نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۶، سال ۱۴۰۱، صفحات ۲۱۲۹ تا ۲۱۵۰
DOI: 10.22060/ceej.2021.19950.7299

بررسی عملکرد بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده حاوی نانوگرافن

فاضل صدیقی[۱]، قاسم پاچیده[۲]، سیده بهنوش سلیم‌بهرامی*[۱]، فردوس احمدی[۴]، سید جمال الدین موسوی مشهدی[۳]

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور واحد تهران شمال، تهران، ایران
۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
۳- کارخانه بنای سبک قدس رضوی قرچک، تهران، ایران
۴- شرکت کارخانجات بنای سبک قدس رضوی، تهران، ایران.

خلاصه: مقاومت فشاری و کششی پایین، جذب آب بالای بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده که سبب جذب آب ملات شده و همچنین مقاومت پایین در برابر ضربه، از مشکلات فنی و اجرایی استفاده از آن در پروژه‌های ساختمانی است. بدین منظور، در این مقاله به کمک افزودن نانوگرافن با مقادیر ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۸ درصد جایگزینی سیمان در بلوک و تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی (نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر)، ضربه (نمونه‌های مکعبی به بعد ۱۵ سانتی‌متر)، جذب آب (نمونه‌های مکعبی به بعد ۱۵ سانتی‌متر)، SEM و XRD سعی شده است خواص ذکر شده بهبود یابند. بر اساس نتایج به دست آمده، با افزودن نانوگرافن به ترکیب بلوک سبب افزایش مقاومت فشاری و کششی و ضربه تا ۴۵، ۸۱ و ۱۳۰ درصد نسبت به نمونه شاهد شده است. همچنین افزودن نانوگرافن سبب کاهش ۶۱ درصدی میزان جذب آب گردیده است. همچنین نتایج حاصل از آزمایش‌های ریزساختار بر روی نمونه‌ها بیانگر این است که وجود نانوگرافن در ترکیب بلوک، سبب ایجاد ساختاری مستحکم بین اجزا شده و اندازه ذرات تا ۳۰ درصد ریزتر شده است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۷
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۳۰
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۸/۱۵

کلمات کلیدی:
بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده
نانوگرافن
مقاومت فشاری و کششی
جذب آب
ضربه
آزمایش میکروسکوپ الکترونیکی
آزمایش پراش اشعه ایکس

۱- مقدمه

به علت کاهش تلاش‌های ناشی از زلزله در مصالح سبک، طی سالیان اخیر کارخانجات بسیاری در زمینه تولید بلوک‌های سبک هوادار اتوکلاو شده ایجاد شده‌اند [۱]. بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده نوعی بتن سبک محسوب شده که شامل سیمان، آهک، آب، ماسه ریزدانه و پودر آلومینیوم است که توسط دستگاه آسیاب گلوله‌ای ریزدانه می‌شوند. البته گاهی استفاده از مصالح ریزدانه دیگر از جمله میکروسیلیس و خاکستر بادی نیز در ترکیب بلوک استفاده شده است [۲]. این نوع بلوک به علت وزن مخصوص کم (در حدود ۴۰۰ الی ۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب)، دارای خواص عایق حرارتی مناسب نسبت به بتن‌ها و بلوک‌های با چگالی بیشتر بوده و همچنین باعث کاهش وزن ساختمان نیز می‌شود و به همین جهت کاربرد آن در سطح جهان مخصوصاً در کشورهای لرزه‌خیز در حال گسترش است [۳].

برخی از خواص مهم بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده به صورت ذیل می‌باشد [۷-۴]:

- چگالی خیلی کم نسبت به بتن‌های معمولی (یک سوم تا یک ششم)
- عایق صوتی و حرارتی مناسب در مقایسه با بتن معمولی (حجم حفره بلوک = ۳۰ الی ۹۰ درصد)
- راحتی کار کردن با آن هنگام برش و قطعه قطعه کردن
- برگشت مجدد ضایعات آن به خط تولید
- انرژی اندک برای تولید اولیه‌ی محصول

Keriene و همکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی تأثیر افزودن نانو لوله‌های کربنی به بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده و اتوکلاو نشده پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که افزودن نانو لوله‌های کربنی سبب افزایش خاصیت بلوری شدن ترکیب بلوک سبک می‌شود. همچنین مقاومت فشاری و خمشی افزایش یافته و خزش در بلوک نیز کاهش می‌یابد. همچنین تأثیرات نانو لوله‌های کربنی بر روی بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده بیشتر از اتوکلاو نشده می‌باشد، اما در کل پایداری این نوع از بلوک‌ها در حالت

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: bsbahrami@yahoo.com

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

استفاده از نانو لوله کربنی بیشتر از حالت بدون استفاده از آن می‌باشد [۸].

Walczak و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی ساختاری و زیست محیطی بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده پرداختند. بدین منظور به کمک افزودن خاکستر بادی به ترکیب این بلوک، سبب هدایت حرارتی بهتری شده و همچنین میزان پرتی مصالح نیز کاهش یافت. یافته دیگر تحقیقات آن‌ها، دست‌یابی به مقاومت فشاری و چگالی کمتر نسبت به بلوک سبک معمولی بوده است [۹].

Yuan و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی تأثیر افزودن سرباره سدیم کربنات فعال به عنوان جایگزین کامل سیمان در ترکیب بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده پرداختند. بر اساس نتایج، مقاومت فشاری ۲۵ درصد کاهش، چگالی ۱۸ درصد افزایش، هدایت حرارتی ۱۳ درصد افزایش، تخلخل ۵ درصد کاهش و انقباض خشک شدن ۵/۵ درصد افزایش یابد. علاوه بر این، تبلور نسبتاً بالاتر هیدرات‌های سیلیکات کلسیم و اختلاط Al در زنجیره C-S-H برای محصولات سرباره سدیم کربنات فعال مشاهده شد. همچنین کاهش قابل توجهی در هزینه، مصرف انرژی و انتشار CO_2 پیش‌بینی شد [۱۰].

Tao و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی تصفیه نانو ضایعات بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده و استفاده از آن در مصالح ساختمانی پرداختند. ضایعات بتن هوادار اتوکلاو شده (AACW) به عنوان ماده اولیه برای تهیه هسته‌ای برای تسریع سیمان پرتلند استفاده گردید. ذرات نانو AACW با اندازه ذرات متوسط ۳۲۴ نانومتر با روش آسیاب مرطوب تهیه شد. به طور واضح هدایت الکتریکی و مقدار pH نانو AACW بهبود یافته است. زمان و شدت اوج اصلی هیدراتاسیون توسط نانو AACW ارتقا یافت. مقاومت فشاری در سن قبل از ۳ روز نیز به وضوح توسط نانو AACW بهبود یافت [۱۱].

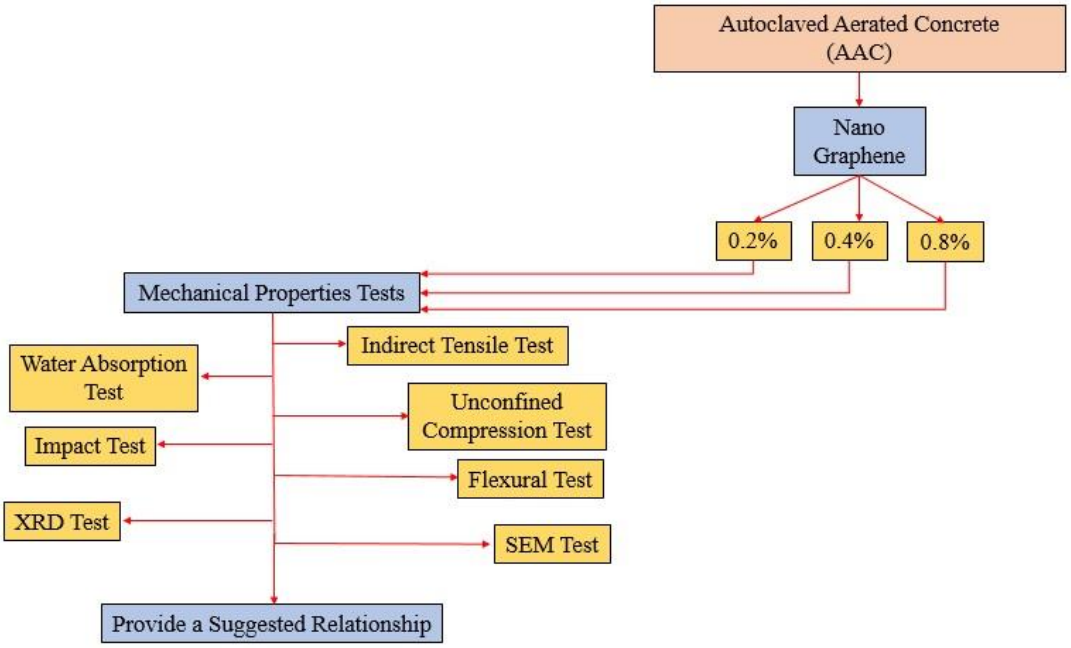
Peng و همکاران در سال ۲۰۲۱ به بررسی تهیه بتن هوادار اتوکلاو شده با استفاده از باطله گرافیت به عنوان یک منبع سیلیس جایگزین پرداختند. تأثیر میزان مصرف سیمان، نسبت مول کلسیم به سیلیس و نسبت مواد جامد (شامل سیلیس و پودر آلومینیوم) به آب بر مقاومت فشاری و تراکم عمده باطله‌های گرافیت بتن هوادار مورد بررسی قرار گرفت .علاوه بر این، هیدراتاسیون و ریزساختار ترکیبات GT-AAC انتخاب شده با استفاده از تجزیه و تحلیل پراش اشعهX ، تبدیل فوریه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که به جز میزان مصرف سیمان و نسبت مواد جامد به آب، نسبت کلسیم به سیلیس نیز نقش مهمی در تولید GT-AAC دارد [۱۲].

Jiang و همکاران در سال ۲۰۲۱ تأثیر میزان مصرف باطله‌های ZSM-5 (Zeolite Socony Mobil-5) بر خصوصیات بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده پرداختند. تأثیرات افزودن این باطله‌ها بر روی خصوصیات مکانیکی و فرآورده‌های واکنشی بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده بر پایه خاکستر بادی مورد ارزیابی قرار گرفت. ترکیبات شیمیایی موجود در AAC به وسیله آزمایشات XRD و SEM بررسی شدند. نتایج آزمایشات آن‌ها نشان داد که افزودنZSM-5 به ترکیب بلوک، سبب کاهش چگالی بلوک و افزایش ۱۵ درصدی مقاومت فشاری خواهد شد. جایگزینی خاکستر بادی توسط باطله‌های ZSM-5 باعث شکل‌گیری توبرموریت شده و بخشی از توبرموریت سوزنی مانند چمن جایگزین شد [۱۳].

علاوه بر تحقیقات انجام شده در زمینه افزودن مواد پوزولانی و نانو به بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده، تحقیقات زیادی نیز در خصوص افزودن نانوگرافن بر ترکیبات ملات‌ها و بتن‌ها انجام شده است [۱۵ و ۱۴]. از این رو، Devi و Ahmad Khan در سال ۲۰۱۹ به بررسی خصوصیات مکانیکی و دوام بتن‌های حاوی گرافن اکسید پرداختند. بدین منظور پنج طرح اختلاط شامل نمونه شاهد و نمونه‌های حاوی ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ درصد نانوگرافن به عنوان جایگزین وزنی سیمان در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که با افزایش استفاده از نانوگرافن، مقادیر کارایی و جذب آب کاهش یافتند. در حالی که با افزایش استفاده از نانوگرافن، سرعت پالس اولتراسونیک، مقاومت فشاری و کششی افزایش یافتند. سرانجام نتایج آزمایش ریزساختار نشان از بهتر بودن ترکیب درونی نمونه‌های حاوی ۰/۸ درصد نانوگرافن بوده است [۱۶].

محمدی و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی تأثیر افزودن نانو ذرات گرافن بر روی مشخصات مکانیکی و دوام بتن‌های ساخته شده با سیمان پرتلند پرداختند. بدین منظور طرح‌های اختلاط مختلفی برای بتن در شرایط معمولی و اتوکلاو در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج به دست آمده، اندازه‌گیری خواص مکانیکی بتن، نشان دهنده افزایش و بهبود مشخصات مکانیکی بتن به مقدار قابل توجهی در نمونه‌های حاوی گرافن اکسید در محیط اتوکلاو شده می‌باشد. همچنین استفاده از این مواد موجب کاهش درصد جذب آب بتن شده است [۱۷].

Akarsh و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی تأثیر اکسید گرافن بر خواص بتن با مقاومت بالا در روسازی شامل میکروسیلیس و در حضور بخارات سیلیس و ماسه پرداختند. سه نوع طرح اختلاط شامل بتن حاوی میکروسیلیس، بتن حاوی نانوگرافن و بتن معمولی در نظر گرفته شدند.



شکل ۱. فلوچارت روند انجام مقاله

Fig. 1. Flowchart of the paper stages

آزمایش‌های مختلفی از قبیل کارایی، مقاومت فشاری و کششی و خمشی، مدول الاستیسیته، جذب آب، خستگی ناشی از خمش و غیره انجام شد. نتایج حاکی از آن بود که با افزودن افزودن ۷ درصد میکروسیلیس و ۰/۱۵ درصد نانوگرافن به ترکیب بتن سبب ایجاد مقاومت فشاری ۷۷ مگاپاسکال و مقاومت خمشی ۸ مگاپاسکال شده است که بیشتر از سایر نمونه‌های دیگر می‌باشد. نتایج آزمایشات خستگی خمشی نشان داد که استفاده از بتن‌های مبتنی بر نانوگرافن در ارتباط با میکروسیلیس می‌تواند به طور موثر به عنوان کیفیت روسازی مورد استفاده قرار گیرد [۱۸].

بر اساس تحقیقات Mowlaei و همکاران در سال ۲۰۲۱ بر روی تأثیر افزودن نانو هیبریدهای گرافن اکسید (۵، ۱۰ و ۳۰ نانومتر) با پوشش سیلیس بر عملکرد خمیرهای سیمانی، به این نتیجه دست یافتند که کارایی کاهش خواهد یافت. با افزایش ضخامت پوشش سیلیس، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه خمیر سیمان به ترتیب تا ۳/۴ و ۱۲/۴ درصد افزایش یافت [۱۹].

Dalal و Dalal در سال ۲۰۲۱ به مطالعه آزمایشگاهی دوام و مقاومت بتن‌های حاوی نانوگرافن پرداختند. نانوگرافن‌ها به مقادیر ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹ و ۱ گرم در لیتر به آب اضافه شده و در مجموع ۹ طرح اختلاط مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی نمونه‌ها به ترتیب تا ۲۷، ۵۵ و ۹۵ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت. همچنین جذب آب و انقباض نیز افزایش یافت [۲۰].

با توجه به مطالعه تحقیقات اخیر و عدم وجود تحقیقات کافی در زمینه استفاده از ماده نانوگرافن در بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده، آزمایشات مشخصات مکانیکی، ضربه، جذب آب، SEM و XRD بر روی نمونه‌های بلوک در قالب‌های استاندارد انجام شده است. سرانجام کلیه نتایج با یکدیگر مقایسه شده و با توجه به نتایج هر آزمایش، درصد بهینه استفاده از نانوگرافن در بلوک ارائه گردید. همچنین روابطی به منظور توسعه استفاده از نانوگرافن در بلوک ارائه شد. شکل ۱ فوچارت روند انجام مقاله را نشان می‌دهد.

۲- مواد و روش‌ها

کلیه مراحل اختلاط، ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها در کارخانه بنای سبک قدس رضوی انجام شد. هم‌اکنون با بهره‌گیری از ماشین‌آلات و تجهیزات مدرن در این زمینه و با ظرفیت اسمی تولید روزانه ۱۰۰۰ متر مکعب بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده و در دو خط تولید مجزا محصولات خود را بر اساس استانداردهای مقررات ملی ساختمان ایران (مبحث ۱۸ و ۱۹ مقررات ملی ساختمان) در ابعاد مختلف به پیمانکاران و کارفرمایان عرضه می‌کند.

جدول ۱. خصوصیات آهک مصرفی

Table 1. Lime properties

دمای آزاد شده (درجه سانتی‌گراد)	زمان انتشار دما (دقیقه)	مقدار کلسیم اکسید
۶۵/۳	۳	٪ ۸۵/۲

مقاومت فشاری و کششی بلوک‌های تولید شده (بر اساس گزارشات ارائه شده توسط کارخانه، که در آزمایشگاه مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی انجام شد) به ترتیب در حدود ۱/۵ و ۰/۵ مگاپاسکال می‌باشند. همچنین ضریب هدایت حرارتی و چگالی اسمی بلوک‌ها نیز به ترتیب در حدود ۱۸×۱۰^{-۶} بر کلوین و ۵۵۰–۶۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد.

فرآیند کلی تولید بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده در کارخانجات ایران تقریباً روال مشابهی دارند که در اینجا به صورت مختصر فرآیند تولید در کارخانه بنای سبک قدس رضوی توضیح داده می‌شود. مواد اصلی تولید بلوک شامل آهک، سیمان، آب و پودر آلومینیوم بوده که ابتدا داخل سیلوی بزرگی با یکدیگر ترکیب شده و دوغاب بلوک را تشکیل می‌دهند (شکل ۲–الف). سپس به کمک مجرای تعبیه شده در زیر سیلو، دوغاب به داخل ظرف مکعبی به ابعاد طول، عرض و ارتفاع ۵، ۱/۴ و ۰/۶ متر منتقل شده و در مدت زمان حدود یک دقیقه تا ۵۰ الی ۶۰ درصد قالب را پر می‌کنند (شکل ۲–الف). سپس قالب‌ها توسط خطوط ریلی، به داخل سالن پیش گرمایش با درجه حرارت ۵۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۸۰ درصد (شکل ۲–ب) منتقل شده و به مدت تقریبی ۴ ساعت در آن جا مانده تا تبدیل به کیک بلوک شود (حالتی شبیه به کیک که پف کرده و نرم است و تا حجم کل قالب پف می‌کند). نکته حائز اهمیت در سالن پیش گرمایش، بسته بودن درب ورودی و خروجی سالن به منظور جلوگیری از هدررفت حرارت و رطوبت است تا مانع از آسیب رسیدن به فرآیند تشکیل کیک بلوک شود. پس از آماده شدن کیک‌ها، قالب‌ها توسط جرثقیل سقفی وارد بخش برش شده (شکل ۲–پ) و توسط ریسمان‌های فلزی نازک به قطعات مشخصی تقسیم شده و بریده می‌شوند. لازم به ذکر است که اگر قالب در زمان معین از کیک جدا نشود، بیش از اندازه سفت شده و هنگام برش خوردن دچار ترک‌های عمیق شده و غیرقابل استفاده می‌شود. یکی از مزایای بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده نسبت به سایر بلوک‌ها، امکان ورود مجدد آن به چرخه‌ی تولید بوده لذا می‌توان قالب‌هایی که ترک خوردند را از طریق حوضچه‌هایی که در کف تعبیه شده مجدداً به خط تولید برگرداند. پس از اتمام عملیات برش خوردن کیک، بر روی صفحات تخت فلزی قرار گرفته و به مدت ۱۲ ساعت در دمای حدود ۲۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد با فشار ۱۲ اتمسفر در داخل دستگاه اتوکلاو قرار می‌گیرد (شکل ۲–ت). پس از خارج شدن قالب از دستگاه اتوکلاو، آماده‌ی بسته بندی و حمل می‌شود (شکل ۲–ث).

۳- برنامه آزمایشگاهی

در این مقاله آزمایشات مقاومت فشاری و کششی، جذب آب، ضربه و ریزساختار بر روی نمونه‌های بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده حاوی نانوگرافن به میزان ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۸ درصد وزنی سیمان، انجام پذیرفت. ظرفیت جک هیدرولیک جهت انجام آزمایشات مقاومت فشاری و کششی برابر ۲۰۰۰ کیلونیوتن و سرعت بارگذاری ۰/۲–۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه می‌باشد. جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری (بر اساس EN 679) و کششی (ASTM C496) از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر، آزمایش جذب آب و ضربه از نمونه‌های مکعبی به بُعد ۱۵ سانتی‌متر استفاده گردید. شکل ۳ تصویر نمونه‌ها در سالن پیش گرمایش را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد، نمونه‌ها که تا ارتفاع حدود ۶۰ درصد ارتفاع قالب‌ها از دوغاب بلوک پر شده بودند، پس از قرار گرفتن در سالن پیش‌گرمایش، به صورت کیک نرم تا ارتفاع کامل نمونه‌ها در حال بالا آمدن هستند.

۳– ۱– مشخصات مصالح طرح اختلاط

سیلیس مصرفی در کارخانه بر طبق استاندارد EN 196-6 [۲۱] دارای سطح مخصوص ۲۷۶۶ سانتی‌متر مربع بر گرم که ۸۵٪ آن از الک ۹۰ میکرون عبور می‌کند، می‌باشد. جهت تولید گاز در تشکیل بلوک، از پودر آلومینیوم با سطح مخصوص ۱۸۰۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم و خلوص آلومینیوم در پودر ۷۰٪ استفاده گردید. در جدول ۱ خصوصیات آهک مصرفی آورده شده است. همچنین سیمان مصرفی از نوع تیپ دو کارخانه‌ی سیمان شاهرود می‌باشد که آنالیز فیزیکی و شیمیایی آن به کمک استاندارد ملی ۳۸۹ ایران و استاندارد کارخانه به ترتیب در جداول ۲ و ۳ آورده شده است.

الف) ریختن دوغاب بلوک به داخل قالب

ب) سالن پیش‌گرمایش

پ) هدایت به سمت خط برش

ت) انتقال کیک به داخل اتوکلاو

ث) بسته‌بندی و حمل

شکل ۲. مراحل تولید بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده

Fig. 2. autoclaved aerated concrete production stages

شکل ۳. تصویر نمونه‌ها در سالن پیش‌گرمایش

Fig. 3. Image tests in the Preheating hall

جدول ۲. آنالیز فیزیکی سیمان مصرفی

Table 2. Cement's physical analysis

شرح آزمایش	نتایج آزمایش	استاندارد ملی ۳۸۹ ایران	استاندارد کارخانه	روش آزمایش
سطح بلین (سانتی‌متر بر گرم)	۳۰۵۵	حداقل ۲۸۰۰	حداقل ۲۹۰۰	۳۹۰
آزمایش اتوکلاو (درصد)	۰/۰۳۶	حداکثر ۰/۸	حداکثر ۰/۶	۳۹۱
زمان سوزن ویکات				
اولیه (دقیقه)	۱۴۵	حداقل ۴۵	حداقل ۷۰	۳۹۲
نهایی (سرعت)	۳/۴۵	حداکثر ۶	حداکثر ۵	۳۹۲
مقاومت فشاری (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)				
۱ روزه	-	-	-	۳۹۳
۲ روزه	-	-	-	۳۹۳
۳ روزه	۲۴۵	حداقل ۱۰۰	حداقل ۱۷۰	۳۹۳
۷ روزه	۳۱۰	حداقل ۱۷۵	حداقل ۲۵۰	۳۹۳
۲۸ روزه	۴۱۱	حداقل ۳۱۵	حداقل ۳۵۰	۳۹۳
حرارت هیدراتاسیون (کالری بر گرم)				
۷ روزه	-	-	-	۳۹۴
۲۸ روزه	-	-	-	۳۹۴

جدول ۳. آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی

Table 3. Cement chemical composition

شرح آزمایش	نتایج آزمایش	استاندارد ملی ۳۸۹ ایران		استاندارد کارخانه	روش آزمایش
(٪) SiO_2	۲۱/۱۱	حداقل ۲۰		حداقل ۲۰/۵	۱۶۹۲
(٪) Al_2O_3	۴/۴۲	حداکثر ۶		حداکثر ۵	
(٪) Fe_2O_3	۳/۹۶	حداکثر ۶		حداکثر ۵	
(٪) CaO	۶۳/۳۶	–		–	
(٪) MgO	۱/۵۱	حداکثر ۵		حداکثر ۲۵	
(٪) SO_3	۲/۷۰	حداکثر ۳		حداکثر ۲/۹	
(٪) Na_2O	۰/۳۲	–		–	۱۶۹۵
(٪) K_2O	۰/۵۱	–		–	
(٪) L.O.I	۲/۰۲	حداکثر ۳		حداکثر ۲/۹	۱۶۹۲
Acid remaining insoluble (٪)	۰/۳۲	حداکثر ۰/۷۵		حداکثر ۰/۷۰	
(٪) Free lime	۱۱	۱/۲۳	–	–	
(٪) C_3S	۱۲	۵۳	–	–	
(٪) C_2S	۱۳	۲۰/۸	–	–	
(٪) C_3A	۳	۵	حداکثر ۸	حداکثر ۶/۵	

ماده افزودنی به دوغاب بلوک، ماده نانوگرافن است که ساختار اصلی آن را مواد پایه کربنی تشکیل می‌دهد. در شکل ۴ تصویر نانوگرافن استفاده شده، نشان داده شده است. همچنین مشخصات نانوگرافن در جدول ۴ ارائه شده است.

گرافن به دلیل خاصیت آب‌گریزی، پراکنش خوبی در آب نداشته و به صورت کلوخه‌های به هم چسبیده تبدیل می‌شود. لذا با اکسید کردن گرافن و القای گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار قابلیت پراکنش آن را افزایش داده و سپس با استفاده از احیای حرارتی در داخل بتن گرافن اکسید به گرافن تبدیل شده و خاصیت آب‌گریزی و هدایت الکتریکی آن بازگردانده می‌شود.

در این مقاله برای سنتز گرافن اکسید از روش اصلاح شده هامر استفاده شده است. برای این منظور پولک‌های گرافیت به عنوان ماده اولیه تولید گرافن اکسید مورد استفاده قرار گرفته است. در این فرآیند ابتدا گرافیت و اسید سولفوریک غلیظ (با نسبت‌ها و مقادیر مناسب) در یک بشر ریخته شده و هم زده می‌شوند. سپس نیترات سدیم (به مقدار مورد نیاز) به آن اضافه گردیده و پس از یک ساعت هم زدن در حمام آب یخ، دمای آن به صفر درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. پس از آن پرمنگنات پتاسیم به تدریج و به مدت ۲ ساعت به آن اضافه شده و بعد از افزودن کامل پرمنگنات پتاسیم مورد نیاز، دمای مخلوط واکنش تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد افزایش داده می‌شود. در گام بعدی این مخلوط به مدت ۲ ساعت در این دما هم زده شده و آب دو بار تقطیر به ظرف واکنش افزوده شده و سپس در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۴۰ دقیقه هم زده می‌شود. در نهایت واکنش با اضافه کردن آب دوبار تقطیر و آب اکسیژنه ۳۰٪ به مقدار کافی متوقف می‌گردد. برای تولید گرافن اکسید، سوسپانسیون حاصل در ۳۵ kHz و به مدت ۴۰ دقیقه التراسونیک می‌گردد. گرافن اکسید تولید شده با محلول ۳٪ HCl در آب، شستشو داده شده و با کمک قیف بوخنر تصفیه می‌گردد. در مرحله بعد سوسپانسیون حاصل با آب مقطر دوبار تقطیر شستشو داده می‌شود. لازم به ذکر است سوسپانسیون به دست آمده پس از هر بار شستشو، با روش فیلتراسیون صاف گردیده است، سپس از این ماده در تهیه نمونه‌های بلوک سبک هوادار

شکل ۴. نانوگرافن استفاده شده

Fig. 4. Nano-graphene used

جدول ۴. مشخصات نانوگرافن استفاده شده

Table 4. Nano-graphene properties

1034343-98-0	**CAS**
GP7	Stock No.
کربن	فرمول مولکولی
۱۲/۰۱	وزن مولکولی (گرم بر مول)
پودر	شکل
سیاه	رنگ
پوسته پوسته شدن	مورفولوژی
۱۰-۵	تعداد لایه‌ها
۱۵	ضخامت متوسط (نانومتر)
۵	بعد جانبی (میکرومتر)
۸۰-۵۰	مساحت سطح (متر مربع بر گرم)
۹۵	تخلخل (درصد)
<۱	مقدار اکسیژن (درصد)
۰/۶۴	نسبت نقض (ID/IG)

اتوکلاو شده استفاده گردید.

۳- ۲- طرح اختلاط بلوک مصرفی

در جدول ۵ طرح اختلاط بلوک تولید شده در هر متر مکعب آورده شده است. کلیه‌ی مراحل اختلاط، ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها در کارخانه بنای سبک قدس رضوی انجام شد. یکی از نکات بسیار مهم در تهیه و ساخت بلوک‌های سبک هوادار اتوکلاو شده در کارخانجات، تفاوت‌های جزئی در طرح اختلاط در هر میکسر می‌باشد. به بیان دیگر، برای اینکه مقدار مواد موجود در اختلاط در نمونه‌ها متفاوت نباشد، کلیه طرح‌ها از یک میکسر در زمان‌های برابر انتخاب شدند. همچنین نکته قابل توجه دیگر در ساخت بلوک‌های سبک هوادار اتوکلاو شده این است که اگر ارتفاعی که ملات در درون ظرف یا قالب ریخت می‌شود، بیشتر از حدود ۲۵ سانتی‌متر باشد، پس از حدود نیم ساعت قسمتی از دوغاب بلوک ته‌نشین شده و همگنی طرح زیر سوال می‌رود. بدین منظور با توجه به اینکه نمونه‌های استاندارد استفاده شده

جدول ۵. طرح اختلاط بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده (کیلوگرم بر متر مکعب)

Table 5. Mix design of the AAC blocks (kg/m3)

	پودر آلومینیوم	گچ	آهک	سیلیس	آب	سیمان	نانوگرافن
REF.	۰/۳۵۰	۰/۲۶۰	۱۰۰	۳۰۰	۲۵۰	۱۲۰	۰
GP-0.2	۰/۳۵۰	۰/۲۶۰	۱۰۰	۳۰۰	۲۵۰	۱۱۹/۷۶	**۰/۲۴**
GP-0.4	۰/۳۵۰	۰/۲۶۰	۱۰۰	۳۰۰	۲۵۰	۱۱۹/۵۲	**۰/۴۸**
GP-0.8	۰/۳۵۰	۰/۲۶۰	۱۰۰	۳۰۰	۲۵۰	۱۱۹/۰۴	**۰/۹۶**

جدول ۶. خلاصه آزمایش‌ها

Table 6. Summary of experiments

آزمایش‌های مکانیکی	آزمایش‌های ریزساختار	سایر آزمایش‌ها	درصد افزودن نانوگرافن‌ها
مقاومت فشاری	میکروسکوپ الکترونیکی	جذب آب	۰/۲
مقاومت کششی	پراش اشعه ایکس	-	۰/۴
مقاومت خمشی	-	-	۰/۸
ضربه	-	-	-
۴ عدد	**۲ عدد**	**۱ عدد**	**۳ عدد**

دارای ارتفاع حداکثر ۲۰ سانتی متر بوده، لذا چنین مشکلی رخ نخواهد داد. لازم به ذکر است که از این به بعد نانوگرافن با نماد GP نشان داده خواهد شد و اعداد مقابل این نماد نشانگر درصد جایگزینی نانو به جای سیمان در بلوک است.

برای تولید دوغاب بلوک، ابتدا به مدت حدود ۱ دقیقه دوغاب سیلیس و سه چهارم آب با یکدیگر ترکیب شدند. سپس سیمان و نانوگرافن اضافه شده و حدود ۳۰ ثانیه با یکدیگر ترکیب شدند. در نهایت آب باقی‌مانده، گچ (plaster) و پودر آلومینیوم به ترکیب اضافه شده و حدود ۴۵ ثانیه با هم ترکیب شدند. باید توجه شود، به دلیل اینکه پودر آلومینیوم بسیار واکنش‌پذیر است و حرارت بالایی را از خود ساطع می‌کند، لذا عملیات میکس شدن باید در کمتر از ۵ دقیقه انجام شده و سپس قالب‌ریزی شود. سپس ادامه فرآیند مشابه آن چیزی است که در قسمت‌های قبل توضیح داده شد. همچنین تعداد و نوع آزمایشات در جدول ۶ ارائه شده است.

۳- ۳- روش آزمایش

بلوک‌های ساخته شده دارای مقاومت زمینه‌ی یکسان می‌باشند. بدین معنی که طرح اختلاط پایه‌ی آن‌ها مطابق جدول ۶ بوده و به مقادیر ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۸ درصد وزنی سیمان از نانوگرافن به آن اضافه شد. پس از ساخت بلوک‌ها، کلیه نمونه‌ها در زیر جک تحت آزمایش مقاومت فشاری و کششی و همچنین آزمایش جذب آب و ضربه قرار گرفتند. سرعت بارگذاری دستگاه برای آزمایش مقاومت فشاری و کششی به ترتیب ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه (۳۹۲۵ نیوتن بر ثانیه) و ۰/۲ مگاپاسکال بر ثانیه (۱۵۷۰ نیوتن بر ثانیه) بر طبق استاندارد EN-12390-13 [۲۲] انتخاب گردید.

۴- انجام آزمایش و بررسی نمونه‌ها

پس از اتمام مراحل ساخت، تولید و عمل‌آوری نمونه‌های بلوک، آزمایشات مقاومت فشاری و کششی، جذب آب، ضربه و ریزساختار طبق

شکل ۵. آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها

Fig. 5. Process of compressive strength test

استاندارد بر روی آن‌ها انجام شد. همچنین نتایج این مقاله با نتایج سایر محققان نیز مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت.

۴- ۱- آزمایش مقاومت فشاری

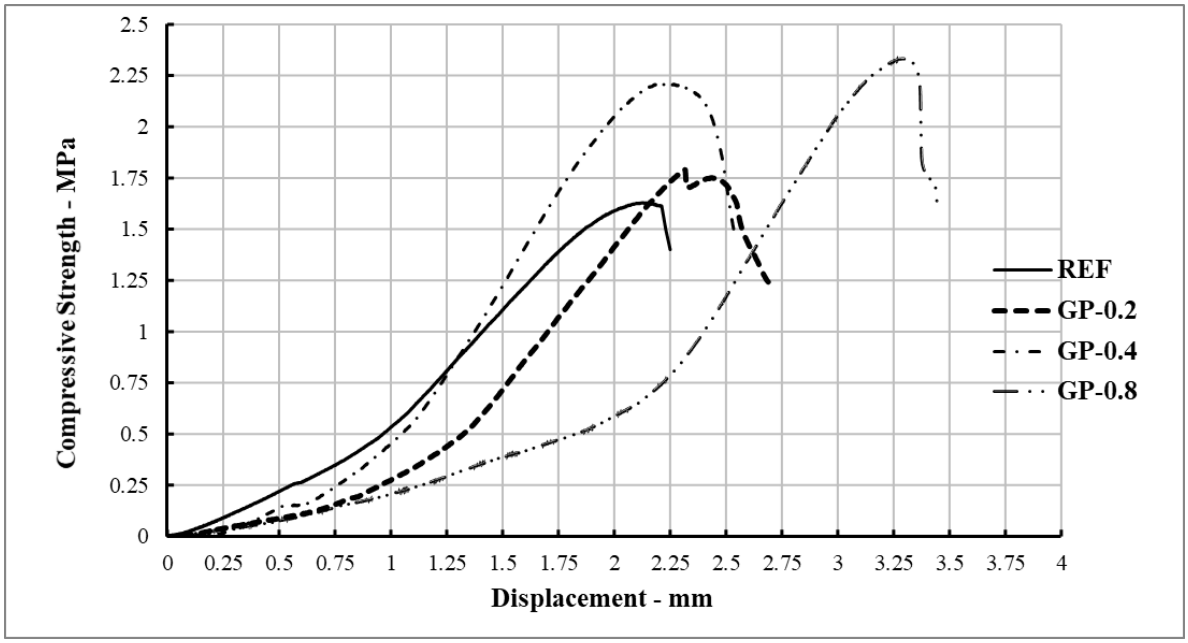
نمای کلی نحوه انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های استوانه‌ای که بر طبق استاندارد EN 679 [۲۳] انجام شده است، در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، برای انجام تست مقاومت فشاری، نمونه‌ها بین دو فک که به فاصله‌ی ۱۰ سانتی‌متر از یکدیگر واقع شده‌اند، قرار داده شده و با سرعت مناسب تحت فشار قرار می‌گیرند. برای انجام این آزمایش نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد ۱۰×۲۰ سانتی‌مترمربع و از هر طرح تعداد ۵ نمونه مشابه ساخته شدند. نمونه‌ها در دمای کمتر از ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد نگهداری شده تا مقدار رطوبت آن‌ها به حدود ۶ درصد جرمی رسید. سپس برای جلوگیری از تغییرات رطوب، برای حداقل ۲ ساعت پس از تست نمونه‌ها تحت محافظت قرار گرفتند تا از تعادل حرارتی نمونه‌ها در شرایط آزمایشگاهی (دمای حدود ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) اطمینان حاصل شود.

برای انجام آزمایش، سطوح فک دستگاه بارگذاری کاملاً تمیز شده و نمونه‌ها در مرکز بین دو فک دستگاه قرار گرفتند. نمونه‌ها با نرخ ثابت تا رسیدن به مرز گسیختگی، بارگذاری شده و حداکثر باری که توسط نمونه تحمل گردید (باری که جک ثبت کرده است)، ثبت شد.

جزئیات اطلاعات شکل ۶ شامل مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته (شیب ناحیه اولیه خطی نمودار)، جذب انرژی (سطح زیر نمودار تنش-تغییر مکان) و کرنش نهایی (بیشترین مقدار نمودار روی محور افقی) برای تمامی نمونه‌ها در جدول ۷ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، مقاومت فشاری در نمونه شاهد و نمونه‌های حاوی نانوگرافن به ترتیب برابر ۱/۶۱، ۱/۷۵، ۲/۲ و ۲/۳۳ مگاپاسکال می‌باشد. بنابراین در نمونه حاوی ۰/۸ درصد نانوگرافن بیشترین مقاومت فشاری حاصل شده که ۴۵ درصد بیشتر از نمونه شاهد شده است.

با افزایش مقدار نانوگرافن در نمونه‌ها مقادیر مدول الاستیسیته نسبت به نمونه شاهد کاهش پیدا کرده است. مدول الاستیسیته در نمونه شاهد برابر ۱۹/۱ مگاپاسکال بر میلی‌متر بوده که با افزودن نانوگرافن در مقادیر ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۸ درصد، این مقدار به ترتیب ۶۷، ۹۲ و ۹۷ درصد کاهش پیدا کرده است. بنابراین نمونه‌ها دارای مقدار مدول الاستیسیته کمتر و در نتیجه سختی اولیه (سکانتی) کمتری شده‌اند. لذا همین موضوع می‌تواند دلیلی بر کاهش میزان پرتی مصالح و خرد شدن آن‌ها در حین حمل و نقل و اجرا در پروژه باشد.

یکی دیگر از پارامترهای مهم تأثیرگذار در رفتار نرم‌تر و مناسب‌تر بلوک‌ها، جذب انرژی آن‌ها می‌باشد که در نمونه‌های حاوی نانوگرافن به ترتیب ۲۴، ۳۸ و ۴۱ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. به هنگام وقوع زلزله در ساختمان‌های کوتاه مرتبه و میان‌قاب‌ها که بلوک



شکل ۶. منحنی تنش-تغییر مکان نمونه‌ها

Fig. 6. Stress-strain curve of the specimens

جدول ۷. مقادیر مستخرج از نمودار تنش-تغییر مکان آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها

Table 7. The values obtained from Stress-Strain Curve

	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال بر میلی‌متر)	جذب انرژی (نیوتن بر میلی‌متر)	کاهش طول (درصد)
REF.	۱۹/۱	۲/۱۱	**۱/۱۳**
GP-0.2	۶/۳۷	۲/۶۱	**۱/۳۵**
GP-0.4	۱/۵۹	۲/۹۲	**۱/۲۷**
GP-0.8	۰/۵۴	۲/۹۸	**۱/۷۲**

نقش سازه‌ای داشته و در سایر ساختمان‌ها نقش غیرسازه‌ای دارد، در اولین سیکل‌های زلزله که دارای بیشترین میزان انرژی بوده، استفاده از نانوگرافن در بلوک می‌تواند تا حدود ۴۱ درصد از میزان انرژی زلزله را مستهلک نموده و سبب خرابی کمتر در اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای گردد. همین موضوع می‌تواند ساختمان را در سطح عملکرد بالاتری قرار دهد.

قبل از انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌ها، یک جابجایی‌سنج (LVDT) در محل فک دستگاه قرار داده شد تا میزان کاهش طول نمونه‌ها در حین بارگذاری را ثبت کند. در واقع به کمک این پارامتر می‌توان مقدار فشردگی و کاهش طول نمونه‌ها پس از اتمام آزمایش مقاومت فشاری را دانست. این پارامتر در نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی نانوگرافن به ترتیب برابر ۱/۱۳، ۱/۳۵، ۱/۲۷ و ۱/۷۲ درصد می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌گردد با توجه به نرم‌تر شدن رفتار نمونه‌ها و کاهش میزان مدول الاستیسیته، طبیعتاً مقدار کاهش طول نیز افزایش یافته است. لذا این موضوع می‌تواند به عنوان عاملی دیگر در برابر بارهای لرزه‌ای و مستهلک نمودن

جدول ۸. مقادیر مقاومت فشاری نمونه‌ها (مگاپاسکال)

Table 8. Compressive strength values (MPa)

	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	نمونه ۵	دامنه اختلاف نتایج	میانگین
REF.	۱/۵۷	۱/۶۰	۱/۵۵	۱/۶۴	۱/۶۹	۰/۱۲	**۱/۶۱**
GP-0.2	۱/۷۴	۱/۷۰	۱/۶۸	۱/۷۹	۱/۸۴	۰/۱۶	**۱/۷۵**
GP-0.4	۲/۰۵	۲/۳۱	۲	۲/۲۰	۲/۴۴	۰/۴۴	**۲/۲**
GP-0.8	۲/۴۱	۲/۳۵	۲/۲۹	۲/۵۰	۲/۱۰	۰/۴۰	**۲/۳۳**

انرژی موثر باشد.

به منظور ارزیابی و درک بهتر از نتایج به دست آمده، مقادیر مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها به تفکیک بر حسب مگاپاسکال در جدول ۸ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری در تمامی نمونه‌ها با کمترین میزان اختلاف به دست آمدند که این موضوع بیانگر دقت انجام مراحل ساخت نمونه‌ها می‌باشد. در نهایت میانگین مقادیر، به عنوان مقاومت فشاری لحاظ گردید.

با برازش منحنی تابع نمایی بر روی نتایج نمونه‌های حاوی نانوگرافن می‌توان مقاومت فشاری نمونه‌های بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده را از رابطه $Y=0.017X^{4.33}$ (Y و X به ترتیب معادل مقاومت فشاری و درصد استفاده از نانوگرافن می‌باشند.) با ضریب رگرسیون $R^2=0.89$ پیش‌بینی نمود. دقت شود که رابطه پیشنهادی صرفاً برای طرح اختلاط استفاده شده در این مقاله قابل ارزیابی خواهد بود.

با توجه به اینکه مواد نانوی تهیه شده توسط شرکت دانش بنیان واقع در ایران تهیه شده است لذا از نمونه مشابه خارجی به مراتب ارزان‌تر است (۵ برابر ارزان تر). علی‌رغم قیمت بالاتر نانوگرافن نسبت به سیمان اما با توجه به اینکه افزایش مقاومت ۴۴ درصد نسبت به نمونه شاهد رخ داده است لذا می‌توان افزودن نانوگرافن را توصیه نمود.

۴- ۲- آزمایش مقاومت کششی

برای انجام آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها، از روش کشش غیرمستقیم یا روش برزیلی بر طبق استاندارد ASTM C496 [۲۳] استفاده شد. روش انجام آزمایش بدین صورت است که نمونه به صورت افقی یا خوابیده در زیر جک قرار گرفته به طوری که هیچ گونه انحرافی در راستای خود ندارد. سپس جک هیدرولیک مورد نظر با اعمال نیرو، منجر به شکست نمونه می‌شود. نمونه‌ها در قالب‌های فلزی استوانه‌ای استاندارد به ابعاد ۱۰×۲۰ سانتی‌مترمربع ساخته شده و برای رسیدن رطوبت درونی محصول نهایی به ۶٪ وزن کل، حدود ۴۸ ساعت نمونه‌ها در دمای ۷۰ درجه در گرمکن قرار گرفتند. برای سرد شدن نمونه‌ها به صورت تدریجی تا رسیدن به دمای اتاق به دلیل جلوگیری از تغییرات مخرب در ساختار بلوری، درب گرمکن بسته ماند و پس از آن نمونه‌ها آماده‌ی آزمایش شدند. شکل ۷ تصویری از نمونه‌ی استوانه‌ای جهت انجام آزمایش مقاومت کششی را نشان می‌دهد. همان گونه که ملاحظه می‌شود با توجه به مقاومت کششی کم نمونه شاهد، پس از پایان تست به صورت دو نیم شدن کاملاً شکافته شده اما در نمونه حاوی نانوگرافن به علت ایجاد پیوند قوی بین سیمان و سایر اجزای بلوک، پس از پایان تست نمونه‌ها صرفاً دچار شکاف باریکی شده و دو نیم نمی‌شوند.

همچنین پس از پایان آزمایش مقاومت کششی در تمامی نمونه‌ها، عرض ترک ایجاد شده در سطح مقطع نمونه‌ها توسط کولیس دیجیتال اندازه‌گیری شد. عرض ترک در نمونه‌های شاهد، GP-0.2، GP-0.4 و GP-0.8 به ترتیب برابر ۱/۵، ۱/۱، ۰/۸۵ و ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد. بنابراین یکی از مشکلات بلوک‌های سبک هوادار اتوکلاو شده که مربوط به ایجاد ترک در حین فرآیند تولید، بسته‌بندی و اجرا بوده، به کمک ماده نانوگرافن مرتفع گردید. همچنین می‌توان با انجام تحقیقات بیشتر و با تغییر در درصد استفاده از نانوگرافن و طرح اختلاط بلوک، به ترک‌هایی با عرض کمتر نیز دست یافت.

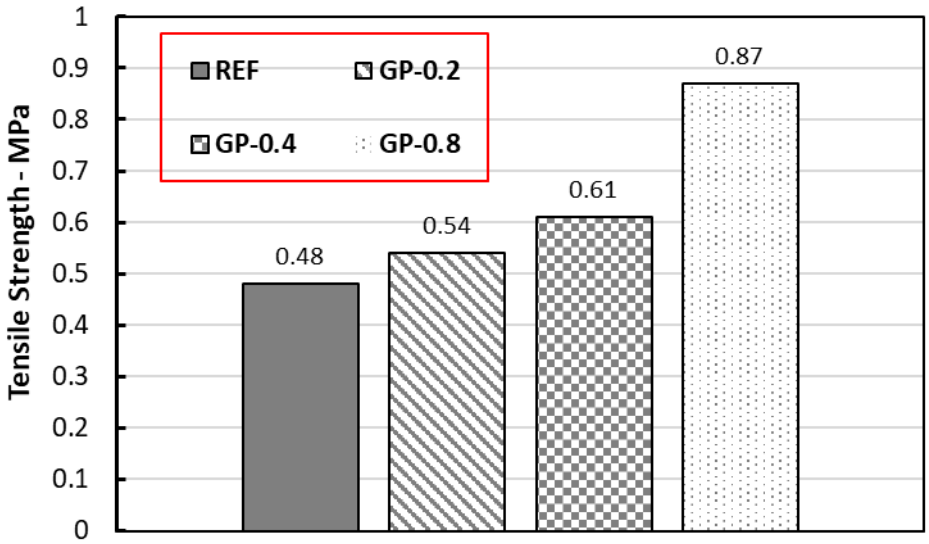
در شکل ۸ روند تغییرات مقاومت کششی بر حسب درصد افزایش مقدار نانوگرافن در ترکیب بلوک نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود مقاومت کششی نمونه‌های شاهد، GP-0.2، GP-0.4 و GP-0.8 به ترتیب برابر ۰/۴۸، ۰/۵۴، ۰/۶۱ و ۰/۸۷ مگاپاسکال می‌باشند. بنابراین می‌توان گفت که با افزودن نانوگرافن به ترکیب بلوک سبک هوادار

الف) شکست نمونه شاهد

ب) شکست نمونه حاوی نانوگرافن

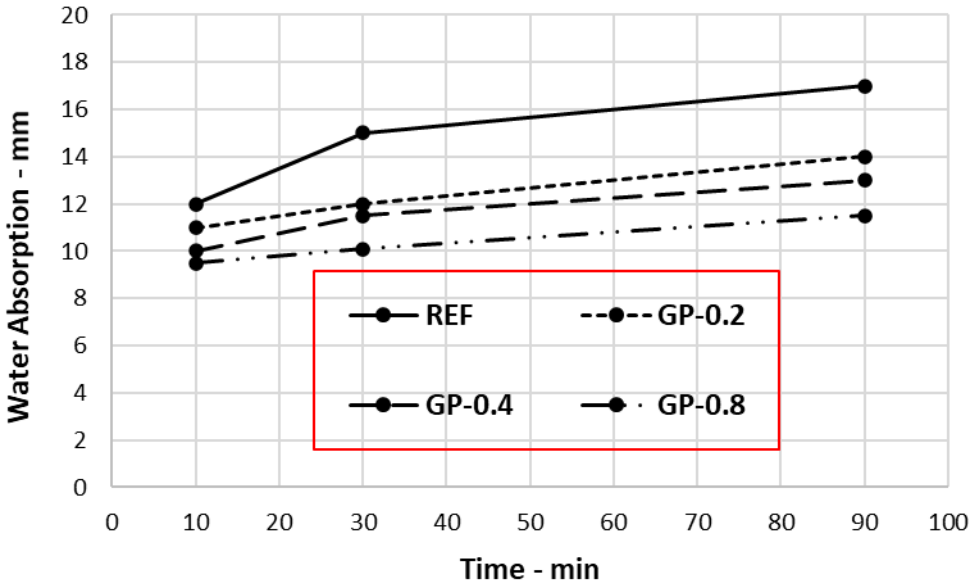
شکل ۷. مشاهدات آزمایش مقاومت کششی

Fig. 7. Observations obtained from Tensile Strength Tests



شکل ۸. مقاومت کششی نمونه‌ها

Fig. 8. Tensile strength of the AAC blocks



شکل ۹. نتایج آزمایش جذب آب در زمان‌های مختلف

Fig. 9. Results of Water Absorption Test at different time intervals

اتوکلاو شده، می‌توان مقاومت کششی را تا ۸۱ درصد افزایش داد. همچنین هر چقدر درصد استفاده از مقدار نانوگرافن در بلوک افزایش یابد، مقاومت کششی نیز به صورت تصاعدی افزایش خواهد یافت.

همچنین با برازش منحنی تابع نمایی بر روی نتایج نمونه‌های حاوی نانوگرافن می‌توان مقاومت کششی نمونه‌های بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده را از رابطه $Y=0.517X^{0.41}$ (Y و X به ترتیب معادل مقاومت فشاری و درصد استفاده از نانوگرافن می‌باشند.) با ضریب رگرسیون R^2=۰.۸۳ پیش‌بینی نمود.

۴- ۳- آزمایش جذب آب

آزمایش جذب آب نمونه‌ها بر اساس استاندارد DIN EN 772-11 انجام شد. مقایسه جذب آب نمونه‌ها از دو دیدگاه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. دیدگاه اول بر این اساس است که نمونه‌های مکعبی به بعد ۱۵ سانتی‌متر در مدت زمان‌های ۱۰، ۳۰ و ۹۰ دقیقه در ظرفی که تا ارتفاع ۵ میلی‌متری از آب پر شده است، قرار گرفتند. سپس میانگین ارتفاع آب بالا آمده در نمونه‌ها اندازه‌گیری شده (شکل ۹) و با یکدیگر مقایسه شدند. همانطور که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود، با افزایش مدت زمان قرارگیری نمونه‌ها در درون ظرف آب، میزان ارتفاع آب بالا آمده در نمونه‌ها افزایش یافته است. به عنوان مثال میزان بالا آمدن آب در نمونه شاهد به ترتیب برابر ۱۲، ۱۵ و ۱۷ میلی‌متر می‌باشد. با افزایش میزان استفاده از نانوگرافن در نمونه‌های بلوک، سطح آب کمتری بالا آمده به طوری که در نمونه حاوی ۰/۸ درصد نانوگرافن، سطح آب به ترتیب برابر ۹/۵، ۱۰/۱ و ۱۱/۵ میلی‌متر می‌باشد. بنابراین با جمع‌بندی نتایج شکل ۹ می‌توان به این نکته دست یافت که با افزایش مقدار نانوگرافن در ترکیب بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده، ارتفاع آب جذب شده حداکثر تا ۴۸ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش می‌یابد. با نگاهی دیگر به این موضوع و با رگرسیون خطی نتایج هر نمونه در زمان‌های مختلف می‌توان به این نکته دست یافت که شیب افزایش سطح بالا آمدن آب در نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی نانوگرافن به ترتیب برابر ۶، ۴، ۳ و ۲ درصد می‌باشد. این مقادیر نشانگر این مطلب هستند که سرعت بالا آمدن آب در نمونه‌ها نیز با افزایش مقدار نانوگرافن در ترکیب بلوک کاهش می‌یابد.

با توجه به اینکه استفاده از بلوک‌های سبک در تمامی مناطق و شرایط جوی مجاز می‌باشد، لذا یکی از مسائل مهم در استفاده از این نوع از بلوک‌ها، کاربرد آن‌ها در مناطق ساحلی و یا مناطقی با شرایط خوردگی بالا می‌باشد.

جدول ۹. درصد جذب آب وزنی نمونه‌ها

Table 9. Water absorption rates (weight percent)

	درصد وزن جذب آب بلوک در زمان‌های مختلف		
	۱۰ دقیقه	**۳۰ دقیقه**	**۹۰ دقیقه**
REF	۳/۳۹	۶/۷۸	۱۱/۱۹
GP-0.2	۲/۳۷	۶/۰۵	۱۰/۹۵
GP-0.4	۱/۷۴	۴/۲۹	۸/۳۸
GP-0.8	۱/۳۳	۳/۷۸	۸/۲۸

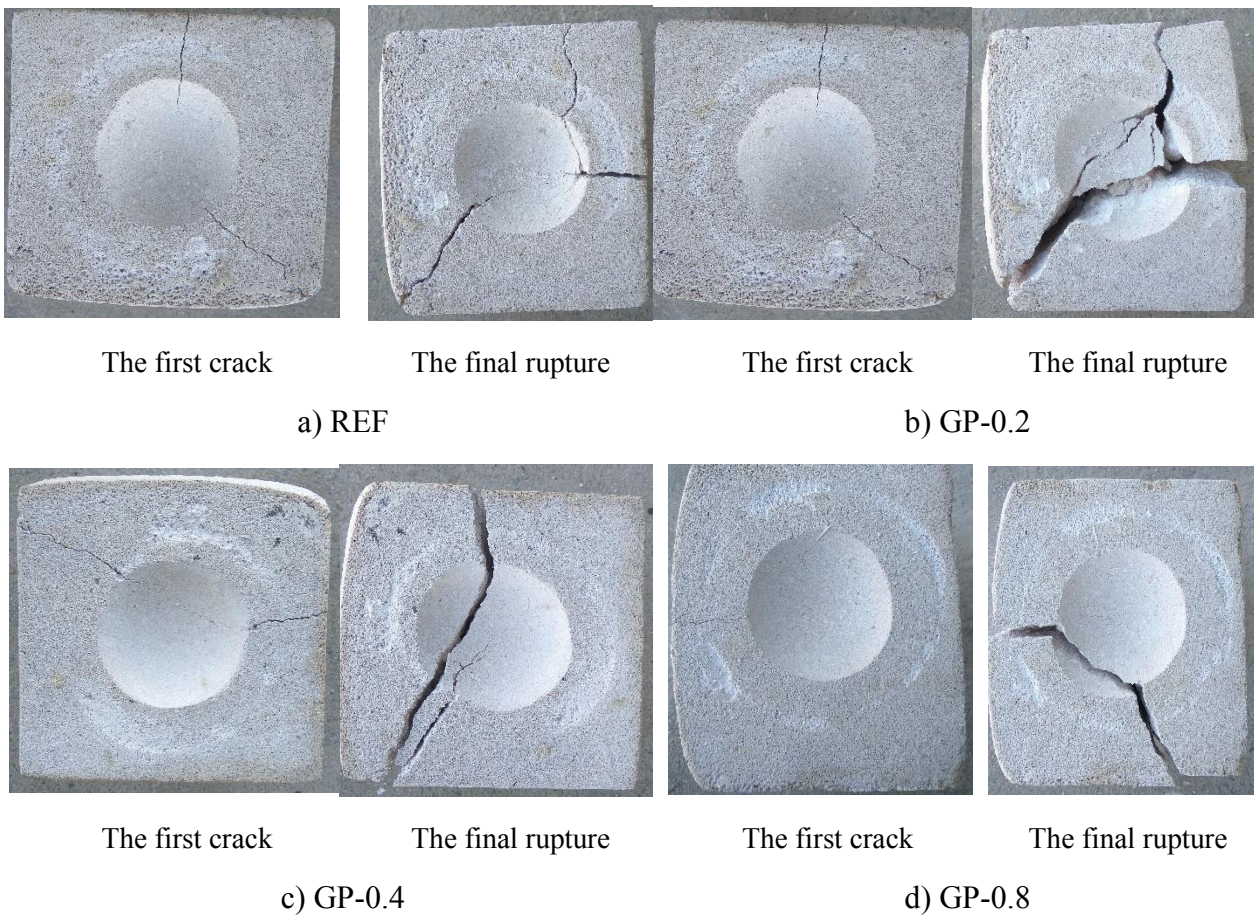
لذا اگر نمونه‌ای میزان بالا آمدن آب کمتری نسبت به سایرین داشته باشد، می‌توان به نوعی بیان نمود که دارای خاصیت دوام بیشتری در شرایط خورنده یا اسیدی می‌باشد. چرا که هر چه میزان تخلخل و ورود حملات شیمیایی و جانوران موزی به داخل نمونه کاهش یابد، دوام نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابند. بنابراین با توجه به توضیحات فوق، در نمونه‌های حاوی نانوگرافن، دوام بیشتری نسبت به نمونه‌های بدون ذرات نانو ملاحظه خواهد شد.

اما دیدگاه دوم نسبت به مسئله جذب آب نمونه‌ها بر این اصل استوار است که مقدار جذب آب نمونه‌ها بر اساس درصد افزایش وزن بر اساس زمان‌های ۱۰، ۳۰ و ۹۰ دقیقه مورد بررسی قرار گیرد. وزن نمونه شاهد که هیچ‌گونه ماده نانویی در آن به کار نرفته است برابر ۱/۹۹۲ کیلوگرم می‌باشد. بر این اساس، در جدول ۹ درصد افزایش وزن نمونه‌ها در زمان‌های مختلف نسبت به نمونه شاهد ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود روند کلی درصد تغییرات وزنی نمونه‌ها، مشابه دیدگاه اول می‌باشد. بیشترین و کمترین مقدار جذب آب مربوط به نمونه‌های شاهد و GP-0.8 می‌باشد. در مابقی نمونه‌ها نیز مقادیر بین این دو حالت هستند.

۴- ۴- آزمایش مقاومت ضربه‌ای

یکی دیگر از مشکلات تولید بلوک‌های سبک هوادار اتوکلاو شده، مقاومت پایین آن‌ها در برابر بارهای ضربه است. به عنوان مثال در حین جابجایی در کارخانه و محل پروژه، در اثر کوچک‌ترین ضربه‌ای دچار شکستگی یا لب پر شدن می‌شوند. به همین جهت میزان مصالح پرت آن‌ها بر اساس اطلاعاتی که از کارفرمایان پروژه‌ها دریافت شد، در حدود ۲۵ درصد می‌باشد که به نوبه خود عدد بزرگی محسوب می‌شود. لذا یکی از نکات مهم به منظور بهبود خواص این نوع از بلوک‌ها، ارائه راهکاری جهت افزایش مقاومت ضربه‌ای آن‌ها می‌باشد که در این مقاله به کمک قالب‌های مکعبی شکل به بعد ۱۵ سانتی‌متر حاوی مقادیر مختلف نانو که در قسمت‌های قبل به طور مفصل توضیح داده شد، سعی در افزایش خاصیت مقاومت ضربه شده است.

آزمایش تعیین مقاومت ضربه‌ای بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده مطابق با روش Drop-weight test (آزمایش وزنه افتان) انجام شده است. از هر نمونه به تعداد سه نمونه مشابه ساخته شد که در نهایت بهترین و صحیح‌ترین نمونه به عنوان نتیجه نهایی لحاظ گردید. برای تعیین مقاومت ضربه‌ای بلوک‌ها روش استانداردی وجود ندارد. آزمایش ضربه پرتابه، آزمایش شارپی، آزمایش وزنه افتان و آزمایش میله هاپکینسون، از جمله آزمایش‌های متداولی هستند که برای بررسی رفتار ضربه‌ای بلوک‌ها و بتن‌ها توسط کمیته [۲۵] پیشنهاد شده است. با دستگاه آزمایش وزنه افتان با ضربات تکرار شونده، تعداد ضربه برای ایجاد سطح مشخصی از گسیختگی به دست می‌آید که معیاری از ظرفیت جذب انرژی مصالح است. این آزمایش با سقوط وزنه ۴/۵۴ کیلوگرمی از ارتفاع ۴۵۷ میلی‌متری انجام می‌شود و ضربات تکراری تا رسیدن به سطوح مشخصی از ترک خوردگی (اولین ترک خوردگی و گسیختگی پایانی) ادامه می‌یابد [۲۶]. در این مقاله، از این روش برای بررسی مقاومت ضربه‌ای بلوک و تأثیر ماده نانوگرافن در



شکل ۱۰. مشاهدات آزمایش مقاومت ضربه‌ای

Fig. 10. Observations of Impact Resistance test.

میزان بهبود عملکرد آن تحت این نوع بارگذاری استفاده شده است. در شکل ۱۰ تصاویر نمونه‌ها در مراحل انجام آزمایش مقاومت ضربه‌ای نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار نانوگرافن در ترکیب بلوک، نمونه‌ها به قطعات با تعداد کمتری تقسیم شده‌اند. همچنین عرض اولین ترک ایجاد شده در نمونه‌ها نیز نشانگر این است که استفاده از نانوگرافن سبب کاهش این پارامتر نسبت به نمونه شاهد شده است.

همچنین به علت وجود نانوگرافن در ترکیبات با درصدهای مختلف، مقاومت بافت و ساختار درونی بلوک‌ها افزایش یافته و نه تنها با تعداد ضربه بیشتری نسبت به نمونه شاهد دچار گسیختگی شده، بلکه تعداد ترک‌ها یا شکاف‌های عمیق رخ داده نیز کاهش یافته است. بنابراین می‌توان ارتباط مستقیمی با میزان استفاده از نانوگرافن در ترکیب بلوک و نحوه گسیختگی نمونه‌ها یافت.

در جدول ۱۰ نتایج مربوط به این آزمایش ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، در افزایش تعداد ضربه بعد از ایجاد اولین ترک تا گسیختگی نهایی برابر یک می‌باشد. همچنین مقدار افزایش تعداد ضربه برای ایجاد اولین ترک نسبت به نمونه شاهد به ترتیب برابر ۴۲، ۹۵ و ۱۳۷ درصد می‌باشد. این روند برای حالت گسیختگی نهایی نیز به ترتیب برابر ۴۰، ۹۰ و ۱۳۰ درصد می‌باشد. بنابراین می‌توان به این نکته پی برد که استفاده از نانوگرافن در ترکیب بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده سبب افزایش چشمگیر در مقاومت ضربه‌ای آن‌ها می‌شود. این مسئله تکمیل کننده بحث جذب انرژی در نمونه‌ها نیز می‌باشد.

جدول ۱۰. نتایج آزمایش مقاومت ضربه‌ای

Table 10. Results of the impact resistance test

	تعداد ضربه در اولین ترک روی سطح	تعداد ضربه در گسیختگی نهایی	افزایش تعداد ضربه بعد از ایجاد اولین ترک تا گسیختگی نهایی	درصد افزایش تعداد ضربه بعد از ایجاد اولین ترک تا گسیختگی نهایی	درصد افزایش تعداد ضربه در اولین ترک نسبت به نمونه بدون نانو	درصد افزایش تعداد ضربه در گسیختگی نهایی نسبت به نمونه بدون نانو
REF	۱۹	۲۰	۱	۵/۳	۰	۰
GP-0.2	۲۷	۲۸	۱	۳/۷	۴۲	۴۰
GP-0.4	۳۷	۳۸	۱	۲/۷	۹۵	۹۰
GP-0.8	۴۵	۴۶	۱	۲/۲	۱۳۷	۱۳۰

۴- ۵- آزمایش میکروسکوپ الکترونیکی (SEM)

به منظور شناخت و درک بهتر خواص ریزساختار نمونه‌ها، تمامی نمونه‌ها تحت آزمایش میکروسکوپ الکترونیکی قرار گرفتند. در واقع به کمک انجام این آزمایش می‌توان به ساختار دورنی بلوک‌های حاوی نانوگرافن پی برده و اثر افزایش مقدار نانوگرافن بر ترکیب بلوک را مشاهده نمود. در شکل ۱۱ تصاویر مربوط به آزمایش میکروسکوپ الکترونیکی بر روی نمونه‌ها نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ساختار صفحه‌ای-سوزنی شکل نانوگرافن در ترکیبات به وضوح قابل رویت است. همچنین در نمونه شاهد به علت عدم وجود نانوگرافن، حفرات بزرگ زیاد و ساختار بهم ریخته‌ای مشاهده می‌شود. بنابراین با افزایش مقدار نانوگرافن در ترکیب بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده، با ایجاد پیوندی منسجم و مستحکم بین خمیر سیمان، سبب کاهش مقدار نفوذپذیری و حفره در بلوک می‌شود.

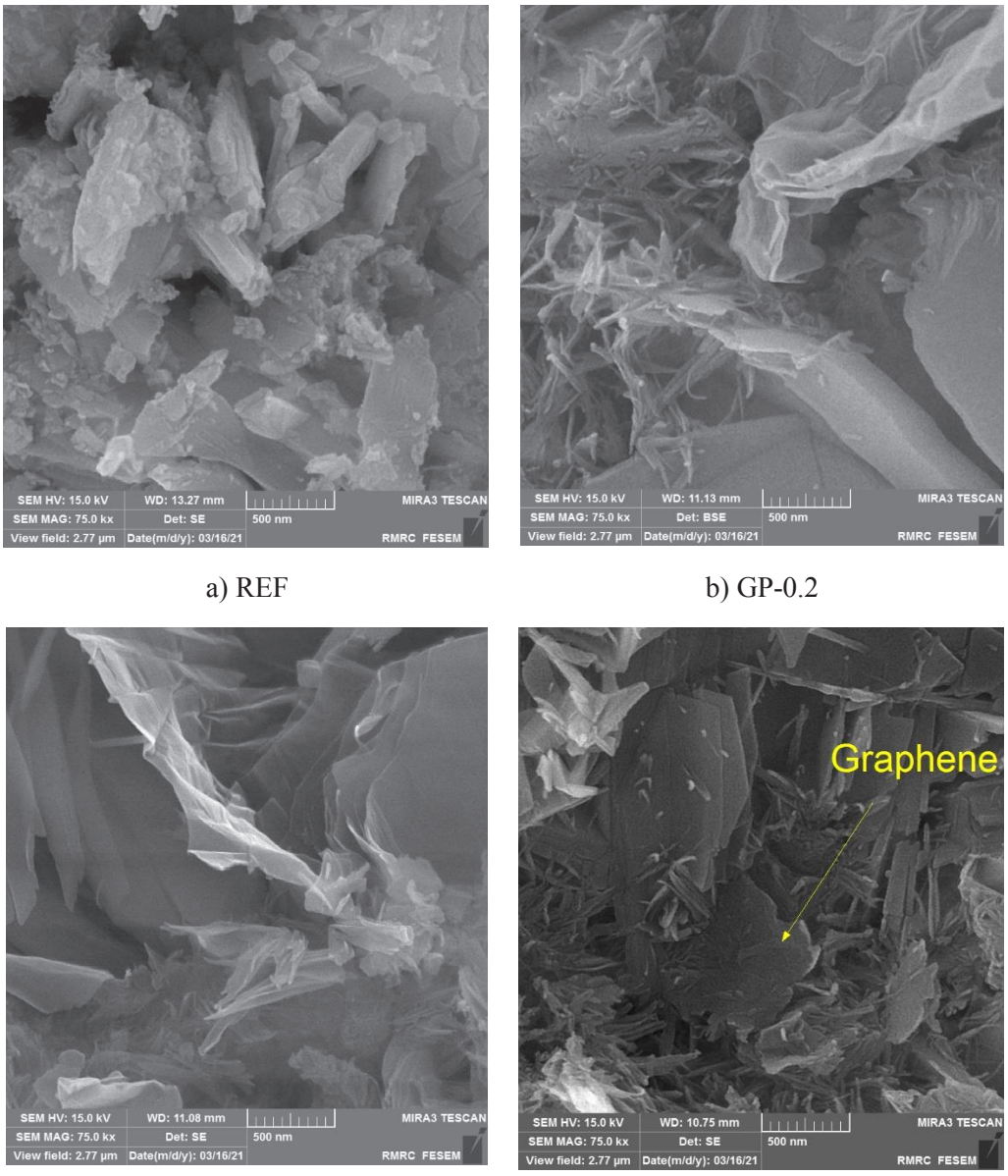
۴- ۶- آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD)

به منظور بررسی اثر افزودن نانوگرافن بر ترکیب بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده، تمامی نمونه‌ها تحت آزمایش پراش اشعه ایکس قرار گرفتند. در این آزمایش، مقدار و ترکیبات اصلی هر نمونه مشخص می‌شود. همانطور که از شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، ترکیبات اصلی نمونه‌ها عبارتند از کوارتز (SiO_2)، کلسیت ($CaCO_3$)، توبرموریت ($Ca_5(OH)_2Si_6O_{16}.4H_2O$) و آنهیدریت ($CaSO_4$). افزودن نانوگرافن به ترکیب بلوک، سبب افزایش مقدار کوارتز و توبرموریت شده است. همچنین ترکیبات آنهیدریت و کلسیت نیز از بلوک حذف شده است و جزو عناصر اصلی محسوب نمی شود.

همچنین بر اساس مقادیر جدول ۱۱، اندازه دانه نمونه‌ها بر حسب نانومتر که طبق رابطه شرر به دست آمده، ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزودن نانوگرافن به ترکیب بلوک، اندازه دانه‌ها تا حدود ۳۰ درصد کوچک‌تر شده است.

۵- مقایسه نتایج این مقاله با نتایج سایر محققان

به منظور درک بهتر نتایج به دست آمده از یافته‌های این مقاله، نتایج این مقاله با نتایج تحقیقات مشابه سایر محققان در جدول ۱۲ مورد مقایسه قرار می‌گیرند. تمامی مواردی که در جدول ذکر شده‌اند بر حسب درصد بوده و در مقایسه با نمونه شاهد مربوط به هر مقاله ارائه شده‌اند. همچنین کلیه تحقیقاتی که در جدول ۱۲ ارائه شدند از مواد نانو و یا هر ماده‌ی ریزساختار دیگری در ترکیبات بلوک و ملات و بتن استفاده شدند. بنابراین نتایج تحقیقات ذیل صرفا محدود به بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده نمی‌باشد. لذا با جامعیت بیشتری می‌توان به اهمیت نتایج این مقاله نسبت به سایر محققان پی برد. همانطور که از جدول ۱۲ مشاهده می‌شود، تقریباً در اکثر موارد نتایج به دست آمده از این مقاله نسبت به سایر تحقیقات، بهتر بوده و خصوصیات ترکیبات بلوک، ملات و بتن را بیشتر ارتقا داده است. همچنین آزمایشی که در عمده مقالات انجام نشده است و از آن غافل گردیده‌اند، آزمایش مقاومت ضربه ای است که در این مقاله انجام شده و نتیجه خوبی نیز حاصل شده است. بنابراین می‌توان گفت با توجه به طرح اختلاط بلوک مورد استفاده در



a) REF

b) GP-0.2

c) GP-0.4

d) GP-0.8

شکل ۱۱. تصاویر آزمایش SEM بر روی نمونه‌ها

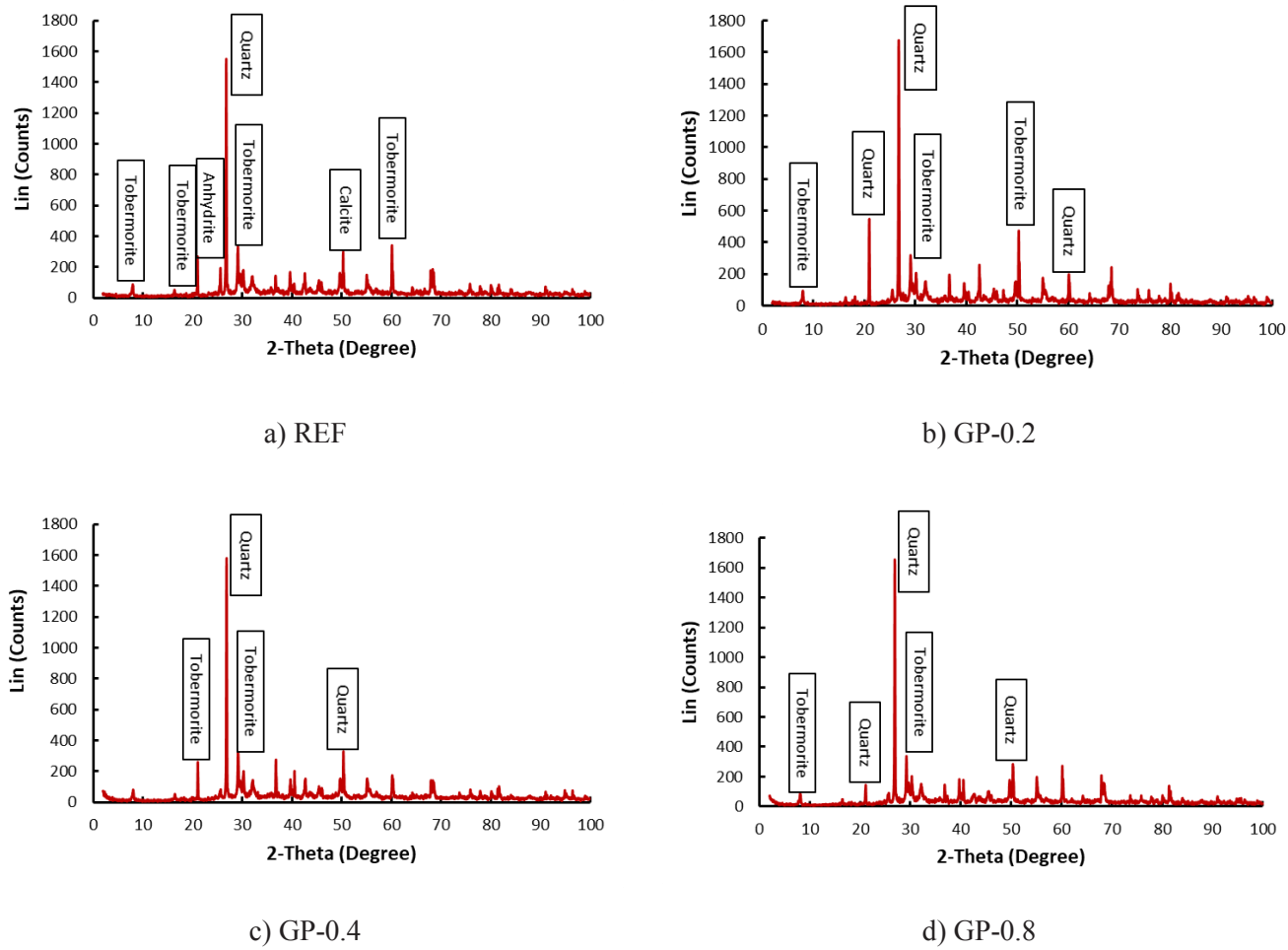
Fig. 11. Images of the SEM tests.

این مقاله و مقادیر افزوده شدن نانوگرافن به آن، نتایج قابل توجهی به دست آمده و می‌تواند یک دستاورد مهم محسوب شود.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با افزودن مقادیر ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۸ درصد وزنی سیمان از ماده نانوگرافن در ترکیب بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده استفاده گردید. آزمایشات مقاومت فشاری و کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای و آزمایشات مقاومت ضربه‌ای و جذب آب بر روی نمونه‌های مکعبی انجام شد. همچنین به منظور شناخت بهتر خواص ریزساختار نمونه‌ها، آزمایش SEM و XRD نیز بر روی هر یک از نمونه‌ها انجام پذیرفت. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از انجام این مقاله به قرار زیر است:

- بر اساس نتایج آزمایشات مقاومت فشاری بر روی نمونه‌ها، با افزودن مقادیر ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۸ درصد نانوگرافن به عنوان جایگزین وزنی سیمان در ترکیب بلوک سبک هوادار اتوکلاو شده، مقاومت فشاری نسبت به نمونه



شکل ۱۲. نتایج آزمایش XRD بر روی نمونه‌ها

Fig. 12. Size of Grains based on XRD test (D in nanometer- θ in degree)

شاهد به ترتیب ۹، ۳۷ و ۴۵ درصد افزایش یافت. مدول الاستیسیته نمونه‌ها نیز به ترتیب ۶۷، ۹۲ و ۹۷ درصد کاهش یافت. تأثیر مثبت نانوگرافن بر جذب انرژی نمونه‌ها سبب افزایش این پارامتر به ترتیب ۲۴، ۳۸ و ۴۱ درصد نسبت به نمونه شاهد بوده است. تغییر طول نمونه‌ها پس از انجام آزمایش مقاومت فشاری در نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی نانوگرافن نیز به ترتیب برابر ۱/۱۳، ۱/۳۵، ۱/۲۷ و ۱/۷۲ درصد بوده است.

– نتایج حاصل از آزمایشات مقاومت کششی حاکی از آن است که مقاومت کششی نمونه‌های حاوی ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۸ درصد نانوگرافن به ترتیب ۱۳، ۲۷ و ۸۱ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش پیدا کرده است. همچنین مقدار عرض ترک در نمونه شاهد و نمونه‌های حاوی نانوگرافن نیز به ترتیب برابر ۱/۵، ۱/۱، ۰/۸۵ و ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد. بنابراین استفاده از نانوگرافن سبب کاهش عرض ترک تا یک سوم عرض ترک در نمونه شاهد شده است.

– بر اساس نتایج آزمایشات جذب آب که در مدت زمان‌های ۱۰، ۳۰ و ۹۰ دقیقه انجام شد، بیشترین درصد رشد جذب آب در تمامی نمونه‌ها مربوط به زمان ۱۰ دقیقه است. همچنین میزان کاهش جذب آب در نمونه‌های حاوی نانوگرافن نسبت به نمونه شاهد به ترتیب برابر ۳۰، ۴۹ و ۶۱ درصد می‌باشد.

– نتایج حاصل از آزمایش مقاومت ضربه‌ای بر روی تمامی نمونه‌ها حاکی از آن است که مقاومت ضربه‌ای در اولین ترک در نمونه‌های حاوی نانوگرافن به ترتیب ۴۲، ۹۵ و ۱۳۷ درصد بیشتر از نمونه شاهد می‌باشد. همچنین این مقدار برای حالت مقاومت ضربه‌ای در حالت نهایی (نمونه گسیخته شده) به ترتیب برابر ۴۰، ۹۰ و ۱۳۰ درصد می‌باشد.

– با توجه به انجام آزمایشات SEM و XRD بر روی نمونه‌ها، مشخص گردید که با افزایش مقدار نانوگرافن در ترکیب بلوک، مقدار کوارتز و توبرموریت در نمونه‌ها افزایش یافته و نقطه پیک نمودار می‌باشند. همچنین اندازه ذرات نیز تا حدود ۳۰ درصد کاهش یافته است.

جدول ۱۱. اندازه دانه نمونه‌های آزمایش (XRD) (D بر حسب نانومتر – θ بر حسب درجه)

Table 11. Size of Grains based on XRD test (D in nanometer- θ in degree)

REF	2θ	۱۸	۲۰/۹	۲۶/۶	۲۹/۴
	D	۴۵/۴	۳۸/۴	۴۶/۱	۴۳/۶
GP-0.2	**2θ**	۱۸/۲	۲۰/۸	۲۶/۶	۲۹/۵
	D	۴۹/۱	۴۴/۷	۴۶	۴۴
GP-0.4	**2θ**	۱۸/۱	۲۰/۹	۲۶/۴	۲۹/۵
	D	۵۱/۵	۴۸/۳	۴۴/۸	۴۴/۸
GP-0.8	**2θ**	۲۶/۸	۲۹/۳	۳۹/۴	۴۳/۵
	D	۴۱	۳۵/۳	۳۵/۵	۳۵/۵

جدول ۱۲. مقایسه نتایج این مقاله با نتایج سایر تحقیقات (درصد)

Table 12. Comparison of results of this paper with those of previous works (%)

	جزئیات	مقاومت فشاری	مقاومت کششی	جذب آب	مقاومت ضربه‌ای
این مقاله	Nano Graphene-AAC	۴۵	۸۱	۶۱	۱۳۰
[۱۲]	Graphite tailing-AAC	۲۴	-	-	-
[۲۷]	Nano SiO_2-AAC	۲۰	-	-	-
[۱۱]	Nano treatment-AAC	۳	-	-	-
[۸]	MWCNT-AAC	۱۱	-	-	-
[۱۷]	Nano Graphene-Concrete	۱۵	۱۳	۵۳	-
[۱۹]	Nano Graphene-Cement Mortar	۱۱	-	-	-
[۱۸]	Graphene Oxide-Concrete	۲۸	-	۳	-
[۱۶]	Graphene Oxide-Concrete	۳۲	۱۷	-	-
[۱۴]	Graphene Oxide-Cement Composite Material	۴۷	-	۵۸۴	-
[۱۵]	Graphene Oxide-Cement Mortar	۲۰	۲۰	-	-

منابع

[1] H. A. Al-Mudhaf, E. K. Attiogbe, Performance of autoclaved aerated-concrete masonry walls in Kuwait. Materials and Structures, 29(1996) 448-452.

[2] F. Seddighi, G. Pachideh, S. B. Salimbahrami, A study of mechanical and microstructures properties of autoclaved aerated concrete containing nano-graphene, Journal of building engineering, 43(2021) 103106.

[3] ACI 523.4R, Guide for design and Construction with Autoclaved Areated Concrete Panels, (2009).

[4] A. M. Memari, S. V. Grossenbacher, L. D. Iulo, Comparative evaluation of structural and water penetration performance of three dierent masonry wall types for residential construction. JCES, 1(1) (2012) 2-9.

[5] G. Al-Khaled, Hebel design analysis program, A Thesis Presented to the Faculty of the School of Architecture, University of South California, (2000).

[6] Z. David, U. Yankelevsky, A. Itzhak, Autoclaved aerated concrete behavior under explosive action, Construction and Building Materials, 12(6-7)(1998) 359-364.

[7] E. Holta, P. Raiviob, Use of gasication residues in aerated autoclaved concrete, Cement and Concrete Research, 35(4) (2005) 796-802.

[8] J. Keriene, M. Kligys, A. Laukaitis, G. Yakovlev, A. Špokauskas, M. Aleknevicius, The influence of multi-walled carbon nanotubes additive on properties of non-autoclaved and autoclaved aerated concretes, Construction and Building Materials, 49(2013) 527-535.

[9] P. Walczak, P. Szymański, A. Różycka, Autoclaved Aerated Concrete based on fly ash in density 350 kg/m3 as an environmentally friendly material for energy – efficient, Procedia Engineering, 122(2015) 39-46.

[10] B. Yuana, C. Straubb, S. Segers, Q.L. Yu, H.J.H. Brouwers, Sodium carbonate activated slag as cement replacement in autoclaved aerated concrete, Ceramics International, 43(2017) 6039-6047.

[11] W. Tao, H.E. Xingyang, Y. Jin, Z. Huang, S. Ying, Nano-treatment of Autoclaved Aerated Concrete Waste and Its Usage in Cleaner Building Materials, Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 35(4) (2020) 786-793.

[12] Y. Peng, Y. Liu, B. Zhan, G. Xu, Preparation of autoclaved aerated concrete by using graphite tailings as an alternative silica source, Construction and Building Materials, 267(2021) 121792.

[13] J. Jiang, Q. Cai, B. Ma, Y. Hu, B. Qian, F. Mad, Z. Shao, Z. Xu, L. Wang, Effect of ZSM-5 waste dosage on the properties of autoclaved aerated Concrete, Construction and Building Materials, 278(2021) 122114.

[14] G. Pachideh, M. Gholhaki, O. Rezaifar, Experimental Study on Engineering Properties and Microstructure of Expansive Soils Treated by Lime Containing Silica Nanoparticles Under Various Temperatures, Geotechnical and Geological Engineering, 39(2021) 4157-4168.

[15] G. Pachideh, V. TouFigureh, Strength of SCLC Recycle Springs and Fibers Concrete Subject to High Temperatures Structural Concrete, (2021).

[16] S.C. Devi, R. Ahmad Khan, Mechanical and durability performance of concrete incorporating graphene oxide, Journal of Materials and Engineering Structures, (6) (2019) 201–214.

[17] M.R. Mohammadi, J. Ahmadi, S. Mohammadi, The Effect of Graphene Nano Particle on the Mechanical and Durability Properties of Portland Cement Concrete, Concrete Research, 12(1) (2020) 109-118.

[18] P.K. Akarsh, S. Marathe, A.K. Bhat, Influence of graphene oxide on properties of concrete in the presence of silica fumes and M-sand, Construction and Building Materials, (2021).

[19] R. Mowlaei, J. Lin, F. Basquiroto de Souza, A. Fouladi, A. Habibnejad Korayem, E. Shamsaei, W. Duan, The effects of graphene oxide-silica nanohybrids on the workability, hydration, and mechanical properties of Portland cement paste, Construction and Building Materials, 266(2021) 121016.

[20] S.P. Dalal, P. Dalal, Experimental Investigation on Strength and Durability of Graphene Nanoengineered Concrete, Construction and Building Materials, 276(2021) 122236.

[21] EN 196-6, Methods for testing cement determination of fineness. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, (2010).

[22] NF EN 12390-13 AFNOR, Testing hardened concrete, in: Determination of Secant Modulus of Elasticity in Compression, (2013) 18–455.

[23] BS EN 679, Determination of the compressive strength of autoclaved aerated concrete, (2005). [24] ASTM C469/C496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, (2011).

[25] American Concrete Institute (ACI)-544.2R Committee report on Fiber Reinforced Concrete, (1999).

[26] A. Bagheri, Impact strength of concrete based on reactive powder reinforced with steel fibers, Proceedings of the Civil Engineering Conference, Amirkabir University, 42(3) (2010) 72-80.

[27] A. Laukaitis, J. Keriene, M. Kligys, D. Mikulskis, L. Lekunaite, Influence of Amorphous Nanodispersive SiO2 Additive on Structure Formation and Properties of Autoclaved Aerated Concrete, Materials Science (MEDŽIAGOTYRA), 16(3) (2010) 257-263.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Seddighi, Gh. Pachideh, S. B. Salimbahrami, F. Ahmadi, S. J. Mousavi Mashhadi, A Study of Mechanical and Microstructures Properties of Autoclaved Aerated Concrete Containing Nano-Graphene, Amirkabir J. Civil Eng., 54(6) (2022) 2129-2150.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19950.7299