

مطالعه‌ی آزمایشگاهی تأثیر الیاف مختلف در مقاومت کششی و مقاومت فشاری بتن سبک اتوکلاو شده

اصغر وطنی اسکویی* (دانشیار)

محمد حدیری گوجانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

سهیل سروش‌نیا (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ناکستان

مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۳۹۷)
دوری ۲ - ۳۴، شماره ۲/۲، ص. ۱۲۵-۱۳۶، (پادداشت نشی)

بتن سبک اتوکلاو شده (AAC)^۱ به علت مزایای فراوان به عنوان عنصر سازه‌ی در ساختمان‌های کوتاه مرتبه و همچنین میانقاب در تمامی ساختمان‌ها استفاده می‌شود. مشکل اصلی بتن سبک اتوکلاو شده، ترد بودن و خواص مکانیکی پایین است. در نوشتار حاضر، با استفاده از الیاف کربن، پلی‌پروپیلن، شیشه‌ی نوع A و شیشه‌ی نوع E، سعی در بهبود خواص بتن مذکور شده است. نتایج نمایانگر این موضوع است که افزودن ۰/۳٪ الیاف کربن، مقاومت فشاری و کششی را افزایش می‌دهد. همچنین افزودن الیاف پلی‌پروپیلن در بهبود خواص مکانیکی مؤثر است، اما تأثیر آن از الیاف کربن کمتر است. افزودن الیاف شیشه‌ی نوع A، باعث کاهش مقاومت فشاری و کششی می‌شود. افزودن ۰/۴٪ الیاف شیشه‌ی نوع A، مقاومت فشاری را به میزان ۳۲٪ و مقاومت کششی را به میزان ۲۹٪ کاهش می‌دهد.

واژگان کلیدی: بتن هوادار اتوکلاو شده، الیاف کربن، الیاف پلی‌پروپیلن، الیاف شیشه، مقاومت فشاری، مقاومت کششی.

asvatani@gmail.com-vatani@srttu.edu
heydarim63@yahoo.com
soroushnia@gmail.com

۱. مقدمه

در نیمه‌ی قرن بیستم در سال ۱۹۵۰، برای اولین بار الیاف شیشه‌ی توسط کشور شوروی سابق استفاده شد که بعد از آن مورد استقبال کشورهای امریکا و انگلستان واقع شد و آن‌ها به استفاده از الیاف شیشه‌ی روی آوردند. سال ۱۹۶۵ را می‌توان سال شروع استفاده از الیاف پلیمری به صورت آزمایشگاهی دانست، ولی استفاده‌ی آن‌ها به صورت عملی به سال ۱۹۷۰ بر می‌گردد. الیاف به کار رفته عمدتاً الیاف پلی‌پروپیلن بودند و اولین بار در سال ۱۹۶۵ میلادی در بتن جهت ساخت سازه‌های ضد انفجار ارتش امریکا استفاده شدند. این کار در واقع شروع مطالعات پژوهشی در رابطه با جزئیات خواص الیاف پلی‌پروپیلن و آثار آن در خواص بتن بود.^[۱] اگر چه بتن هوادار در ابتدا به عنوان یک مصالح عایق در ذهن مجسم می‌شود، اما در مقیاس بزرگ‌تر استفاده از آن به عنوان یک ماده‌ی سبک که باعث کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی می‌شود، بسیار حائز اهمیت است. بتن سلولی یا بتن هوادار (AC)^۲، یک بتن سبک‌دانه است که مخلوطی از سیمان پرتلند، خاکستر بادی (در صورت لزوم) و همچنین

در سال ۲۰۰۶، نیز تأثیر هندسه‌ی الیاف در کارایی بتن مذکور بررسی و نتیجه گرفته شد که الیاف پلی‌پروپیلن با قطر کوچک‌تر بسیار مؤثرتر از نوع درشت آن هستند و همچنین الیاف پلی‌پروپیلن بلندتر، بسیار مؤثرتر از نوع کوتاه آن هستند. رشته رشته کردن الیاف بسیار مؤثر در کنترل ترک خوردگی انقباض ناشی از خشک شدن خمیری بود.^[۵] همچنین در سال ۲۰۰۸، در مورد تأثیر افزودن الیاف کربن، پلی‌پروپیلن،

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۱۱/۲۱، اصلاحیه ۱۳۹۵/۷/۱۰، پذیرش ۱۳۹۵/۸/۸.

DOI:10.24200/J30.2018.1372

۲. نحوه‌ی انجام آزمایش‌های مقاومت کششی بتن سبک اتوکلاو شده

آماده‌سازی نمونه‌ها: برای ساخت بتن هوادار اتوکلاو شده، مواد اولیه‌ی آهک (جدول ۱)، سیلیس، سیمان و پودر آلومینیوم نیاز است که خصوصیات هر کدام به این شرح است: سیلیس طبق استاندارد^[۸] باید سطح مخصوص (cm^2/gr) ۲۷۶۶ داشته باشد که ۸۵٪ آن از الک ۹۰ میکرون عبور کند و شرایط دانه‌بندی الزامات استاندارد را برآورده سازد.^[۸] جهت تولید گاز در تشکیل AAC از پودر آلومینیوم با سطح مخصوص (cm/gr) ۱۸۰۰۰ و خلوص آلومینیوم در پودر ۷۰٪ استفاده شد. چون وجود الیاف در زمان برش کیک‌ها ایجاد مشکل می‌کند، کوتاه‌ترین طول الیاف موجود در بازار تهیه شد که ویژگی‌های آن در جدول ۲ ارائه شده است.

طرح اختلاط نمونه‌هایی که در آن الیاف استفاده شده است، در جدول ۳ ارائه شده است. نمونه‌های A، فاقد الیاف، نمونه‌های B، حاوی ۱٪ الیاف، نمونه‌های C حاوی ۲٪ الیاف، نمونه‌های D حاوی ۳٪ الیاف و نمونه‌های E حاوی ۴٪ الیاف نسبت به وزن جامد کل هستند.

برای به دست آوردن مخلوطی مطابق با ویژگی‌های مخلوط تولیدی در صنعت از هم‌زن برقی با ۴۰۰ دور در دقیقه استفاده شد. ترتیب آماده‌سازی نمونه‌ها و زمان مورد استفاده برای هر مرحله در جدول ۴ ارائه شده است.

دوغاب سیلیس تهیه شده با دستگاه خردکن (بال میل)، مقداری آب دارد که با

کاتولین و بازالت در تشکیل بتن سبک و پارامترهای مقاومتی آن یک کارآزمایشگاهی ارائه شد و همه‌ی الیاف در میزان سیالیت، میزان انبساط و نیز مقاومت خمیری تأثیر داشتند. در محدوده‌ی ۰٫۱٪ تا ۰٫۴٪، افزودنی نسبت به جرم خشک کل با افزودن فیبر به مخلوط میزان سیالیت و انبساط مخلوط کاهش یافت، در حالی که قدرت خمیری AAC افزایش داشت. با افزودن فیبرها به مخلوط اولیه، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی AAC افزایش می‌یابد و بهترین درصد برای افزایش مقاومت فشاری و خمشی ۳٪ اعلام شد. در پژوهش مذکور از تأثیر الیاف در قابلیت برش خوردن کیک‌ها چیزی بیان نشده است.^[۶]

همچنین در سال ۲۰۱۲، تأثیر روش‌های خردکردن الیاف کرین، مانند مخلوط با دانه‌های شن، بریدن، فرز خشک و فرز تر در خواص مکانیکی محصول AAC بررسی و براساس نتایج حاصل نتیجه‌گیری شد که ذرات CF به دست آمده از روش‌های آماده‌سازی مکانیکی سطوح فعالی دارند که یک هسته برای کریستاله شدن مواد چسباننده در مرحله‌ی سفت شدن AAC آماده می‌کنند و میزان کریستاله شدن مواد چسباننده را بالا می‌برند و این خود باعث بالا رفتن مقاومت فشاری و همچنین توان حرارتی AAC می‌شود.^[۷]

جدول ۱. خصوصیات آهک مصرفی.

درجه‌ی دمای آزاد شده	زمان آزادسازی دما	مقدار Cao
۶۵٫۳ درجه‌ی سانتی‌گراد	۳ دقیقه	۸۵٫۲٪

جدول ۲. خواص مکانیکی الیاف طبق ASTM.

نوع الیاف	مقاومت کششی (kg/cm^2)	مدول یانگ $\times 10^5 kg/cm^2$	بیشینه‌ی تغییر طول (%)	وزن مخصوص (kg/m^3)
AR شیشه	۲۵۰۰۰	۸	۳۶	۲۷۰۰
E شیشه	۳۴۵۰۰	۷٫۲	۴٫۸	۲۵۰۰
پلی پروپیلن	۵۶۰۰-۷۷۰۰	۰٫۵	۱۰-۲۰	۹۰۰
کرین	۲۶۵۰۰	۲۳	۱-۱٫۵	۱۹۰۰

جدول ۳. طرح اختلاط نمونه‌ها با الیاف.

وزن مجموع	الیاف	آب	پودر آلومینیوم	سیلیس	آهک	سیمان پرتلند	نام مواد نمونه
(Kg)	(gr)	(Kg)	(gr)	(Kg)	(Kg)	(Kg)	
۲۱٫۹۲۰	۰	۸٫۶۸	۱۰	۷٫۹۹	۳٫۲۴	۲	A.
۲۱٫۹۳۳	۱۳٫۳	۸٫۶۸	۱۰	۷٫۹۹	۳٫۲۴	۲	B.
۲۱٫۹۴۶	۲۶٫۶	۸٫۶۸	۱۰	۷٫۹۹	۳٫۲۴	۲	C.
۲۱٫۹۶۰	۴۰	۸٫۶۸	۱۰	۷٫۹۹	۳٫۲۴	۲	D.
۲۱٫۹۷۳	۵۳٫۳	۸٫۶۸	۱۰	۷٫۹۹	۳٫۲۴	۲	E.

جدول ۴. نحوه‌ی آماده‌سازی مخلوط.

مدت زمان مخلوط شدن	مواد
۱ دقیقه	دوغاب سیلیس + ۷۵٪ آب
۱ دقیقه	دوغاب سیلیس + ۷۵٪ آب + الیاف
۱ دقیقه	دوغاب سیلیس + ۷۵٪ آب + الیاف + سیمان
۳۰ ثانیه	دوغاب سیلیس + ۷۵٪ آب + الیاف + سیمان + آهک
۴۵ ثانیه	دوغاب سیلیس + ۷۵٪ آب + الیاف + سیمان + آهک + باقی مانده آب + پودر آلومینیوم



شکل ۳. نمای کلی دستگاه مورد استفاده جهت انجام آزمایش های مقاومت کششی.

خارج می شدند. ارتفاع مقطع آزمون در محل شکست اندازه گیری شد. با توجه به اینکه در ساخت نمونه های استوانه ایی از قالب های استاندارد فلزی استفاده شده بود، قطر نمونه ها همه ثابت و برابر ۱۵۰ میلی متر بود، با این حال بعد از انجام آزمایش برای اطمینان بیشتر، قطر آن ها دوباره اندازه گیری شد. همچنین طول نمونه ها با توجه به ابعاد ۱۵۰ × ۳۰۰ میلی متر آن ها با دقت ۱ میلی متر اندازه گیری (شکل ۳) و قبل از انجام آزمایش ثبت شدند.

۳. برنامه ی آزمایشگاهی

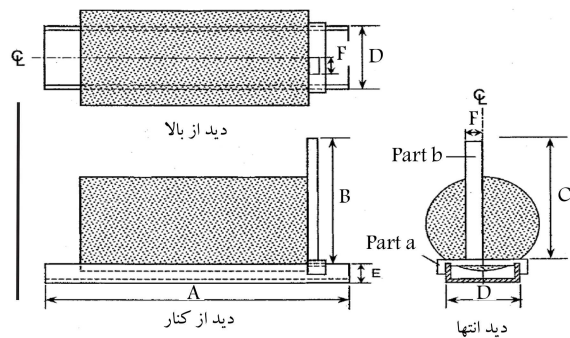
در پژوهش حاضر، الیاف های کربن، الیاف شیشه ی A (A-Glass)، الیاف شیشه ی E (E-Glass) و پلی پروپیلن به طرح اختلاط مربوط اضافه شدند. جهت دست یابی به مقدار بهینه ی الیاف، الیاف از ۰/۱٪ تا ۰/۴٪ الیاف به طرح اختلاط اضافه شدند. با توجه به اینکه الیاف مورد استفاده از نوع آبگریز بودند و درصد جذب آب آن ها تقریباً صفر بود، لذا نیازی به اضافه کردن آب مورد استفاده در طرح اختلاط نبود. با توجه به تعداد طرح های اختلاط و انواع الیاف مورد استفاده، در کل ۴۸ عدد نمونه ی استوانه ایی ۱۵۰ × ۳۰۰ میلی متر جهت انجام آزمایش های مقاومت کششی گرفته شد، که ۳ عدد آن ها جهت مقایسه به صورت شاهد بدون الیاف در نظر گرفته شدند. استفاده از الیاف شیشه ی A (A-Glass) در تولید AAC به دلیل حساسیت بالای A-Glass به محیط های قلیایی، باعث واکنش الیاف در همان مراحل اولیه می شد، به طوری که در زمان برش، متورم شدن الیاف مشهود بود، بعد از اتوکلاو نیز اثری از الیاف شیشه در بلوک ها نبود. و از آنجایی که پس از استفاده از الیاف A-Glass نتایج خوبی حاصل نشد، از الیاف شیشه ی E (E-Glass) نیز استفاده شد. همچنین جهت هوادار کردن بتن از پودر آلومینوم استفاده شد. برای عمل آوری نمونه ها از اتوکلاو صنعتی موجود در کارخانه ی بتن سبک استفاده شد.

۴. نتایج حاصل از آزمایش ها

پس از انجام آزمایش های مقاومت کششی، نتایج دسته بندی شدند و در نهایت نتایج برای الیاف متفاوت با یکدیگر مقایسه شدند. در شکل ۴، نتایج حاصله از آزمایش های حاصله از افزودن الیاف کربن به نمونه های بتن سبک هوادار اتوکلاو شده مشاهده می شود. نتایج حاکی از آن است که با افزودن ۰/۳٪ الیاف به مخلوط، بیشترین مقاومت کششی ایجاد و باعث افزایش مقاومت کششی به میزان ۰/۷۱٪ معادل ۰/۳۰ مگاپاسکال می شود. افزودن الیاف به نمونه های بتن هوادار اتوکلاو شده باعث ایجاد



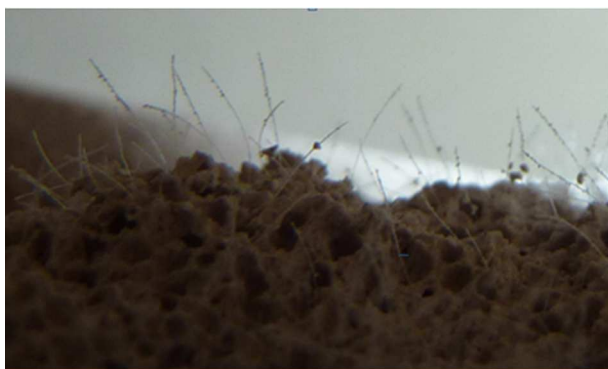
شکل ۱. نمونه های آزمایشگاهی در گرم خانه.



A	B	C	D	E	F
۱۶ in	۸ ۱/۴ in	۸ in	۴ in	۱ ۱/۴ in	۱ in
۴۰۰ mm	۲۰۵ mm	۲۰۰ mm	۱۰۰ mm	۳۲ mm	۲۵ mm

شکل ۲. نمایی از دستگاه آزمایش برزیلین.

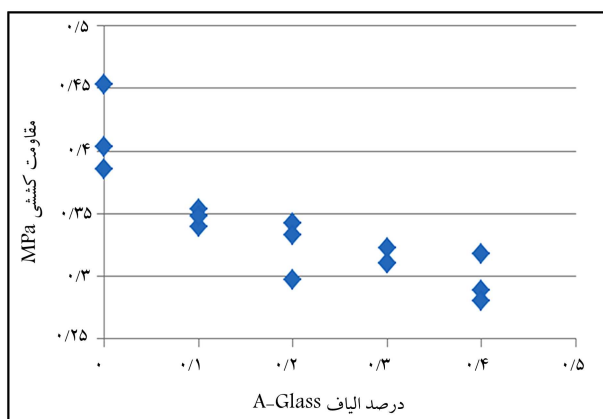
اندازه گیری چگالی آن با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ گرم، میزان آب آن حساب و از مقدار آب لازم مخلوط کم شد. ابتدا دوغاب همراه با ۰/۷۵ آب محاسبه شده با روش مذکور درون همزن و به مدت ۱ دقیقه هم زده شد. سپس بدون خاموش کردن همزن، مواد دیگر طبق جدول ۴ زمان بندی به آن اضافه شدند. بعد از قالب ریزی، نمونه ها به مدت ۶ ساعت در گرم خانه در دمای محیطی ۴۵ درجه نگهداری شدند تا گیرش اولیه حاصل شود. قسمت های اضافی (شکل ۱) نمونه با سیم برش استاندارد بریده شدند، سپس وارد اتوکلاو با دمای ۱۹۵ درجه و فشار ۱۲ بار شدند، و عمل آوری نهایی به مدت ۱۲ ساعت در اتوکلاو انجام شد. جهت تعیین مقاومت کششی نمونه های ساخته شده از بتن هوادار اتوکلاو شده از استاندارد ASTM C۴۹۶ که با دو نیم کردن نمونه پیشنهاد می شود، انجام شد. (شکل ۲) بنابراین نمونه های استوانه ایی ۱۵۰ × ۳۰۰ میلی متر از طرح اختلاط های ذکر شده به روش بالا تولید و برای رسیدن رطوبت درونی محصول نهایی به ۰/۴٪ وزن کل، ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه در آن قرار داده شدند. برای سرد شدن تدریجی نمونه ها و رسیدن به دمای اتاق، به دلیل جلوگیری از تغییرات مخرب در ساختار بلوری آن ها، درب آن بسته ماند و پس از آن نمونه ها آماده ی آزمایش شدند. آزمون برزیلین طبق استاندارد ASTM C۴۹۶ بر روی نمونه ها انجام شد که در شکل ۳ نحوه ی برپایی آزمایش کششی مشاهده می شود.^[۱] بر طبق استاندارد، چگونگی شکست آزمون ها بررسی شد و چنانچه ظاهر قطعه ی بتن هوادار اتوکلاو شده و نوع شکست آن غیر معمول بود، از روند انجام آزمایش ها



شکل ۶. بیرون کشیدگی الیاف کربن از بتن AAC، بعد از آزمایش های مقاومت کششی (نمونه با ۰٫۳٪ الیاف).

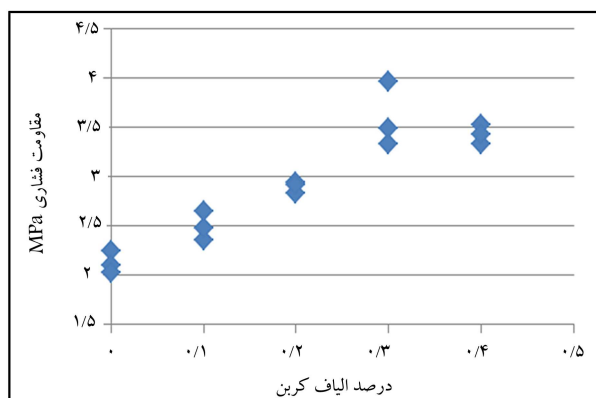


شکل ۷. الیاف پلی پروپیلن قبل و بعد از اتوکلاو.

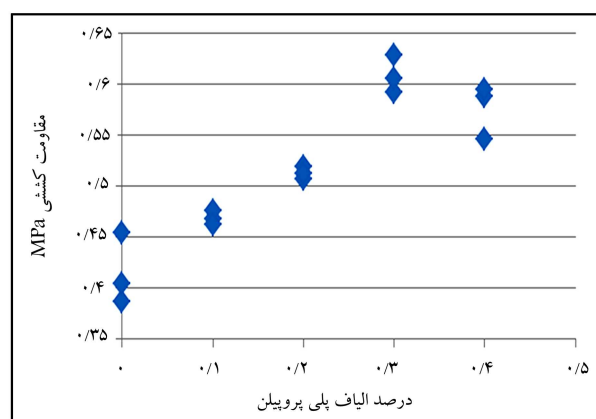


شکل ۸. تأثیر الیاف شیشه‌ی نوع A در مقاومت کششی AAC.

الیاف شیشه چون نسبت به محیط قلیایی حساس هستند، همان‌گونه که انتظار می‌رفت، تأثیر اندکی در مقاومت داشتند. بنابراین افزودن این الیاف نه فقط افزایش مقاومت را به همراه نداشت، بلکه با زیاد شدن مقدار الیاف در مخلوط، کاهش مقاومت فشاری بیشتری مشاهده شد. همچنین افزودن ۰٫۴٪ الیاف شیشه‌ی نوع A، باعث کاهش مقاومت کششی به میزان ۲۹٪ (شکل ۸) و افزودن مقادیر متفاوت الیاف شیشه‌ی نوع E به نمونه‌های بتن هوادار اتوکلاو شده هم باعث کاهش مقاومت کششی نمونه‌ها شد (شکل ۹). اما کاهش مقاومت در نمونه‌های مذکور نسبت



شکل ۹. تأثیر الیاف کربن افزوده شده در مقاومت کششی AAC.

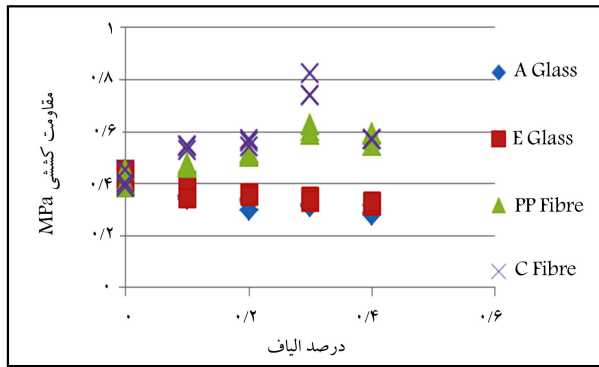


شکل ۱۰. تأثیر الیاف پلی پروپیلن در مقاومت کششی AAC.

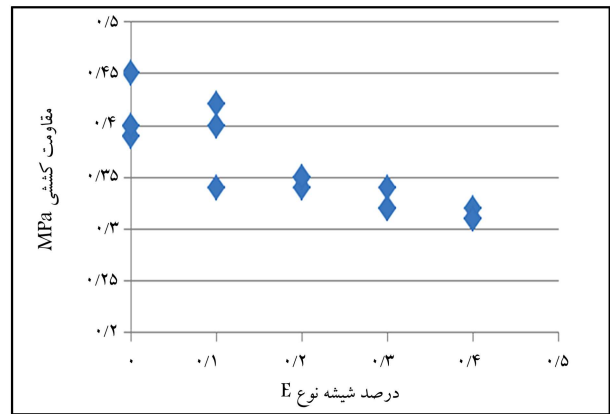
جسبندگی بین الیاف و ساختار بتن اتوکلاو شده می‌شود و در هنگام اتوکلاو، الیاف مانند هسته‌ی عمل می‌کنند که سیلیکات کلسیم هیدراته‌ی اطراف آن شروع به شکل گرفتن می‌کند (نمونه‌ی آن در صنعت پولکی‌سازی است که از نخ برای کریستاله شدن ذرات نبات حول آن استفاده می‌شود) و این اتصال مناسب باعث می‌شود که محصول تحت بار کششی، مقاومت بیشتری از خود نشان دهد.

افزودن الیاف پلی پروپیلن با نسبت ۰٫۳٪ مانند الیاف کربن، بیشترین تأثیر را در مقاومت کششی این نوع بتن دارد. افزودن ۰٫۳٪ الیاف پلی پروپیلن مقاومت کششی را به میزان ۴۷٪ افزایش داده است و این به دلیل ذوب الیاف است که دیواره‌های حفره‌ها را می‌پوشاند و باعث افزایش مقاومت محصول در برابر کشش می‌شود. شکل ۵، تأثیر افزودن الیاف پلی پروپیلن در مقاومت کششی بتن اتوکلاو شده را نشان می‌دهد.

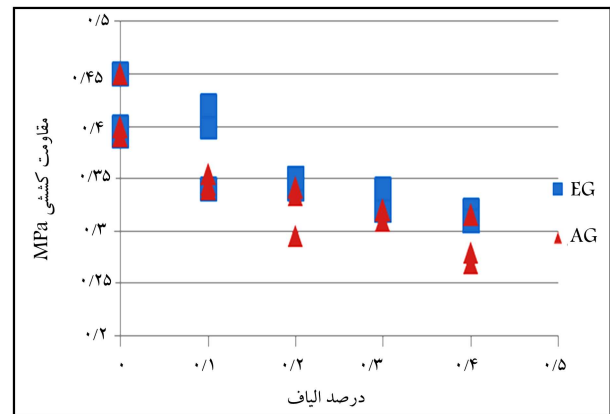
با توجه به مقاومت کم بتن و مقاومت پیوستگی بین بتن سبک هوادار و الیاف، الیاف بدون پاره‌شدگی از داخل بتن بیرون کشیده می‌شدند. در شکل ۶، بیرون کشیده شدن الیاف کربن در نمونه‌های حاوی ۰٫۱٪ و ۰٫۳٪ الیاف نشان داده شده است. تفاوت رفتار الیاف پلی پروپیلن و کربن در مقاومت کششی به خاطر ذوب شدن الیاف پلی پروپیلن در مرحله‌ی اتوکلاو است. دمای اتوکلاو بین ۱۹۰ تا ۲۰۵ درجه‌ی سلسیوس است، در حالی که دمای ذوب الیاف پلی پروپیلن ۱۷۰ درجه است. برای اطمینان از ذوب شدن الیاف در اتوکلاو، مقدار ۲۰ گرم از الیاف در یک ظرف مناسب قرار گرفته و در اتوکلاو گذاشته شده است. شکل ۷، تصاویر الیاف پلی پروپیلن قبل و بعد از اتوکلاو را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. مقایسه‌ی تأثیر الیاف مختلف در مقاومت کششی AAC.



شکل ۹. تأثیر الیاف شیشه‌ی نوع E در مقاومت کششی AAC.



شکل ۱۰. مقایسه بین تأثیر الیاف شیشه‌ی نوع E-Glass و A-Glass در مقاومت کششی AAC.

کششی را به همراه داشته است که با نتایج حاصل از پژوهش حاضر نیز مطابقت دارد.

۵. نحوه‌ی انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری بتن هوادار اتوکلاو شده

برای انجام آزمایش مقاومت فشاری از استاندارد EN 6۷۹:۲۰۰۵^[۱۰] با نام تعیین مقاومت فشاری بتن سبک اتوکلاو شده استفاده شده است. هدف از انجام آزمایش مذکور، به دست آوردن اطلاعات مربوط به مقاومت فشاری نمونه‌های AAC تولیدشده به همراه الیاف شیشه بوده است.^[۱۰]

برای انجام آزمایش مذکور، نمونه‌های مکعبی $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متری با دقت 0.1 میلی‌متر اندازه‌گیری و از هر نمونه دست‌کم ۳ عدد مورد آزمون قرار گرفته شد. آزمون‌ها در دمای کمتر از 60 درجه‌ی سلسیوس نگهداری شدند، تا مقدار رطوبت آن‌ها به (2 ± 6) درصد جرمی رسید. پس از رسیدن رطوبت آزمون‌ها به میزان مذکور، در مقابل تغییرات رطوبت برای کمیته‌ی ۲ ساعت، نمونه‌ها پیش از آزمون تحت محافظت قرار گرفتند تا از تعادل حرارتی آن‌ها در شرایط آزمایشگاهی در دمای (5 ± 20) درجه‌ی سلسیوس اطمینان حاصل شود. سطح رکاب دستگاه آزمون کاملاً تمیز شدند و آزمون‌ها طبق توضیحات اخیر آماده و در مرکز رکاب دستگاه قرار داده شدند. بار به صورت محوری عمود بر جهت بتن‌ریزی اعمال شد. آزمون‌ها با نرخ ثابت تا رسیدن به مرز گسیختگی، بارگذاری شدند و بیشینه‌ی مقدار باری که توسط آزمون تحمل شد، ثبت شد.

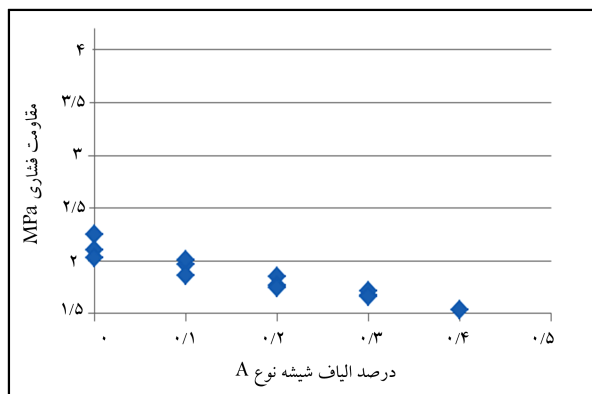
۶. نتایج حاصل از آزمایش‌ها

با توجه به تعداد طرح‌های اختلاط و انواع الیاف مورد استفاده، در کل ۶۵ نمونه‌ی مکعبی $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متری تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری قرار گرفتند. پس از انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، نتایج دسته‌بندی و در نهایت، برای الیاف متفاوت با یکدیگر مقایسه شدند.

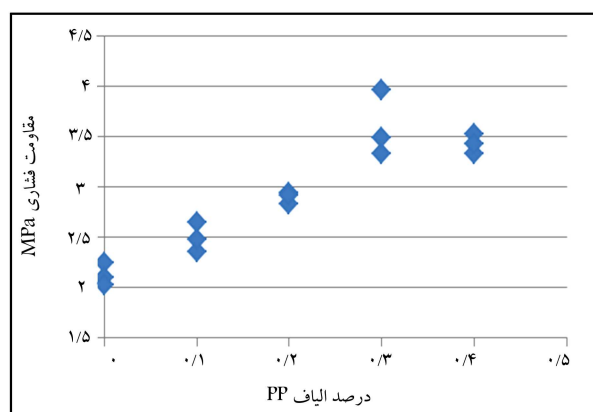
نتایج حاصل از افزودن مقادیر متفاوت الیاف کربن به نمونه‌های بتن هوادار اتوکلاو در شکل ۱۲ نشان می‌دهد که با افزودن الیاف کربن تا 0.3% ، مقاومت فشاری نمونه‌ها تا بیش از 1.5 برابر مقاومت فشاری نمونه‌ی شاهد از مقدار میانگین ۲ مگاپاسکال به ۴ مگاپاسکال افزایش یافته است. همچنین با افزودن بیشتر الیاف،

به نمونه‌های حاوی الیاف شیشه از نوع A کمتر است، چون الیاف شیشه‌ی نوع E در محیط قلیایی نسبت به نوع A مقاوم‌تر هستند. همچنین افزودن 0.4% الیاف شیشه‌ی نوع E باعث کاهش مقاومت کششی به میزان 22% معادل 0.9 مگاپاسکال شده است. در شکل ۱۰، تأثیر افزودن دو نوع شیشه‌ی A و E با هم مقایسه شده است. روند کاهش مقاومت در بتن‌های هوادار اتوکلاو شده حاوی الیاف شیشه‌ی نوع A به مراتب بیشتر از الیاف شیشه‌ی نوع E است که ناشی از آسیب‌پذیری بیشتر الیاف شیشه‌ی نوع A در محیط‌های قلیایی و مقاومت نسبتاً بالای الیاف شیشه‌ی نوع E در مقایسه با الیاف شیشه‌ی نوع A در محیط‌های قلیایی است.

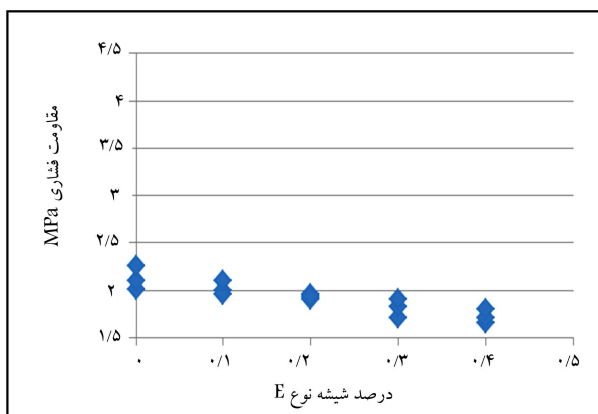
در شکل ۱۱، مقایسه‌ی بین تأثیر الیاف کربن و پلی‌پروپیلن و شیشه در مقاومت کششی بتن AAC مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که روند افزایش مقاومت کششی الیاف کربن و پلی‌پروپیلن تقریباً مشابه است و با افزودن این دو نوع الیاف تا میزان 0.3% وزن مواد جامد به بتن، افزایش مقاومت بتن سبک هوادار و از آن پس کاهش مقاومت را به دنبال داشته است. اما افزودن الیاف شیشه از هر دو نوع A و E، کاهش مقاومت کششی را به دنبال داشته است. این به دلیل حساس بودن الیاف شیشه به محیط قلیایی است. الیاف شیشه‌ی نوع A به دلیل مقاومت کمتر در محیط قلیایی، در واکنش‌ها شرکت می‌کنند و باعث ضعف بیشتری در ساختار بتن و تشکیل ماتریس آن می‌شوند. در مطالعاتی در سال ۲۰۰۸^[۶] افزودن الیاف کربن به میزان 0.3% ، بیشترین افزایش مقاومت



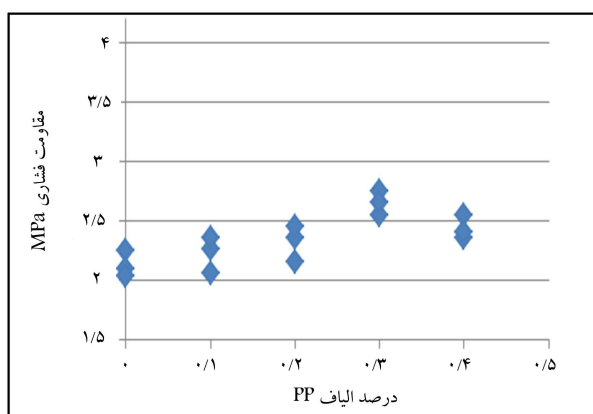
شکل ۱۴. تأثیر الیاف شیشه‌ی نوع A-Glass در مقاومت فشاری AAC.



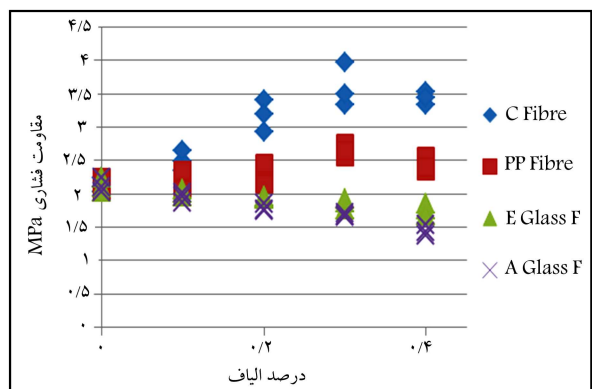
شکل ۱۲. تأثیر الیاف کربن در مقاومت فشاری AAC.



شکل ۱۵. تأثیر الیاف شیشه‌ی نوع E-Glass در مقاومت فشاری بتن AAC.



شکل ۱۳. تأثیر الیاف پلی پروپیلن در مقاومت فشاری AAC.



شکل ۱۶. تأثیر الیاف مختلف در مقاومت فشاری AAC.

تأثیر الیاف شیشه‌ی نوع E در مقاومت فشاری بتن هوادار در شکل ۱۵ نشان داده شده است. تفاوت الیاف شیشه‌ی نوع E با نوع A در مقاومت بالاتر آن‌ها نسبت به محیط قلیایی است. اما این مقاومت تا قبل از اتوکلاو کارساز بود، بعد از وارد کردن نمونه‌ها به اتوکلاو به علت دمای بالا الیاف شیشه‌ی نوع E نیز در محیط قلیایی واکنش داد و باعث ضعف در مقاومت محصول نهایی شد. به طوری که افزودن ۰٫۴٪ الیاف به نمونه‌ها، باعث کاهش مقاومت فشاری به میزان ۱۷٪ معادل $0.36 MPa$ شد (از $2.12 MPa$ به $1.76 MPa$).

تأثیر افزودن الیاف مختلف در مقاومت فشاری بتن هوادار اتوکلاو شده در شکل ۱۶

مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. تأثیر الیاف پلی پروپیلن در مقاومت فشاری بتن AAC در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود.

افزودن ۰٫۳٪ الیاف پلی پروپیلن، مقاومت فشاری را به میزان ۲۵٪ افزایش می‌دهد ($2.12 MPa$ به $2.64 MPa$) که به دلیل پر کردن روزه‌های درون بافت بتن اتوکلاو شده توسط الیاف ذوب‌شده‌ی پلی پروپیلن است. چون در زمان تشکیل کیک، الیاف کاملاً سالم مانده و اطراف خود شیارهای باریکی ایجاد کرده‌اند. الیاف در اتوکلاو ذوب شده و درون همین شیارها را پر کرده و به بدنه‌ی ماتریس بتن چسبیده‌اند و این باعث افزایش مقاومت فشاری محصول می‌شود. افزودن بیشتر الیاف پلی پروپیلن، افزایش مقاومت را به همراه ندارد، چون ماتریس در برگزیده‌ی الیاف نسبت به میران الیاف کم می‌شود.

الیاف شیشه‌ی نوع A چون نسبت به محیط قلیایی حساس هستند، انتظار می‌رفت که تأثیر اندکی در مقاومت داشته باشند. افزودن این الیاف نه فقط افزایش مقاومت را به همراه نداشت، بلکه با زیاد شدن مقدار الیاف در ترکیب، کاهش مقاومت فشاری مشاهده می‌شود. شکل ۱۴، تأثیر الیاف شیشه‌ی نوع A در مقاومت فشاری محصول را نشان می‌دهد.

افزودن ۰٫۴٪ الیاف شیشه‌ی نوع A-Glass مقاومت فشاری را به میزان ۳۲٪، $0.7 MPa$ کاهش داد (از $2.12 MPa$ به $1.4 MPa$) چون الیاف مذکور شدیداً به محیط‌های قلیایی حساس هستند، در مراحل عمل‌آوری محصول مانند یک عامل منفی در واکنش‌های شیمیایی شرکت و از تشکیل پیوندهای قوی جلوگیری می‌کنند. بنابراین استفاده از آن، کاهش مقاومت فشاری را به همراه دارد.

افزودن ۰/۳٪ الیاف پلی پروپیلن باعث افزایش مقاومت کششی تا ۴۷٪ و افزایش مقاومت فشاری ۲۵٪ نسبت به نمونه‌های شاهد می‌شود. شایان ذکر است که الیاف پروپیلن در درون اتوکلاو به علت گرمای درون آن ذوب می‌شوند. افزودن الیاف کربن و پلی پروپیلن تا نسبت ۳٪ باعث افزایش مقاومت کششی و فشاری و بعد از این (به میزان ۴٪ الیاف) باعث کاهش مقاومت نمونه می‌شود.

افزودن الیاف شیشه از دو نوع A و E، به هر نسبتی باعث کاهش مقاومت کششی و فشاری محصول نهایی شده و این به دلیل حساس بودن الیاف شیشه نسبت به محیط‌های قلیایی، در محیط قلیایی ترکیب به علت وجود آهک، الیاف شیشه در واکنش‌ها شرکت می‌کند و علاوه بر تخریب ساختار خود به شکل‌گیری ماتریس محصول آسیب وارد می‌کنند. الیاف شیشه از نوع A به دلیل حساسیت بیشتر نسبت به محیط‌های قلیایی در مقایسه با الیاف از نوع E باعث کاهش مقاومت کششی و فشاری بیشتر نمونه‌ها می‌شود. استفاده از الیاف در ساخت این بتن فقط برای کارهای ویژه که افزایش مقاومت بسیار حائز اهمیت باشد، توصیه می‌شود و در تولید انبوه و صنعتی مقرون به صرفه نیست.

مشاهده می‌شود که مطابق آن افزودن الیاف کربن و پلی پروپیلن تقریباً تأثیر محتوایی مشابه ایجاد کرده است، یعنی افزودن مقادیر ۱/۰ تا ۳/۰٪ این دو نوع الیاف همراه با افزایش مقاومت فشاری همراه است، افزودن ۴/۰٪ از الیاف مذکور، کاهش مقاومت فشاری را به همراه دارد. اما استفاده از هر دو نوع الیاف شیشه‌ای به‌کار رفته، باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی شده است.

۷. نتیجه‌گیری

بتن‌های هوادار اتوکلاو شده حاوی ۰/۳٪ الیاف کربن، حالت بهینه‌ی جهت افزایش مقاومت کششی و مقاومت فشاری بتن سبک هوادار اتوکلاو شده است، با افزودن این الیاف به این نوع بتن مقاومت کششی تا ۷۰٪ و مقاومت فشاری آن به میزان ۵۰٪ افزایش می‌یابد. در انتهای آزمایش هیچ‌یک از الیاف کربن به‌کار رفته پاره نشده بودند و مد گسیختگی بیرون‌کشیدگی الیاف از درون بتن سبک است.

پانویس‌ها

1. autoclaved aerated concrete
2. aerated concrete

منابع (References)

1. Samsami, F. "Propylene fiber and usage of them in concrete", *Journal of Iranian Concrete Society*, **4**(14), pp. 31-34 (2004).
2. Bagheri, A., Parhizkar, T., Ghodossi, P. and Taheri, A. "The usage of fiber and cement production", BHRC, Report No:300 (1988).
3. Narayanan, N. and Ramamurthy, K. "Structure and properties of aerated concrete: A review", *Cement and Concrete Composites*, **22**(5), pp. 321-329 (2000).
4. Holt, E. and Raivio, P. "Use of gasification residues in aerated autoclaved concrete", *Cement and Concrete Research*, **35**(4), pp. 796-802 (2005).
5. Bantia, N. and Gupta R. "Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete", *Cem. Concr. Res.*, **36**(7), pp. 1263-1267 (2006).
6. Laukaitis, A., Keriene, J., Mikulskis, D., Sinica, M. and Sezemanas, G. "Influence of fibrous additives on properties of aerated autoclaved concrete forming mixtures and strength characteristics of products", *Construction and Building Materials*, **23**(9), pp. 3034-3042 (2009).
7. Laukaitis, A., Keriene, J., Kligys, M., Donatas Mikulskis, D. and Lekunaite, L. "Influence of mechanically treated carbon fibre additives on structure formation and properties of autoclaved aerated concrete", *Construction and Building Materials*, **26**(1), pp. 362-371 (2012).
8. EN 196-6, "Methods for testing cement-determination of fineness", Brussels, Belgium: European Committee for Standardization (2010).
9. ASTM C496/C496M, "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens", (2011).
10. BS EN 679, "Determination of the compressive strength of autoclaved aerated concrete", (2005).
11. Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI), "Lightweight concrete - Determination of the compressive strength of autoclaved aerated concrete - test method", No:8596 (2004).