بررسی تأثیر الیاف شیشه روی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی

دریافت مقاله: ۱۳۹۷-۰۹-۱۳
پذیرش مقاله: ۱۳۹۸-۰۴-۱۰

سروناز معتمد
کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران،
sarvenazmoetamed@gmail.com

سید حسام مدنی*
عضو هیئت‌علمی دانشکده عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران،
h.madani@kgut.ac.ir

چکیده:
این تحقیق به خواص مکانیکی مخلوط‌های پایه سیمانی مسلح شده با الیاف شیشه می‌پردازد. خواص مکانیکی موردبررسی شامل مقاومت فشاری، مقاومت نهایی خمشی چهار نقطه‌ای، چقرمگی، مقاومت کششی نهایی، ضربه و جمع شدگی می¬باشد. در مخلوط‌های موردمطالعه سیمان پرتلند و آلومینات کلسیم به‌عنوان عامل چسبانننده در ساختار استفاده‌شده‌اند. نمونه‌های حاوی ۲ و ۴ درصد (درصدی از حجم کل مخلوط) الیاف شیشه که نسبت طول به قطر آن برابر ۱۹۲۵ می‌باشد، استفاده‌شده است. بر اساس آزمون‌های صورت گرفته، نتایج حاکی از آن است که مخلوط‌های ساخته‌شده باسیمان آلومینات کلسیم مقاومت فشاری بیشتری نسبت به مخلوط‌های ساخته‌شده باسیمان پرتلند دارند. همچنین با افزودن الیاف شیشه به مخلوط‌ها مقاومت خمشی تا حدود ۳۲٪ در ۲۸ روز نسبت به نمونه کنترل افزایش یافته است. اضافه کردن الیاف شیشه نیز در هر دو نوع سیمان سبب بهبود مقاومت کششی، چقرمگی و ضربه می‌شود و باعث کاهش جمع شدگی نیز می¬گردد که جمع شدگی سیمان‌های آلومینات کلسیم (CAC) قدری کمتر از سیمان پرتلند می‌باشد.

کلمات کلیدی: سیمان پرتلند، سیمان آلومینات کلسیم، الیاف شیشه

۱-مقدمه

بتن و ملات ممکن است از انواع گوناگونی سیمان و مواد افزودنی تولید گردد. بخشی از این مخلوط‌ها باسیمان‌های آلومینات کلسیم ساخته می‌شوند. برخی از خواصی که با استفاده از سیمان‌های آلومینات کلسیم به دست می‌آیند، ازجمله سخت شدن سریع و کسب مقاومت زودهنگام در سنین پایین و مقاومت در برابر ضربه و سایش نسبتا بالا می‌باشد. از این مخلوط پایه سیمانی در مواردی از قبیل استفاده در کارهای تعمیراتی (به دلیل خاصیت کسب مقاومت زودهنگام در سنین پایین) و همچنین در ساخت دیواره تونل‌ها استفاده می‌شود[۲۳,۱۹,۱۵,۴]. توسعه و پیشرفت سیمان‌های آلومینات کلسیم به‌منظور تولید فرآورده‌های بتنی و فرآورده‌های مقاوم در برابر یون‌های مهاجم صورت گرفته است و روند تولید آن ابتدا توسط فرمی در سال ۱۸۶۵ ارائه‌شده است[۹].

دسته‌بندی و طبقه‌بندی سیمان آلومینات کلسیمی (CAC) با توجه به مقادیر مختلف استفاده از اکسید آلومینوم (Al_2O_3) در تولید کلینکر این نوع سیمان تعیین می‌شود. در منابع گوناگون این دسته‌بندی‌ها متفاوت می‌باشد. بنستد و بارنز این سیمان را به دو نوع اصلی دسته‌بندی کرده‌اند[۹]: ۱) فرآورده‌های نرمال که به رنگ خاکستری و سیاه دیده می‌شوند و می‌توانند در محدوده حرارت‌های گسترده مورداستفاده قرار گیرند. ۲) سیمان‌سفید که اصولاً در دمای بالا و برای دکوراسیون و تزئینات ظاهری مورداستفاده قرارمی گیرد. نیومن و چو[۱۷] ضمن تقسیم‌بندی‌های مذکور بیان شده، این سیمان‌ها را بر اساس مقدار اکسید آلومینیوم طبقه‌بندی کرده است. به دسته‌هایی که میزان ۴۰ ٪ تا ۶۰ ٪ اکسید آلومینیوم داشته باشد را به‌عنوان سیمان‌های کم آلومینات در نظر گرفته است.

تفاوت اصلی بین سیمان پرتلند و سیمان آلومینات کلسیم در ماهیت فاز فعال است که منجر به گیرش و سخت شدن می‌شود. سیمان پرتلند حاوی آهک (CaO) و سیلیس (SiO_2) به عنوان اکسید اصلی به صورت C_3S و C_2S می‌باشد. در واکنش با آب C-S-H و CH هیدراته‌های اصلی تشکیل شده هستند. در مقابل، در سیمان آلومینات کلسیم CaO و Al_2O_3 به عنوان اکسیدهای اصلی ، شناخته شده است. این ترکیب که به عنوان فاز اصلی فعال در سیمان می‌باشد، با آب واکنش داده و هیدراته‌های آلومینات کلسیم را به وجود می‌آورد[۱۲].

گو و همکارانش[۱۰] به بررسی رشد مقاومت و هیدراسیون ملات‌های ساخته‌شده با دو نوع سیمان پرتلند و آلومینات کلسیم پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که مقاومت در سنین پایین این ملات‌ها به نسبت سیمان پرتلند به آلومینات کلسیم بستگی دارد وهرچه مقدار سیمان آلومینات کلسیم بیشتر باشد مقاومت فشاری نیز بیشتر می‌باشد. همچنین می‌توان با اضافه کردن سیمان آلومینات کلسیم به سیمان پرتلند زمان گیرش ملات را تنظیم کرد.

در بتن، الیاف برای بهبود خواص مکانیکی، شکل‌پذیری و کنترل الگوهای ترک‌خوردگی استفاده می‌شوند[۲۱,۲۰,۱۱,۶]. الیاف‌های متعددی در صنایع بتنی مورداستفاده قرار می‌گیرد که دراین‌بین الیاف‌های فولادی، شیشه، کربن، آرامید و پلی‌پروپیلن از شناخته شده‌ترین الیاف‌ها محسوب می‌گردند. الیاف به هم متصل می‌شوند و یک ترکیب یکپارچه و کمتر مستعد جداشدگی ایجاد می‌کند[۲۵].استفاده از الیاف در بتن و ساخت بتن الیافی به‌عنوان یک گام مؤثر در جلوگیری از انتشار ریزترک‌ها و ترک‌ها محسوب می‌شود. مهم‌ترین مشخصه بتن‌های الیافی، خاصیت جذب انرژی، انعطاف‌پذیری و مقاومت آن در مقابل ضربه است و به همین دلیل امروزه استفاده از الیاف نقش بسیار مهمی در پیشرفت تکنولوژی بتن ایفا کرده است[۲۴,۲].

یکی از انواع الیاف که در بتن کاربرد فراوانی دارد الیاف شیشه می‌باشد. بتن الیافی با الیاف شیشه به دو صورت، اسپری کردن (الیاف شیشه‌بر روی بتن اسپری می‌شود و با غلتک های مخصوص فشرده می‌شود) و مخلوط کردن (اضافه کردن الیاف شیشه به بتن در زمان هم زدن مواد) تولید می‌شود[۱۸].

فیلیپ و کلاوس[۱۲] در سال ۲۰۱۴ در دانشگاه علوم کاربردی لایپزینگ به بررسی بتن مسلح شده با الیاف شیشه برای دال‌های روی زمین پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از الیاف شیشه در یک ماتریس بتنی، می‌تواند بسیاری از خواص مانند توزیع ترک و توسعه آن در بتن را بهبود بخشد. همچنین الیاف شیشه قادر به افزایش مقاومت خمشی به دلیل استحکام کششی بالای الیاف شیشه که بین ۳۷۰۰-۱۷۰۰ مگاپاسکال می‌باشد و پیوند خوب آن‌ها با ماتریس سیمان است. آن‌ها نیز به این نتیجه رسیدند که استفاده از این نوع بتن برای اجزای پیش‌ساخته، عایق صدا، پانل‌های مقاوم در برابر آتش، عناصر طراحی داخلی و بازسازی خانه‌های قدیمی بسیار مناسب می‌باشد.

اسکندر و کرازو[۱۶]در سال ۲۰۱۸ به بررسی بتن‌های مسلح شده با الیاف شیشه (GFRC) پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که خواص فیزیکی و مکانیکی GFRC به پارامترهای مختلفی ازجمله نسبت آب به سیمان، تخلخل، چگالی کامپوزیت، دانه بندی سنگدانه، جهت‌گیری و طول الیاف و همچنین دقت و روش تولید آن وابسته است. افزودن مقدار زیاد الیاف شیشه به دلیل کاهش کارایی بتن باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود.در مدول الاستیسیته بتن با افزودن الیاف در کسر حجمی کم، بهبود معناداری وجود ندارد. به‌طورکلی، عمر مفید GFRC نسبت به بتن معمولی به علت کنترل انتشار ریزترک‌ها بیشتر می‌باشد. GFRC سبک‌وزن است و چگالی آن حدود ۱۰ درصد کمتر از بتن معمولی می‌باشد، دلیل کاهش وزن قطعات GFRC کاهش ضخامت قطعات به واسط افزایش مقاومت خمشی است. هزینه آن به دلیل الیاف شیشه و اضافه کردن مواد افزودنی از بتن معمولی بالاتر است. از آن‌ها می‌توان در چاپ سه‌بعدی و ایجاد اشکال پیچیده استفاده کرد.

در این مقاله به بررسی خواص مکانیکی و دوام بتن های مسلح شده با الیاف شیشه پرداخته‌شده است. تاکنون مطالعه چندانی روی استفاده از الیاف شیشه در مخلوط‌های ساخته‌شده باسیمان آلومینات کلسیم موردبررسی قرار نگرفته است. لذا می‌توان با استفاده و کاربرد الیاف گوناگون در ساختار مخلوط‌های پایه سیمانی خواص مکانیکی را بهبود بخشید و نوآوری ویژه‌ای در صنایع تولید مصالح پایه سیمانی (ملات، بتن و گروت) انجام داد. در این تحقیق از مخلوط کردن الیاف شیشه به میزان ۲ و ۴ درصد از حجم کل مخلوط استفاده‌شده است و آزمون‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، چقرمگی، مقاومت کششی، ضربه و جمع شدگی برای بررسی خواص انجام‌شده است.

۲- مواد و مصالح

۲-۱ سیمان

در این پژوهش از دو نوع سیمان پرتلند و آلومینات کلسیم به‌صورت مجزا استفاده‌شده است. سیمان پرتلند و آلومینات کلسیم مصرفی به ترتیب از نوع تیپ II کرمان و آلومینات کلسیم IRC-40 که از شرکت سیمان‌های نسوز ایران واقع در اصفهان تهیه شده است. IRC کدی می‌باشد که خود شرکت برای این محصول انتخاب کرده است که مخفف Iran cement می‌باشد و عدد ۴۰ میزان اکسید آلومینیوم این سیمان که حدود ۳۵-۴۰ درصد است، می‌باشد. آنالیز شیمیایی این دو سیمان مطابق جدول ۱ است.

جدول ۱-مشخصات شیمیایی سیمان‌ها

آنالیز شیمیایی							
نوع سیمان	Ti_2O%	CaO %	MgO%	SO_3%	Fe_2O_3%	Al_2O_3%	SiO_2%
پرتلند	-	۶۳/۵۲	۱/۷۵	۲/۲۰	۳/۹۷	۴/۹۵	۲۱/۵
آلومینات کلسیم	۳	۴۰	۱/۵	-	۱۶/۵	۳۵	۴

۲-۲ سنگدانه

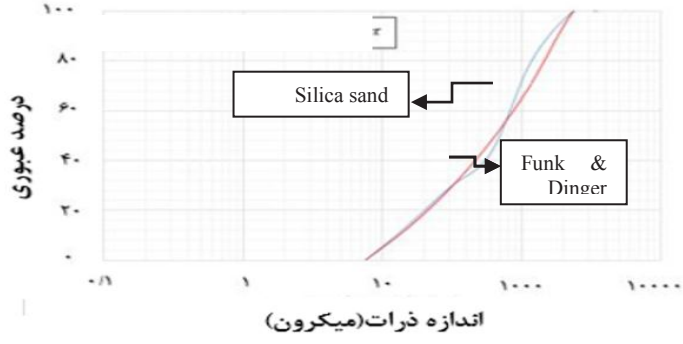
در طرح اختلاط موردبررسی، جنس سنگدانه سیلیسی بوده و از معدن کهبد کرمان زمین تهیه‌شده است. دانه‌بندی و مشخصات فیزیکی سنگدانه های مصرفی به ترتیب در جدول ۲ و ۳ نشان داده‌شده است. شکل شماره ۱ بیشترین انطباق بین دانه‌بندی سنگدانه موجود با منحنی فانک و دینگر [۱] با توان ۰/۳ را نشان می‌دهد که نسبت هرکدام از ۳ دانه‌بندی ماسه سیلیسی مورداستفاده در این پژوهش با ابعاد ذرات ۰/۶ تا ۲/۳۶، ۰/۰۴ تا ۰/۵ و کوچک‌تر از ۰/۰۱۵ میلی‌متر، به ترتیب برابر ٪۴۸، ٪۲۰ و ٪۳۲ می‌باشند تا این انطباق مطابق با منحنی فانک ایجاد شود.

جدول ۲- دانه‌بندی سنگدانه ها

	شماره الک	۴	۸	۱۶	۳۰	۵۰	۱۰۰	۲۰۰
٪ تجمعی عبوری	ماسه نوع (۱)	۱۰۰	۱۰۰	۶۷/۹۳	۱۲/۱۲	۴/۱۰	۰/۴۰	۰
	ماسه نوع (۲)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۷	۶۳/۷۵	۲۲	۱۳
	ماسه نوع (۳)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۶	۷۰

جدول ۳- مشخصات فیزیکی سنگدانه

چگالی ترکیبی سنگدانه ها (ماسه‌های سیلیسی)	جذب آب در حالت SSD (٪)
۲۵۵۴Kg/m3	۰/۶



شکل ۱- همپوشانی و سازگاری دانه‌بندی ترکیبی با منحنی فانک و دینگر با توان ۰/۳

۲-۳ الیاف

در این تحقیق از الیاف شیشه با طول ۲۵ میلی‌متر استفاده‌شده است. سایر مشخصات آن در جدول شماره ۴ قابل‌مشاهده است.

جدول ۴-مشخصات الیاف بکار گرفته‌شده در این تحقیق

نوع الیاف شیشه	مقاوم در برابر قلیایی (AR)
درصد زیرکونیا(ZnO_2)	>٪ ۱۶/۷
قطر (میکرومتر)	۱۳±۲
چگالی	۲/۷g/cm^3
مدول الاستیسیته	۸۰/۴ GPa
مقاومت کششی	۱/۷ GPa
درصد جذب رطوبت	<٪۰/۲

۲-۴ آب و روانساز

در این بررسی از آب شرب شهر کرمان و فوق روان کننده مایع‌بر پایه پلی کربوکسیلات اتر استفاده‌شده است که pH آن برابر ۶ و چگالی آن $1/08 g/cm^3$ می‌باشد.

۳-طرح اختلاط

در این تحقیق، مخلوط ها با عیار سیمان ۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت آب به سیمان ۰/۳۸ می‌باشد. به‌منظور ثابت نگه داشتن نسبت آب به سیمان، میزان آب موجود در روانساز از میزان آب مصرفی کم شده و الیاف شیشه به میزان ۲ و ۴ درصد از حجم کل مخلوط استفاده‌شده است. در این طرح اختلاط‌ها، الیاف افزوده‌شده به‌عنوان جایگزینی از وزن ماسه محسوب شده است به همین دلیل مقادیر دانه‌بندی در نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف الیاف و نمونه کنترل با یکدیگر متفاوت می‌باشد. مقدار روان‌ساز بر مبنای دستیابی به حد روانی مطلوب البته به صورت بصری و به‌نحوی‌که قالب‌گیری به صورت مناسب انجام شود، تنظیم گردید. طرح اختلاط نمونه‌های ساخته‌شده مطابق جدول ۵ می‌باشد.

جدول ۵- طرح مخلوط نمونه‌ها

کد طرح اختلاط	W/C	آب آزاد	سیمان	ماسه نوع (۱)	ماسه نوع (۲)	ماسه نوع (۳)	روانساز	الیاف شیشه
		(Kg/m^3)						
C	۰،۳۸	۳۲۳	۸۵۰ (CAC)	۴۸۴	۲۰۲	۳۲۳	۰،۴	-
P	۰،۳۸	۳۲۳	۸۵۰ (PC)	۴۶۹	۱۹۵	۳۱۳	۰،۳	-
CG-4%	۰،۳۸	۳۲۳	۸۵۰ (CAC)	۴۳۵	۱۸۱	۲۹۰	۲	۱۰۴
CG-2%	۰،۳۸	۳۲۳	۸۵۰ (CAC)	۴۶۰	۱۹۱	۳۰۶	۱	۵۲
PG-4%	۰،۳۸	۳۲۳	۸۵۰ (PC)	۴۲۰	۱۷۵	۲۸۰	۱۵،۴	۱۰۴
PG-2%	۰،۳۸	۳۲۳	۸۵۰ (PC)	۴۴۵	۱۸۵	۲۹۶	۵،۳	۵۲

۴-عمل‌آوری

نمونه بتن های شاهد و نمونه بتن های الیافی پس از ساخت، قالب‌گیری شده و توسط میز لرزاننده متراکم شدند. پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از قالب خارج‌شده و به مدت ۷ روز در آب تحت عمل‌آوری مرطوب و بعدازآن در محیط اتاق، خارج از آب و در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد تحت عمل‌آوری خشک قرار گرفتند.

۵- اصول و روش‌های آزمون

۵-۱ مقاومت فشاری

آزمون مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های با ابعاد ۵۰ میلی‌متر مطابق با استاندارد ASTM C109 [۸] انجام‌گرفته است. این آزمون برای نشان دادن تأثیر الیاف شیشه‌بر مقاومت فشاری بتن ها صورت گرفته است و بخشی از رفتار

الیاف شیشه در ساختار مصالح پایه سیمانی را نشان می‌دهد. بدین منظور برای انجام این آزمون از جک هیدرولیکی و نمایشگر دیجیتالی با سرعت بارگذاری ۵۳۰ کیلوگرم بر ثانیه استفاده‌شده است.

۵-۲ مقاومت خمشی نهایی

برای بررسی مقاومت خمشی نمونه‌ها از قالب‌های منشوری ۴۰*۴۰*۱۶۰ میلی‌متری مطابق با آیین‌نامه EN 196 [۲۲] استفاده‌شده است. نمونه‌های خمشی در سن‌های ۲۸ و ۹۰ تحت آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای (نمونه‌ها در دونقطه روی تکیه‌گاه قرارگرفته و نیرو نیز در دونقطه به نمونه اعمال می‌شود) قرارگرفته‌اند. سرعت بارگذاری بر روی نمونه‌ها برابر با ۱/۰۱۵۸ میلیمتر بر دقیقه بوده است.

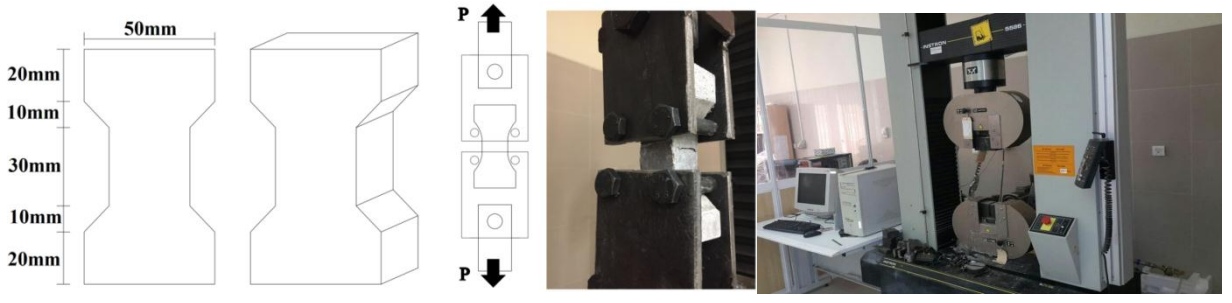
۵-۳ بررسی چقرمگی خمشی

چقرمگی خاصیتی از یک جسم است که تا حدی شکل‌پذیری اجسام را در برابر شکست نشان می‌دهد. اگر چقرمگی شکست یک ماده کم باشد، آن ماده به‌صورت ترد می‌شکند و هر چه چقرمگی شکست بالاتر رود احتمال شکست نرم افزایش می‌یابد. سرعت بارگذاری همان سرعت آزمایش مقاومت خمشی ۱/۰۱۵۸ میلیمتر بر دقیقه می‌باشد.

چقرمگی خمشی مساحت زیر منحنی خیز-نیرو می‌باشد که میزان انرژی جذب‌شده را توسط نمونه‌های بتنی نشان می‌دهد. بررسی چقرمگی مخلوط‌های ساخته‌شده مطابق آیین‌نامه ASTM C1018-97 [۷] انجام‌گرفته است.

۵-۴ مقاومت کششی نهایی

برای انجام آزمون مقاومت کششی، نمونه‌های کنترل و نمونه‌های الیافی تحت کشش مستقیم قرارگرفته تا خواص کششی نمونه‌های اصلاح‌شده الیافی و نمونه‌های فاقد الیاف با یکدیگر مقایسه شوند. برای انجام این آزمون از نمونه‌های براکتی‌که ابعاد آن مطابق شکل ۲ می‌باشد استفاده‌شده است. سرعت اعمال نیروی کششی در این آزمون برابر ۰٫۸۸ mm/min بوده است. مقاومت کششی نهایی برای هر طرح، میانگینی از مقاومت کششی ۳ نمونه در سنین مشخص می‌باشد.



شکل ۲- نمونه‌های مقاومت کششی و شماتیکی از کشش در این نمونه‌ها

۵-۵ مقاومت ضربه‌ای

آزمون مقاومت ضربه‌ای باهدف تعیین میزان مقاومت نمونه‌های بتنی تحت اعمال ضربه انجام می‌گردد. این آزمون بر اساس روش ACI 544.2R-89 [۳]انجام‌شده و روند انجام این آزمایش به صورتی است که یک صفحه با ابعاد ۲۰۰*۲۰۰ میلی‌متر در یک‌پایه بتنی جای گرفته سپس سطح صفحه را با وازلین و یا گریس چرب کرده تا از حرکت نمونه بر ورق خودداری گردد، سپس نمونه استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۶۰ میلی‌متر در دستگاه قرارگرفته و اطراف آن توسط یک فوم الاستومریک تا ایجاد اولین ترک در نمونه پوشانده شده است. پس از جایگذاری نمونه در دستگاه یک توپ استیل سخت با قطر ۶۰ میلی‌متر در مرکز نمونه قرار می‌گیرد تا بار ضربه

اعمـالی را از کوبـه بـه نمونـه منتقـل کنـد و سـپس کوبـه ۴/۵ کیلـوگرمی را از ارتفـاع ۴۵۷ میلـی‌متـری بـر روی نمونـه رهـا کرده و تعداد ضرباتی که سـبب ایجـاد اولـین تـرک در سـاختار نمونـه شـده یادداشـت مـی‌شـود؛ سـپس فـوم الاسـتومریک را از اطراف نمونه برداشته و این آزمـون را ادامـه داده تـا نمونـه کـاملاً شکسـته شـده و بـه سـه جـداره یـا چهـار جـداره اطـراف نمونـه تمـاس برقـرار کنـد سـپس تعـداد ضـربات را یادداشـت کـرده و بـه‌عنـوان عـدد گسـیختگی نهـایی در نظـر گرفتـه می‌شود.

شکل ۳ - دستگاه آزمون مقاومت ضربه

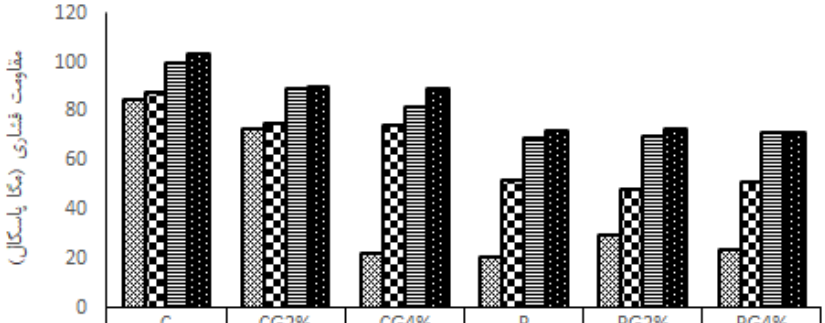
۶-۵ تغییر طول ناشی از جمع شدگی

بـرای تعیـین تغییـر طـول ناشـی از جمـع شـدگی بـتن کـه در قالـب‌هـای منشـوری سـاخته مـی‌شـوند از کمپراتـور جمـع شـدگی کـه مجهـز بـه عقربـه انـدیکاتور دیجیتـال بـا دقـت میکرومتـر و یـک میلـه مرجـع از آلیـاژ فـولادی مـی‌باشـد، استفاده‌شده است. کمپراتـور دارای پـیچ تنظـیم ارتفـاع بـوده کـه ایـن امـر انـدازه‌گیـری نمونـه‌هـا بـا ابعـاد متفـاوت را میسـر می‌سازد. آیین‌نامه‌ای که برای آزمون جمع شدگی مشخص‌شده است ASTM C490 [۶] می باشد.

۶-نتایج نمونه‌ها و بحث

۶-۱ مقاومت فشاری

نمودار مقاومت فشاری نمونـه‌هـا کـه در شـکل ۴ نشـان داده‌شـده اسـت میـانگینی از سـه نمونـه شکسـته شـده در سـنین ۱، ۷، ۲۸ و ۹۰ می‌باشد.



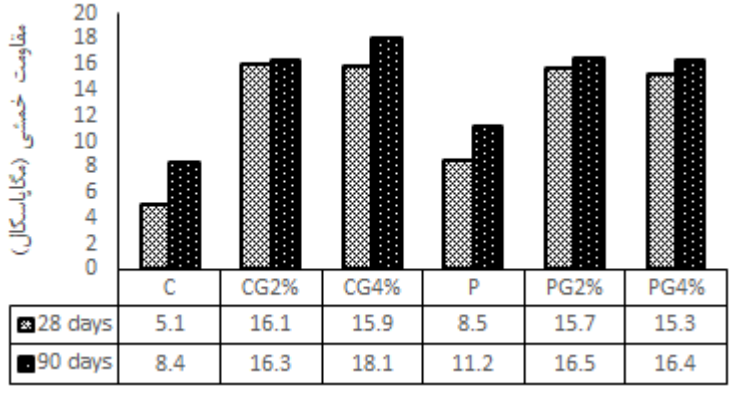
	C	CG2%	CG4%	P	PG2%	PG4%
1 day	85	73	22	21	30	24
7 days	88	75	74	52	48	51
28 days	100	89	82	69	70	71
90 days	103	90	89	72	73	71

شکل ۴ - مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۱، ۷، ۲۸ و ۹۰

با اضافه کردن الیاف شیشه به نمونه‌های ساخته‌شده باسیمان آلومینات کلسیم شاهد کاهش مقاومت می‌باشیم. این کاهش مقاومت می‌تواند به دلیل تأثیر منفی روانساز بر این نوع سیمان باشد. در نمونه CG4% با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی صورت گرفته کارایی بسیار کم شده لذا از روانساز بیشتری استفاده گردید که در نتیجه گیرش به تعویق افتاده بود. این مسئله نشان دهنده آن است که سیمان آلومینات کلسیم تعامل اثر خوبی با این روانساز نداشته است و مقاومت یک‌روزه آن نسبت به بقیه نمونه‌ها کم‌تر می‌باشد. در نمونه‌های سیمان پرتلند ساخته‌شده با الیاف شیشه شاهد کاهش مقاومت نمی‌باشیم.با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود که مقاومت نمونه‌های ساخته‌شده باسیمان آلومینات کلسیم به‌مراتب بیشتر از سیمان پرتلند می‌باشد و این به دلیل مقاومت سریع و همچنین تشکیل سریع ریزساختار می‌باشد. سیمان کلسیم آلومینات همچون سیمان پرتلند با گذشت زمان به تولید محصولات هیدراسیون ادامه می‌دهد لذا بهبود خواص مقاومتی اتفاق می‌افتد. شایان ذکر است که در مورد سیمان بررسی شده و در مدت زمان ۹۰ روز شواهدی از افت مقاومت مخلوط‌های سیمانی به دلیل تغییر فاز محصولات هیدراسیون مشاهده نگردید.

۶-۲ مقاومت خمشی نهایی

در این بررسی نمونه‌های آماده‌شده با ابعاد ۱۶۰*۴۰*۴۰ میلی‌متر تحت آزمون مقاومت خمشی نهایی قرار گرفتند. طی این آزمون در ۲۸ و ۹۰ روز برای هر طرح، ۳ نمونه با ابعاد مذکور تحت خمش قرار گرفتند و مقاومت میانگین به‌عنوان مقاومت خمشی نهایی مبنا در نظر گرفته شد. شکل ۵ نشان می‌دهد که برخلاف مقاومت فشاری با اضافه کردن الیاف مقاومت خمشی نهایی بتن نسبت به نمونه بتن شاهد افزایش می‌یابد. الیاف‌ها در برابر انتشار ترک‌ها مقاومت می‌کنند و تمایل به شکست ناگهانی ساختار بتن را کاهش می‌دهند و بنابراین باعث افزایش ظرفیت باربری بتن می‌شوند[۱۴,۱۳].



	C	CG2%	CG4%	P	PG2%	PG4%
28 days	5.1	16.1	15.9	8.5	15.7	15.3
90 days	8.4	16.3	18.1	11.2	16.5	16.4

شکل ۵-نمودار مقاومت خمشی آزمونه‌ها در سنین ۲۸ و ۹۰ روز

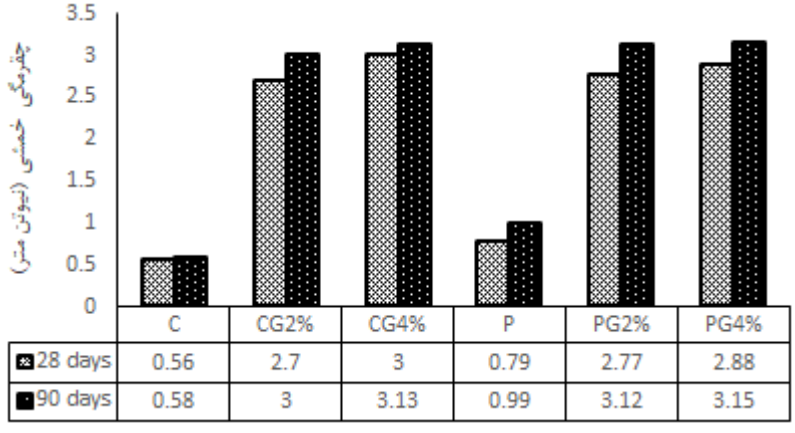
با افزودن الیاف شیشه به مخلوط، شاهد افزایش مقاومت خمشی در هر دو نوع سیمان می‌باشیم این افزایش مقاومت به این دلیل می‌باشد که الیاف شیشه قطر کمی دارند لذا به دلیل ضخامت کم این الیاف ناحیه انتقالی که اطراف الیاف و ماتریس سیمان شکل می‌گیرد از خواص مناسبی به لحاظ ریز ساختاری برخوردار می‌باشد. به همین دلیل پیوستگی مناسبی بین الیاف و خمیر سیمان ایجاد شده که سبب درگیری مطلوب الیاف شیشه حین فرآیند بارگذاری می‌گردد. در این حالت الیاف به عنوان بخش یکپارچه‌ای از کامپوزیت سیمانی عمل می‌کنند که به لحاظ مقاومت کششی بالا موجب بهبود مقاومت خمشی بتن می‌شوند. همان‌طور که از شکل ۵ مشاهده می‌شود نمونه CG2% و CG4% به ترتیب مقاومت‌هایی برابر با ۱۶/۱ و ۱۵/۹ مگاپاسکال در سن ۲۸ روز کسب کرده‌اند. همچنین

نتـایج نشـانگر آن هسـتند کـه افـزایش درصـد الیـاف از ۲٪ بـه ۴٪ تـأثیر چنـدانی در بهبـود مقاومـت خمشـی مخلـوط‌هـا نداشته است.

از مقایسـه دو سـیمان آلومینـات کلسـیم و سـیمان پرتلنـد در آزمـایش مقاومـت خمشـی درمـی‌یـابیم کـه در نمونـه‌هـای الیافی تقریبـاً مقاومـت مخلـوط‌هـای حـاوی سـیمان پرتلنـد و آلومینـات کلسـیم مشـابه بـوده لـیکن در مخلـوط بـدون الیـاف نمونـه باسـیمان پرتلنـد بـه دلیـل متفـاوت بـودن محصـولات هیدراسـیون، قـدری بهتـر از سـیمان آلومینـات کلسـیم در ایـن آزمایش عمل کرده اسـت. محصـولات هیدراسـیون سـیمان هـای پرتلنـد بـا سـیمان آلومینـات کلسـیم متفـاوت هسـتند و بـه نظر میرسد عملکرد مطلـوبتری بـه لحـاظ مشخصـاتی از بـتن کـه تحـت تـاثیر تـنش‌هـای کششـی هسـتند دارنـد. در نتیجـه در نتـایج متفـاوتی در دو آزمـون فشـاری و خمشـی بـه دسـت آمـده اسـت. همـان‌طـور کـه در شـکل ۵ مشـهود مـی‌باشـد نمونه P، ۱۱/۲مگاپاسکال در سن ۹۰ روز مقاومت خمشی کسب کرده است.

۶-۳ چقرمگی خمشی الاستیک

در شـکل شـماره ۶ چقرمگـی خمشـی الاسـتیک (مسـاحت زیـر منحنـی خیـز - نیـرو) در سـن ۲۸ و ۹۰ روز مشـاهده می‌گردد. بـا افـزودن الیـاف شیشـه چقرمگـی تـا حـد مطلـوبی افـزایش مـی‌یابـد. یکـی از ویژگـی‌هـای الیـاف مقاومـت بـالای کششی آن‌ها بوده کـه تـا حـدی ضـعف‌هـای ریزسـاختار مـاتریس بتنـی را جبـران مـی‌نمایـد و همـین امـر بـه جـذب انـرژی نمونه‌ها و درنتیجه افزایش چقرمگی خمشی الاستیک مخلوط‌های اصلاح‌شده با الیاف کمک می‌کند.



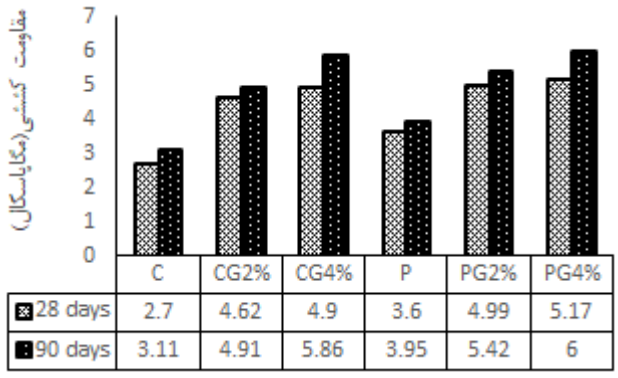
	C	CG2%	CG4%	P	PG2%	PG4%
28 days	0.56	2.7	3	0.79	2.77	2.88
90 days	0.58	3	3.13	0.99	3.12	3.15

شکل ۶- چقرمگی خمشی در سن ۲۸ و ۹۰ روز

الیـاف شیشـه جـاذب بسـیار خـوب انـرژی مـی‌باشـد در نتیجـه بیشـترین میـزان چقرمگـی را بـه خـود کسـب کـرده اسـت همان‌طور که در شـکل ۶ مشـاهده مـی‌گـردد، چقرمگـی نمونـه ۲٪ الیـاف شیشـه سـاخته شـده بـا سـیمان آلومینـات کلسـیم در سـن ۹۰ روز نسـبت بـه نمونـه CAC، ۶ برابـر افـزایش‌یافتـه اسـت هرچنـد بـا افـزایش درصـد ایـن الیـاف از ۲٪ بـه ۴٪ میـزان چقرمگـی بهبـود چنـدانی نیافتـه اسـت. در مقایسـه مخلـوط‌هـای حـاوی سـیمان پرتلنـد و آلومینـات کلسـیم تفـاوت ملموسی ازلحاظ چقرمگی و میـزان انـرژی جـذب‌شـده مشـاهده نمـی‌گـردد لـیکن همچـون نتـایج مقاومـت خمشـی مخلـوط ساده حاوی سیمان پرتلند چقرمگی بیشتری نسبت به مخلوط باسیمان آلومینات کلسیم داشته است.

۶-۴ مقاومت کششی نهایی

در شـکل شـماره ۷ شـاهد نتـایج مقاومـت کششـی نهـایی در سـن ۲۸ و ۹۰ روز مـی باشـیم. مطـابق شـکل بـا افـزودن الیاف به ماتریس سـیمانی، مقاومـت کششـی بهبـود مـی‌یابـد. کـه دلیـل ایـن امـر پیوسـتگی خـوب الیـاف شیشـه و مـاتریس سیمان می‌باشد.



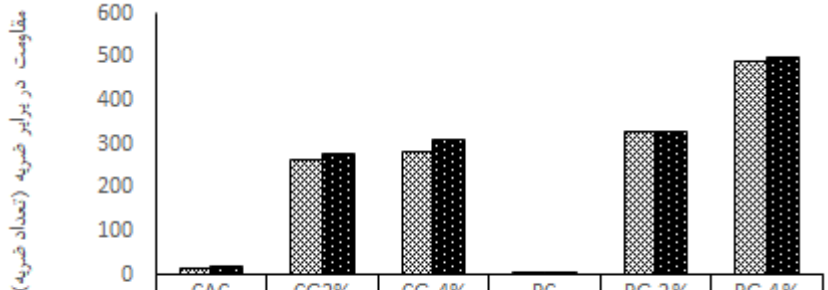
	C	CG2%	CG4%	P	PG2%	PG4%
28 days	2.7	4.62	4.9	3.6	4.99	5.17
90 days	3.11	4.91	5.86	3.95	5.42	6

شکل ۷- مقاومت کششی نهایی نمونه‌ها در سن ۲۸ و ۹۰ روز

با توجه به شکل مشاهده می‌شود که نمونه‌های CG2% و CG4% به ترتیب ۴/۶۲ و ۴/۹ مگا پاسکال در سن ۲۸ روز و نمونه‌های PG2% و PG4% به ترتیب ۴/۹۹ و ۵/۱۷ مگاپاسکال مقاومت کششی کسب کرده‌اند که نشان‌دهنده آن است با اضافه کردن ۴٪ الیاف شیشه در این سن مقاومت کششی نمونه حاوی سیمان آلومینات کلسیم تا ۲ برابر و نمونه حاوی سیمان پرتلند تا ۱/۵ برابر افزایش‌یافته است. با افزایش درصد الیاف از ۲ به ۴ درصد مقاومت کششی بهبود ناچیزی یافته است. در مقایسه نمونه‌های الیافی حاوی سیمان پرتلند و CAC از لحاظ مقاومت کششی تفاوت زیادی مشاهده نمی‌شود لیکن در این آزمون نیز مانند مقاومت خمشی، نتایج مربوط به نمونه‌های بدون الیاف حاوی سیمان پرتلند مقاومت کششی بیشتری نسبت به نمونه‌های بدون الیاف باسیمان CAC دارند.

۶-۵ مقاومت ضربه‌ای

در آزمون مقاومت ضربه‌ای دو پارامتر ایجاد اولین ترک بر سطح نمونه و گسیختگی نهایی که وابسته به تعداد ضربات وارده بر سطح نمونه می‌باشد ملاک عمل قرارگرفته است. نتایج آزمون مقاومت ضربه‌ای که در سن ۱۰۰ روز بر روی نمونه‌های اصلاح‌شده با الیاف شیشه و نمونه‌های کنترل انجام‌شده است در شکل ۸ مشهود می‌باشد. یکی از خواصی که الیاف برای مخلوط‌های پوششی ایجاد می‌کند، افزایش مقاومت ضربه‌ای این نمونه‌ها می‌باشد.



	CAC	CG2%	CG-4%	PC	PG-2%	PG-4%
initial crack	16	263	284	2	330	490
final failure	17	276	311	6	330	498

شکل ۸- مقاومت ضربه‌ای نمونه‌ها در سن ۱۰۰ روز

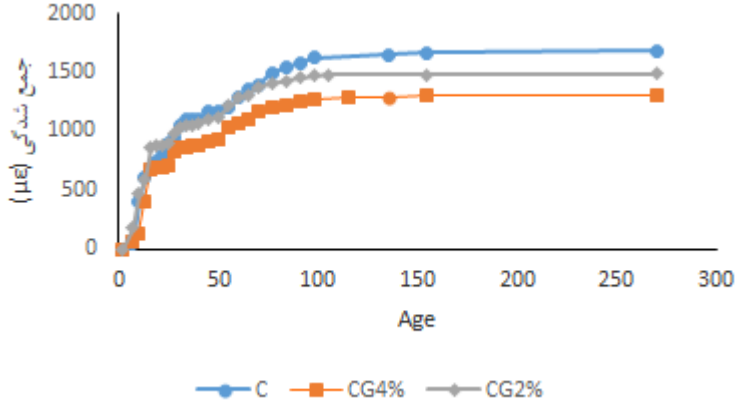
افزودن الیاف شیشه به مخلوط‌ها مقاومت ضربه‌ای را افزایش می‌دهد. همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد الیاف شیشه به دلیل ریز بودن پیوستگی خوبی با ماتریس سیمانی داشته لذا سبب انسجام ساختاری مطلوبی می‌شوند که این امر باعث افزایش مقاومت ضربه‌ای آن‌ها می‌گردد. همچنین الیاف شیشه جذب انرژی زیادی دارد به‌طوری‌که

مشاهده می‌شود در نمونه‌های CG4% و PG4% به ترتیب تحت ۲۸۴ و ۴۹۰ ضربه، اولین ترک بر روی سطح نمونه ایجاد می‌شود.

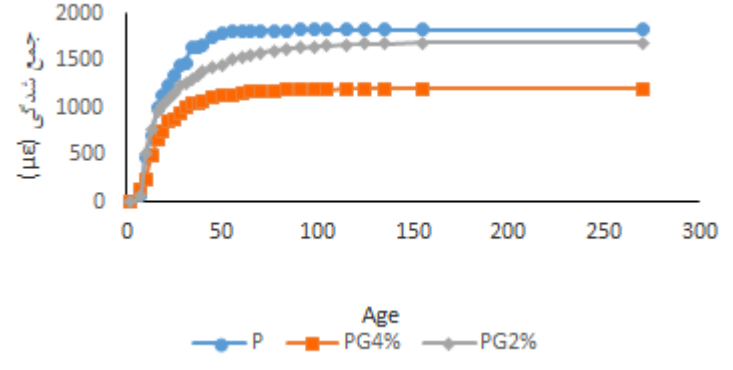
نمونه‌های دارای الیاف جذب انرژی بالایی دارند درصورتی‌که نمونه‌های کنترل تحت ضربه‌های کمتر کاملا گسیخته می‌شوند. در مقایسه نمونه‌های کنترل ساخته‌شده باسیمان پرتلند و سیمان آلومینات کلسیم مشاهده می‌شود که سیمان آلومینات کلسیم در برابر ضربه بهتر از سیمان پرتلند عمل می‌کند و این به دلیل تشکیل سریع ریزساختار و کسب مقاومت در سنین پایین می‌باشد.

۶-۶ تغییر طول ناشی از جمع شدگی

شکل‌های شماره ۹ و ۱۰ جمع شدگی طرح‌های ساخته‌شده را نشان می‌دهد. آزمایش جمع شدگی بر روی نمونه‌ها انجام‌گرفته و تا سن ۲۷۰ روز اندازه‌گیری شده است.



شکل ۹- جمع شدگی نمونه‌های ساخته‌شده باسیمان آلومینات کلسیم



شکل ۱۰- جمع شدگی نمونه‌های ساخته‌شده باسیمان پرتلند

مطابق نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌گردد که افزودن الیاف باعث کاهش جمع شدگی نمونه‌ها می‌شود و هر چه درصد الیاف بیشتر باشد جمع شدگی نمونه‌ها کم‌تر می‌شود زیرا الیاف جلوی انتشار ریزترک‌ها را می‌گیرد. اضافه کردن ۴٪ الیاف شیشه به نمونه حاوی سیمان آلومینات کلسیم حدود ۲۲/۵ درصد و در نمونه حاوی سیمان پرتلند حدود ۳۴/۵ درصد جمع شدگی کاهش می‌یابد. با افزایش الیاف از ۲ به ۴ درصد در نمونه حاوی سیمان آلومینات کلسیم حدود ۱۲ درصد و در نمونه حاوی سیمان پرتلند حدود ۲۹ درصد کاهش جمع شدگی مشاهده گردید. در مقایسه دو سیمان پرتلند و آلومینات کلسیم مشاهده می‌شود که جمع شدگی این نمونه‌ها تفاوت زیادی نسبت به همدیگر ندارند.

۷- نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌ها و ارزیابی‌های صورت گرفته بر روی بتن های حاوی الیاف شیشه نتایج زیر حاصل‌شده است:

۱-مقاومت فشاری نمونه‌ی کنترل (بدون الیاف) سیمان آلومینات کلسیم به دلیل کسب مقاومت سریع و تشکیل سریع ریزساختار نسبت به سیمان پرتلند بیشتر گردید. با افزایش سن نیز مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با سیمان آلومینات کلسیم بیشتر از نمونه‌های ساخته شده با سیمان پرتلند می‌باشد به این دلیل که سیمان آلومینات کلسیم مانند همه سیمان ها تولید محصولات هیدراسیون دارد و افزایش سن سبب افزایش تولید محصولات هیدراسیون و رشد مقاومت می شود. همچنین با اضافه کردن الیاف شیشه در مخلوط‌های حاوی سیمان آلومینات کلسیم مقاومت فشاری کاهش می‌یابد به این دلیل که الیاف شیشه کارایی را کاهش داده و مجبور به افزایش روانساز می‌گردد. اضافه کردن الیاف شیشه به نمونه‌های حاوی سیمان پرتلند کاهش محسوسی مشاهده نشد.

۲-در آزمایش مقاومت خمشی مشاهده شد که مقاومت نمونه‌های کنترل سیمان پرتلند به دلیل تشکیل کند ریزساختار قدری نسبت به سیمان CAC بیشتر گردید. با اضافه کردن الیاف شیشه به دلیل ریز بودن الیاف شیشه و پیوستگی خوب آن با ماتریس سیمانی، مقاومت خمشی افزایش پیدا می‌کند. لیکن در مقایسه مخلوط‌های هر دو نوع سیمان با افزایش الیاف تفاوت چندانی مشاهده نشد. همچنین افزایش درصد الیاف تأثیر چندانی در بهبود مقاومت خمشی نداشته است.

۳-نمونه کنترل سیمان پرتلند در چقرمگی، همانند مقاومت خمشی نسبت به نمونه کنترل سیمان آلومینات کلسیم بیشتر است. همچنین با افزودن الیاف شیشه به دلیل جذب بسیار خوب انرژی این نوع الیاف چقرمگی خمشی افزایش یافت و هر چه درصد الیاف بیشتر شود مقاومت چقرمگی قدری افزایش می‌یابد اما تفاوت چندانی در مخلوط‌های الیافی در هر دو نوع سیمان مشاهده نگردید.

۴-با توجه به داده های مقاومت کششی، مشاهده شد که این نتایج با نتایج مقاومت خمشی تطابق داشته و با افزودن الیاف شیشه به مقدار ۴٪ مقاومت کششی در نمونه حاوی سیمان CAC تا ۲ برابر در سن ۲۸ روز افزایش‌یافته است و دلیل این افزایش پیوستگی مطلوب الیاف شیشه با ماتریس سیمانی می‌باشد.

۵-تحت آزمون ضربه نمونه‌های کنترل در هر دو نوع سیمان در کمترین ضربه ازهم‌گسیخته می‌شوند لیکن نمونه کنترل حاوی سیمان آلومینات کلسیم در این آزمون به دلیل کسب مقاومت در سنین پایین و تشکیل سریع ریزساختار مقاوم‌تر از نمونه کنترل حاوی سیمان پرتلند می‌باشد. افزودن الیاف شیشه به دلیل جذب بالای انرژی و پیوستگی با ماتریس سیمانی که سبب انسجام ساختاری می‌شود، مقاومت در برابر ضربه را افزایش می‌دهد و همچنین با افزایش درصد الیاف مقاومت ضربه‌ای نیز زیاد می‌شود.

۶-جمع شدگی در نمونه کنترل در هر دو نوع سیمان تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند اما با افزودن الیاف شیشه به دلیل جلوگیری از انتشار ریزترک‌ها جمع شدگی کاهش می‌یابد و هرچه درصد الیاف زیاد شود جمع شدگی کاهش بیشتری می‌یابد. همچنین با افزایش درصد از ۲ به ۴ درصد در نمونه حاوی سیمان پرتلند حدود ۲۹ درصد کاهش جمع شدگی تا سن ۲۷۰ روز مشاهده گردید.

تشکر

کلیه ساخت های آزمایشگاهی و آزمایش های صورت گرفته در این پژوهش در آزمایشگاه تکنولوژی و دوام بتن دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی کرمان انجام گرفته است.

۸-مراجع

[۱] کمیته تدوین طرح ملی مخلوط بتن ایران، روش ملی طرح مخلوط بتن، تهران، مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی

[۲] ACI Committee 318. 2014. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14).
[۳] ACI Committee 544, "Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete 544.2R-89," Aci, vol. 544.2R, no. Reapproved, p. 12, 1999.
[٤] Â. Alcocel, P. Garce, and S. Chincho, "General study of alkaline hydrolysis in calcium aluminate cement mortars under a broad range of experimental conditions," Cement and concrete research, vol. 30, no. 11, pp. 1689–1699, 2000.
[٥] ASTM C. 490-04," Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement, Paste, Mortar, and Concrete". In: American Society for Testing and Materials. 2004.
[٦] Anon. n.d. D. Brigante, New Composite Materials: Selection, Design, and Application, Springer International Publishing, Switzerland, 2014.
[۷] ASTM, "ASTM C1018-97 Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)," ASTM Stand., 1997.
[۸] ASTM International, ASTM C109/C109M-16a. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50mm] Cube Specimens). 2016.
[۹] Barnes, Paul and John Bensted. Structure and Performance of Cements. CRC Press, 2002.
[۱۰] Gu, Ping, J. J. Beaudoin, E. G. Quinn, and R. E. Myers, "Early strength development and hydration of ordinary portland cement/calcium aluminate cement pastes," Advanced Cement Based Materials, vol. 6, no. 2, pp. 53–58, 1997.
[۱۱] Jiang, K. Fan, F. Wu, and D. Chen, "Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete," Materials and Design, vol. 58, pp. 187–193, 2014.
[۱۲] Hewlett, Peter C. Lea's Chemistry of Cement and Concrete. Elsevier, 2003.
[۱۳] K. S. Kene, V. S. Vairagade, and S. Sathawane, "Experimental Study on Behavior of Steel and Glass Fiber Reinforced Concrete Composites," Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science, vol. 2, no. 4, pp. 125–130, 2012.
[۱٤] Löber and K. Holschemacher, "Structural Glass Fiber Reinforced Concrete for Slabs on Ground," World Journal of Engineering and Technology, vol. 02, no. 03, pp. 48–54, 2014.
[۱٥] Mostafa, Nasser Y., Z. I. Zaki, and O. H. Abd, "Cement & Concrete Composites Chemical activation of calcium aluminate cement composites cured at elevated temperature," Cement and Concrete Composites, vol. 34, no. 10, pp. 1187–1193, 2012.
[۱٦] Muhammed İSKENDER, "Glass Fibre Reinforced Concrete (GFRC)," El-Cezerî Journal of Science and Engineering, vol. 5, pp. 136–162, 2018.
[۱۷] Newman, and B. S. Choo, Advanced concrete technology 3: processes. Butterworth-Heinemann, 2003.
[۱۸] PCI, Committee on Glass fibre Reinforced Concrete Panels, "Recommended Practice for Class Fiber Reinforced Concrete Panels," PCI Journal, Vol. 32 , 1981.
[۱۹] Scrivener, Karen, "Calcium aluminate," Advanced Concrete Technology Set, p. 1, 2003.
[۲۰] Shaikh, Faiz Uddin Ahmed, "Review of mechanical properties of short fibre reinforced geopolymer composites," Construction and Building Materials, vol. 43, pp. 37–49, 2013.
[۲۱] Soboyejo, Mechanical properties of engineered materials, vol. 152, CRC press, 2002.
[۲۲] British Standards,. "BS EN 196-1: Methods of testing cement — determination of strength," 2005.
[۲۳] Stinnessen, Ingo, Andreas Buhr, Rainer Kockegey-Lorenz, and Raymond Racher, "High purity calcium aluminate cements, production and properties," in Conference on Mineral Dalian, 2002.
[۲٤] Swamy, Ed., Fibre Reinforced Cement and Concrete Proceedings of the Fourth International Symposium held by RILEM (The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures) and organized by the Department of Mechanical and Process Engi. Taylor & Franics, 1992.
[۲٥] Vairagade, Vikrant S., Kavita S. Kene, and Tejas R. Patil, "Comparative Study of Steel Fiber Reinforced Over Control Concrete," Scientific and Research Publications, vol. 2, no. 5, pp. 3–5, 2012.

Investigating the Effect of Glass Fiber on the Mechanical Properties of Cement Composites

Sarvenaz Moetamed
M.Sc in Hydraulic Structures Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran
Sarvenazmoetamed@gmail.com

Hesam Madani*
Assistant professor, Faculty Member of Civil Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran
h.madani@kgut.ac.ir

Abstract
In this research, a comparison has been made between the mechanical properties of cement based mixtures containing glass fiber. For this purpose, a type II portland cement and a calcium aluminate cement have been used. In order to investigate the mechanical characteristics, the tests including compressive strength, flexural strength, toughness, ultimate tensile strength, impact resistance and drying shrinkage of the mixtures were evaluated at ages from 28 days to 270 days. Glass fiber was incorporated in the mixes at replacement levels of 2 and 4 percent (percent of the total volume of the mixture). Based on the tests, the results indicate that the mixtures made with calcium aluminate had improved properties compared to the mixtures made with Portland cement. Furthermore, by adding glass fiber to the mixes, the flexural strength was increased by about 32% in 28 days compared to the plain mixture. Adding glass fibers in both types of cement also improved tensile strength, flexural toughness and impact resistance, as well as drying shrinkage.
key words: Portland Cement,Calcium Aluminate Cement,Glass Fiber