

تأثیر افزودن الیاف بازیافتی کارتن کنگره‌ای کهنه بر ویژگی‌های چندسازه الیاف - سیمان هوادهی شده

چکیده

نگرانی‌های زیست‌محیطی، محققین را به سمت استفاده از فناوری‌های سبز سوق داده است. در این تحقیق امکان استفاده از الیاف بازیافتی کاغذ باطله و سیمان با کمک فرایند هوادهی به‌منظور تولید یک محصول ساختمانی سبز، سبک، با قابلیت گیرایی، دوام و ویژگی‌های مکانیکی مناسب پرداخته شده است. در این محصول با ایجاد فضاهای حاوی هوا (با پراکنش یکنواخت) توسط یک عامل کف‌کننده مناسب، ویژگی‌های مدنظر بررسی گردید. در این راستا الیاف بازیافتی در (بر اساس وزن خشک سیمان) به فوم بتن اضافه گردید. افزودن الیاف باعث افزایش زمان گیرایی اولیه و نهایی سیمان پرتلند به ترتیب به میزان ۶۹-۱۵ درصدی و ۳-۲۷ درصدی گردید. مقاومت فشاری محصول در میزان مصرف الیاف در سطوح ۱، ۱/۵ و ۲ درصد، به ترتیب ۲/۰۸، ۱/۸۴ و ۱/۷۰ مگاپاسگال تعیین گردید که نشان از کاهش بودن این مقاومت با افزایش میزان مصرف الیاف دارد. همچنین استفاده از الیاف بازیافتی در فوم بتن باعث بهبود مقاومت خمشی گردیده است؛ به طوری که بیشترین افزایش در سطح ۱ درصد الیاف (نسبت به وزن سیمان) به میزان ۱/۰۲ مگا پاسکال بوده است. به علاوه، افزودن ۱ درصد الیاف بازیافتی به فوم بتن باعث کاهش ۱۳ درصدی انقباض در فوم بتن نهایی گردید؛ درحالی که سطوح ۱/۵ و ۲ درصد الیاف تفاوت معنی‌داری در انقباض ایجاد نکرده است.

واژگان کلیدی: فوم بتن، ویژگی‌های مکانیکی، ویژگی‌های فیزیکی، عامل کف‌کننده، بتن سبک‌سازی شده.

محمد صالح حسینی فرد^۱
 مهدی رحمانی نیا^{۲*}
 حسین رنگ آور^۳
 میلاد اصغری^۴

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

^۲ دانشیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

^۳ دانشیار، گروه صنایع چوب، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

^۴ دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

مسئول مکاتبات:

rahmaninia@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰

مقدمه

تقاضای تجاری برای استفاده از بتن‌های سبک و چندسازه‌های بتنی سبک در سال‌های اخیر با توجه به امتیازات مختلف آن (سبکی، کاهش نیروی زلزله وارده به سازه‌ها، عملکرد بهتر از نظیر عایق‌بندی حرارتی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی و دوستدار محیط‌زیست بودن) بیش‌ازپیش افزایش یافته و در حال گسترش است [۱، ۲، ۳، ۴]. طبق تعریف موسسه بتن امریکا، بلوک‌های بتنی

سبک، به دودسته کلی تقسیم می‌شوند: بلوک‌های سبک دانه و بلوک‌های متخلخل سبک. بتن سبک عموماً جرم حجمی بیش از ۱۴۰۰ و کمتر از ۱۹۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب دارد و مقاومت فشاری آن‌ها بالاتر از ۱۷/۵ مگا پاسکال است که حداکثر تا ۶۰ مگا پاسکال نیز می‌رسد. برای ساخت این بتن‌ها معمولاً از مواد سبک‌کننده طبیعی و مصنوعی استفاده می‌شود [۵، ۶]. هم‌چنین بتن‌های متخلخل سبک (CLC) به یکی از دو روش؛ افزودن

ریزساختار ماتریسی در اطراف الیاف بررسی می‌گردد. ریزساختار به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر فرآیند تولید و عمل‌آوری بوده که می‌تواند در تخلخل چندسازه تغییراتی ایجاد نماید. در واقع به نظر می‌رسد که ریزساختار غیرمترکم سبب بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس می‌شود، در حالی که ریزساختار مترکم سبب گسیختگی یا پاره شدن الیاف می‌گردد که این عوامل باعث تغییراتی در خواص مکانیکی چندسازه می‌شود [۱۳، ۱۴]. در خصوص کاربرد الیاف لیگنوسلولزی در ساخت چندسازه‌های سیمانی باید متذکر شد که الیاف گونه‌های گیاهی و چوبی باید تا حد امکان از درصد وزنی پائین همی سلولز و مواد استخراجی برخوردار باشند؛ زیرا محیط قلیایی سیمان، همی سلولزها و مواد استخراجی را در خود حل کرده و آن‌ها نیز به سبب اختلال در فرآیند هیدراتاسیون و متعاقباً تأخیر در گیرایی سیمان باعث کاهش عملکرد مکانیکی چندسازه می‌شوند [۱۵، ۱۴، ۱۶]. لذا برای حل این مشکل استفاده از افزودنی‌های تسریع‌کننده واکنش هیدراتاسیون (کلرید کلسیم، تزریق گاز CO₂ و ...)، تیمار سطحی و آب گرم (تیمار قلیایی، ترکیبات سیلان و ...)، پوزلان‌ها (ژل میکرو سیلیکا، خاکستر بادی و ...) و الیاف تهیه‌شده به روش شیمیایی (فرآیند کرافت، سولفیت و ...) توصیه می‌گردد [۱۵، ۱۷، ۱۸، ۱۹]. نکته دیگری که باید توجه نمود پایداری الیاف لیگنوسلولزی در محیط قلیایی سیمان است. به‌طور اطمینان الیاف تهیه‌شده توسط فرآیندهای قلیایی نظیر کرافت و سودا پایداری بهتری نسبت به الیاف تهیه‌شده در فرآیندهای اسیدی مانند سولفیت خواهند داشت [۱۴]. کاغذهای باطله از جمله منابع ارزشمند لیفی می‌باشند. با توجه به مباحث محیط‌زیستی مختلف نظیر کاهش سطح جنگل‌های صنعتی، افزایش سهم کاغذهای باطله در مواد بازیافتی، فشار طرفداران محیط‌زیست و همچنین افزایش هزینه‌های تولید الیاف بکر سهم استفاده از الیاف بازیافتی در حال افزایش چشم‌گیر می‌باشد [۲۰].

عامل گازساز و عامل کف‌ساز به خمیر سیمان، سبک‌سازی می‌شوند. در هر دو روش ذکرشده، پایدار بودن حباب‌های هوا و توزیع یکنواخت آن‌ها در مخلوط بتن بسیار حائز اهمیت بوده و کیفیت نهایی بتن را تعیین می‌کند [۷، ۸]. وزن مخصوص بتن سبک متخلخل بین محدوده ۳۰۰ تا ۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد [۹]. یکی از بتن‌های متخلخل، بتن هوادار اتوکلاو شده است که به‌منظور کاهش چگالی بتن از مواد تولیدکننده گاز (هیدروژن پراکسید و پودر فلزات آلومینیوم و ...) استفاده می‌شود [۱۰]. این مواد افزودنی با ساختار شیمیایی خمیر بتن واکنش می‌دهند و با خارج شدن گاز طی این واکنش، افزایش حجم خمیر اتفاق افتاده و ساختار متخلخل می‌گردد [۸، ۹، ۱۰]. پودر آلومینیوم یکی از عمومی‌ترین و متداول‌ترین عوامل تولیدکننده گاز است که طی واکنش با هیدروکسید کلسیم Ca(OH)₂ (قلیا)، حباب‌های گاز هیدروژن را در مخلوط بتن تولید می‌کند [۷].

در این میان استفاده از الیاف طبیعی در ساخت محصولات ساختمانی مورد توجه قرار گرفته است. خمیر الیاف شیمیایی با دارا بودن ویژگی‌های قابل قبول و هم‌چنین هزینه تولید مناسب می‌تواند یکی از گزینه‌های مناسب جهت جایگزینی با الیاف آریست باشد و خواص فیزیکی و مکانیکی منحصر به فردی در محصولات سیمانی ایجاد و سازگاری مناسبی با ماتریس سیمان برقرار کند [۱۱، ۱۲]. خمیرهای سیمانی تقویت‌شده با الیاف معمولاً برای ساخت ورق‌های نازکی به کار می‌رود. در این محصولات می‌توان از الیاف شیشه و الیاف لیگنوسلولزی به میزان ۵ تا ۱۵ درصد حجمی به‌منظور تقویت خواص استفاده می‌شود. همچنین به‌منظور کنترل ترک‌ها در محصول بتنی می‌توان از الیاف به میزان حجمی زیر ۲ درصد استفاده کرد که در این حالت الیاف، بیشتر نقش ثانویه در تقویت بتن دارا می‌باشند [۱۳، ۱۴]. سطوح مشترک و پیوند بین ماتریس سیمانی و الیاف لیگنوسلولزی با دو عامل کلی، مقدار رطوبت و چگونگی شکل‌گیری

¹ Gas agent

² Foam agent

³ Aerated Concrete Autoclaved

ساختمانی سبز، سبک، با قابلیت گیرایی، دوام و ویژگی‌های مکانیکی مناسب مورد استفاده قرار گیرند.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق به منظور ساخت فوم بتن تقویت شده با الیاف از سیمان پرتلند نوع ۲، الیاف بازیافتی، ژل میکرو سیلیکا، پودر سنگ و کلرید کلسیم استفاده گردید (شکل ۱) تولید شده در کارخانه سیمان بجنورد مورد استفاده گردید که ترکیبات شیمیایی و ویژگی‌های آن بر اساس اطلاعات کارخانه مزبور در جدول ۱ ارائه شده است. هم-چنین در این تحقیق در راستای کاهش هزینه‌ها، از پودر سنگ به عنوان پرکننده به جای ماسه ریزدانه سیلیسی استفاده شد که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۲ ارائه شده است.

در این میان استفاده از الیاف بازیافتی در ساخت و تقویت محصولات سازه‌ای به ویژه همراه با بتن مورد توجه بوده است. بر این اساس در میان کاغذهای باطله، الیاف حاصله از کاغذهای شیمیایی نسبت به دیگر کاغذهای باطله مانند کاغذ باطله روزنامه که حاصل فرآیند مکانیکی کاغذسازی می-باشند، موجب ویژگی‌های مناسب‌تر در چندسازه سیمانی می‌شوند [۲۱، ۲۲، ۲۳]. با توجه به آنچه گفته شد، در این تحقیق هدف آن است که الیاف بازیافتی حاصل از کارتن‌های کنگره‌ای کهنه (که مخلوطی از انواع الیاف بازیافتی (شیمیایی و حتی مکانیکی) به همراه درصد زیادی از نرمه الیاف و حتی پرکننده‌های معدنی می‌باشد) به همراه سیمان با کمک فرآیند هوادهی به منظور تولید یک محصول



شکل ۱. مواد مورد استفاده در ساخت فوم بتن تقویت شده

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی و ویژگی‌های سیمان پرتلند نوع ۲ مورد استفاده در این پژوهش

ویژگی‌های فیزیکی			ترکیبات شیمیایی			ترکیبات (درصد)
نتایج	استاندارد آبا استاندارد ASTM C150	خصوصیات	نتایج	استاندارد آبا استاندارد ASTM C150	نتایج	
۳۱۷۰	---	---	وزن مخصوص (ton/m ³)	۲۱/۵۵	حداقل ۲۰	SiO ₂
۱۴۱	حداقل ۴۵	حداقل ۴۵	زمان گیرایی	۴/۶۳	حداکثر ۶	Al ₂ O ₃
۳۱۰	حداکثر ۳۷۵	حداکثر ۳۶۰	نهایی (دقیقه)	۳/۵۲	حداکثر ۶	Fe ₂ O ₃
۳۱۹۱	۲۸۰۰	۲۸۰۰	سطح ویژه (cm ² /gr)	۶۴/۸۳	---	CaO
۵/۳	---	---	ذرات بیش از ۹۰ میکرون	۱/۹۴	حداکثر ۶	MgO
		مقاومت فشاری (Kg/cm ²)		۱/۹۶	حداکثر ۳	SO ₃
۲۳۷	---	حداقل ۱۰۰	۳ روزه	۰/۲۸	حداکثر ۰/۷۵	Insoluble Residue
۳۱۷	---	حداقل ۱۷۵	۷ روزه	۰/۸۱	حداکثر ۳	Loss on Ignition
۴۲۷	---	حداقل ۳۱۵	۲۸ روزه	۵۸/۴۱	---	C ₃ S
		حرارت هیدراتاسیون (Cal/gr)		۱۷/۷۵	---	C ₂ S
۵۹/۰۳	حداکثر ۷۰	حداکثر ۷۰	۷ روزه	۶/۳۱	حداکثر ۸	C ₃ A
۶۸/۹۷	---	---	۲۸ روزه	۲۳/۳۳	---	2C ₃ A + C ₄ AF

۱/۸۵gr/cm³ استفاده شد. الیاف لیگنوسولولزی مورد استفاده در این تحقیق حاصل بازیافت کارتن کنگره‌ای کهنه (OCC) بوده است که از شرکت افرنگ نور استان مازندران تهیه گردید. این الیاف پس از انتقال به محل آزمایشگاه تا رطوبت ۴۰ درصد هوا خشک شدند. دسته‌بندی طول الیاف بازیافتی به کمک دستگاه باورمک نت و همچنین درجه روانی خمیر با کمک دستگاه CFS Tester به ترتیب بر اساس استانداردهای TAPPI T 233 و TAPPI T 227 اندازه‌گیری شدند [۲۵، ۲۶].

جهت بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی در نمونه‌های ساخته شده از ژل میکروسلیکا^۴ با چگالی ۱/۴gr/cm³ (با کد اختصاری PIRB منطبق با استاندارد ASTM C494) [۲۴] تهیه شده از شرکت فن‌آوران بتن ایرانیان استفاده گردید که در ساخت آن جهت افزایش کارایی از فوق روان کننده^۵ استفاده شده است. در جدول ۲ ترکیبات شیمیایی ژل میکرو سیلیکا ارائه گردیده است. برای تسریع در فرآیند هیدراتاسیون سیمان و هم-چنین کاهش زمان گیرایی از کلرید کلسیم (CaCl₂.2H₂O) با وزن مولکولی ۱۴۷ g/mol و چگالی

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی پودر سنگ و ژل میکرو سیلیکا

ترکیبات (درصد)	پودر سنگ	ژل میکرو سیلیکا
SiO ₂	۶۸/۲۱	۹۵/۴۱
Al ₂ O ₃	۰/۵۳	۰/۲
Fe ₂ O ₃	۱/۷۴	۰/۸۹
CaO	۱۷/۱	۰/۲۸
MgO	۲/۱۸	۰/۹۵
Na ₂ O	۰/۷۶	۰/۰۳
K ₂ O	۰/۳۹	۰/۰۲

4 Micro Silica gel

5 Super Plasticizer

شرایط تولید بتن در صنعت و هم‌چنین پیش‌آزمون‌های آزمایشگاهی به‌منظور دستیابی به مقاومت‌های استاندارد (ISO 2185-4) [۲۷] شرایط و نسبت‌های اختلاط مواد تعیین گردید (جدول ۳). در این تحقیق نسبت آب به سیمان در ۳ سطح و میزان الیاف کارتن بازیافتی در ۴ سطح به‌عنوان عوامل متغیر در نظر گرفته شد و از ترکیب عوامل متغیر ۱۲ تیمار مشخص گردید. در جدول ۴ نسبت ترکیبات برای ساخت یک مترمکعب فوم بتن ساده و فوم بتن تقویت‌شده با الیاف OCC گزارش شده است.

مخلول فوم‌زای شیمیایی از شرکت فوم بتن الوند با چگالی حدود ۱/۲ کیلوگرم به ازای هر لیتر تهیه شد. جهت تولید فوم از دستگاه فوم ژنراتور استفاده گردید. به این منظور مایع فوم‌زا به نسبت ۱ به ۳۳ با آب مقطر درون مخزن دستگاه مخلوط شد. سپس فوم خامه‌ای شکلی با چگالی حدود ۴۰ تا ۴۵ گرم به لیتر تولید شد. به‌طور کلی میزان مصرف مایع فوم‌زا متناسب با کیفیت دستگاه‌های فوم ساز حدود ۰/۶ تا ۱ لیتر در هر مترمکعب می‌باشد. نسبت اختلاط مواد مورداستفاده بر اساس شرایط صنعتی تعیین گردید. بر این اساس، با در نظر گرفتن

جدول ۳. نسبت ترکیبات برای ساخت یک مترمکعب فوم بتن ساده و تقویت‌شده با الیاف

کد نمونه	الیاف بازیافتی OCC		نسبت آب به سیمان و ژل سیلیکا	سیمان (kg)	ژل سیلیکا (kg)	نسبت پودر سنگ به سیمان	پودر سنگ (kg)	حجم فوم (m ³)	کلرید کلسیم (۱ درصد وزن سیمان)
	نسبت به جرم سیمان (%)	میزان (kg)							
A1	صفر	صفر	۰/۶۷	۳۳۳/۵	۱۶/۵	۰/۶	۲۰۰	۰/۵۷	۳/۳۳
B1	۱	۳/۳۳	۰/۶۷	۳۳۳/۵	۱۶/۵	۰/۶	۲۰۰	۰/۵۷	۳/۳۳
C1	۱/۵	۵	۰/۶۷	۳۳۳/۵	۱۶/۵	۰/۶	۲۰۰	۰/۵۷	۳/۳۳
D1	۲	۶/۶۷	۰/۶۷	۳۳۳/۵	۱۶/۵	۰/۶	۲۰۰	۰/۵۷	۳/۳۳
A2	صفر	صفر	۰/۷	۳۳۳/۵	۱۶/۵	۰/۶	۲۰۰	۰/۵۶	۳/۳۳
B2	۱	۳/۳۳	۰/۷	۳۳۳/۵	۱۶/۵	۰/۶	۲۰۰	۰/۵۶	۳/۳۳
C2	۱/۵	۵	۰/۷	۳۳۳/۵	۱۶/۵	۰/۶	۲۰۰	۰/۵۶	۳/۳۳
D2	۲	۶/۶۷	۰/۷	۳۳۳/۵	۱۶/۵	۰/۶	۲۰۰	۰/۵۶	۳/۳۳
A3	صفر	صفر	۰/۷۳	۳۳۳/۵	۱۶/۵	۰/۶	۲۰۰	۰/۵۵	۳/۳۳
B3	۱	۳/۳۳	۰/۷۳	۳۳۳/۵	۱۶/۵	۰/۶	۲۰۰	۰/۵۵	۳/۳۳
C3	۱/۵	۵	۰/۷۳	۳۳۳/۵	۱۶/۵	۰/۶	۲۰۰	۰/۵۵	۳/۳۳
D3	۲	۶/۶۷	۰/۷۳	۳۳۳/۵	۱۶/۵	۰/۶	۲۰۰	۰/۵۵	۳/۳۳

پراکنده‌سازی شده به همراه آب مخلوط شده و سپس به ترتیب ژل میکرو سیلیکا، پودر سنگ و سیمان به مدت ۴ دقیقه مخلوط شدند. برای رساندن حجم مخلوط به میزان معین (حدود ۱۸/۵ لیتر) از فوم پایدار (خامه‌ای شکل) استفاده گردید. سپس کلرید کلسیم محلول در آب به مخلوط اضافه شد و به مدت ۳ دقیقه دیگر در مخلوط‌کن عمل اختلاط صورت گرفت. سپس مخلوط حاصل به درون

به‌منظور پراکنده‌گی مناسب الیاف در ماتریس سیمان و فوم، قبل از به‌کارگیری الیاف بازیافتی OCC در ساخت بلوک‌ها، قسمتی از آب مورداستفاده در مخلوط سیمان به الیاف اضافه و جداسازی الیاف از یکدیگر در دستگاه پراکنده‌ساز (Disintegrator) با دور ۲۰۰۰ rpm انجام شد [۱۹]. مخلوط کردن مواد مورداستفاده با دستگاه مخلوط-کن مکانیکی Hobart E302 صورت گرفت و در ابتدا الیاف

آزمونی در ابعاد $5 \times 5 \times 20$ cm³ به تعداد ۶ عدد برای هر تیمار تهیه گردید و مطابق استاندارد EN 680 انجام گردید [۳۴]. همچنین برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی از سنسور سوزنی شکل KS-1 بر طبق استاندارد ASTM D5334 استفاده گردید [۳۵].

نتایج و بحث

تأثیر میزان الیاف و کلرید کلسیم بر زمان

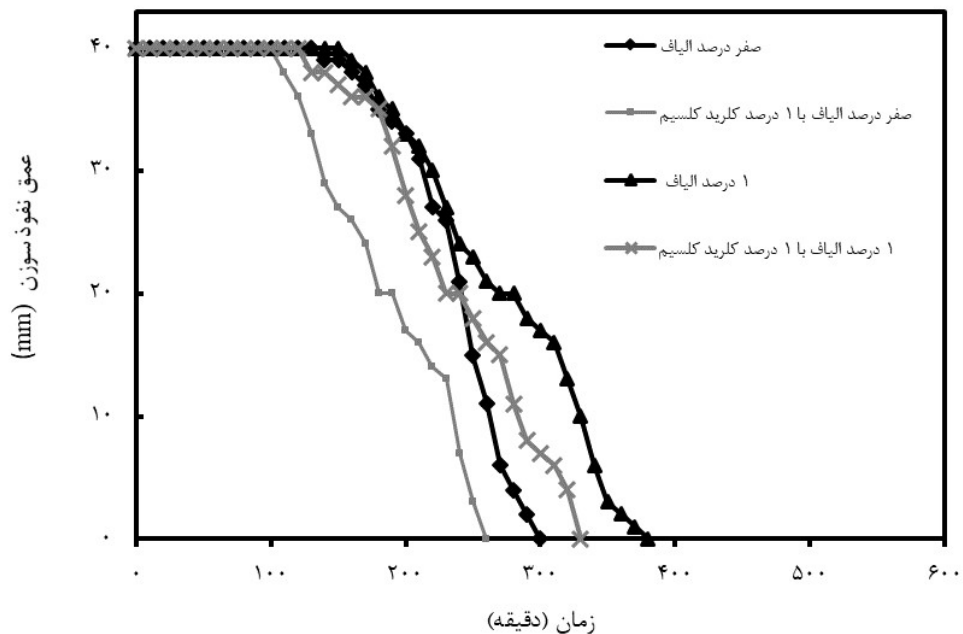
گیرایی سیمان پرتلند نوع ۲

زمان گیرایی اولیه و نهایی سیمان پرتلند با ۱، ۱/۵ و ۲ درصد الیاف به ترتیب بعد از ۱۵۰ و ۳۸۰، ۱۹۰ و ۴۱۰ و ۲۲۰ و ۴۶۰ دقیقه حاصل گردید که در مقایسه با سیمان پرتلند بدون الیاف (۱۵۰ و ۳۸۰ دقیقه)، افزایش ۱۵ تا ۶۹ درصدی برای زمان گیرایی اولیه و ۲۷ تا ۵۳ درصدی برای زمان گیرایی نهایی رخ داده است. مطابق با نظر سایر محققین، حضور الیاف لیگنوسولوزی به دلیل داشتن ترکیبات بازدارنده واکسنش هیدراتاسیون (مانند همی سلولز، قندها، نشاسته، فنول، پکتین، کربوکسیلیک اسیدها) باعث افزایش زمان گیرایی سیمان گردید [۳۵، ۱۶] در مقابل، در تحقیقات متعدد گزارش شده است که کلرید کلسیم می‌تواند با تسریع فرآیند هیدراتاسیون سیمان سبب کاهش چشمگیر زمان گیرایی شود [۳۰]. لذا به منظور جبران اثر حضور الیاف در ترکیب بتن، کلرید کلسیم توانست باعث تسریع در گیرایی گردد؛ به طوری که افزودن ۱ درصد این ترکیب در سیمان پرتلند حاوی الیاف به‌طور میانگین زمان گیرایی اولیه و نهایی را به ترتیب ۱۱ تا ۱۳ درصد کاهش داد (شکل ۲).

قالب طراحی شده ریخته و برای کاهش زمان گیرایی به جهت جلوگیری از شکستن حباب هوا و در نتیجه جلوگیری از افزایش چگالی، به مدت ۲ ساعت قالب مورد نظر در گرم‌خانه‌ای با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. همچنین به منظور خارج نشدن سریع رطوبت، سطح قالب با یک پوشش پلاستیکی محافظت شد (شکل ۳-۵). بلوک‌های ساخته شده بعد از ۲۰ ساعت از قالب خارج شده و به مدت ۲۸ روز در رطوبت نسبی بالای 70 ± 5 درصد و دمای 20 ± 3 درجه سانتی‌گراد جهت تکمیل شدن فرآیند سخت شدن قرار می‌گیرند [۱۹]. برای جلوگیری از ترک‌های ناشی از خشک شدن بلوک‌های ساخته شده در دما 20 ± 5 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 50 ± 5 به مدت ۳۰ روز خشک شدند [۲۸]. شرایط کلبماتیزه برای انجام آزمون‌ها به خوبی انجام پذیرفت. همچنین به منظور تعیین تأثیر الیاف بازیافتی OCC و کلرید کلسیم بر زمان گیرایی سیمان پرتلند نوع ۲ از دستگاه سوزن و یکتا مطابق استاندارد ASTM C191-82 استفاده شد [۲۹]. در این آزمون از نسبت آب به سیمان ۰/۴ استفاده گردید [۳۰]؛ و هر ۱۰ دقیقه یک‌بار میزان عمق نفوذ سوزن در مخلوط تازه سیمان اندازه‌گیری شد. مقاومت فشاری بلوک‌های ساخته شده مطابق استاندارد EN 679 اندازه‌گیری شد [۲۹]. نمونه‌های مکعبی در ابعاد $10 \times 10 \times 10$ cm³ توسط دستگاه اهر نواری نجاری تهیه شدند و از هر تیمار ۶ عدد نمونه مکعبی مورد آزمون قرار گرفت. برای اندازه‌گیری ویژگی‌های مربوط به خمش استاتیک، نمونه‌ها به ابعاد $50 \times 50 \times 200$ میلی‌متر تهیه شد و طبق آیین‌نامه شماره 8598 استاندارد ISIR تحت آزمون خمشی سه نقطه‌ای قرار گرفتند [۳۲]. در این آزمون مدول گسیختگی^۷ (MOR) و مدول الاستیسیته^۸ (MOE) بر اساس ۶ تکرار برای هر تیمار محاسبه شدند. برای آزمون جذب آب، ۵ نمونه مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ cm³ برای هر تیمار تهیه شد و طبق استاندارد EN 772-11 تعیین گردید [۳۳]. به این منظور وزن هر کدام از نمونه‌ها بعد از ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری انقباض ناشی از خشک شدن، نمونه‌های

7 Modulus of Rupture

8 Modulus of Elasticity

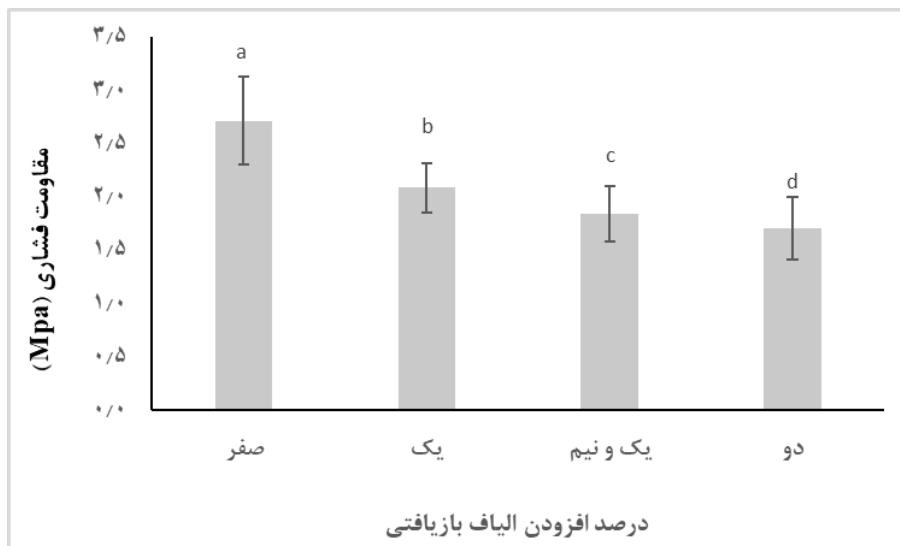


شکل ۲. تعیین زمان گیرایی سیمان با سوزن و ویکات

این مقاومت گردیده و با افزایش درصد مصرف الیاف روند کاهشی بوده است. به طوری که افزایش ۲ درصد الیاف باعث کاهش ۳۷ درصدی مقاومت فشاری نسبت به حالت بدون حضور الیاف می‌گردد. به نظر می‌رسد همان‌طور که بیان شد، حضور الیاف باعث کاهش نرخ هیدراتاسون سیمان گردیده است. البته در این میان از تأثیر ویژگی ساختاری و چگالی پائین محصول بر کاهش این ویژگی نباید غافل شد [۳۷، ۲].

مقاومت فشاری

پژوهش‌های مختلف گزارش کردند که افزودن الیاف لیگنوسلولزی به چندسازه‌های سیمانی سبب کاهش مقاومت فشاری چندسازه مربوطه می‌شود. این منابع دلیل این پدیده را کاهش نرخ واکنش هیدراتاسیون سیمان به سبب وجود برخی از ترکیبات قندی و اسیدی در مواد لیگنوسلولزی دانستند [۴، ۳۶، ۱۶]. در این تحقیق با توجه به شکل ۲ مشخص می‌گردد که حضور الیاف باعث کاهش

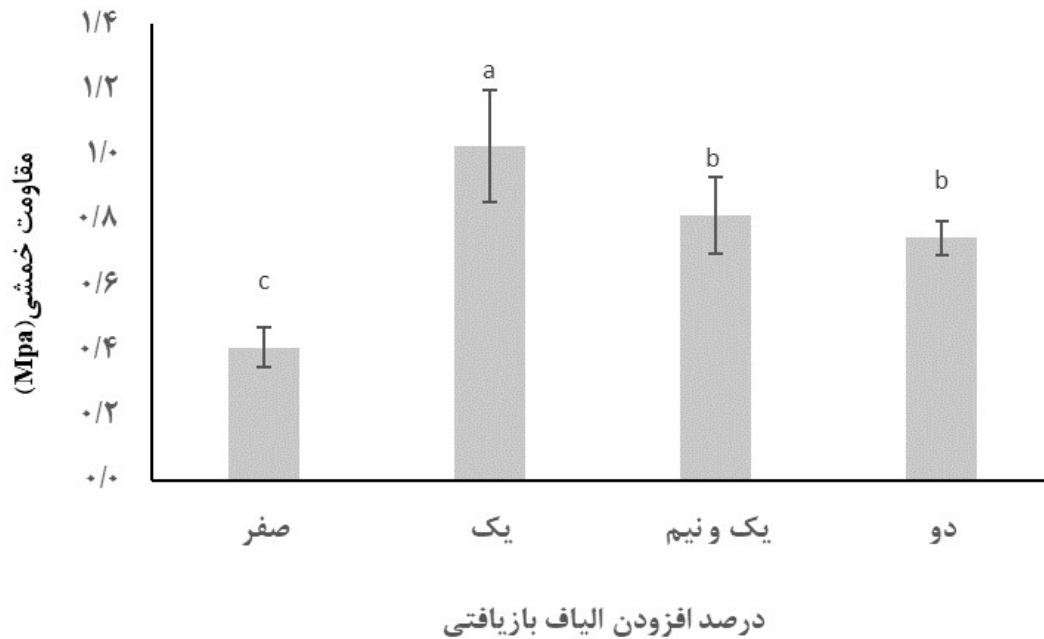


شکل ۳. اثر میزان مصرف الیاف باز یافتی بر مقاومت فشاری فوم بتن تقویت شده

مقاومت خمشی

تنها با افزودن ۱ درصد الیاف نسبت به جرم سیمان، مقاومت خمشی به حدود ۱ مگا پاسکال می‌رسد. این در حالی است که مقاومت خمشی برای نمونه شاهد در حدود ۰/۴ مگا پاسکال می‌باشد که افزایش ۲/۵ برابری مقاومت خمشی با افزودن ۱ درصد الیاف در فوم بتن الیافی نسبت به نمونه شاهد رخ داده است. استفاده از درصدهای بالاتر الیاف (۱/۵ و ۲ درصد) در فوم بتن باعث کاهش مقاومت خمشی شد؛ اما مقاومت خمشی همچنان بالاتر از نمونه بدون الیاف است. پژوهشگران مختلف دلیل این امر را به اندازه بزرگ حفرات (که باعث تضعیف ساختار دیواره حفرات و پیوند بین ماتریس و حفرات می‌شود) نسبت

داده‌اند [۳۸، ۳۹، ۴۰]. نتایج تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) که در شکل ۳ مشاهده می‌شود؛ تائید کننده نتایج فوق است. این تصاویر ریخت‌شناسی سطح شکست خمشی نمونه‌های فوم بتن خام و مسلح به الیاف را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در نمونه شاهد، اندازه حفرات بزرگ‌تر از نمونه دارای ۱ درصد الیاف می‌باشد. نکته قابل توجه آن است که افزایش درصد حضور الیاف (۱/۵ و ۲ درصد) باعث توزیع ناپیکنواخت تر حفرات و اندازه آن در سطح ماتریس می‌شود. این اتفاق احتمالاً باعث تمرکز تنش در ناحیه شکست و فروپاشی دیواره حفرات و کاهش این مقاومت در درصدهای ذکر شده می‌گردد [۳۹، ۴۰].

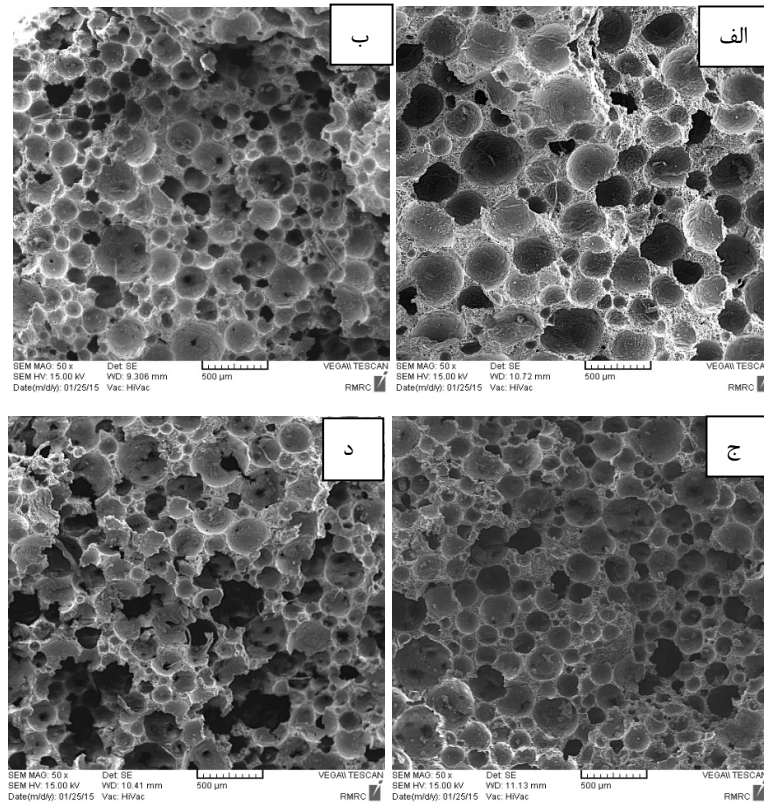


شکل ۴. اثر میزان مصرف الیاف بازیافتی بر مقاومت خمشی فوم بتن تقویت شده

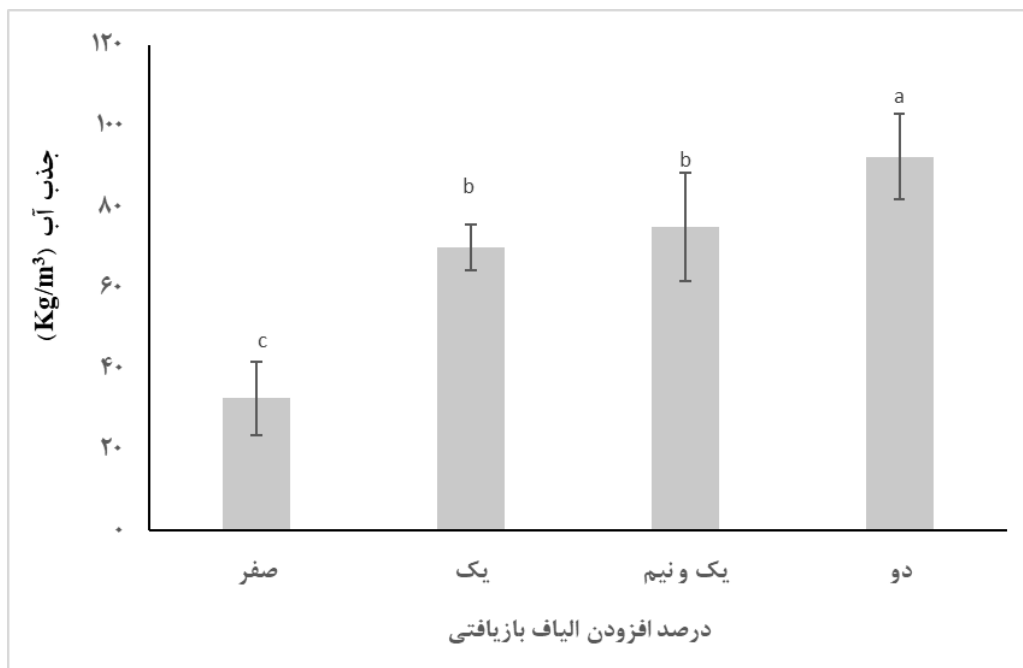
جذب آب

شکل ۶ نتایج جذب آب در نمونه‌های بتن شاهد و نمونه‌های حاوی الیاف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود؛ با افزایش سطح حضور الیاف تا ۲ درصد میزان جذب آب در محصول روند افزایشی را نشان می‌دهد. وجود الیاف آب‌دوست در ساختار بتن دلیل این نتایج می‌باشد. البته میزان جذب آب در سطوح ۱ و ۱/۵ با

شاهد از نظر آماری تفاوت چندانی نشان نمی‌دهد؛ ولی با افزودن ۲ درصد الیاف، میزان جذب آب حدود ۱۸۰ درصد نسبت به نمونه شاهد (بدون الیاف) افزایش معنی‌دار یافته است. باید توجه داشت که حفرات ایجاد شده در بتن به علت آنکه حفرات بسته‌ای هستند (تخلخل ایجاد شده در فوم بتن) در فرآیند جذب آب فوم بتن تأثیری ندارند [۴۱، ۴۲].



شکل ۵. اندازه حفرات در نمونه‌های فوم بتن: الف) نمونه شاهد، ب) نمونه با ۱ درصد الیاف؛ ج) نمونه با ۱/۵ درصد الیاف؛ د) نمونه با ۲ درصد الیاف

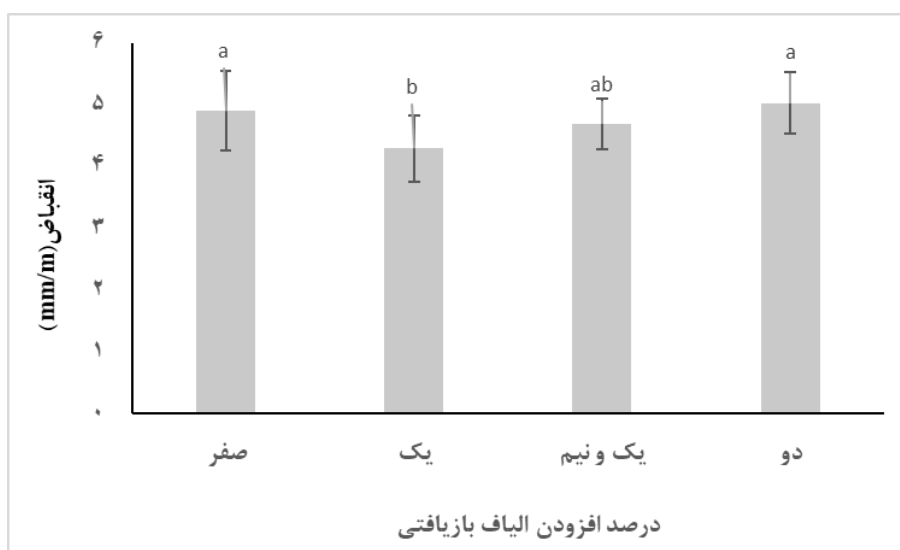


شکل ۶. اثر میزان مصرف الیاف بازتابی بر جذب آب فوم بتن تقویت‌شده

انقباض

شکل ۷ ویژگی انقباض بتن‌های مورد مطالعه در این تحقیق را نشان می‌دهد. بر اساس این نتایج، استفاده از ۱ درصد الیاف بازیافتی در تولید فوم بتن الیاف، باعث کاهش ۱۳ درصدی این ویژگی نسبت به نمونه شاهد گردیده است؛ اما افزایش میزان مصرف الیاف (۱/۵ و ۲ درصد) در فوم بتن ساخته شده تفاوت معنی‌داری نسبت به فوم بتن بدون الیاف ایجاد نکرده است. طبق تحقیقات گذشته، به‌طور کلی استفاده از الیاف کوتاه و پراکندگی مناسب آن‌ها در چندسازه‌های سیمانی سبب کاهش انقباض می‌شود. بر اساس نظر بعضی از محققین، حضور الیاف در

بتن به دلیل پدیده پوشیده شدن سطح الیاف با سیمان و حتی نفوذ آن به منافذ باعث سفت و انعطاف‌ناپذیرتر شدن الیاف و کنترل انقباض می‌شود که در سطح ۱ درصد مصرف الیاف قابل مشاهده است [۴۳،۴۴،۴۵،۴۶،۴۷]. البته نباید فراموش کرد که جذب آب در الیاف می‌تواند باعث معکوس شدن این فرایند و افزایش انقباض در محصول گردد که این نتیجه در درصدهای مصرف ۱/۵ و ۲ درصد قابل مشاهده است. لازم به ذکر است الیاف بازیافتی که حداقل یک‌بار خشک شده‌اند (و در نتیجه سایت‌های جذب آب کمتری دارند)، احتمالاً نسبت به الیاف بکر در این بخش عملکرد بهتری خواهند داشت.



شکل ۷- اثر میزان مصرف الیاف بازیافتی بر انقباض فوم بتن تقویت شده

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج این مطالعه می‌توان نتیجه‌گیری ذیل را ارائه نمود:

- حضور الیاف در ساخت فوم بتن باعث کاهش مقاومت فشاری محصول نهایی گردید. همچنین با افزایش درصد مصرف الیاف در فوم بتن، مقاومت فشاری روند کاهشی بیشتری را تجربه می‌کند. به نظر می‌رسد؛ الیاف به دلیل حضور ترکیباتی مانند همی سلولز، لیگنین، مواد استخراجی باعث کاهش نرخ هیدراتاسیون در سیمان می‌شود. حضور آلاینده‌های مختلف نظیر مواد چسبناک و سایر ترکیبات کلونیدی می‌توانند این مسئله را تشدید کند. هم‌چنین ویژگی ساختاری و چگالی پائین محصول فوم بتن نیز می‌تواند سبب کاهش مقاومت فشاری گردد.

- زمان گیرایی اولیه و نهایی سیمان پرتلند با افزودن الیاف به بتن در سطوح ۱، ۱/۵ و ۲ درصد کاهش یافت که بیشترین کاهش این ویژگی در سطح ۱ درصد اتفاق افتاد. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از کلرید کلسیم می‌تواند با تسریع فرایند هیدراتاسیون، باعث کاهش معنی‌داری در زمان گیرایی گردد.

- افزودن ۱ درصد الیاف بازیافتی به فوم بتن الیاف باعث کاهش انقباض نسبت به نمونه شاهد شده است. این در حالی است که در سطوح ۱/۵ و ۲ درصد تفاوت معنی‌داری مشاهده نمی‌شود.
- بیشترین جذب آب با افزودن ۲ درصد الیاف به فوم بتن مشاهده می‌شود. درحالی‌که در سطوح ۱ و ۱/۵ درصد الیاف تفاوت معنی‌داری نسبت به شاهد دیده نمی‌شود.
- به‌طور کلی افزودن الیاف در تمامی سطوح باعث بهبود مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد گردید؛ اما بهترین نتایج در سطح مصرف ۱ درصد الیاف بازیافتی حاصل شد.

منابع

- [1] Rangavar, H. Kargarfard, A. and Hoseiny Fard, M.S. 2016. Investigation on Effect of cement Types on the cement hydration and properties of wood-cement composites manufactured using sunflower stalk (*Helianthus Annuus*). IRANIAN JOURNAL OF WOOD AND PAPER SCIENCE RESEARCH, 31(2) (55), 336-348. (in Persian)
- [2] Bentschikou M. Guidoum A. Scrivener K. Silhadi K. and Hanini S. 2012. Effect of Recycled Cellulose Fibres on the Properties of Lightweight Cement Composite Matrix, *Construction and Building Materials*, 34: 451-456.
- [3] Bing, C. Zhen, W. and Ning, L. 2012. Experimental research on properties of high-strength foamed concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24 (1): 113-118. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000353
- [4] Mohammed, J.H. and Hamad, A. J. A. 2014. classification of lightweight concrete: materials, properties and application review. *International Journal of Advanced Engineering Applications*, 7(1): 52-57.
- [5] Parhizkar, T. and Pourkhorshidi, A. 2013. Non-autoclaved ventilated lightweight concrete blocks (specifications and production method), Road, Housing and Urban Development Research Center Publications, first edition, Tehran: 60 p. (in Persian)
- [6] Chandra, S. and Berntsson, L. 2001. *Lightweight aggregate concrete*. Elsevier. 429 page.
- [7] Brady, K.C. Watts, G.R.A. and Jones, M.R. 2002. Specification for foamed concrete. Application Guide Report AG39.
- [8] Narayanan N. and Ramamurthy K. 2000. Structure and Properties of Aerated Concrete: a review, *Cement and Concrete Composites*, 22(5): 321-329.
- [10] Holt E. Raivio P. 2005. Use of Gasification Residues in Aerated Autoclaved Concrete, *Cement and Concrete Research*, 35(4): 796-802.
- [11] Moslemi, A., 2008, November. Technology and Market Considerations for Fiber Cement Composites. In 11th International Inorganic Bonded Fiber Composite Conference (pp. 4-7). Madrid.
- [12] Zakaria, M. Ahmed, M. Hoque, M. and Shaid, A. 2020. A Comparative Study of the Mechanical Properties of Jute Fiber and Yarn Reinforced Concrete Composites, *Journal of Natural Fibers*, 17:5, 676-687.
- [13] Khorrami, M. Khalili, A.A. Parhizkar, T. and Ganjian. I. 2011. Road, Housing and Urban Development Research Center Publications, first edition, Tehran: 296 p. (in Persian)
- [14] GHOFRANI, M. and FAZELI, A.. (2021). Effect of Board density and industrial wood particles to cement ratio on mechanical and physical properties of wood cement composite boards. IRANIAN JOURNAL OF WOOD AND PAPER SCIENCE RESEARCH, 35 (4 (73)), 362-375.
- [15] Karade, S.R. 2010. Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes. *Construction and Building Materials*, 24 (8): 1323-1330.

- [16] Hasan, K. F. Horváth, P. G. and Alpár, T. (2022). Lignocellulosic fiber cement compatibility: a state of the art review. *Journal of Natural Fibers*, 19 (13), 5409-5434.
- [17] Nazerian, M. and Eghbal, S.H. 2013. The influence of additive content and particle size of bagasse on some properties of cement-bonded particleboard. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 10 (2): 86-94.
- [18] Soroushian, P. and Won J.P. Hassan M. 2012. Durability Characteristics of CO₂-Cured Cellulose Fiber Reinforced Cement Composites, *Construction and Building Materials*, 34: 44-53.
- [19] Naghizadeh Z. Faezipour M. Ebrahimi G. and Hamzeh Y. 2012. Manufacture of Lignocellulosic Fiber–Cement Boards Containing Foaming Agent, *Construction and Building Materials*, 35: 408-413.
- [20] Milani, H.S. and Rahmaninia, M. Li, B. 2024. Improved Drainage of LNFC-reinforced Recycled Pulp and Mechanical Properties of End Papers by the Zeolite-Chitosan Microparticle Drainage Aid System. *BioResources*, 19 (1): 84-102.
- [21] Soroushian, P. Shah, Z. and Won, J.P. 1996. Aging effects on the structure and properties of recycled wastepaper fiber cement composites. *Materials and Structures*, 29 (5): 312-317.
- [22] Teixeira, D.E. 2012. Recycled Old Corrugated Container Fibers for Wood-Fiber Cement Sheets. *International Scholarly Research Notices*, 12:1-8.
- [23] Hamzeh, Y. Ziabari, K P. Torkaman, J. Ashori, A. and Jafari, M. 2013. Study on the effects of white rice husk ash and fibrous materials additions on some properties of fiber–cement composites. *Journal of environmental management*, 117: 263-267.
- [24] ASTM-C494-05, 2005. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete.
- [25] TAPPI T 233 cm-15, Fiber Length of Pulp by Classification.
- [26] TAPPI T 227 om-21, Freeness of pulp (Canadian standard method).
- [27] ISO 2185-4, Muscovite mica blocks, thins and films visual classification.
- [28] Kim, Y.J. H.U. J. Lee, S.J. and You, B.H. 2010. Mechanical properties of fiber reinforced lightweight concrete containing surfactant. *Advances in Civil Engineering*, 2010:1-8.
- [29] ASTM C191-82, Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle.
- [30] Nazerian, M. and Sadeghiipanah, V. 2013. Cement-bonded particleboard with a mixture of wheat straw and poplar wood. *Journal of Forestry Research*, 24 (2): 381-390.
- [31] EN 679, Determination of the compressive strength of autoclaved aerated concrete.
- [32] ISIR 8598, Lightweight concrete - Determination of flexural strength of autoclaved aerated concrete.
- [33] EN 772-11, Methods of test for masonry units — Part 11: Determination of water absorption of aggregate concrete, autoclaved aerated concrete, manufactured stone and natural stone masonry units due to capillary action and the initial rate of water absorption of clay masonry units.
- [34] EN 680, Determination-of-the-drying-shrinkage-of-autoclaved-aerated-concrete.
- [35] Sedan, D. Pagnoux C. Smith A. and Chotard T. 2008. Mechanical Properties of Hemp Fibre Reinforced Cement: Influence of the Fibre/Matrix Interaction, *Journal of the European Ceramic Society*, 28 (1): 183-192.
- [36] Bentschikou, M. Guidoum, A. Scrivener, K.L. Silhadi, K. and Hanini, S. 2004. Effect of cellulose fiber on the thermal and mechanical properties of cement paste, conference on the use of recycled materials in building and structures. Spain: Barcelona; 9–11.

- [37] Ashori A. Tabarsa T. and Valizadeh I. 2011. Fiber Reinforced Cement Boards Made from Recycled Newsprint Paper, *Materials Science and Engineering: A*, 528 (25): 7801-7804.
- [38] Ferraz, P. F. P. Mendes, R. F. Marin, D. B. Paes, J. L. Cecchin, D. and Barbari, M. (2020). Agricultural residues of lignocellulosic materials in cement composites. *Applied Sciences*, 10(22), 8019.
- [39] Othuman Mydin, M.A. and Roosli, R. 2012. Prediction of Elevated Temperature Flexural Strength of Lightweight Foamed Concrete Strengthened with Polypropylene Fiber and Fly Ash. *Civil and Environmental Research*, 2 (7): 1-10.
- [40] Hasan, K. F. Horváth, P. G. and Alpár, T. (2021). Development of lignocellulosic fiber reinforced cement composite panels using semi-dry technology. *Cellulose*, 28, 3631-3645.
- [41] Ioannou, I. Hamilton, A. and Hall, C. 2008. Capillary absorption of water and n-decane by autoclaved aerated concrete. *Cement and Concrete Research*, 38(6): 766-771.
- [42] Sulaiman, S. 2011. Water Permeability and Carbonation on Foamed Concrete. Master of Science Thesis in Civil University Tun Hussein Onn Malaysia.
- [43] Kaveh, M. and Farrokhzad, R. 2016. Investigating the mutual effect of different types of fibers and pozzolan on the properties of non-structural concrete (foam concrete). *Structural Analysis - Earthquake*, 14 (3), 33-43. (in Persian)
- [44] Jamshaid, H. Mishra, R. K. Raza, A. Hussain, U. Rahman, M. L. Nazari, S. and Choteborsky, R. (2022). Natural cellulosic fiber reinforced concrete: influence of fiber type and loading percentage on mechanical and water absorption performance. *Materials*, 15(3), 874
- [45] Kawashima, S. Shah, S. P. 2011. Early-age autogenous and drying shrinkage behavior of cellulose fiber-reinforced cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 33 (2): 201-208.
- [46] golbabaeci, f. hosseinkhani, h. hajihassani, r. and rashnv, a. 2013. Investigation on properties of wood-cement panels based on agricultural residues. *Iranian journal of wood and paper science research*, 28(3 (44)), 583-596.
- [47] Noushini, A. Vessalas, K. Arabian, G. and Samali, B. 2014. Drying Shrinkage Behavior of Fiber Reinforced Concrete Incorporating Polyvinyl Alcohol Fibers and Fly Ash. *Advances in Civil Engineering*, 2014:1-10.

The Effect of Applying Old Corrugated Container Recycled Fibers on the Properties of Aerated Fiber-Cement Composite

Abstract

Environmental concerns have led the researchers to use green technologies. In the current research, the feasibility of applying recycled fibers with cement along with aeration process in order to produce a green and light construction product with grip, durability and suitable mechanical properties has been discussed. In this product, by creating spaces containing air (with uniform distribution) by a suitable foaming agent, the desired characteristics were investigated. In this regard, recycled fibers (based on the dry weight of cement) were added to foam concrete. The addition of fibers increased the initial and final setting time of Portland cement by 15-69% and 27-53%, respectively. The compression strength of the product at three levels of fiber consumption (1, 1.5 and 2%) were 2.08, 1.84 and 1.70 MPa, respectively, which shows that this strength decreases with the increase in the amount of fiber consumption. Also, the application of recycled fibers in concrete foam has improved the bending resistance. The highest increment was achieved in the level of 1 percent of fibers (based on the dry weight of cement) which was about 1.02 MPa. In addition, applying 1% recycled fibers to the foam concrete caused a 13% reduction in shrinkage in the final product; while in the 1.5% and 2% consumption dosages of fibers, no significant difference in shrinkage was observed.

Keywords: Foam Concrete, Mechanical Properties, Physical Properties, Foaming Agent, Lightweight Concrete.

M. S. Hosseinifard¹
M. Rahmaninia^{2*}
H. Rangavar³
M. Asghari⁴

¹ M.Sc. Wood and Paper Science and Technology Dep. Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

² Associate Professor, Wood and Paper Science and Technology Dep. Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

³ Associate Professor, Wood Science and Technology Department, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

⁴ Ph.D. Candidate, Wood and Paper Science and Technology Dep. Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

Corresponding author:
rahmaninia@modares.ac.ir

Received: 2024/04/23
Accepted: 2024/06/09