بتن‌ها با کاهش مصرف فولاد نسبت به بتن معمولی همراه هستند [۲۱].

در ارزیابی‌های زیست‌محیطی و خصوصیات گرمایی طرح اختلاط‌های مختلف بتن سبک، مشخص شده است که افزایش مقاومت بتن‌ها با افزایش انتشار دی‌اکسید کربن مرتبط است [۲۲]. همچنین، در تحقیقی دیگر، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن سبک ساخته شده از الیاف ضایعاتی فرش مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایشات نشان‌دهنده پتانسیل قابل توجه این الیاف برای افزایش شکل‌پذیری و تحمل بار بتن

مقاومت فشاری ۳۹٫۵ و ۴۱٫۵ مگاپاسکال به دست آورد. ترکیب ۱۵ درصد سرباره به عنوان جایگزین سیمان بهترین عملکرد را پس از قرار گرفتن در معرض ۶۰۰ درجه سانتی گراد در مقایسه با سایر مواد نشان داد [۲۸].

همچنین، ویژگی‌های ملات سیمان حاوی نانوذرات سیلیس در تحقیقی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش مقاومت فشاری نشان داد که نانوذرات سیلیکا نه تنها به عنوان پرکننده برای بهبود زیر ساختار ملات سیمان عمل می‌کند، بلکه به عنوان بهبوددهنده واکنش پوزولانی نیز مؤثر است [۲۹].

در تحقیقی دیگر، تأثیر نانوذرات تیتانیوم بر خصوصیات مقاومتی، گرمایی و فیزیکی بتن بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش نانو دی‌اکسید تیتانیوم بیش از ۳ درصد وزنی منجر به کاهش میزان مقاومت فشاری بتن می‌شود. استفاده از افزودنی نانو تیتانیوم به صورت مجزا و در ترکیب با نانودی‌اکسید آهن و نانودی‌اکسید آلومینیم منجر به افزایش قابل توجه در میزان مقاومت بتن و کاهش نفوذپذیری آن گردید [۳۰].

در تحقیق دیگری، تأثیر نانوذرات سیلیس و آلومینا بر مقاومت بتن در برابر سایش و مقاومت فشاری بتن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کاربرد نانوذرات در بتن باعث افزایش مقاومت شده است. در این تحقیق از الیاف پلی‌پروپیلن و نانوذرات سیلیس استفاده شد. مقاومت فشاری نمونه‌های قرار گرفته در چرخه انجماد و ذوب با استفاده از روش تست سریع مورد آزمون قرار گرفت و نشان‌دهنده افزایش مقاومت فشاری در اثر کاربرد نانوذرات است [۳۱].

در تحقیقی دیگر، تأثیر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر نفوذپذیری بتن خود متراکم در برابر یون کلرید، درصد جذب آب و جذب مویری مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم تا ۴ درصد وزنی سیمان بهترین تأثیر را داشته و به عنوان پرکننده‌های نانویی عمل کرده و مقدار خلل و فرج را کاهش می‌دهند. این نتایج نشان می‌دهد که چگالی بتن افزایش می‌یابد و منافذ کوچک‌تر شده و ساختار منافذ بهبود یافته است که این امر باعث بهبود نفوذپذیری بتن در مقابل حملات یون کلرید و همچنین کاهش درصد جذب آب و موییگی می‌شود [۳۲].

در تحقیقی دیگر، تأثیر ذرات نانوسیلیس بر کارایی بتن و مقاومت فشاری بتن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مخلوط بتن دارای ذرات نانوسیلیس، به طور قابل توجهی مقاومت فشاری بالاتری در مقایسه با مخلوط بتن بدون ذرات نانوسیلیس دارد و طرح بهینه با جایگزین کردن

در زمان ترک خوردگی است. این تحقیق بر پتانسیل بالای الیاف ضایعاتی فرش برای تولید بتن سبک و جایگزینی آن‌ها با الیاف پلیمری تأکید دارد [۲۳].

در مطالعه‌ای دیگر، خواص مکانیکی بتن سازه‌ای سبک حاوی سنگ‌دانه‌های رس منبسط شده و مقادیر مختلف الیاف بازالت (۰-۵۰ درصد) بررسی شده است. در این تحقیق، از مواد پوزولانی دوده سیلیس و خاکستر بادی به عنوان جایگزین بخشی از وزن سیمان در مخلوط‌های بتن سبک استفاده شده است. در مجموع، ۲۱ طرح اختلاط ساخته و خواص تازه و سخت شده آن‌ها در سنین مختلف ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه آزمایش شد. نتایج نشان داد که حضور الیاف بازالت، اسلامپ و مقاومت فشاری را به ترتیب ۳۷ و ۱۳ درصد کاهش می‌دهد. همچنین، تمام مخلوط‌ها دارای سطح "خوب" کیفیت جذب آب هستند و بنابراین در دسته "بتن سازه‌ای" قرار می‌گیرند. نتایج همچنین نشان داد که افزودن الیاف باعث بهبود کشش، استحکام خمشی و جمع شدگی می‌شود [۲۴].

در تحقیقی، بتن سبک با جایگزینی سنگ‌دانه درشت با سنگ‌دانه پومیس به میزان ۵۰٪، ۸۰٪ و ۱۰۰٪ تهیه شد. خواص مکانیکی و دوام بتن معمولی و بتن سبک با سنگ‌دانه پومیس با انجام آزمایش‌های مختلف مخرب و غیرمخرب مقایسه شد و نشان داده شد که بتن سبک ساخته شده با پومیس کیفیت مطلوبی دارد [۲۵].

در تحقیقی دیگر، از پوسته نخل روغنی تصفیه شده به عنوان سنگ‌دانه درشت در تولید بتن سبک برای بررسی خواص مکانیکی و دوام استفاده شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از پوسته نخل روغنی تصفیه شده نتایج بهتری نسبت به بتن ساخته شده با پوسته نخل روغنی تصفیه نشده دارد [۲۶].

در مقاله‌ای، خواص مکانیکی بتن سبک با سنگ‌دانه پومیس تقویت شده با الیاف فولادی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که درحالی‌که مقاومت فشاری کاهش یافته است، مقاومت خمشی به طور قابل توجهی افزایش یافته است، به‌ویژه از نظر رفتار پس از ترک [۲۷].

در مطالعه‌ای دیگر، امکان توسعه بتن سبک سازه‌ای سازگار با محیط‌زیست با جایگزینی ۱۰۰٪ آجر خرد شده ضایعاتی بررسی شد. عملکرد بتن تولید شده تحت شرایط دمایی بالا (۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی گراد) ارزیابی شد. نتایج نشان داد که این بتن را می‌توان با استفاده از آجر خرد شده ضایعاتی به عنوان جایگزین ۱۰۰ درصدی سنگ‌دانه و با ۱۵ درصد متاکائولین و ۱۵ درصد دوده سیلیس به عنوان جایگزین سیمان، با

۳-۱- سیمان مصرفی

در مناطقی که بتن هم‌زمان در معرض یون کلر و سولفات قرار دارد توصیه شده است از سیمان تیپ ۲ به عنوان یک سیمان ضد سولفات ضعیف‌تر استفاده شود تا امکان خوردگی در اثر نفوذ یون کلر نیز کاهش یابد. سیمان مورد استفاده در این تحقیق جهت ساخت بتن، سیمان پرتلند تیپ II کردستان می‌باشد. مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان مصرف

مشخصات شیمیایی (%)							مشخصات فیزیکی		
CaO	SiO ₂	C ₃ A	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	گیرش اولیه (دقیقه)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	سطح ویژه gr/cm ²
۶۲/۰۲	۲۱/۳۲	۷/۶	۳/۸۳	۲/۷۶	۳/۴۴	۲/۰۹	۴۵	۳۴۵	۲۹۰۰

دست می‌آید. در جداول (۲) و (۳) نیز به ترتیب مشخصات فیزیکی و شیمیایی میکروسیلیس مصرفی در این تحقیق آورده شده است.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی میکروسیلیس مصرفی

مشخصات فیزیکی				
ساختار	شکل ذرات	اندازه ذرات (μm)	وزن مخصوص (kg/m ³)	سطح ویژه (gr/m ²)
آمورف	کروی	<۴۰	۴۰۰-۶۰۰	۱۴-۲۰

ذرات نانوسیلیس حداکثر تا ۲ درصد وزن سیمان و عمل آوری بتن در محلول آب و آهک، دارای حداکثر مقاومت فشاری می‌باشد [۳۳]. در تحقیقی دیگر، تأثیر نانو تیتانیوم بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خمیر سیمان سنگ‌آهکی بررسی شد. نتایج نشان داد که این ماده می‌تواند باعث افزایش ۲۰ درصدی خمیر سیمان گردد [۳۴].

۳-۳- مصالح مصرفی در پژوهش حاضر

در این بخش مصالح مورد استفاده برای تهیه نمونه‌های بتنی مورد آزمایش، شرح داده می‌شود. مصالح مصرفی در طرح‌های مختلف اختلاط بتن سبک شامل سیمان، آب، ماسه، سبکدانه پرلیت، فوق‌روان‌کننده، میکروسیلیس، پودر سنگ، هوازا، نانوسیلیس، نانو تیتانیوم و نانوکامپوزیت است که در ادامه مشخصات کلی آنها بیان شده است.

۳-۲- آب اختلاط مصرفی

آب آشامیدنی مناسب‌ترین آب برای تهیه بتن است. در آزمایش‌ها از آب آشامیدنی شهر اهواز با میزان PH حدود ۷/۶، دمای آزمایشگاه ۲۰/۹ درجه سانتی‌گراد و غلظت یون کلرید ۱۶۰ تا ۲۸۰ ppm برای طرح اختلاط استفاده شده است.

۳-۳- میکروسیلیس مصرفی

میکروسیلیس جهت استفاده در پر نمودن منافذ بتن، کاهش نفوذپذیری، افزایش مقاومت بتن برابر عوامل خورنده و افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن کاربرد دارد. میکروسیلیس (دوده سیلیسی) محصول جانبی است که از تولید فلزات خاصی در کوره‌های قوس الکتریکی به

۳-۷- نانومواد مصرفی

همان‌طور که پیش‌ازاین اشاره شد، در این تحقیق از نانو تیتانیوم، نانوسیلیس و نانوکامپوزیت استفاده شد. نانو تیتانیوم مصرفی در این پژوهش از شرکت ایساتیس یزد خریداری شده است که مشخصات آن در جدول (۵) آمده است.

جدول ۵- مشخصات نانوتیتانیوم مصرفی در پژوهش حاضر

Titanium Oxide Nano-powder(TiO ₂ , rutile)	
Purity	99.9%
APS	30 nm
SSA	35-60 M2/g
Color	White
Morphology	spherical
True density	4.23 g/cm ³

نانوسیلیس مصرفی در این پژوهش از پارک علوم و فن آوری شیراز تهیه شده است. از محلول ColloidalSilica (Nano Silica) با مشخصات جدول (۶) به عنوان نانوسیلیس استفاده شده است.

جدول ۶- مشخصات نانوسیلیس مصرفی

رنگ	وزن مخصوص (gr/cm ³)	میزان ذرات جامد (%)	اندازه ذرات
تقریباً بی- رنگ	۱/۳۷	۵۰/۹	کوچک‌تر از ۵۰ نانومتر

نانوکامپوزیت مصرفی از نوع نانورس (اکریلیک) در این پژوهش از پارک علوم و فن آوری شیراز تهیه شده است. اندازه ذرات این محصول ۱nm-۱۳ است.

جدول ۳- مشخصات فیزیکی میکروسیلیس مصرفی

ترکیبات شیمیایی						
رطوبت	L.O.I	MgO	AL ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂
ماکزیمم درصد					مینیمم درصد	
۱	۳	۲	۱	۱/۵	۲	۸۵

۳-۴- پودر سنگ مصرفی

پودر سنگ مورد استفاده در این تحقیق از نوع کربنات کلسیم (CaCO₃) است.

۳-۵- فوق روان کننده مصرفی

از این افزودنی بتن به‌عنوان ماده کاهنده آب بتن، برای اسلامپ و دوام بهتر استفاده می‌شود. در این پژوهش از فوق‌روان کننده یا (افزودنی‌های کاهنده آب در حد بالا) مواد مضاف کاهنده آب در حد بالا (HRWR) که با نام فوق‌روان کننده شناخته می‌شوند، استفاده شده است. در این مطالعه از فوق‌روان کننده شرکت بهساز بتن متین استفاده شد. مشخصات فوق‌روان کننده شرکت بهساز بتن متین در جدول (۴) آورده شده است. همچنین روش مصرف آن ۰/۴۵ تا ۱/۲ درصد عیار سیمان است.

جدول ۴- مشخصات فوق روان کننده شرکت بهساز بتن متین

حالت فیزیکی	مایع
وزن مخصوص	1.17±0.02 gr/cm ³
رنگ	قهوه‌ای تیره
PH	۰±۸/۵
محتوای کلریدی	ندارد
دمای نگهداری	۱۵ تا ۲۵ درجه سانتیگراد

۳-۶- افزودنی‌های حباب زا (هوازا) مصرفی

افزودنی هوازای مصرف شده در این پژوهش، تهیه شده از شرکت شیمی آبادگران بود. میزان مصرف این ماده جهت ایجاد مقدار هوا در بتن نیز باتوجه به نوع سیمان حدود ۱ الی ۱/۵ درصد وزن سیمان است.

۳-۸- سبکدانه پرلیت مصرفی

برای به دست آوردن سبکدانه پرلیت از سنگ پرلیت، نخست سنگ پرلیت را در داخل کوره‌های دوار به دمای ۸۵۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی گراد می‌رسانند و سنگ به صورت شیشه‌ای نرم حاصل می‌شود. در این حالت آب از لایه لای سنگ بصورت کامل تخلیه شده و توده‌های سنگ به اندازه ۷ تا ۱۵ برابر افزایش حجم پیدا می‌کنند. مصالح جدید که از نظر شکل بزرگ و حجیم شده‌اند، سفید رنگ در ابعاد و قطعه‌های بزرگ و نامرتب بوده و سفیدی آنها به دلیل بخارهای حاصل از تبخیر مایعات و آب از داخل سنگ می‌باشد. وزن مخصوص سنگ پرلیت در حالت خام و منبسط نشده در حدود ۱۱۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب هست. ولی وزن مخصوص حالت منبسط شده آن به صورت سبکدانه پرلیتی در بازه‌ی ۳۰ تا ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.



شکل ۱- سبکدانه پرلیت مصرفی در این تحقیق

۴- مراحل ساخت بتن و تجهیزات لازم

در این بخش باتوجه به مرور آثار پیشین و با استفاده از طرح اختلاط موجود به ساخت نمونه‌های بتنی پرداخته شده است تا از این رهگذر بتوان به بتن سبک سازه‌ای با وزن مطلوب و مقاومت بالادست یافت و همچنین در ادامه این مسیر، اشاره شده است که چگونه بعد از ساخت، بتن در قالب‌ها ریخته و قالب‌گیری شدند. در این پژوهش از نمونه‌های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متری برای آزمایش مقاومت فشاری بتن استفاده شد. در این آزمایش از قالب‌های پلاستیکی که وزن آن‌ها بین ۴۰۰-۵۰۰ گرم متغیر بود استفاده گردید. دیواره قالب‌های بتنی روغن کاری شده، تا زمان

خارج سازی نمونه بعد از ۲۴ ساعت، چسبندگی خاصی بین دیواره قالب و نمونه بتنی وجود نداشته نباشد.

مراحل ساخت نمونه بتن به این شکل بود (مطابق استاندارد ASTM C-94) که ابتدا مواد مختلف خشک (سیمان، پودر سنگ، میکروسیلیس) با وزن‌های مشخص (تعیین شده بر اساس طرح اختلاط) در ظرف ریخته شده و هم زده می‌شوند. در مرحله بعد پرلیت‌های با دانه‌بندی مختلف را مخلوط کرده و برای پیش اشباع با ۲۰۰ گرم آب (این آب جزو آب طرح اختلاط نمی‌باشد و جداگانه برای پیش اشباع در نظر گرفته شده) خوب با هم مخلوط کرده تا سطح تمام دانه‌ها خیس شود. سپس پرلیت‌های پیش اشباع شده را به مخلوط سیمان اضافه کرده و خوب مخلوط می‌کنیم. بعد از مخلوط کردن مقداری آب به مخلوط سیمان و پرلیت‌ها اضافه کرده و از باقیمانده آب طرح اختلاط مقداری را با فوق‌روان‌کننده مخلوط کرده و مقدار خیلی کم از آب را نیز به هوازها اضافه کرده و فوق‌روان‌کننده و هوازها را به آب ریخته شده در مخلوط سیمان اضافه کرده و خوب با هم مخلوط می‌کنیم. بعد از آن نانومواد را اضافه کرده و خوب مخلوط می‌کنیم. سپس قالب‌ها را روغن زده و دولایه از مخلوط را در قالب ریخته و با میله ۲۵ ضربه می‌کوبیم و سپس یک لایه دیگر ریخته و این با ۲۵ ضربه می‌زنیم و در آخر لایه آخر را ریخته و روی آن را صاف می‌کنیم. ۲۴ ساعت پس از نمونه‌گیری قالب‌ها را باز کرده نمونه‌ها را بیرون می‌آوریم و در حوضچه‌های پر شده از آب می‌گذاریم. نمونه‌ها را ۲۸ روز به همین شیوه نگه می‌داریم و پس از ۲۸ روز آزمایش تعیین مقاومت فشاری بتن نمونه‌ها انجام می‌گیرد. مقاومت فشاری بتن برابر میانگین مقاومت‌های فشاری سه نمونه مربوط به هر نوبت آزمایش در نظر گرفته می‌شود.



الف



ب

$$W = \frac{Ws - Wd}{Ws} \times 100 \quad (۱)$$

در این رابطه، Ws وزن نمونه خشک، Wd وزن نمونه اولیه و W درصد میزان جذب آب هستند.

۶- ارائه نتایج

در این بخش از تحقیق به ارائه طرح اختلاط نمونه‌های مورد بررسی و همچنین ارائه نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده پرداخته شده است. نتایج ارائه شده در دو بخش مختلف ارائه شده‌اند. بخش اول مربوط به ارائه طرح‌هایی است که در آنها با سعی و خطا و تغییر مقادیر مصرف مواد مختلف در بتن، طرح اختلاط بهینه (دارای بیشترین مقاومت فشاری و کمترین وزن) بتن سبک حاوی سبکدانه پرلیت به دست آمده است. پس از دستیابی به طرح اختلاط بهینه، در بخش دوم به ارائه نتایج طرح‌های با مقادیر مختلف نانومواد تحت اثر دماهای مختلف پرداخته شده است.

۶-۱- دستیابی به طرح اختلاط بهینه

۶-۱-۱- مرحله اول: طرح اختلاط اولیه ساخته شده بر اساس مطالعات گذشته

در مرحله اول، جهت دستیابی به طرح اختلاط بهینه بتن سبک با سنگدانه پرلیت، از طرح اختلاط‌های موجود در مطالعات گذشته استفاده شد. طرح اختلاط‌های اولیه مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۷) آورده شده است. در این طرح‌ها، از پرلیت به صورت کلی و بدون دانه‌بندی مشخص در تولید بتن استفاده شد. در طرح اختلاط شماره ۱ از سنگدانه پرلیت به مقدار مساوی در ۲ اندازه بین ۰ تا ۴ میلی‌متر (مانده بر روی الک‌های ۱۰۰، ۵۰، ۳۰ و ۱۶) و ۴ تا ۸ میلی‌متر (مانده بر روی الک ۸) استفاده شد. در طرح اختلاط شماره ۲ از سنگدانه پرلیت در اندازه ۴ تا ۸ میلی‌متر و بدون میکروسیلیس استفاده شد. در طرح اختلاط شماره ۳، میکروسیلیس به طرح شماره ۲ اضافه شد و در طرح اختلاط شماره ۴ نیز از پرلیت با اندازه ۰ تا ۴ میلی‌متر و ۴ تا ۸ میلی‌متر با نسبت ۷۰ به ۳۰ استفاده شد.



ج

د

شکل ۲- مرحله ساخت بتن (الف: مصالح آزمایش) (ب و ج: میکس مصالح) (د: ملات ساخته شده)

۵- روش انجام آزمایش‌ها

۵-۱- آزمایش مقاومت فشاری

مقاومت فشاری بتن‌ها بر اساس استاندارد BS 1881:PART 116 با استفاده از نمونه‌های مکعبی $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متری انجام شد. این نمونه‌گیری بدون اعمال هرگونه انرژی انجام شده و نمونه‌ها پس از ۴۸ ساعت از قالب خارج شده و تا زمان انجام آزمایش مطابق استاندارد تحت عمل‌آوری قرار گرفتند. بر اساس ضوابط آیین‌نامه مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، نمونه استوانه‌ای استاندارد به ابعاد $300 \times 300 \times 150$ میلیمتر می‌باشد. در صورت استفاده از نمونه‌های مکعبی باید مقاومت آنها به مقاومت نظیر نمونه‌های استوانه‌ای تبدیل شود. در این تحقیق نیز از این ضرایب برای تبدیل مقاومت نمونه‌های مکعبی به استوانه‌ای استاندارد استفاده شده است. اعمال حرارت 100°C و 200°C و 400°C و 600°C و 800°C درجه سانتیگراد بر روی نمونه‌ها در آون از نوع 800°C درجه حجم 60 لیتر صورت گرفت تا متعاقب آن، اثر حرارت در مقاومت بتن بررسی شود.

۵-۲- آزمایش جذب آب نیم ساعته بتن

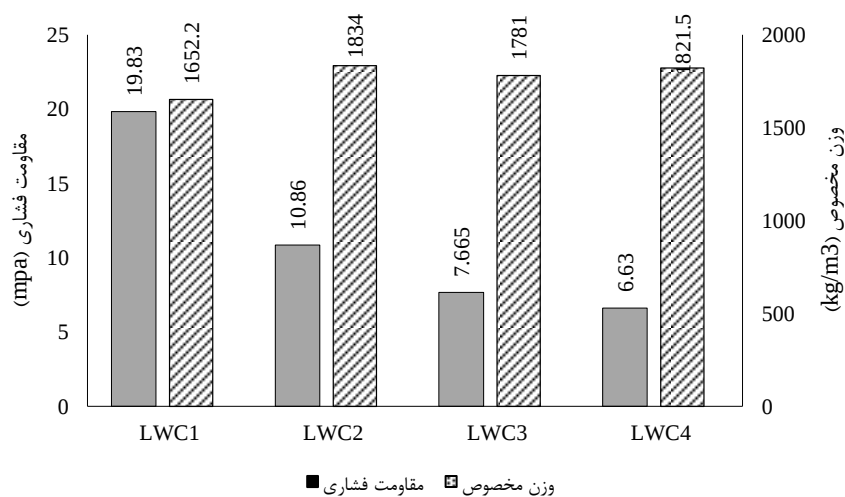
نمونه‌های مکعبی بتنی با اندازه‌های $10 \times 10 \times 10$ در آب غوطه‌ور شدند و با ثبت زمان ۲۴ ساعت در آون با دمای حدود 100°C درجه سانتیگراد قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها خارج و وزن شدند. در ادامه این مسیر، نمونه‌ها در فاصله زمانی نیم‌ساعت در آب قرار داده و نمونه‌ها بعد خارج شدن از آب دوباره وزن شدند و میزان جذب آب به دست آمد. با توجه به رابطه (۱) این مقدار محاسبه شده است.

جدول ۷- طرح های اختلاط اولیه (کیلوگرم بر مترمکعب)

نام طرح	اجزاء	آب	ماسه	سستنه و سیمان	نسبت سیمان/آب	دانه های سبک پرلیت (میلی متر)	
						۰-۲	۲-۴
LWC1	۴۹۵	۱۹۲	۴۷۴	۵۵	۶/۶	۱۵۶/۵	۱۵۶/۵
LWC2	۴۰۰	۱۶۰	۹۶۰	-	۴	-	۲۲۰
LWC3	۴۰۰	۱۶۰	۹۶۰	۴۰	۴	-	۲۲۰
LWC4	۴۹۵	۱۹۲	۴۷۴	۵۵	۶/۶	۴۸۲	۲۰۶/۵۸

مقاومت فشاری بتن ها به شدت پایین و غیرقابل قبول بوده و لزوم تغییر طرح اختلاط جهت رسیدن به مقاومت فشاری بالاتر احساس شد.

در شکل (۳) نمودار مقاومت فشاری ۲۸ روزه و وزن مخصوص ۴ طرح اختلاط اولیه ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود، در این مرحله



شکل ۳ - مقاومت فشاری و وزن مخصوص طرح اختلاط های اولیه

۶-۱-۲- مرحله دوم: بررسی تأثیر دانه‌بندی سبکدانه بر

مشخصات بتن سبک

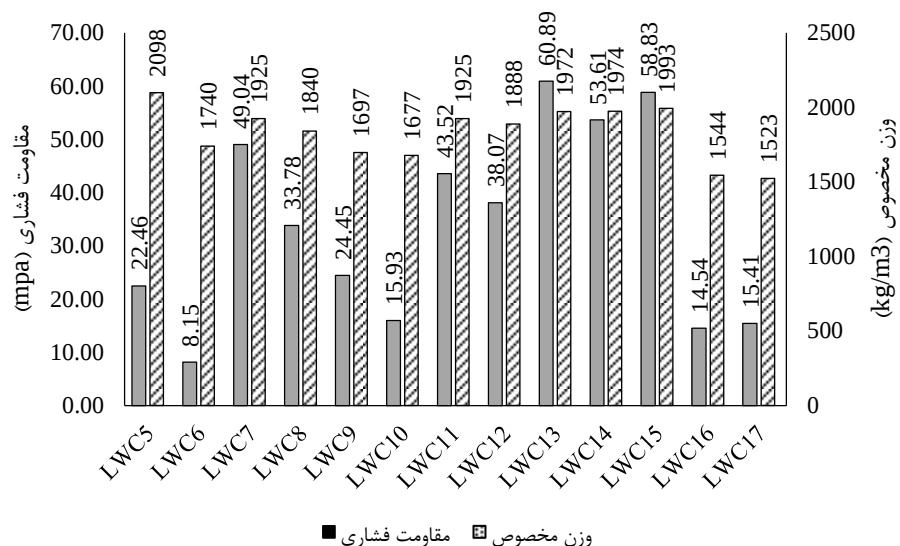
در مرحله دوم به بررسی تأثیر استفاده از دانه‌بندی جزئی پرلیت بر روی خواص بتن سبک تولید شده پرداخته شده است. در جدول (۸) طرح‌های اختلاط مورد بررسی در این مرحله آورده شده‌اند. لازم به ذکر است که در برخی طرح اختلاط‌های این مرحله از ماسه نیز استفاده شد.

در شکل (۴) نمودار مقاومت فشاری ۲۸ روزه و وزن مخصوص طرح‌های اختلاط مرحله دوم جهت بررسی تأثیر نوع دانه‌بندی پرلیت بر خواص بتن

جدول ۸ - طرح‌های اختلاط مرحله دوم (بررسی تأثیر نوع دانه‌بندی پرلیت) (کیلوگرم بر مترمکعب)

نام طرح	سیمان	آب	ماسه	میکروسیلیس	فوق‌روان‌کننده	پودر سنگ	هوازا -٪	دانه‌های سبک پرلیت (میلی‌متر)							
								۵/۰-۱۰/۰	۱۰/۰-۲۰/۰	۲۰/۰-۳۰/۰	۳۰/۰-۴۰/۰	۴۰/۰-۵۰/۰	۵۰/۰-۶۰/۰	۶۰/۰-۷۵/۰	۷۵/۰-۹۰/۰
LWC5	۴۹۵	۱۹۲	۴۷۴	۵۵	۷	-	-	۱۶	۲۲	۵۶	۱۷۱	۴۷	-	-	-
LWC6	۴۴۰	۲۰۱	-	-	۷	-	-	-	-	-	-	-	۴۳۸	۳۹۶	-
LWC7	۴۹۵	۱۹۲	۲۵۰	۵۵	۶/۶	۱۶۵	-	۷۲	۷۸	۱۱۳	۲۲۸	۱۰۳	-	-	-
LWC8	۴۶۰	۱۴۳	-	۱۴	۲/۴	۱۴	-	-	-	-	-	-	۵۸۴	۵۲۸	-
LWC9	۴۶۰	۱۴۳	-	۱۴	۲/۴	۱۴	-	-	-	-	-	-	۲۹۲	۸۲۰	-
LWC10	۴۹۵	۱۹۲	-	۵۵	۶/۶	۱۶۵	-	۷۲	۷۸	۱۰۰	۲۰۰	۱۰۰	-	-	-
LWC11	۴۹۵	۱۹۲	-	۵۵	۶/۶	۱۶۵	-	۱۶	۲۲	۵۶	۱۷۱	۴۷	-	۴۰۰	-
LWC12	۴۹۵	۱۹۲	-	۵۵	۶/۶	۱۶۵	-	۱۶	۲۲	۵۶	۱۷۱	۴۷	-	۴۰۰	-
LWC13	۴۹۵	۱۹۲	-	۵۵	۶/۶	۱۶۵	-	۷۲	۷۸	۱۱۲	۲۲۷	۱۰۳	-	۱۹۴	-
LWC14	۴۹۵	۱۹۲	-	۵۵	۶/۶	۱۶۵	-	۸۴	۹۰	۱۲۴	۲۳۹	۲۴۷	-	-	-
LWC15	۴۹۵	۱۹۲	-	۵۵	۶/۶	۱۶۵	-	۱۱۰	۱۱۶	۱۵۰	۲۶۵	۱۴۱	-	-	-
LWC16	۴۶۰	۱۴۳	-	۱۴	۲/۴	۱۴	-	-	-	-	-	-	۲۹۲	۸۲۰	-
LWC17	۴۶۰	۱۴۳	-	۱۴	۲/۴	۱۴	-	-	-	-	-	-	۳۵۰	۷۶۲	-





شکل ۴- مقاومت فشاری و وزن مخصوص طرح اختلاط‌های مرحله دوم (بررسی تاثیر نوع دانه‌بندی پرلیت)

۶-۱-۳- مرحله سوم: استفاده از هوازا برای سبک‌سازی بتن

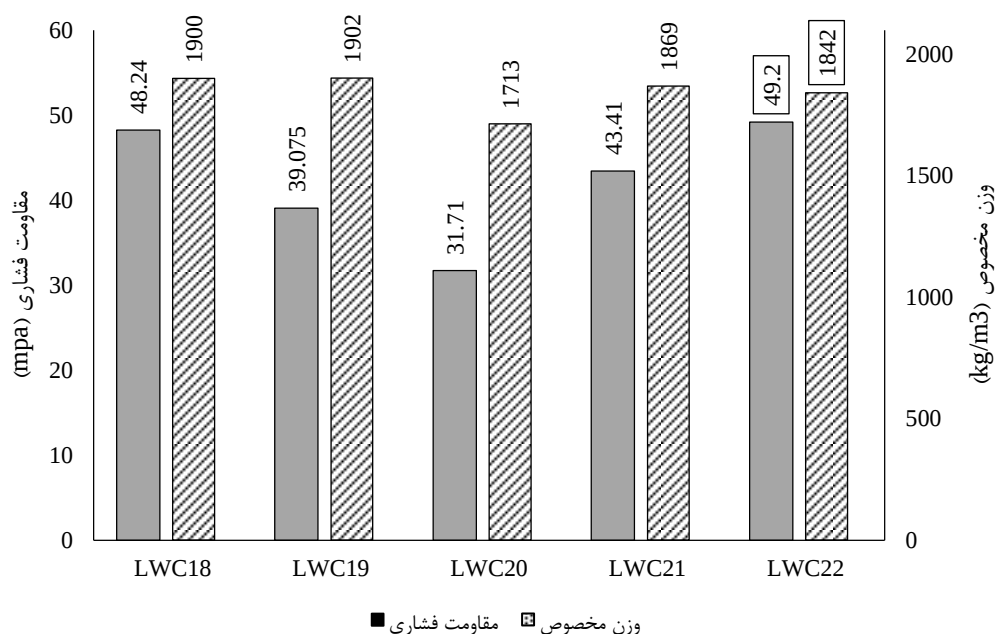
در مرحله سوم از مراحل رسیدن به طرح اختلاط بهینه به بررسی تأثیر استفاده از هوازا بر روی خواص بتن سبک تولید شده پرداخته شده است. در جدول ۹ طرح‌های اختلاط مورد بررسی در این مرحله آورده شده‌اند.

جدول ۹- طرح‌های اختلاط مرحله سوم (تأثیر افزودن هوازا) (کیلوگرم بر مترمکعب)

ردیف	نمونه	آب	سیمان	نسبت سیمان/آب	نسبت سیمان/سیمان	نسبت سیمان/سیمان	دانه‌های سبک پرلیت (میلی‌متر)					
							۰-۰.۲۵	۰.۲۵-۰.۵	۰.۵-۱	۱-۲	۲-۴	۴-۸
LWC18	۴۹۵	۱۹۲	۵۵	۶/۶	۱۶۵	-	۷۲	۷۸	۱۱۲	۲۲۷	۱۰۳	۱۹۴
LWC19	۴۹۵	۱۹۲	۵۵	۶/۶	۱۶۵	۱/۵ - ۷/۴۲	۷۲	۷۸	۱۱۲	۲۲۷	۱۰۳	۱۹۴
LWC20	۴۹۵	۱۹۲	۵۵	۶/۶	۱۶۵	۲ - ۱۰	۷۲	۷۸	۱۱۲	۲۲۷	۱۰۳	۱۹۴
LWC21	۴۹۵	۱۹۲	۵۵	۶/۶	۱۶۵	-	۵۵/۷	۶۱/۹	۹۶/۱	۲۱۱/۷	۸۶/۸	۲۷۴
LWC22	۴۹۵	۱۹۲	۵۵	۶/۶	۱۶۵	۱ - ۵	۵۵/۷	۶۱/۹	۹۶/۱	۲۱۱/۷	۸۶/۸	۲۷۴

شده و وزن بتن نیز در حد قابل قبولی می‌باشد، لذا این طرح به عنوان طرح اختلاط بهینه و نهایی انتخاب می‌شود. در جدول ۱۰ مقادیر دقیق مصالح مصرفی در طرح اختلاط بهینه آورده شده است.

در شکل (۵) نمودار مقاومت فشاری ۲۸ روزه و وزن مخصوص طرح‌های اختلاط مرحله سوم جهت بررسی تاثیر استفاده از هوازا بر خواص بتن سبک ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری بتن‌های تولید شده با هوازا نسبت به بتن بدون هوازا کاهش پیدا کرده است اما در عین حال وزن بتن بطور چشمگیری کاهش پیدا کرده است. با توجه به اینکه در طرح اختلاط LWC22 بیشترین مقاومت فشاری حاصل



شکل ۵ - مقاومت فشاری و وزن مخصوص طرح اختلاط‌های مرحله سوم (تاثیر افزودن هوازا)

جدول ۱۰ - طرح بهینه نهایی (کیلوگرم بر مترمکعب)

ردیف	نیمس	آب	چسب/آب	سبکساز/کیم	هسته/آب/کیم	کیم/آب	٪/آب	دانه‌های سبک پرلیت (میلی‌متر)					
								۰-۰/۲۵	۰/۲۵-۰/۵	۰/۵-۱	۱-۲	۲-۴	۴-۸
LWC-Final	۴۹۵	۱۹۲	۰/۳۹	۵۵	۶/۶	۱۶۵	۵ - ٪۱	۵۵/۷	۶۱/۹	۹۶/۱	۲۱۱/۷	۸۶/۸	۲۷۴

۶-۱-۴- بررسی تأثیر نانومواد بر خواص بتن سبک

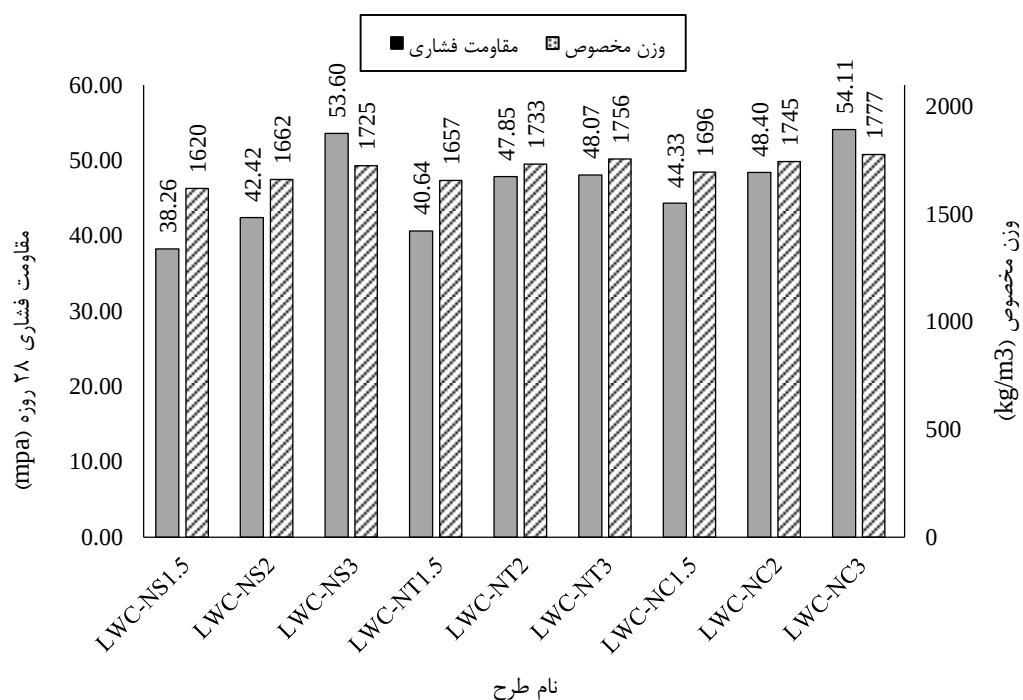
در این بخش از تحقیق به بررسی تأثیر استفاده از نانومواد مختلف بر روی خواص بتن سبک پرداخته شده است. در جدول ۱۱ طرح‌های اختلاط نمونه‌های حاوی نانومواد به همراه مقاومت فشاری ۲۸ روزه و وزن مخصوص بتن آورده شده است. لازم به ذکر است که از این نانومواد به مقدار ۱/۵، ۲ و ۳ درصد سیمان مصرفی و به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی در طرح‌ها استفاده شده است.

جدول ۱۱- طرح‌های اختلاط (کیلوگرم بر مترمکعب) - طرح‌های همراه با نانومواد

نام طرح	سیمان	آب	پودر سنگ	نانوسیلیس	نانو تیتانیوم	نانو کامپوزیت	میکروسیلیس	فوق روان کننده	هوازا - %	دانه‌های سبک پرلیت (میلی‌متر)					
										۵/۰-۱۰/۰	۵/۰-۵/۰	۱۰/۰-۱۵/۰	۲۰/۰	۲۵/۰	۳۰/۰
LWC-NS1.5	۴۸۷/۵۸	۱۹۲	۱۶۵	۷/۴۲	-	-	۵۵	۶/۶	۵ - %	۵۵/۷	۶۱/۹	۹۶/۱	۲۱۱/۷	۸۶/۸	۲۷۴
LWC-NS2	۴۸۵/۱۰	۱۹۲	۱۶۵	۹/۹	-	-	۵۵	۶/۶	۵ - %	۵۵/۷	۶۱/۹	۹۶/۱	۲۱۱/۷	۸۶/۸	۲۷۴
LWC-NS3	۴۸۰/۱۵	۱۹۲	۱۶۵	۱۴/۸۵	-	-	۵۵	۶/۶	۵ - %	۵۵/۷	۶۱/۹	۹۶/۱	۲۱۱/۷	۸۶/۸	۲۷۴
LWC-NT1.5	۴۸۷/۵۸	۱۹۲	۱۶۵	-	۷/۴۲	-	۵۵	۶/۶	۵ - %	۵۵/۷	۶۱/۹	۹۶/۱	۲۱۱/۷	۸۶/۸	۲۷۴
LWC-NT2	۴۸۵/۱۰	۱۹۲	۱۶۵	-	۹/۹	-	۵۵	۶/۶	۵ - %	۵۵/۷	۶۱/۹	۹۶/۱	۲۱۱/۷	۸۶/۸	۲۷۴
LWC-NT3	۴۸۰/۱۵	۱۹۲	۱۶۵	-	۱۴/۸۵	-	۵۵	۶/۶	۵ - %	۵۵/۷	۶۱/۹	۹۶/۱	۲۱۱/۷	۸۶/۸	۲۷۴
LWC-NC1.5	۴۸۷/۵۸	۱۹۲	۱۶۵	-	-	۷/۴۲	۵۵	۶/۶	۵ - %	۵۵/۷	۶۱/۹	۹۶/۱	۲۱۱/۷	۸۶/۸	۲۷۴
LWC-NC2	۴۸۵/۱۰	۱۹۲	۱۶۵	-	-	۹/۹	۵۵	۶/۶	۵ - %	۵۵/۷	۶۱/۹	۹۶/۱	۲۱۱/۷	۸۶/۸	۲۷۴
LWC-NC3	۴۸۰/۱۵	۱۹۲	۱۶۵	-	-	۱۴/۸۵	۵۵	۶/۶	۵ - %	۵۵/۷	۶۱/۹	۹۶/۱	۲۱۱/۷	۸۶/۸	۲۷۴

وجود به دلیل نزدیک بودن مقاومت فشاری بتن حاوی ۳ درصد نانوسیلیس با بتن حاوی ۳ درصد نانوکامپوزیت و کمتر بودن وزن آن، طرح اختلاط LWC-NS3 (بتن حاوی ۳ درصد نانوسیلیس) به عنوان بهینه‌ترین طرح اختلاط انتخاب می‌شود.

در شکل (۶) نمودار مقاومت فشاری و وزن نمونه‌های دارای نانومواد نشان داده شده است. با دقت در این نمودار می‌توان دید که بطور کلی با افزایش مقادیر نانومواد در بتن سبک، مقاومت فشاری بتن افزایش یافته است و این میزان افزایش در حالت استفاده از ماده نانوکامپوزیت به میزان ۳ درصد سیمان مصرفی، نسبت به سایر نانومواد مقدار بیشتری دارد. با این



شکل ۶- مقاومت فشاری و وزن مخصوص طرح‌های با نانومواد

۶-۱-۵- بررسی تأثیر حرارت بالا بر مقاومت فشاری بتن سبک پرلیتی حاوی نانومواد

در این بخش از تحقیق به بررسی اثر حرارت بالا بر مقاومت فشاری بتن سبک پرلیتی حاوی نانومواد که یکی از اهداف مهم این تحقیق بوده است، پرداخته شده است. از آنجایی که در طراحی بتن، حالت خرابی ابتدا در بتن نه آرماتور حادث می‌شود، لذا در این تحقیق تست اعمال حرارت بر روی بتن حاوی نانو به عنوان محافظ آرماتور انجام شد و آرماتور نقشی ندارد. جهت انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری بر روی نمونه‌ها، در این مرحله نمونه‌ها تحت اثر دماهای ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد قرار گرفته‌اند. در جدول ۱۲ نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها آورده شده است. لازم به ذکر است که نمونه‌ها با قرارگرفتن در کوره به دمای موردنظر رسیده‌اند. به عنوان نمونه در شکل (۷) تصاویری از قراردادن یکی از نمونه‌ها در کوره، نمایش داده شده است.



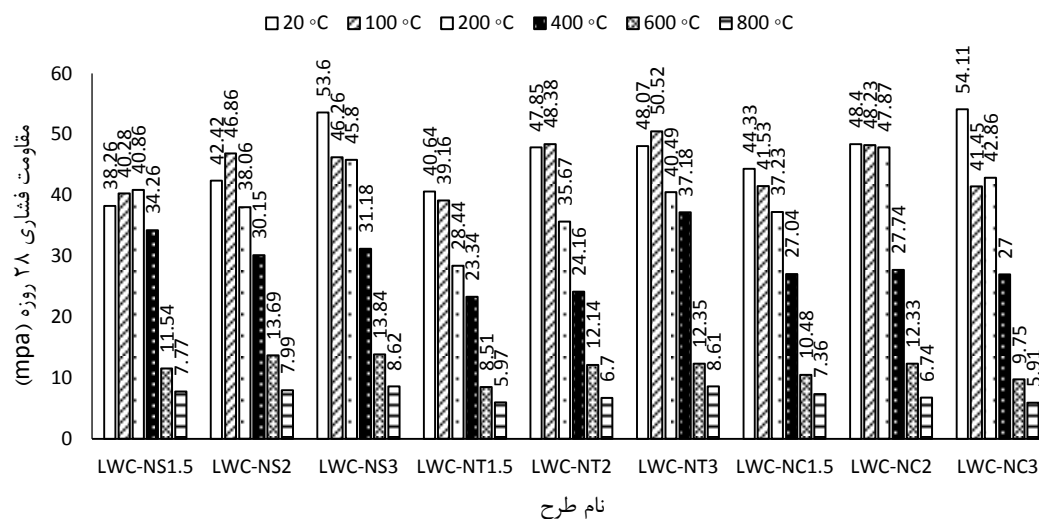
شکل ۷- نمونه قرار گرفته در کوره جهت اعمال حرارت بالا

جدول ۱۲- مقاومت فشاری نمونه‌ها در درجه حرارت‌های متفاوت

مقاومت فشاری (مگاپاسکال)						نام طرح
800 °C	600 °C	400 °C	200 °C	100 °C	20 °C	
7.77	11.54	34.26	40.86	40.28	38.26	LWC-NS1.5
7.99	13.69	30.15	38.06	46.86	42.42	LWC-NS2
8.62	13.84	31.18	45.80	46.26	53.60	LWC-NS3
5.97	8.51	23.34	28.44	39.16	40.64	LWC-NT1.5
6.70	12.14	24.16	35.67	48.38	47.85	LWC-NT2
8.61	12.35	37.18	40.49	50.52	48.07	LWC-NT3
7.36	10.48	27.04	37.23	41.53	44.33	LWC-NC1.5
6.74	12.33	27.74	47.87	48.23	48.40	LWC-NC2
5.91	9.75	27.00	42.86	41.45	54.11	LWC-NC3

در شکل (۸) نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های مورد بررسی تحت اثر حرارت‌های مختلف نشان داده شده است. با دقت در این نمودار می‌توان دید که تا دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد، مقاومت بتن افت ناچیزی داشته و در برخی موارد حتی افزایش مقاومت فشاری نیز دیده می‌شود. اما از دمای ۴۰۰ درجه با شیب تصاعدی کاهش مقاومت فشاری بتن سبک اتفاق می‌افتد. میزان کاهش مقاومت فشاری بتن در حرارت‌های بالا نیز ارتباطی به نوع نانومواد مورد استفاده در بتن نداشته و در همه نمونه‌ها تقریباً به یک اندازه افت مقاومت بتن رخ داده است.

علاوه بر این، نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها تحت اثر حرارت‌های بالا در جدول ۷ نشان داد در ترکیب حاوی نانو سیلیس ۳٪ در حرارت ۸۰۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ درجه سانتیگراد شاهد کاهش مقاومت بترتیب به میزان ۸۴٪، ۷۴٪، ۴۲٪، ۱۵٪ و ۱۴٪ نسبت به دمای معمول بود. در بتن حاوی ۳ در صد نانو تیتانیوم روند کاهش مقاومت ۸۲٪، ۷۴٪، ۲۳٪، ۱۰٪ و ۵٪ (افزایش) و برای بتن حاوی نانو کامپوزیت روند کاهش مقاومت تحت حرارت ذکر شده بالا بترتیب ۹٪، ۸۲٪، ۵۱٪، ۲۱٪ و ۲۴٪ بود.

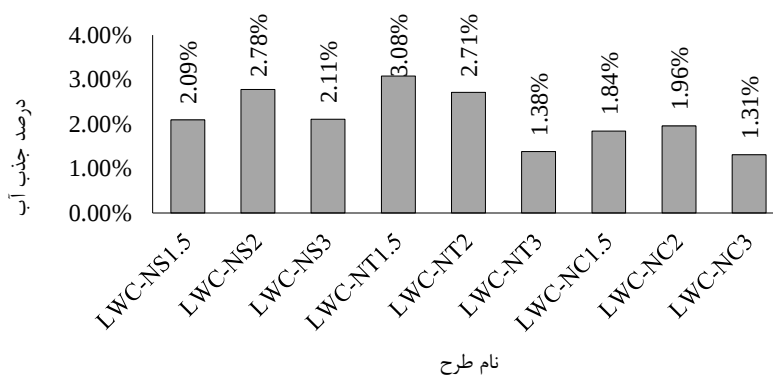


شکل ۸ - مقاومت فشاری نمونه‌ها در درجه حرارت‌های متفاوت

۶-۱-۶- نتایج آزمایش جذب آب نیم ساعته بتن

شده است و این میزان کاهش در حالت استفاده از ماده نانوکامپوزیت نسبت به سایر نانومواد مقدار بیشتری دارد.

در این بخش از تحقیق به ارائه نتایج حاصل از آزمایش جذب آب نیم‌ساعته بتن پرداخته شده است. در شکل (۹) نمودار درصد جذب آب نمونه‌ها نشان داده شده است. با دقت در این نمودار می‌توان دید که به‌طور کلی با افزایش مقادیر نانومواد در بتن سبک، از جذب آب بتن کاسته



شکل ۹ - درصد جذب آب طرح‌های با نانومواد

۷- نتایج

در این بخش از تحقیق به جمع‌بندی نتایج به‌دست‌آمده پرداخته شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در بخش قبل و بحث‌های انجام شده پیرامون این نتایج، نتایج نهایی این تحقیق شامل موارد زیر هستند:

- مقاومت فشاری بتن‌های تولید شده با دانه‌بندی جزئی پرلیت از مقاومت فشاری بتن‌های سبک با دانه‌بندی کلی به مقدار کاملاً محسوس و چشمگیری بیشتر است.

- مقاومت فشاری بتن‌های تولید شده با هوازا نسبت به بتن بدون هوازا کاهش پیدا کرده است؛ اما درعین حال وزن بتن به طور چشمگیری کاهش پیدا کرده است.

- به‌طورکلی با افزایش مقادیر نانومواد در بتن سبک، مقاومت فشاری بتن افزایش یافته است و این میزان افزایش در حالت استفاده از ماده نانوکامپوزیت به میزان ۳ درصد سیمان مصرفی، نسبت به سایر نانومواد مقدار بیشتری دارد. با این وجود به دلیل نزدیک بودن مقاومت فشاری بتن حاوی ۳ درصد نانوسیلیس با بتن حاوی ۳ درصد LWC-NS3 (بتن حاوی ۳ درصد نانوسیلیس) به عنوان بهینه‌ترین طرح اختلاط انتخاب می‌شود.

- نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها تحت اثر حرارت‌های بالا نشان داد که تا دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد، مقاومت بتن افت ناچیزی داشته و در برخی موارد حتی افزایش مقاومت فشاری نیز دیده می‌شود. اما از دمای ۴۰۰ درجه با شیب تصاعدی کاهش مقاومت فشاری بتن سبک اتفاق می‌افتد. میزان کاهش مقاومت فشاری بتن در حرارت‌های بالا نیز ارتباطی به نوع نانومواد مورد استفاده در بتن نداشته و در همه نمونه‌ها تقریباً به یک اندازه افت مقاومت بتن رخ داده است.

- به‌طورکلی با افزایش مقادیر نانومواد در بتن سبک، از جذب آب بتن کاسته شده است و این میزان کاهش در حالت استفاده از ماده نانوکامپوزیت نسبت به سایر نانومواد مقدار بیشتری دارد.

منابع

- [1] Qi. Yang, Q. Yang, Xi. Peng, K. Xia, B. Xu, "Review of the Effects of Nanomaterials on the Properties of Concrete", Buildings, 2025.
<https://doi.org/10.3390/buildings15132363>

- [2] P.K. Mehta, P.J. Monteiro, "Concrete microstructure", Properties and materials, 2017.

- [3] A.M. Neville, J.J. Brooks, "Concrete technology", Longman Scientific & Technical England, 1987.
https://dl.ojocv.gov.et/admin_book/Concrete%20Technology%20Book%20KT.pdf

- [4] Y. Theiner, G. Hofstetter, "Evaluation of the effects of drying shrinkage on the behavior of concrete structures strengthened by overlays", Cement and Concrete Research, Vol. 42(9), 2012, pp. 1286-1297.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.06.001>

- [۵] تدین، م، "بررسی و ارزیابی مقاومت کششی، مدول ارتجاعی، ضریب پواسون و شدت خوردگی بتن سبک پر مقاومت با مصالح موجود در ایران"، پایان‌نامه دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۱.

- [6] Y. Ke, A.L. Beacour, S. Ortola, H. Dumontets, R. "Cabrillac, "Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregates on the mechanical properties of concrete", Construction and Building Materials, Vol. 23(8), 2009, pp. 2821-2828.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.038>

- [7] R. Demirboga, I. Orung, R. Gul, "Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of lowdensity concretes". Cement and Concrete Research, Vol. 31(11), 2001, pp. 1627-1632.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00615-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00615-9)

- [8] H.J. Chen, T. Yen, T.P. Lia, Y.L. Huang, "Determination of dividing strength and it's relation to the concrete strength in lightweight aggregate concrete", Cement and Concrete Composition, Vol. 21, 1999, pp. 29-37.
<https://doi.org/10.1016/S0958-9465%2898%2900035-3>

[۱۷] کالوندی، سید محسن، رضایی، مهلا، رهگذر، محمدرضا، بررسی برخی خواص مهندسی بتن معمولی حاوی نانوالومینا و نانوسیلیس، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران بابل، دانشگاه نوشیروانی بابل، ۱۳۹۳.

[۱۸] رضایی فر، امید، بوستانی، مریم و وکیلی، خدیجه، بررسی اثرات استفاده از بتن دارای دی اکسید تیتانیوم بر بهبود کیفیت هوا، دومین کنفرانس سراسری توسعه محوری مهندسی عمران، معماری، برق، مکانیک ایران، گروه آموزش و پژوهش شرکت مهندسی بارو گستر پارس با همکاری آکادمی آکسفورد سرت انگلستان، گرگان، ۱۳۹۴.

https://www.researchgate.net/profile/Omid-Rezaifar/publication/320322617_Investigating_the_Effects_of_Concrete_with_Titanium_Dioxide_on_Improving_Air_Quality/links/59ddaaa5458515f6eff60429/Investigating-the-Effects-of-Concrete-with-Titanium-Dioxide-on-Improving-Air-Quality.pdf

[۱۹] حیدری باغعوضی، سمیرا، کیانپور، محسن و شهرآبادی عباس، خواص فتوکاتالیستی و آب دوستی نانوذره دی اکسید تیتانیوم در تصفیه آب و بررسی روش های سنتز آن، اولین همایش ملی توسعه تکنولوژی در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی، موسسه علمی نفت پژوهان جنوب، اهواز، ۱۳۹۰.

[20] Li, H., Zhang, M.H., and Ou. J.P., Flexural fatigue performance of concrete containing nanoparticles for pavement. International Journal of fatigue 29(7), 1292-1301, 2007.

<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2006.10.004>

[۲۱] رنگرز، س.م، برمایه ور، ب.، صافحیان، م.، "بررسی اقتصادی، زیست محیطی و دوام بتن سبک الیافی سازه ای"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد ۲۵، شماره ۳، ۱۴۰۱، صفحه ۴۹-۵۹.

<https://doi.org/10.22034/jcee.2021.36309.1868>

[22] M. Robati, T. McCarthy, G. Kologiannakis, "Incorporating environmental evaluation and thermal properties of concrete mix designs", Construction and Building Materials, Vol. 128, 2016, pp. 422-435.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.092>

[9] ACI Committee 213, "Guide for Structural Lightweight-aggregate Concrete", American Concrete Institute, 2014.

https://www.concrete.org/Portals/0/Files/PDF/Preview/s/213R-14_preview.pdf

[10] M. Shakarchizadeh, N. Alilibar, M. Jalili, "Handbook for lightweight aggregate concrete", Elm-o-Adab Publication, First edition, Tehran, 2016.

<https://doi.org/10.22065/jsce.2017.95976.1301>

[11] Deputy of housing and building, Ministry of Roads and City Planning, National Building Regulations of Iran, Ninth issue, Design and implementation of reinforced concrete buildings, Publishing Iran Development, 2013.

<https://www.bhrc.ac.ir/portals/0/box/PubEnReport.pdf>

[۱۲] نویل، آدام، خواص بتن، مترجم هرمز فامیلی، انتشارات ابوریحان بیرونی، ۱۳۷۸.

[13] DIN 1048, Concrete harden – Determination of the depth of penetration of water under pressure, German National Standard, 1991.

[۱۴] اسدی، محمد، فهیم، جواد، منشی، احمد و جهانبخش سفیدی، محبوبه، بررسی تاثیر افزودنی نانو سیلیس بر خواص مکانیکی و ریز ساختمانی خمیر سیمان پرتلند، ماهنامه علمی تخصصی سیمان، صفحه ۷۹-۸۴، ۱۳۹۰.

[۱۵] بهادری، هادی و بوشهریان، عباس، کاربرد نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم در روسازی های بتنی در جهت بهبود ویژگی ها و ایجاد خاصیت فوتوکالیستی در بتن، سومین همایش تخصصی محیط زیست، دانشگاه تهران، ۱۳۷۸.

[۱۶] راستگوی حقی، سیده هدا و مظهر سرمدی، نسترن، فن آوری نانو و کاربرد آن در بهبود خواص بتن و فلزات، همایش ملی مقاوم سازی ایران، یزد، ۱۳۹۱.

<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.042>

[۲۹] خجسته بند، حامد، سهرابی، محمدرضا، صمیمی عبدالرضا، بررسی اثر نانوسیلیس بر خواص مکانیکی بتن سبک، هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، شیراز، دانشگاه شیراز، ۱۳۸۸

[30] Nazari, A., Riahi, Sh., Abrasion resistance of concrete containing SiO₂ and Al₂O₃ nanoparticles indifferent curing media. *Energy and Buildings* (43), 2939–2946, 2011.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.05.037>

[31] Nazari, Ali, and Shadi Riahi. The effects of TiO₂ nanoparticles on physical, thermal and mechanical properties of concrete using ground granulated blast furnace slag as binder. *Materials Science and Engineering: A* 528, no. 4-5, 2085-2092, 2011.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.025>

[32] Jalal, M., Fathi, M., Mohammad Farzad, M., Effects of fly ash and TiO₂ nanoparticles on rheological, mechanical, microstructural and thermal properties of high strength self compacting concrete. *Mechanics of Materials* (61), 11–27, 2013.

<https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2013.01.010>

[33] Najigivi, A., Khaloo A., and Abdul Rashid, S. Investigating the effects of using different types of SiO₂ nanoparticles on the mechanical properties of binary blended concrete. *Composites Part B: Engineering*, (54), 52-58, 2013.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.04.035>

[34] Abdelzaher, M. A., Asmaa S. Hamouda, Ibrahim M. Ismail, and M. N. El-Sheikh. Nano Titania Reinforced Limestone Cement: Physico-Mechanical Investigation. *Key Engineering Materials* 786 (2018)

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.786.248>

[23] Fashandi, H., Pakravan, H. R., Latifi, M., “Application of modified carpet waste cuttings for production of eco-efficient lightweight concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol. 198, 2019, pp. 629-637.

<https://doi.org/10.22034/jcee.2021.39150.1933>

[24] Saradar, A., Nemati, P., Shadmani, A., Paskiabi, M., Mohtasham, M., HosseinMoezd, E., Hassanzadeh, V., “Prediction of mechanical properties of lightweight basalt fiber reinforced concrete containing silica fume and fly ash: Experimental and numerical assessment”, *Journal of Building Engineering*, Vol. 32, 2020, 101732.

[25] Karthika, R., Vidyapriya, K., Nandhini, V., Merlin, S., Beaula, G., Harini, M., “Experimental study on lightweight concrete using pumice aggregate, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 43, 2021, pp. 1606-1613.

https://www.ijasret.com/VolumeArticles/FullTextPDF/1561_Experimental_Study_on_Lightweight_Concrete_Using_Pumice_Aggregate.pdf

[26] Swamy, V., Siva, G., Hemalatha, K., kula, R., “Mechanical and durability properties of treated oil palm shell lightweight concrete”, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 47, 2021, pp. 282-285.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.373>

[27] Christidis, K., Badogiannis, G., Mintzoli, C., “Flexural behaviour of pumice lightweight concrete reinforced with end-hooked steel fibres”, *Structures*, Vol. 33, 2021, pp. 3845-3847.

<https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2021.06.090>

[28] Yasser, M., AbdElrahman, M., Elsakhawyc, B., Tayehd, A., TahwiaM., “Development and performance of sustainable structural lightweight concrete containing waste clay bricks”, *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 21, 2022, pp. 4344-4359.