مجله علمی – پژوهشی
مهندسی عمران مدرس
دوره بیستم، شماره ۱، سال ۱۳۹۹

تاثیر استفاده از هیبرید الیاف فولادی و الیاف شیشه بر مشخصات مکانیکی، جمع‌شدگی و دوام کامپوزیت‌های سیمانی

سروناز معتمد[۱]، سید حسام مدنی *[۲]

۱-کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

۲- عضو هیئت علمی دانشکده عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

***h.madani@kgut.ac.ir**

تاریخ دریافت ۹۷/۱۰/۱۰ تاریخ پذیرش ۹۸/۰۸/۱۷

چکیده

این مطالعه به بررسی تأثیر الیاف فولادی، الیاف شیشه و هیبرید آنها بر خواص کامپوزیت‌های سیمانی می‌پردازد. خواص مکانیکی مورد بررسی شامل مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بوده و میزان جذب انرژی نمونه‌ها با معیار چقرمگی خمشی تعیین‌شده است. در مخلوط‌های مطالعه شده سیمان پرتلند و آلومینات کلسیم به عنوان عامل چسباننده در ساختار استفاده شده‌اند. به منظور بررسی تأثیر الیاف ازنمونه‌های حاوی ۲ درصد الیاف فولادی (درصدی از حجم کل مخلوط)، ۲ درصد الیاف شیشه (درصدی از حجم کل مخلوط) وهیبرید این دو الیاف (۲٪ الیاف فولادی و ۲٪ الیاف شیشه) بهره گرفته شده است. استفاده از الیاف فولادی و همچنین الیاف شیشه در مخلوط‌های سیمانی باعث افزایش مقاومت خمشی می‌شود، لیکن هیبرید آن با الیاف شیشه مقاومت خمشی بیشتر از مخلوط‌های حاوی الیاف فولادی را به ارمغان می‌آورد. همچنین مخلوط‌های هیبریدی میزان جمع شدگی را به میزان ۲۰ تا ۳۰ درصد نسبت به مخلوط شاهد در یک دوره ۲۷۰ روزه کاهش داده است. در کنترل خواص دوام که با استفاده از نفوذپذیری یون کلراید موردسنجش قرار داده شد، مخلوط‌های اصلاح شده با الیاف‌های فولادی و شیشه و همچنین هیبرید این الیاف دارای نفوذ پذیری یون کلراید بالاتر در مقایسه با سایر مخلوط‌ها بوده‌اند. الیاف شیشه به دلیل افزایش انسجام ساختاری میان خمیر و الیاف فولادی و مسدود نمودن تخلخل‌های پیرامون الیاف فولادی سبب کاهش در میزان نفوذ یون کلراید شده است اما با این وجود میزان نفوذ یون کلراید بالایی را داشته‌اند.

واژگان کلیدی: سیمان آلومینات کلسیم، سیمان پرتلند، الیاف فولادی، الیاف شیشه، خواص مکانیکی، جمع شدگی، دوام

۱- مقدمه

سیمان آلومینات کلسیم یک سیمان هیدرولیکی معدنی محسوب می‌شود که به دلیل مقدار بالای اکسید آلومینیوم و مقدار کم سیلیس نسبت به سایر سیمان‌ها، به سیمان آلومینات کلسیم معروف است. سیمان آلومینات کلسیم دارای ویژگی‌هایی مانند کسب مقاومت زودهنگام، مقاومت مناسب در برابر حملات اسیدی و مقاومت بالا در برابر سایش و ضربه است. این نوع سیمان می‌تواند در کاربرد-های خاص از قبیل لوله‌های فاضلاب، سطح بزرگراه‌ها و نیز تعمیرات باند فرودگاه‌ها بکار رود، همچنین استفاده ویژه این سیمان در کاربردهای سازه‌ای گوناگون گزارش شده است [1–11].

در مطالعه حاضر علاوه بر سیمان پرتلند، سیمان کمتر شناخته شده آلومینات کلسیم بررسی شده است. شایان ذکر است در بتن‌های الیاف شیشه از پلیمرها استفاده می‌شود که دلیل اصلی آن کمک به عمل آوری بتن است. به دلیل کسب سریع خواص مقاومتی سیمان آلومینات کلسیم، این ایده مطرح می‌شود که بتوان با حذف پلیمر از سیمان آلومینات کلسیم استفاده شود که به دلیل کسب خواص سریع نیاز به عمل‌آوری طولانی ندارد.

پینگ‌گو و همکاران [8] به بررسی مقاومت در سنین پایین و هیدراسیون بتن‌های ساخته‌شده با سیمان‌های دو جزئی پرداخته‌اند. آن‌ها در این مطالعه از دو نوع سیمان پرتلند و آلومینات کلسیم استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند، بتنی که مقدار سیمان آلومینات کلسیم آن از مقدار سیمان پرتلند بیشتر بوده است، بیشترین مقاومت را کسب کرده است. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که می‌توان با افزودن سیمان آلومینات کلسیم به سیمان پرتلند زمان گیرش را تنظیم کرد.

لینگلین و همکاران [12] به بررسی تشکیل اترینگایت در هیدراته‌های ترکیب سه‌گانه سیمان پرتلند/سیمان آلومینات کلسیم/سولفات کلسیم در دماهای پایین پرداختند. نتایج نشان داده است که مقاومت فشاری و خمشی ملات-های حاوی آلومینات کلسیم به‌طور پیوسته رشد می‌کند. مصطفی و همکاران [7] در یک مطالعه پیرامون سیمان آلومینات کلسیم از دوده سیلیسی و خاکستر بادی به‌عنوان درصد جایگزینی از سیمان آلومینات کلسیم در این ترکیبات استفاده نمودند و دریافتند که این مواد سبب بهبود در خواص مکانیکی مخلوط‌های پایه سیمان آلومینات کلسیم شده و در این بین خاکستر بادی عملکرد مطلوب‌تری در مقایسه با دوده سیلیسی ایفا کرده است.

کاردوسو و همکاران [13] در رابطه با تجزیه فازهای سیمان آلومینات کلسیم بیان می‌کنند که: ژل آلومین در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، CAH_{10} در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، C_2AH_8 در محدوده دمایی ۱۷۵ تا ۱۹۵ درجه سانتی‌گراد، AH_3 در محدوده ۲۱۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و C_3AH_6 در محدوده دمایی ۲۴۰ تا ۳۷۰ درجه سانتی‌گراد دچار آب‌زدایی می‌شوند. البته ولتاین آنتونیک و همکاران [14] در رابطه با کریستال‌های مکعبی C_3AH_6 بیان می‌کنند که در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد خروج آب در این ترکیب صورت می‌گیرد و شروع تجزیه هیدارته C_3AH_6 صورت می‌پذیرد.

الیاف می‌تواند خواصی از قبیل چقرمگی، مقاومت خمشی، مقاومت کششی، مقاومت در برابر ضربه، مقاومت سایشی و بعضا عایق صدا بودن را تقویت نمایند. به همین لحاظ استفاده و کاربرد الیاف در بتن و مشتقات آن روزبه‌روز افزایش‌یافته است [15–17].

نخستین مطالعات روی الیاف فولادی با شکل هندسی صاف نشان از افزایش چشمگیر شکل‌پذیری و تحمل بار این ترکیب کامپوزیتی داشته است که با گذشت زمان و تنوع انواع گوناگون الیاف فولادی، دستاوردهای ارزشمندتری نیز بدست آورده‌اند [18,19]. در گذشته بررسی‌هایی روی الیاف شیشه‌ای از جنس بوروسیلیکات با نام تجاری پیرکس (E-glass) و الیاف شیشه‌ای از جنس کربنات سدیم-آهک-سیلیس (A-glass) صورت گرفته بود که به دلیل ناپایداری این دو نوع الیاف در محیط‌های قلیایی عملکرد الیاف شدیدا تنزل می‌یافت. دنباله بررسی‌ها

منتهی به استفاده از الیاف شیشه‌ای مقاوم در مقابل محیط‌های قلیایی (AR-glass) برای تولید محصولات پایدارتر بتنی شد که به بتن‌های GFRC شهرت یافتند [20,21].

لبر و همکاران [15] به بررسی بتن مسلح شده با الیاف شیشه 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 بخشند. همچنین الیاف شیشه قادر به افزایش مقاومت خمشی به دلیل مقاومت کششی بالای الیاف شیشه که بین ۱۷۰۰–۳۷۰۰ مگاپاسکال هستند و پیوند خوب آن‌ها با ماتریس سیمان است. افروغ ثابت و همکاران [16] بتن‌های فوق توانمند مسلح شده با الیاف فولادی را مطالعه کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که اضافه کردن الیاف فولادی باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود. با این وجود افزودن الیاف فولادی بیش از ۲ درصد سبب کاهش مقاومت در اثر کاهش کارایی و افزایش تخلخل می‌شود. همچنین مشاهده شد که شکل الیاف فولادی تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود مقاومت فشاری ندارد. تأثیر الیاف فولادی در افزایش مقاومت کششی و مقاومت خمشی به‌طور قابل‌توجهی بیشتر ازآنچه در بهبود مقاومت فشاری است، می‌باشد.

کمال و همکاران [22] رفتار و مقاومت تیرهای ساخته شده با بتن فوق توانمند با الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن به صورت جداگانه بررسی کرده‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن و فولادی باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شوند. همچنین الیاف رفتار ترک‌خوردگی را بهبود می‌بخشند.

لایم و همکاران [23] به رفتار وابسته به اندازه و هندسه الیاف فولادی در بتن‌های فوق توانمند پرداختند. آن‌ها از دو نوع الیاف فولادی پیچ‌خورده و الیاف فولادی صاف استفاده کرده‌اند. نتایج نشان داد که اندازه و هندسه مختلف الیاف تأثیر قابل توجهی بر مقاومت ترک‌خوردگی نداشته‌اند درحالی‌که آثار ملموسی بر مقاومت فشاری، ظرفیت جذب انرژی و رفتار ترک‌خوردگی ایجاد می‌کنند.

با توجه به این که ترکیب دو الیاف فولادی و شیشه در ساختار مخلوط‌های پایه سیمانی به ویژه مخلوط‌های پایه سیمان آلومینات کلسیمی استفاده نشده است از همین حیث در این مطالعه از دو الیاف فولادی و شیشه به صورت ترکیبی استفاده کرده است تا تاثیر همزمان آن‌ها بر ساختار مخلوط‌های پایه سیمانی بررسی شود. شایان ذکر است بتن‌های GFRC معمولا رفتاری ترد دارند در صورتی که کامپوزیت‌های ساخته شده از الیاف فولادی می‌توانند رفتاری شکل‌پذیر داشته باشند. پس این پژوهش با ایده بهبود رفتار بتن‌های GFRC با کمک الیاف فولادی انجام شده است. در مطالعه آزمایشگاهی حاضر، مشخصات مکانیکی نمونه‌ها از قبیل مقاومت فشاری و خمشی بررسی و ارزیابی‌شده است. همچنین به منظور بررسی عملکرد الیاف بر سایر خواص، میزان چقرمگی خمشی و تغییر طول نمونه‌ها نیز بررسی‌شده است.

۲- مواد و مصالح

۲-۱ - سیمان

در این پژوهش از دو نوع سیمان پرتلند و آلومینات کلسیم به صورت مجزا استفاده شده است. سیمان پرتلند و آلومینات کلسیم مصرفی به ترتیب از نوع تیپ II کرمان و آلومینات کلسیم IRC-40 است. سطح ویژه سیمان آلومینات کلسیم ۳۱۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم و سطح ویژه سیمان پرتلند ۲۹۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم است. آنالیز شیمیایی سیمان‌ها که با روش XRF مشخص‌شده است که در جدول (۱) مشهود است.

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سیمان

Chemical Analysis							
Cement type	SiO_2 %	Al_2O_3%	Fe_2O_3%	SO_3 %	MgO %	CaO %	Ti_2O %
PC	21.5	4.95	3.97	2.20	1.75	63.52	-
CAC	4	35	16.5	-	1.5	40	3

Table 1. Chemical and physical properties of cement

۲-۲- سنگدانه

در این بررسی از سنگدانه سیلیسی با دانه‌بندی پیوسته استفاده شده است. ماسه‌های مصرفی از شرکت کهبد کرمان زمین تهیه‌شده و دارای سه نوع دانه‌بندی مختلف با ابعاد ذرات ۰/٦ تا ۲/۳٦، ۰/۰٤ تا ۰/۵ و کوچک‌تر از ۰/۰۱۵ میلی‌متر هستند که به ترتیب ٤۸، ۲۰ و ۳۲ درصد از سهم دانه‌بندی را در این پژوهش به خود اختصاص داده‌اند. میزان رطوبت اشباع با سطح خشک ترکیبی ماسه‌های مصرفی که بر اساس استاندارد ASTM C566 تعیین می‌شود برابر۰/٦٪ بوده و وزن مخصوص این ماسه‌ها برابر ۲۵۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب مطابق استاندارد ASTM C29 محاسبه‌شده است. شکل (۱) نمونه سنگدانه‌های مصرفی را نشان می‌دهد.

Fig. 1. The utilized aggregates

شکل ۱. سنگدانه مصرفی

۲-۳- الیاف

در این پژوهش از الیاف فولادی با روکش مسی و طول ۲۵ میلی‌متر که از کارخانه فولاد عرفان و همچنین از الیاف شیشه با طول ۲۵ میلی‌متر استفاده‌شده که از کارخانه دیسمان تهیه شده‌اند. سایر مشخصات آن در جدول شماره (۲) و الیاف ها در شکل(۲) قابل‌مشاهده است.

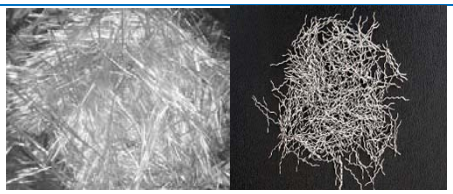

Fig. 2. Glass fiber (right) and Steel fiber (left)

شکل ۲. الیاف شیشه (سمت راست) و الیاف فولادی (سمت چپ)

جدول ۲. مشخصات الیاف فولادی و شیشه

Properties	Glass	Steel
Tensile strength (MPa)	1700	>1100
Elastic modulus (GPa)	200	80.4
Length (mm)	25	25
Diameter (mm)	0.013	0.7
Elongation%	-	3%
Moisture content%	0.2%	-
Geometry	smooth	corrugated

Table. 2. properties of fibers

۲-٤- روانساز

در این پژوهش از فوق روان کننده مایع بر پایه پلی‌کربوکسیلات اتر استفاده شده است که pH آن برابر ٦ و وزن مخصوص آن ۱/۰۸g/cm3 است.

۳- نسبت‌های اختلاط

در این بررسی مقدار سیمان مصرفی در حجم واحد ۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.

جدول ۳. نسبت‌های مخلوط مطالعه شده

Name	Kg/m³					
	Cement	Water	Sand	Glass fiber	Steel fiber	Superplasticizer
C	850 (CAC)	323	1010.1	0	0	0.45
P	850 (PC)	323	978.75	0	0	0.28
CS2%	850 (CAC)	323	959	0	156	0.22
CG2%	850 (CAC)	323	959	52	0	1
CH	850 (CAC)	323	908	52	156	5.31
PS2%	850 (PC)	323	927.67	0	156	0
PG2%	850 (PC)	323	927.67	52	0	5.3
PH	850 (PC)	323	876.59	52	156	4.25

Table. 3. Mixture proportions

نسبت آب به سیمانی که برای ساخت مخلوط‌های پایه سیمان آلومینات کلسیم اصلاح‌شده با الیاف و فاقد الیاف در نظر گرفته شده است ۰/۳۸ بوده که به منظور ثابت نگه‌داشتن نسبت آب به سیمان، مقدار آب موجود در روانساز مصرفی از میزان آب مصرفی کاسته شده است و مقادیر جامد روانساز به عنوان جایگزینی از وزن ماسه محسوب شده‌اند. در ساخت مخلوط‌های سیمانی از ۲٪ الیاف فولادی، ۲٪ الیاف شیشه و هیبرید این دو الیاف (۲٪ الیاف فولادی و ۲٪ الیاف شیشه) استفاده‌شده است. نسبت‌های مخلوط بررسی شده در این مطالعه مطابق جدول (۳) است.

این کار پژوهشی براساس یک معیار مقایسه‌ای انجام شده است. لیکن لازم است توضیحاتی در مورد محدودیت‌های استفاده از الیاف در این مطالعه بیان شد. الیاف فولادی در درصدهای استفاده بیش از ۲٪ حجمی دچار جداشگی می‌شوند و تراکم پذیری مخلوط سیمانی بسیار نامطلوب بوده است. از این رو با وجود تلاش انجام گرفته در آزمایشگاه امکان ساخت مخلوط حاوی ٤٪ الیاف فولادی میسر نشد. مشکلات مشابه در مورد تراکم پذیری برای درصد استفاده ٤٪ الیاف شیشه نیز وجود داشت به گونه‌ای که در مراجع علمی و کارهای اجرایی توصیه می‌شود در درصد مذکور بتن به صورت شاتکریت ساخته شود. در بررسی‌های گذشته روی بتن‌های فوق توانمند الیافی و مطالعات اولیه آزمایشگاهی مشخص شد که الیاف فولادی در درصدهای حجمی جایگزین کمتر از ۲٪ حجمی تاثیر مثبت قابل توجهی بر بهبود چقرمگی ندارند، همچنین الیاف شیشه نیز در درصدهای کمتر از ۲٪ توصیه نمی‌شوند. از این رو در این پژوهش طرح‌های مخلوط به صورت مذکور در مقاله انتخاب شده اند.

٤- ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

ابتدا مصالح لازم به‌صورت دقیق مطابق با نسبت مخلوط مدنظر وزن شده و سپس مصالح خشک که شامل سیمان و ماسه می‌شود به صورت خشک به مدت ۵ دقیقه در همزن مخلوط می‌شوند شایان ذکر است این مدت زمان برای اختلاط بهینه مصالح خشک در نظر گرفته شده است [1,24] ، در این مرحله آب به مصالح خشک اضافه می‌شود و سپس الیاف به مخلوط اضافه می‌شود، پس از طی مراحل ساخت مخلوط در یک‌زمان مشخص هم زده می‌شوند و سپس قالب‌گیری صورت می‌گیرد.

نمونه‌ها پس از ٢٤ ساعت از قالب خارج و به مدت ٦ روز در شرایط غوطه‌ور در آب خالص تحت عمل‌آوری مرطوب نگهداری شده‌اند، با توجه به اینکه شناخت زیادی از سیمان آلومینات کلسیم وجود ندارد و همچنین تاثیر آب آهک روی این نوع مخلوط‌ها بررسی نشده است در این مطالعه برای ممانعت از هرگونه خطای آزمایشی ترجیح داده شد که از آب خالص برای عمل آوری این مخلوط‌ها استفاده شود. نمونه‌ها سپس در سن ۷ روز تا زمان انجام آزمون در محیط اتاق تحت عمل‌آوری خشک، خارج از آب و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شده‌اند.

۵- نتایج و بحث

۵-۱- مقاومت فشاری

آزمون مقاومت فشاری در سنین ۱، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز روی نمونه‌های شاهد و نمونه‌های اصلاح‌شده با الیاف انجام‌شده است و نتایج آن مطابق شکل (۳) است. این آزمون روی نمونه‌های با ابعاد ۵۰ میلی‌متر مطابق با استاندارد ASTM C109 [25] انجام‌گرفته است. بدین منظور برای انجام این آزمون از جک هیدرولیکی و نمایشگر دیجیتالی با سرعت بارگذاری ۵۳۰ کیلوگرم بر ثانیه استفاده شده است.

در ارزیابی مقاومت فشاری مخلوط‌های بررسی شده، رویت می‌شود که نمونه کنترل ساخته شده با سیمان آلومینات کلسیم در سن ۱ روز مقاومتی برابر با ۸۵ مگاپاسکال داشته که با توجه به مقاومت ۹۰ روز این مخلوط که برابر ۱۰۳ مگاپاسکال است، کسب ۸۲ درصد مقاومت فشاری را در این سن برای مخلوط نام برده شده نشان می‌دهد درصورتی‌که نمونه کنترل ساخته‌شده باسیمان پرتلند در سن ۱ روز مقاومتی

برابر ۲۱ مگاپاسکال کسب کرده است همچنین مقاومت ۹۰ روز این مخلوط برابر با ۷۲ مگاپاسکال هست که از مقاومت یک‌روزه نمونه سیمان آلومینات کلسیم کم‌تر است. این مسئله نشان‌دهنده یکی از خواص سیمان آلومینات کلسیم یعنی کسب میزان چشمگیر مقاومت فشاری در سن ۱ روز در مقایسه با سایر سیمان‌های رایج مصرفی از قبیل سیمان پرتلند در سنین بالاتر است.

شکل۳. مقاومت فشاری (۱، ۷، ۲۸و۹۰)

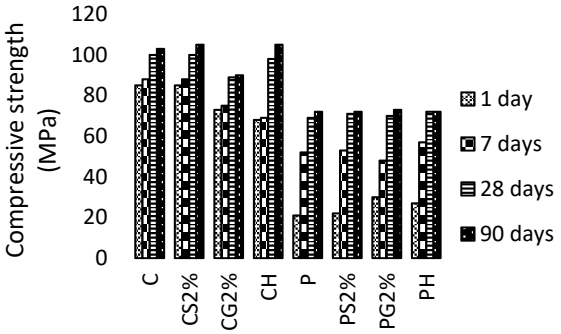

Fig. 3. Compressive strength test results

افزودن ۲ درصد الیاف فولادی به مخلوط تأثیر زیادی بر مقاومت فشاری ندارد. مقدار و نسبت ابعاد الیاف دو پارامتر تأثیرگذار بر مقاومت فشاری است [26]. درافزودن ۲ درصد الیاف شیشه به مخلوط‌ها به دلیل کاهش کارایی ملات و تراکم‌پذیری و همچنین استفاده بیشتر از روانساز، شاهد کاهش مقاومت در نمونه CG2% هستیم. این کاهش مقاومت در سن ۱، ۷، ۲۸ و ۹۰ به ترتیب ۱٤، ۱۵، ۱۱ و ۱۳ درصد است. در نمونه‌های هیبریدی در سنین پایین به دلیل اینکه الیاف شیشه سبب کاهش تراکم می‌شود مقاومت فشاری در سنین اولیه کاهش می‌یابد. افزایش سن بتن سبب تشکیل محصولات هیدراسیون بیشتری در مخلوط سخت شده می‌شود و همین امر سبب تراکم بالاتر و درگیری مطلوب الیاف فولادی در مخلوط‌های بتنی می‌شود. بنابراین الیاف فولادی عملکرد بتن در برابر تغییر شکل‌های ناشی از فشار وارده را تقویت می‌نماید، در نتیجه افزایش مقاومت بتن سخت شده حاصل می‌آید. به شکلی که مشاهده می‌شود مقاومت فشاری ۹۰ روزه در نمونه های C، CS2%، CG2% و CH به ترتیب ۱۰۳، ۱۰۵، ۹۰ و ۱۰۵ مگاپاسکال است.

مشاهده می‌شود مقاومت با افزایش سن پیوسته رشد یافته است برای نمونه مقاومت ۹۰ روزه نمونه CH، ۱/۵ برابر مقاومت ۱ روزه آن، و همچنین مقاومت ۹۰ روزه نمونه PH، ۲/٦ برابر مقاومت ۱ روزه آن است. تشکیل ریزساختار منسجم و توسعه محصولات هیدراسیون با افزایش سن نمونه‌ها علل اصلی برای این افزایش مقاومت فشاری در مخلوط‌ها است.

۵-۲- مقاومت خمشی

نتایج حاصل از آزمون مقاومت خمشی که روی نمونه‌های منشوری با ابعاد ٤٠×٤٠×١٦٠ میلی‌متر مطابق با آیین‌نامه EN 196 [27] در سنین ۲۸ و ۹۰ روز صورت گرفته، در شکل (٤) نشان داده شده است. سرعت بارگذاری روی نمونه‌ها برابر با ۱/۰۱۵۸ میلی‌متر بر دقیقه بوده است.

نمونه شاهد ساخته شده با سیمان آلومینات کلسیم در سنین ۷ و ۲۸ روز دارای مقاومت خمشی برابر با ۵/۱ و ۸/٤ مگاپاسکال است که در سن ۹۰ روز به بیشینه میزان خود رسیده و مقاومت خمشی مطلوبی را نشان می‌دهد. همچنین نمونه شاهد ساخته شده با سیمان پرتلند در همین سنین دارای مقاومت خمشی برابر با ۸/۵ و ۱۱ مگا پاسکال است. به دلیل تشکیل کند ریزساختار نمونه‌های شاهد ساخته شده با سیمان پرتلند قدری بهتر از سیمان آلومینات کلسیم در این آزمایش عمل کرده است.

الیاف فولادی به خاطر هندسه موجی شکل درگیری بسیار خوبی با ماتریس بتنی ایجاد می‌کند و پس از ترک‌خوردگی ماتریس، الیاف بار را تحمل می‌کنند که در نمونه تا زمانی که اتصال بین الیاف و ماتریس تضعیف می‌شود، تحمل بار ادامه می‌یابد. بنابراین، الیاف در برابر انتشار ترک‌ها مقاومت می‌کند و از تمایل به شکست ناگهانی جلوگیری می‌کند که این امر باعث افزایش ظرفیت باربری بتن می‌شود [28] به گونه‌ای که مقاومت خمشی نمونه CS2% در سن ۲۸ روز، ۲/۱۳ برابر نمونه C (نمونه شاهد ساخته شده با سیمان آلومینات کلسیم) و مقاومت خمشی نمونه PS2% در سن مذکور، ۱/۲٤ برابر نمونه P (نمونه شاهد ساخته شده با سیمان پرتلند) است.

افـزودن ۲ درصـد حجمـی الیـاف شیشـه باعـث افـزایش مقاومت خمشی می‌شود و این افزایش مقاومت از نمونـه‌هـای حاوی ۲ درصد الیاف فولاد بیشتر است به طوری کـه مقاومـت خمشی نمونه CG2% در سن ۹۰ روز برابـر ۱۶/۳ مگاپاسـکال است که نسبت به نمونه شاهد خود، ۹٤ درصد افزایش مقاومت داشته است. همچنین مقاومت خمشـی نمونـه PG2% در سـن ۹۰ روز برابر ۱٦/۵ مگاپاسکال می‌باشـد کـه نسـبت بـه نمونـه شاهد خود، ٤۷ درصد افزایش مقاومت نشان داده اسـت. دلیـل این افزایش مقاومت این است که نسبت قطـر بـه طـول الیـاف شیشه از الیاف فـولادی کـم تـر مـی‌باشـد در نتیجـه بـه دلیـل ضخامت کم این الیاف ناحیه انتقالی که اطراف الیاف و ماتریس سیمان شکل می‌گیرد از خواص مطلـوبی بـه لحـاظ سـاختاری برخوردار است. به همین دلیـل پیوسـتگی مناسـبی بـین الیـاف شیشه و خمیر سیمان ایجاد شده و الیاف شیشه به عنوان بخـش یکپارچه‌ای از کامپوزیت سیمانی عمل می‌کننـد کـه بـه لحـاظ مقاومـت کششـی بـالا موجـب بهبـود مقاومـت خمشـی بـتن می‌شوند.

شکل ٤. مقاومت خمشی (۲۸و۹۰)

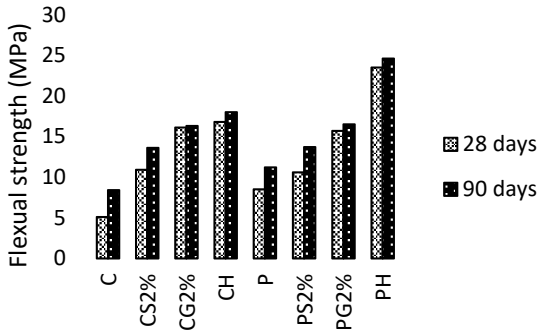

Fig. 4. Flexural strength test results

در شکل (٤) مشـاهده مـی‌شـود کـه مقاومـت خمشـی نمونـه هیبریدی CH در سن ۲۸ روز برابر ۱٦/۸ مگاپاسکال است کـه ۳/۳ برابر نمونه شاهد ساخته شده با سـیمان آلومینـات کلسـیم می‌باشد. همچنین مقاومـت نمونـه PH در ۲۸ روز برابـر ۲۳/۵ مگاپاسکال است که ۲/۷ برابر نمونه شاهد ساخته شده با سیمان پرتلند است که ایـن افـزایش مقاومـت خمشـی در نمونـه‌های هیبریدی به دلیل پخش همگن‌تر الیاف فولادی به دلیل اسـتفاده از الیاف شیشه و همچنین بهبود رفتار به دلیـل اسـتفاده هیبریـد نسبت به حالات استفاده از الیاف در ۲٪ جـایگزین حجمـی در این نمونه‌ها هست. همچنین نمونه هیبریدی ساخته‌شده باسیمان پرتلند به دلیل تشکیل کند ریزساختار این نوع سیمان، بیشـترین مقاومت خمشی را کسب کرده است [29]. باگذشـت زمـان در تمامی نمونه‌ها مقاومت خمشی افزایش مـی‌یابـد. بـرای نمونـه مقاومت خمشی ۹۰ روزه نمونه C (فاقد الیـاف)، ٦٤/۷ درصـد نسبت به مقاومـت خمشـی ۲۸ روزه افـزایش مقاومـت داشـته است. همچنین افزایش ۳۷/۷ درصدی نمونه P (فاقد الیاف) ۹۰ روزه نسبت به ۲۸ روز مشاهده می‌شود.

۵-۳- چقرمگی خمشی الاستیک

چقرمگی میزان جذب انرژی نمونه‌هـا را نشـان مـی‌دهـد. ایـن ویژگی تا حدی نشانگر میزان جلوگیری از انتشار ریزترک‌ها در بتن قبل از شکسـت نهـایی اسـت. در ایـن مطالعـه چقرمگـی مخلوط‌های حاوی الیاف بررسی‌شده است تا میزان تأثیر الیـاف در افزایش شکل‌پذیری نمونه‌هـا و تحمـل کـرنش‌هـای بـالاتر مشخص شود [30].

چقرمگی خمشی الاستیک مسـاحت زیـر منحنـی خیـز- نیـرو است که میزان انرژی جذب‌شده را توسط نمونه‌های بتنی نشان می‌دهد. بررسـی چقرمگـی مخلـوط‌هـای ساخته‌شـده مطـابق ASTM C1018-97 [31] انجام گرفته است. مطابق ایـن روش برای محاسبه چقرمگی باید خیز نمونـه‌هـای خمشـی سـنجیده شود. Δ خیز معادل با اولین ترک ایجاد شده است. مساحت زیر منحنی خیز- نیرو تا محل اولین ترک ایجادشده (Δ) چقرمگـی الاستیک نام دارد. همان‌گونه کـه بیان‌شـده چقرمگـی الاسـتیک میزان جذب انرژی مقطع بتنی را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه چقرمگی الاستیک در این پژوهش از مساحت زیر منحنی خیز- نیرو در آزمون خمشی حاصل می‌آید نتایج حاضر تـأثیر الیـاف در جذب انرژی و درنتیجه افزایش شکل‌پذیری نمونه را نشـان می‌دهد. بنابراین با استفاده از الیاف احتمال ایجاد شکسـت تـرد در سازه کاهش می‌یابـد و همچنـین ضـعف‌های ریزسـاختاری ماتریس بتنی جبران می‌شود.

شکل ۵. چقرمگی خمشی مخلوط‌های موردبررسی

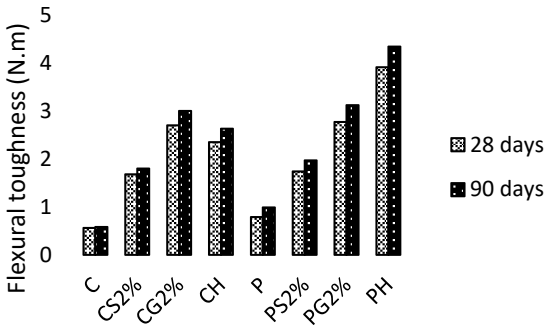

Fig. 5. Flexural toughness test results

استفاده از ۰.۲٪ الیاف فولادی باعث افزایش چقرمگی الاستیک نسبت به نمونه کنترل می‌شود همان گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود در ۰.۲٪ حجمی الیاف فولادی در سن ۹۰ روز تقریباً چقرمگی الاستیک نمونه حاوی سیمان آلومینات کلسیم تا ۳ برابر افزایش یافته است.

افزودن ۲ درصد الیاف شیشه به مخلوط‌ها باعث افزایش چقرمگی می‌شود. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که چقرمگی نمونه CG2% در سن ۲۸ روز، ٤/۸ برابر نمونه C و نمونه PG2% در سن ۲۸ روز، ۳/۵ برابر نمونه P است که دلیل این افزایش چقرمگی جذب بسیار خوب انرژی توسط الیاف شیشه می‌باشد.

همچنین با هیبرید کردن الیاف فولادی با الیاف شیشه به دلیل بهبود رفتار به دلیل هیبرید کردن نسبت به نمونه‌های ۰.۲٪ جایگزین حجمی الیاف و همچنین پخش بهتر الیاف فولادی در داخل الیاف شیشه و این موضوع که الیاف شیشه نسبت به الیاف فولادی انرژی بیشتری را جذب می‌کند چقرمگی آن از نمونه‌های الیاف فولادی تنها بیشتر است به گونه‌ای که با مقایسه دو نمونه CH و CS2% در سن ۹۰ روز، متوجه می‌شویم که چقرمگی نمونه CH، ٤٦ درصد نسبت به نمونه CS2% افزایش مقاومت از خود نشان داده است. لیکن با مقایسه دو نمونه CG2% و CH در همان سن ۹۰ روز، مشاهده می‌شود که در نمونه CG2%، ١٤ درصد چقرمگی آن نسبت به نمونه CH افزایش داشته است. افزایش چقرمگی در نمونه‌های ساخته‌شده باسیمان پرتلند همچون نتایج مقاومت خمشی، بیشتر است.

٥-٤- چقرمگی A3.5، A5.5 و A10.5

چقرمگی A3.5، A5.5 و A10.5 به ترتیب مساحت زیر نمودار خیز–نیرو تا خیز معادل با ۳/۵، ۵/۵ و ۱۰/۵ برابر خیز الاستیک تعریف می‌شود.

شکل ٦. چقرمگی‌های خمشی A3.5، A5.5 و A10.5

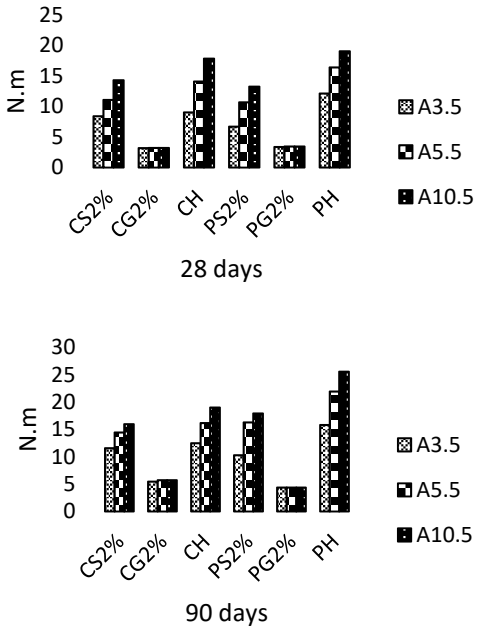

Fig. 6. Flexural toughness A3.5, A5.5 and A10.5

با توجه به شکل (٦) مشاهده می‌شود که استفاده از الیاف فولادی سبب افزایش مساحت زیر نمودار می‌شود و دلیل این امر همان‌گونه که پیشتر گفته شد بخاطر هندسه موجی شکل الیاف فولاد است که درگیری بسیار خوبی با ماتریس بتنی ایجاد می‌کند و اجازه نمی‌دهد که نمونه با اولین ترک کاملا گسیخته شود بلکه با ایجاد ترک در ماتریس بتنی، الیاف خود تحمل بار را بر عهده می‌گیرند و تا گسیخته نشدن الیاف این تحمل بار ادامه می‌یابد.

افزودن ۲ درصد حجمی الیاف شیشه به مخلوط‌ها نسبت به نمونه کنترل که با اولین ترک از هم گسیخته می‌شود، سبب افزایش مساحت زیر نمودار خیز–نیرو می‌شود، اما این افزایش نسبت به نمونه‌های الیافی به دلیل ماهیت الیاف فولادی، بسیار کمتر است. لیکن با هیبرید کردن این دو الیاف با یکدیگر، همانطور که قبلا نیز گفته شد به دلیل

دارا بودن الیاف فولادی در این نمونه‌ها و بهبود رفتار به دلیل استفاده هیبرید از الیاف فولادی و شیشه نسبت به حالات استفاده از الیاف در ۲٪ جایگزین حجمی، مساحت زیر نمودار مقاومت خمشی افزایش قابل توجهی می‌یابد و این افزایش در نمونه‌های ساخته شده با سیمان پرتلند بیشتر می‌شود.

۵-۵- جمع‌شدگی

جمع‌شدگی تأثیر زیادی در عملکرد ساختاری و دوام بتن دارد و یکی از علل اصلی که سبب کاهش در ابعاد نمونه‌ها در فرآیند خشک شدن می‌شود خروج آب موجود در منافذ موئینه و تغییر در نیروهای کشش سطحی وارد بر جداره‌های این نمونه‌ها است که سبب کاهش ابعاد نمونه‌ها می‌شوند. جمع‌شدگی تحت تأثیر بسیاری از پارامترهای مختلف مانند مخلوط بتن، عمل‌آوری، درجه حرارت و رطوبت محیط است [32]. برای تعیین جمع‌شدگی نمونه‌های منشوری ساخته می‌شوند و از کمپراتور انقباض که مجهز به عقربه اندیکاتور دیجیتال با دقت میکرومتر و یک میله مرجع از آلیاژ فولادی می‌باشد، استفاده شده است. آیین‌نامه‌ای که برای آزمون انقباض مشخص‌شده است ASTM C490 [33] است. جمع‌شدگی که در این مطالعه بررسی شده است بیشتر جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن است. البته در روند بررسی قطعا هیدراسیون سیمان نیز ادامه داشته است، لیکن نمونه‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۱۵٪ نگهداری شده‌اند تا میزان جمع شدگی آنها تعیین شود.

شکل ۷. تغییر طول نمونه‌های ساخته‌شده باسیمان آلومینات کلسیم

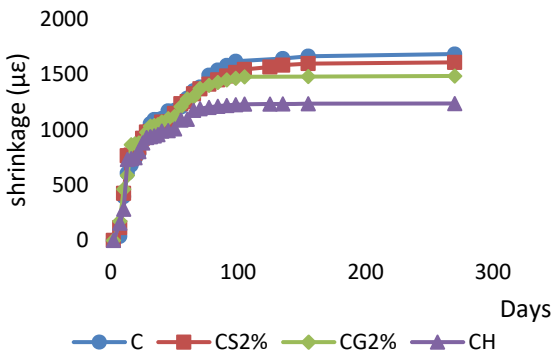

Fig. 7. Shrinkage of CAC mortars

شکل ۸. تغییر طول نمونه‌های ساخته‌شده باسیمان پرتلند

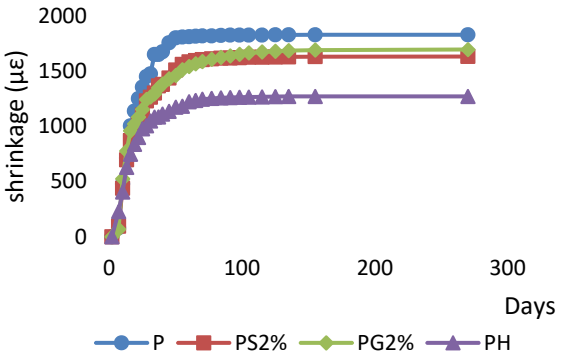

Fig. 8. Shrinkage of PC mortars

اضافه کردن ۲٪ حجمی الیاف فولادی در نمونه‌های حاوی سیمان آلومینات کلسیم ٤/٥ درصد، استفاده از ۲٪ الیاف شیشه، ۱۱/۷ درصد و اضافه کردن ۲٪ الیاف فولادی به همراه ۲٪ الیاف شیشه ۲٦/٥ درصد تغییر طول را در سن ۲۷۰ روز کاهش می‌دهد همچنین در نمونه‌های حاوی سیمان پرتلند با اضافه کردن ۲٪ الیاف فولادی ۷درصد، با اضافه کردن ۲٪ الیاف شیشه ۷/۳ درصد و هیبرید آن با الیاف شیشه ۳۰/٥ درصد تغییر طول کاهش می‌یابد.

درنتیجه مشاهده می‌شود که الیاف باعث کاهش تغییر طول نمونه‌ها می‌شود و هرچه درصد الیاف بیشتر باشد تغییر طول نمونه‌ها کم‌تر می‌شود زیرا الیاف جلوی جمع شدگی و انتشار ترک‌ها را می‌گیرد [34]. در مقایسه دو سیمان پرتلند و آلومینات کلسیم مشاهده می‌شود که تغییر طول نمونه شاهد سیمان آلومینات کلسیم ۷ درصد کمتر از نمونه شاهد ساخته شده با سیمان پرتلند است.

۵-٦-مهاجرت تسریع شده یون کلراید

عمر مفید بتن در شرایط آسیب رسان محیطی یکی از مهم‌ترین جنبه‌های ساخت بتن محسوب می‌شود [35]. در این مطالعه برای بررسی پتانسیل خوردگی در طرح‌های الیافی از آزمایش مهاجرت تسریع شده یون کلراید استفاده شده است. این آزمایش در سن ۹۰ روز روی نمونه‌ها انجام گرفته است.

نتایج بیان‌کننده این موضوع هستند که استفاده از الیاف فولادی سبب افزایش ضریب مهاجرت یون کلراید بتن

می‌شود. بطوری که مشاهده می‌شود نفوذ یون کلراید در نمونه CS2%، ٦/٧ برابر نمونه کنترل ساخته شده با سیمان آلومینات کلسیم (C) است و همچنین نفوذ در نمونه PS2%، ٢/٥ برابر نمونه کنترل ساخته شده با سیمان پرتلند در سن ٩٠ روز است.

شکل ۹. ضریب مهاجرت تسریع شده یون کلراید در سنین ۹۰ روز

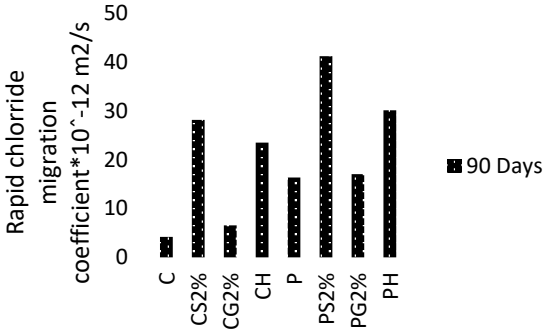

Fig .9. Rapid chloride migration coefficients

استفاده از ٢ درصد الیاف شیشه در مخلوط‌های حاوی سیمان آلومینات کلسیم، ٥٥ درصد و در مخلوط‌های حاوی سیمان پرتلند، ٥ درصد نفوذ یون کلراید را نسبت به مخلوط‌های شاهد افزایش داده است، لیکن این افزایش نفوذ از نمونه‌های حاوی الیاف فولادی کمتر است.

با هیبرید کردن الیاف شیشه و الیاف فولادی مشاهده می‌شود که نفوذ یون کلراید نسبت به مخلوط‌های حاوی الیاف فولادی کاهش می‌یابد بطوری که با مقایسه دو نمونه PH و PS2% درمی‌یابیم که با هیبرید کردن این دو الیاف، ٢٧ درصد نفوذ نسبت به نمونه PS2% کاهش می‌یابد. همچنین شاهد این اتفاق در نمونه‌های ساخته شده با سیمان آلومینات کلسیم نیز هستیم بطوری که ١٦/٥ درصد نمونه هیبریدی این نوع سیمان نفوذ کمتری نسبت به نمونه CS2% داشته است.

الیاف فولادی دارای سطحی صیقلی هستند پس پیوستگی مناسبی با خمیر سیمان در ناحیه انتقالی ایجاد نمی‌کنند به همین لحاظ ناحیه انتقالی خمیر سیمان و الیاف فولادی ناحیه‌ای بسیار متخلخل محسوب می‌شود و همچون کانال‌هایی فضای لازم برای انتقال یون کلراید در محیط پایه سیمانی را فراهم می‌آورد. این مسأله سبب می‌شود ضریب مهاجرت یون کلراید بالاتری نسبت به مخلوط‌های بدون الیاف به دست آید. در مقایسه با الیاف فولادی، الیاف شیشه قطر بسیار کمتری دارند، پس ناحیه انتقالی با ضخامت و تخلخل کمتر خواهند داشت. این سبب می‌شود در مقایسه با مخلوط‌های حاوی الیاف فولادی، مخلوط‌های با الیاف شیشه نفوذپذیری کمتری داشته باشند، اما کماکان نفوذ این مخلوط‌ها از مخلوط‌های بدون الیاف بیشتر است. به نظر می‌رسد در حالت هیبرید الیاف شیشه به پخش همگن‌تر الیاف فولادی کمک نموده‌اند و جهت‌گیری الیاف فولادی را به گونه‌ای تغییر داده‌اند که نفوذ یون کلراید در ساختار مخلوط از طریق ناحیه انتقالی به سهولت قبل اتفاق نیفتد که این پدیده سبب کاهش نفوذ نسبت به مخلوط‌های حاوی الیاف فولادی شده است که البته به دلیل حضور الیاف شیشه در ساختار مخلوط این عدد نسبت به مخلوط‌های حاوی الیاف شیشه بزرگ‌تر است. شایان ذکر است نفوذپذیری نسبتا بالایی که در نمونه‌های الیافی دیده می‌شود می‌تواند یک مشکل جدی در بحث دوام به ویژه در شرایط آسیب‌رسان محیطی حاوی یون‌های مزاحم کلراید ایجاد کند.

سیمان‌های آلومینات کلسیم از نفوذ یون کلراید کمتری نسبت به سیمان پرتلند برخوردار هستند بطوری که نفوذ نمونه P، ٤ برابر نفوذ نمونه C است. علت بهبود این خاصیت در سیمان آلومینات کلسیم، بهبود کیفیت ناحیه انتقالی بین خمیر سیمان و سنگدانه است در نمونه‌های ساخته شده با سیمان پرتلند تخلخل بیشتری در این ناحیه به علت تراکم ضعیف ذرات وجود دارد درحالی‌که در نمونه‌های ساخته‌شده با سیمان آلومینات کلسیم فضاهای متخلخل این نواحی توسط هیدرات‌های الومینات کلسیم پر می‌شود.

٦- نتیجه‌گیری

در مطالعه آزمایشگاهی حاضر تأثیر الیاف بر خواص مکانیکی و دوام کامپوزیت‌های سیمانی بررسی و نتایج ذیل به دست آمده است:

- مقاومت فشاری نمونه کنترل(بدون الیاف) حاوی سیمان آلومینات کلسیم به دلیل کسب مقاومت سریع و تشکیل سریع ریزساختار نسبت به نمونه حاوی سیمان پرتلند بیشتر می‌شود به طوری‌که مقاومت ۹۰ روزه نمونه سیمان پرتلند از مقاومت ۱ روزه سیمان آلومینات کلسیم کمتر است. همچنین اضافه کردن ۲ درصد الیاف فولادی تأثیر ناچیزی بر مقاومت فشاری دارد. استفاده از ۲ درصد الیاف شیشه در مخلوط سبب کاهش مقاومت می‌شود. هیبرید الیاف فولادی با الیاف شیشه در سنین پایین باعث کاهش مقاومت می‌شود لیکن با افزایش سن بتن به دلیل تشکیل محصولات هیدراسیون بیشتر در مخلوط سخت شده و در نتیجه درگیری مطلوب الیاف فولادی در مخلوط‌های بتنی، مقاومت بتن افزایش می‌یابد.
- نمونه‌ی شاهد ساخته‌شده باسیمان پرتلند به دلیل تشکیل کند ریزساختاردارای مقاومت خمشی بهتر از نمونه شاهد ساخته شده باسیمان آلومینات کلسیم است. با افزودن الیاف فولادی به دلیل هندسه موجی شکل این الیاف درگیری بسیار خوبی با ماتریس سیمانی ایجاد می‌کند و سبب افزایش مقاومت خمشی می‌شود. استفاده از ۲ درصد الیاف شیشه نیز به دلیل ناحیه انتقالی بهتر نسبت به الیاف فولادی، مقاومت خمشی را افزایش می‌دهد. همچنین با هیبرید کردن الیاف فولادی با الیاف شیشه به دلیل پخش همگن الیاف فولادی درکنار الیاف شیشه و همچنین بهبود رفتار به دلیل هیبرید کردن این دو نوع الیاف با یکدیگر مقاومت خمشی نمونه‌های هیبریدی از نمونه‌های الیاف فولادی در ۲٪ جایگزینی بیشتر است.
- بررسی میزان جذب انرژی مخلوط‌های پایه سیمانی (چقرمگی خمشی) تأثیر مثبت الیاف در افزایش این پارامتر را نشان می‌دهد که این میزان جذب انرژی با هیبرید کردن الیاف فولادی با الیاف شیشه افزایش می‌یابد، به شکلی که در سن ۹۰ روز و در نمونه‌های CH و PH به ترتیب میزان چقرمگی برابر با ۲/٦۳ و ٤/۳٤ نیوتن متر مشاهده شده است.
- تغییر طول در نمونه کنترل در هر دو نوع سیمان تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند اما با افزودن ۲ درصد الیاف (الیاف فولادی و الیاف شیشه) به دلیل جلوگیری از جمع‌شدگی و انتشار ریزترک‌ها انقباض کاهش می‌یابد. در هیبرید کردن الیاف فولادی با الیاف شیشه به دلیل زیادشدن درصد الیاف انقباض کاهش می‌یابد بطوری که مشاهده می‌شود نمونه PH در سن ۲۷۰ روز، ۳۰/۵ درصد و نمونه CH، ۲٦/۵ درصد انقباض کاهش می‌یابد.
- با توجه به نتایج حاصل از آزمون مهاجرت تسریع شده یون کلراید، مخلوط‌های اصلاح‌شده با الیاف برخلاف مخلوط شاهد باعث افزایش نفوذ یون کلراید می‌شود و مقادیر نفوذ در نمونه‌های هیبریدی و نمونه‌های الیاف شیشه، کمتر از نمونه‌های با الیاف فولادی است. با مقایسه نمونه‌های بتنی ساخته شده با سیمان آلومینات کلسیم و پرتلند، نتیجه گرفته شد که نمونه‌های ساخته شده با سیمان آلومینات کلسیم به دلیل بهبود در ناحیه انتقالی و بهبود تخلخل، نفوذ یون کلراید کمتری نسبت به نمونه‌های ساخته شده با سیمان پرتلند دارند.
-

۷-مراجع

[1] saidi kia A, Madani H. 2018 The influence of ethylene vinyl acetate and vinyl acetate polymers on mechanical properties, shrinkage and durability of Calcium Aluminate Cement based mixtures. Modares Civ Eng J. , 18 (4). (In Persian)
[2] Barnes P, Bensted J. 2002 Structure and Performance of Cements, Second Edition.
[3] Kurdowski W. 2014 Cement and concrete chemistry. Springer Science & Business.
[4] Scrivener K. 2003 Calcium aluminate cements. In: Advanced Concrete Technology.
[5] concrete pavement maintenance/Repair. 2009 Cement Concrete & Aggregates Australia.
[6] Newman J, Choo BS. 2003 Advanced

concrete technology 3: processes. Butterworth-Heinemann.
[7] Mostafa NY, Zaki ZI, Abd OH. 2012 Cement & Concrete Composites Chemical activation of calcium aluminate cement composites cured at elevated temperature. Cem Concr Compos. 34(10):1187–93.
[8] Gu P, Beaudoin JJ, Quinn EG, Myers RE. 1997 Early strength development and hydration of ordinary portland cement/calcium aluminate cement pastes. Adv Cem Based Mater. 6(2):53–8.
[9] Hewlett PC. 2003 Lea's Chemistry of Cement and Concrete. Lea's Chemistry of Cement and Concrete.
[10] Kırca Ö, Yaman İÖ, Tokyay M. 2013 Compressive strength development of calcium aluminate cement–GGBFS blends. Cem Concr Compos. 35(1):163–70.
[11] Odler I. 2000 Special Inorganic Cements. Taylor & Francis Group.
[12] Xu L, Wang P, Zhang G. 2012 Formation of ettringite in Portland cement/calcium aluminate cement/calcium sulfate ternary system hydrates at lower temperatures. Constr Build Mater. 31:347–52.
[13] Cardoso FA, Innocentini MDM, Akiyoshi MM, Pandolfelli VC. 2004 Effect of curing time on the properties of CAC bonded refractory castables. J Eur Ceram Soc.
[14] Antonovič V, Kerienė J, Boris R, Aleknevičius M. 2013 The effect of temperature on the formation of the hydrated calcium aluminate cement structure. Procedia Eng. 57:99–106.
[15] Löber P, Holschemacher K. 2014 Structural Glass Fiber Reinforced Concrete for Slabs on Ground. World J Eng Technol. 2(03):48.
[16] Afroughsabet V, Biolzi L, Ozbakkaloglu T. 2016 High-performance fiber-reinforced concrete: a review. J Mater Sci. 51(14):6517–51.
[17] Daniel J, Gopalaratnam V, Galinat M. 2002 Report on Reinforced Concrete. 96.
[18] Kene KS, Vairagade VS, Sathawane S. 2012 Experimental Study on Behavior of Steel and Glass Fiber Reinforced Concrete Composites. Bonfring Int J Ind Eng Manag Sci. 2(4):125–30.
[19] Luo X, Sun W, Chan SYN. 2001 Steel fiber reinforced high-performance concrete: a study on the mechanical properties and resistance against impact. Mater Struct. 34(3):144–9.
[20] Muhammed İSKENDER BK. 2018 Glass Fibre Reinforced Concrete (GFRC). El-Cezerî J Sci Eng. 5:136–62.
[21] Shakor PN, Pimplikar SS. 2011 Glass fibre reinforced concrete use in construction. Int J Technol Eng Syst. 2(2):41–8.
[22] Kamal MM, Safan MA, Etman ZA, Salama RA. 2014 Behavior and strength of beams cast with ultra high strength concrete containing different types of fibers. HBRC J. 10(1):55–63.
[23] Nguyen DL, Ryu GS, Koh KT, Kim DJ. 2014 Size and geometry dependent tensile behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. Compos Part B Eng. 58:279–92.
[24] Saidikia, A., Madani, H. 2019 Influence of polymer materials on the durability of Calcium Aluminate Cement based mixtures. J Concr Struct Mater, 3(2):24-40.
[25] ASTM International. ASTM C109/C109M-16a. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50mm] Cube Specimens). Annual Book of ASTM Standards 2016.
[26] Eren Ö, Çelik T. 1997 Effect of silica fume and steel fibers on some properties of high-strength concrete. Constr Build Mater. 11(7-8):373-382.
[27] BS EN 196-1, 2016 Methods of testing cement. Determination of strength.
[28] Wang JY, Chia KS, Liew JYR, Zhang MH. 2013 Flexural performance of fiber-reinforced ultra lightweight cement composites with low fiber content. Cem Concr Compos. 43: 39-47.
[29] Blunt JD, Ostertag CP. 2009 Deflection Hardening and Workability of Hybrid Fiber Composites. ACI Mater J. 106(3):265.
[30] Soboyejo W. 2002 Mechanical properties of engineered materials. 152.
[31] Astm C. 1018-97. 1998 Standard Test Method Flexural Toughness First-Crack Strength Fiber-Reinforced Concr.
[32] Gribniak V, Kaklauskas G, Kliukas R, Jakubovskis R. 2013 Shrinkage effect on short-term deformation behavior of reinforced concrete - When it should not be neglected. Mater Des. 51:1060-1070.
[33] 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.
[34] Toledo Filho RD, Ghavami K, Sanjuán MA, England GL. 2005 Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres. Cem Concr Compos. 27(5):537–46.
[35] Shi X, Xie N, Fortune K, Gong J. 2012 Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. Constr Build Mater. 30:125-138.

Hybrid performance of steel and glass fibers on mechanical properties, shrinkage and durability of cement composites

Hesam madani*[1], Sarvenaz moetamed[2]

1- Assistant professor, Faculty Member of Civil Engineering and Geodesy, Graduate University of Advanced Technology, kerman, Iran
2- M.Sc in Hydraulic Structures engineering, Graduate University of Advanced Technology, kerman, Iran

***h.madani@kgut.ac.ir**

Abstract

This study investigates the effect of steel fibers and its hybrid form with glass fiber on the properties of cement composites. The studied mechanical properties included compressive strength and flexural strength, and the energy absorption rate of the specimens was determined by the flexural toughness. In the mixtures, Portland cement and calcium aluminate have been used as bonding agents the mixes containing 2% steel fiber (% of total volume of the mixture), 2% AR Glass fiber, and hybrid of these fibers were made of glass fiber (2% steel fibers and 2% glass fiber), the length of these fibers was 25 mm. The compressive strength test was performed at the age of 1, 7, 28 and 90 days. Speciments made with calcium aluminate cement had higher compressive strength due to quick formation of microstructure compared to Portland cement mixtures, so that 90-day compressive strength of Portland cement mix was lower compared to the 1-day compressive strength of Calcium aluminate concrete. Incorporating 2% steel fibers also had a slightly enhancing effect on compressive strength. Flexural strength test was carried out at 28 and 90 days. The steel fibers create appropriate mechanical bond with the cementitious matrix, and the ultimate flexural strength was about 2 times higher than non-fibers specimen, due to the congrated geometry of the steel fibers. Substituting glass fiber also increased the ultimate flexural strength due to the high aspect ratio glass fibers and the well formed Interfacial transition zone (ITZ). The hybridization of the aforementioned fibers with steel fibers increases the bending strength due to the synergistic effect. The energy absorption content of the cementitious mix measured by flexural toughness index shows that this energy absorption content increases with the hybridization of the glass and steel fibers, so that the hybrid specimen made with Portland cement had a flexural toughness of 34.4 Nm. The glass fiber increased the toughness due to its excellent energy absorption. The steel fibers in the mixed increased the area under the flexural loading cureve and prevent the mixture from being destroyed by the first crack. In the shrinkage test results the control specimen with the two types of cements did not differ significantly, but the addition of 2% of the fibers (steel fiber and glass fiber) reduced shrinkage by their limiting effect on length change and propagation of micro cracks. When the percentage of glass fiber become higher, similar to the hybrid mix, the shrinkage was reduced further. This experiment was performed uo to 270 days and it was observed that the shrinkage of the hybrid specimen made with Calcium aluminate cement reduced by 65.5% compared to the plain concrete. In this study, the RCMT was carried out at 90 days. The results indicate that the penetration rate of the hybrid specimens and the glass fiber mixtures were lower than those of the steel fibers incorporated mixed. Also, in comparing two types of calcium aluminate cement and Portland cement, specimen made with calcium aluminate cement, the chloride ion penetration was lower than those made with Portland cement due to the improved Interfacial transition zone (ITZ) and less porosity of this type of cement.

Keyword: Calcium Aluminate Cement, Portland cement, Steel Fibers, Glass Fibers, Mechanical Properties, Shrinkage, Durability