مهندسی عمران شریف (بهار ۱۳۹۹)
دوره‌ی ۲ - ۳۶، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۱۱-۱۹

Original Article

مقایسه‌ی عملکرد الیاف پلیمری ماکرو و الیاف فولادی به لحاظ کنترل ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خشک شدن بتن

علیرضا باقری * **(دانشیار)**
مرتضی گرگانی فیروزجاه (کارشناس ارشد)
آرمین جمالی (کارشناس ارشد)
حامد زنگانه (کارشناس ارشد)
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

در این مطالعه تأثیر الیاف پلیمری ماکرو در کنترل ترک‌خوردگی جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن نظیر زمان وقوع اولین ترک، نرخ توسعه‌ی تنش‌های کششی و عرض ترک‌ها با استفاده از آزمایش حلقه‌ی مقید مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اثر الیاف پلیمری ماکرو بر روی برخی از ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی بتن نظیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جمع شدگی آزاد بتن مورد بررسی قرار گرفت. برای مقایسه، مخلوط‌های حاوی الیاف پلیمری ماکرو و الیاف فولادی نیز ساخته و بررسی شدند. نتایج نشانگر عملکرد مشابه الیاف پلیمری ماکرو و الیاف فولادی در مقادیر استفاده کم و متوسط (۰٫۲۵ و ۰٫۵ درصد مصرف) هستند. در ۰٫۵ درصد مصرف الیاف توانسته‌اند عرض ترک‌ها را تا حدود ۵۰ درصد کاهش دهند. با افزایش مقدار مصرف به ۱ درصد، عملکرد الیاف فولادی در کنترل ترک‌خوردگی جمع‌شدگی به میزان قابل توجهی بهتر از الیاف پلیمری ماکرو بوده است.

bagheri@kntu.ac.ir
mortazagorgani.1222@gmail.com
arminjamali@email.kntu.ac.ir
hamedzanganeh@gmail.com

واژگان کلیدی: جمع‌شدگی، خشک شدن، بتن، الیاف پلیمری ماکرو، الیاف فولادی، حلقه‌ی مقید.

۱. مقدمه

بتن به دلیل مزایای متعدد فنی و اقتصادی پرمصرف‌ترین مصالح در مهندسی عمران است. در عین حال بتن کاستی‌هایی دارد که باید در کاربرد آن لحاظ شود. خمیر سیمان هیدراته با قرارگرفتن در محیط به دلیل تبادل رطوبتی و خروج رطوبت از منافذ دچار انقباض قابل توجهی می‌شود (حدود ۰٫۶ درصد). به دلیل کاربرد سنگ‌دانه‌ها، میزان جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن در بتن معمولاً در محدوده‌ی ۰٫۰۵ الی ۰٫۱ درصد است، اما جمع‌شدگی بتن در صورت مقید شدن می‌تواند منجر به ترک‌خوردگی شود.[۱-۳]

در دال‌های بتنی روی زمین ـ نظیر کف کارخانه‌ها و پارکینگ‌ها و غیره و همچنین در رویه‌های بتنی، یکی از موارد مهم طراحی، کنترل ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خشک شدن بتن است.[۴-۷] برای کنترل ترک‌خوردگی معمولاً لحاظ کردن درزهای انقباضی در فواصل معین که بستگی به نوع بتن به لحاظ مقدار جمع‌شدگی، ضخامت کف یا رویه و نیز میزان قید اعمالی از کف دارد، ضروری است. در صورت استفاده از تسلیح نظیر مش‌های فولادی، فواصل درزها قابل افزایش است.[۶و۸]

با توسعه‌ی فنّاوری بتن‌های الیافی امکان جایگزینی مش با الیاف مطرح شده و مزایایی نظیر عدم نیاز به جایگذاری مش و افزایش سرعت اجرا باعث تمایل مجریان و کارفرمایان برای استفاده از الیاف شده است. با تولید و عرضه‌ی الیاف متنوع نظیر الیاف فولادی، الیاف پلیمری میکرو و ماکرو، بررسی عملکرد این الیاف در مقادیر مختلف مصرف مدنظر محققین قرار گرفته است. طول الیاف پلیمری میکرو معمولاً کم‌تر از ۲۵ میلی‌متر و قطر آن درحدود ۲۰ تا ۱۰۰ میکرومتر است. بررسی‌های انجام شده درخصوص کنترل ترک‌های جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن نشان می‌دهد که با توجه به محدودیت در حداکثر مقدار قابل استفاده از الیاف پلیمری میکرو که حدود ۰٫۲ درصد است، نمی‌توان از این الیاف انتظار عملکرد قابل مقایسه با مش‌های فولادی را داشت.[۹و۱۰] در خصوص الیاف فولادی مشخص شده است که این الیاف در کنترل زمان وقوع ترک و نیز میزان بازشدگی ترک عملکرد مؤثری دارند، اگرچه میزان اثر بستگی به مقدار مصرف این الیاف دارد.[۱۰-۱۲] نتایج برخی از تحقیقات نشان می‌دهد استفاده از الیاف فولادی به میزان ۰٫۲۵ و ۱ درصد (حجمی) عرض ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی خشک شدن را از حدود ۱ میلی‌متر برای مخلوط کنترل (فاقد الیاف) به ترتیب به ۰٫۲۵ و ۰٫۱ میلی‌متر کاهش می‌دهد.[۱۳]

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۷/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۷/۳/۱، پذیرش ۱۳۹۷/۴/۱۳.
DOI:10.24200/J30.2018.5210.2221

الیاف پلیمری ماکرو در مقایسه با الیاف پلیمری میکرو و الیاف فولادی جدیدترند. طول این الیاف حدوداً ۳۰ تا ۶۰ میلی‌متر است و طبق الزامات استاندارد ASTM C۱۱۱۶ [۱۴] قطر معادل الیاف ماکرو بیشتر از ۰٫۳ میلی‌متر است. ابعاد بزرگ‌تر الیاف پلیمری ماکرو استفاده از این الیاف را در مقادیر بالاتر از آنچه برای الیاف میکرو معمول است ممکن می‌سازد. تحقیقات انجام شده روی این نوع الیاف به لحاظ کنترل ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی نسبتاً محدود بوده است. شرکت‌های تولیدکننده‌ی این الیاف مدعی عملکرد مناسب الیاف پلیمری ماکرو هستند، اما برخی تحقیقات نشان داده که عملکرد این الیاف در مقایسه با الیاف فولادی، در مقدار برابر مصرف، ضعیف‌تر است.[۱۵] همچنین نتایج دیگر بررسی‌ها نشان می‌دهد که در مقادیر مصرف پایین (حدود ۰٫۲۵ درصد) تفاوت قابل توجهی بین الیاف فولادی و الیاف پلیمری در به تأخیر انداختن زمان ترک‌خوردگی وجود ندارد؛ مقایسه‌ی عملکرد این الیاف در مقادیر بالای مصرف بیانگر عملکرد بهتر الیاف فولادی است.[۱۰] تحقیق اخیر یوسفیه و همکاران نیز که محدود به بیشینه‌ی ۰٫۲ درصد استفاده از الیاف پلیمری ماکرو بوده حاکی از عدم عملکرد این الیاف (در مقادیر کم استفاده) در به تعویق انداختن زمان وقوع ترک ناشی از جمع‌شدگی بوده است.[۱۶] بررسی‌های Yin و همکاران[۱۷] درخصوص عملکرد الیاف مختلف نیز، به‌لحاظ کنترل ترک‌خوردگی ناشی از خشک شدن جمع‌بندی مشخصی ارائه نداده است. دیگر بررسی‌های انجام شده در مورد اثر الیاف بر جمع‌شدگی آزاد[۱۸] نشان می‌دهد که حضور الیاف تأثیر محسوسی در این خصوص ندارد.

با توجه به در دسترس قرارگرفتن الیاف پلیمری ماکرو در داخل کشور، مشخص کردن اثر کاربرد این الیاف در مقایسه با الیاف فولادی در کنترل ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خشک شدن حائز اهمیت است. تحقیقات قبلی انجام شده درخصوص الیاف پلیمری ماکرو با لحاظ کردن نسبت‌های مختلف استفاده و مقایسه‌ی هم زمان با الیاف فولادی محدود است و جمع‌بندی دقیقی نیز در این خصوص ارائه نشده است. در عین حال الیاف پلیمری ماکرو علاوه بر حالت تک‌رشته‌یی ضخیم، به‌صورت الیاف متشکل از رشته‌های تابیده شده (multi strand) نیز عرضه می‌شود که مقایسه‌ی مستقیمی در این خصوص صورت نگرفته است. در تحقیق حاضر عملکرد دو نوع الیاف پلیمری شامل تک‌رشته‌یی ضخیم و چندرشته‌یی تابیده شده با عملکرد الیاف پلیمری میکرو و الیاف فولادی در درصدهای مختلف مصرف به لحاظ جمع‌شدگی آزاد و جمع‌شدگی مقید مقایسه شده است.

۲. برنامه‌ی آزمایشگاهی

۱.۲. کلیات

در این تحقیق عملکرد الیاف پلیمری مختلف و الیاف فولادی در کنترل ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خشک شدن بتن بررسی شده است. یک نوع الیاف فولادی و دو نوع الیاف پلیمری ماکرو در مقادیر استفاده ۰٫۲۵ و ۰٫۵ و ۱ درصد حجمی و همچنین یک نوع الیاف پلیمری میکرو در ۰٫۲۵ درصد حجمی مورد مطالعه قرارگرفته است. با احتساب مخلوط کنترل (مخلوط بدون الیاف) تعداد مخلوط‌های مورد مطالعه ۱۱ عدد بوده است. آزمایش‌های انجام شده شامل آزمایش تعیین مقاومت فشاری و کششی، جمع‌شدگی آزاد و جمع‌شدگی مقید با استفاده از حلقه‌ی جمع‌شدگی بوده است.

۲.۲. مواد و مصالح

۱.۲.۲. سیمان

در این آزمایش از سیمان تیپ دو کارخانه سیمان تهران استفاده شده که مشخصات آن در جدول ۱ آمده است.

۲.۲.۲. سنگدانه‌ها

مصالح سنگی مورد استفاده از منابع جنوب غربی تهران تهیه شده است. ماسه‌ی مورد استفاده عمدتاً غیرشکسته و شن مورد استفاده نیمه‌شکسته است. با توجه به این که حداکثر اندازه‌ی مجاز مصالح دانه‌یی مورد استفاده در بتن برای آزمایش حلقه‌ی جمع‌شدگی مقید طبق استاندارد ASTM C۱۵۸۱ [۱۹] باید به ۱۳ میلی‌متر محدود شود، بیشینه اندازه‌ی مصالح درشت‌دانه معادل ۱۲٫۵ میلی‌متر در نظرگرفته شده است. دانه‌بندی شن و ماسه در محدوده‌ی استاندارد ۳۰۲ ایران[۲۰] بوده است. مقادیر جذب آب و جرم حجمی ماسه‌ی مورد استفاده ۴٫۸ درصد و ۲٫۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب تعیین شد و مقادیر متناظر برای نمونه شن ۳٫۳ درصد و ۲٫۵۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب حاصل شد.

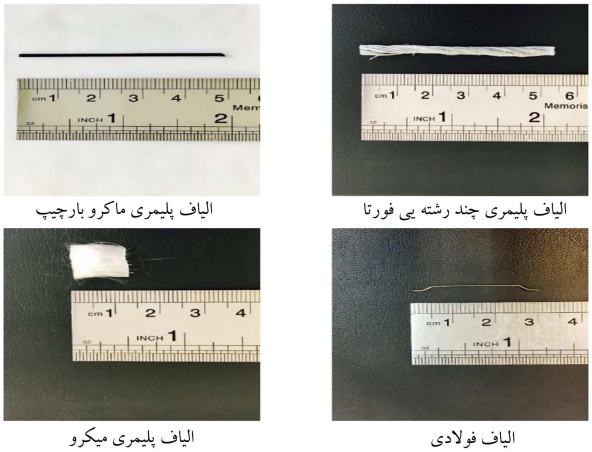
۳.۲.۲. الیاف

در این پژوهش از دو نوع الیاف پلیمری در اندازه‌ی ماکرو، یک نوع الیاف پلیمری میکرو و یک نوع الیاف فولادی استفاده شده است. الیاف پلیمری ماکرو شامل الیاف پلیمری چندرشته‌یی فورتا، الیاف پلیمری تک‌رشته‌یی بارچیپ سیاه و الیاف فولادی از نوع قلاب‌دار هستند. در شکل ۱ تصاویر الیاف مورد استفاده و در جدول ۲ مشخصات اعلام شده توسط تولیدکننده الیاف ارائه شده است.

با توجه به این که برای الیاف پلیمری ماکرو مقادیر مدول الاستیسیته و بیشینه‌ی مقاومت کششی توسط تولیدکنندگان مشخص نشده بود این مقادیر با انجام آزمایش تعیین مدول الاستیسیته الیاف طبق استاندارد ASTM۱۵۵۷ [۲۱] تعیین شد. (شکل ۲).

جدول ۱. مشخصات آزمایشگاهی سیمان مورد استفاده.

غلظت خمیر نرمال سیمان بر حسب درصد	زمان گیرش سیمان (دقیقه)		مقاومت فشاری ۲۸ روزه (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)
	اولیه	نهایی	
۲۱٫۷۵	۱۴۰	۲۵۰	۳۱۲

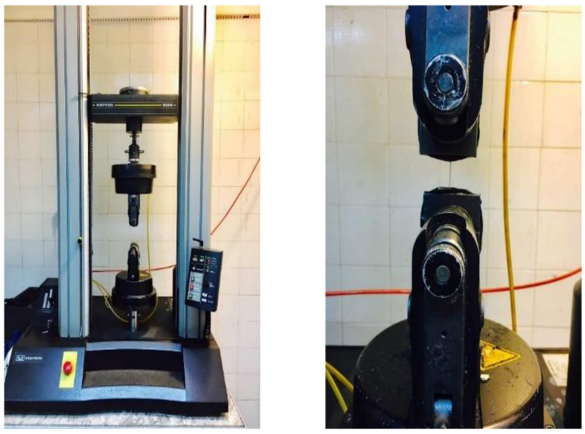


شکل ۱. تصاویر الیاف مورد استفاده.

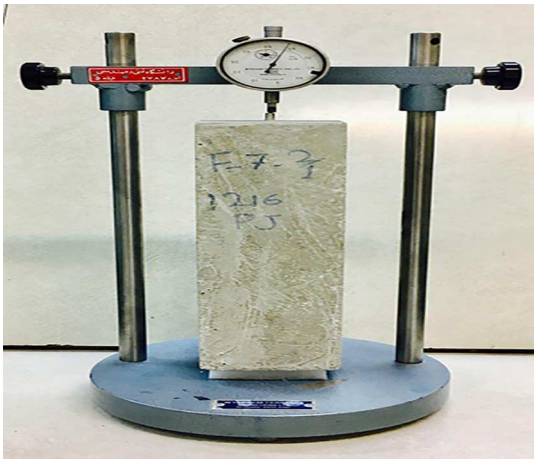
جدول ۲. مشخصات الیاف مورد استفاده.

خواص	الیاف ماکرو		الیاف	
	فورتا	تک‌رشته‌یی	فولادی	میکرو
نام تجاری	Forta ferro	Barchip	Dramix	PP
نوع مواد اولیه	پلی‌پروپیلن	پلی‌پروپیلن	فولاد	پلی‌پروپیلن خالص
رنگ	خاکستری	مشکی	نقره‌یی	سفید
شکل	رشته‌های درهم تابیده/تارهای شبکه‌یی	تک رشته‌یی موج‌دار	قلاب‌دار	شبکه‌یی
وزن مخصوص (تن بر مترمکعب)	۰٫۹۱	۰٫۹۱	۷٫۸۱	۰٫۹۱
طول (میلیمتر)	۵۰	۵۰	۳۵	۱۲
قطر (میلیمتر)	۰٫۳۴	۰٫۵-۱	۰٫۵۵	۰٫۰۲
مقاومت کششی (مگاپاسکال)	*۶۹۳	*۶۴۰	۱۱۵۰	۳۰۰
دمای ذوب (درجه سانتی‌گراد)	۱۶۵	۱۷۹-۱۵۹	۱۵۰۰	۱۶۵-۱۶۰
مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	*۶٫۴	*۱٫۴	۲۱۰	۱۰-۳

* این نتایج بر اساس آزمایش انجام شده توسط نویسندگان به‌دست آمده است، بقیه‌ی موارد بر اساس اطلاعات شرکت‌های تولیدکننده‌ی الیاف می‌باشد.



شکل ۲. آزمایش تعیین مدول الاستیسیته الیاف پلیمری ماکرو.



شکل ۳. دستگاه کامپراتور مورد استفاده برای تعیین جمع‌شدگی آزاد.

۳.۲. مخلوط‌های مورد مطالعه

طرح اختلاط پایه برای تمامی مخلوط‌ها یکسان بوده و درصدهای مختلف الیاف به مخلوط پایه اضافه شد. مقدار سیمان ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت آب به سیمان ۰٫۴۶ در نظرگرفته شده است. اسلامپ متوسط برای همه‌ی مخلوط‌ها برابر ۷ سانتی‌متر (محدوده‌ی S2 استاندارد ۳۵۱۹ ایران[۲۲] ۵ تا ۹ سانتی‌متر) در نظرگرفته شده است. برای جبران افت کارایی ناشی از کاربرد الیاف و در عین حال حفظ نسبت $\frac{W}{C}$ یکسان برای مخلوط‌های مختلف، از مقادیر لازم فوق روان‌کننده در ساخت مخلوط‌ها استفاده شد. برای کدگذاری مخلوط‌های مختلف از حروف اختصاری "Fo"، "Ba"، "PP" و "St" به ترتیب برای مخلوط‌های حاوی الیاف پلیمری ماکرو فورتا و ماکرو بارچیپ و الیاف پلیمری میکرو و فولادی استفاده شد. همچنین اعداد ۰٫۲۵، ۰٫۵ و ۱ به کار رفته درکد مخلوط‌ها نشان‌دهنده‌ی درصد مصرف الیاف مورد استفاده است. جزئیات مربوط به مخلوط‌های مورد مطالعه در این تحقیق در جدول ۳ ارائه شده است.

۴.۲. آزمایش‌های انجام شده

۱.۴.۲. خواص مقاومتی

مقاومت فشاری مخلوط‌های ساخته شده طبق استاندارد ۳۲۰۶ ایران[۲۳] روی آزمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰ سانتی‌متر در سن ۲۸ روز تعیین شد. آزمایش برزیلی برای تعیین مقاومت کششی مخلوط‌های مختلف طبق استاندارد ASTM C496 [۲۴] روی آزمونه‌های استوانه‌یی ۲۰ × ۱۰ سانتی‌متر انجام شد.

۲.۴.۲. جمع‌شدگی آزاد

جمع‌شدگی آزاد طبق استاندارد ASTM C157 [۲۵] روی نمونه‌های منشوری به ابعاد ۲۷۵ × ۷۵ × ۷۵ میلی‌متر انجام شد. پس از عمل‌آوری مرطوب به مدت هفت روز، نمونه‌ها در محیطی با رطوبت نسبی ۵ ± ۵۰ درصد نگه‌داری شده و در زمان‌های مختلف میزان جمع‌شدگی آزاد آن‌ها با دستگاه کامپراتور به دقت ۰٫۰۰۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شد (شکل ۳).

جدول ۳. جزئیات مخلوط‌های مورد بررسی.

کد مخلوط	سیمان ($\frac{kg}{m^3}$)	آب ($\frac{kg}{m^3}$)	درشت‌دانه ($\frac{kg}{m^3}$)	ریزدانه ($\frac{kg}{m^3}$)	جرم حجمی بتن تازه ($\frac{g}{m^3}$)	الیاف		فوق روان‌کننده ($\frac{kg}{m^3}$)
						نوع	درصد کاربرد	
کنترل	۴۰۰	۱۸۴	۶۶۸	۱۰۰۲	۲٫۲۹۱	-	-	۰٫۳
Fo-۰٫۲۵	۴۰۰	۱۸۴	۶۶۸	۱۰۰۲	۲٫۳۱۵	فورتا	۰٫۲۵	۱
Fo-۰٫۵	۴۰۰	۱۸۴	۶۶۸	۱۰۰۲	۲٫۳۱	فورتا	۰٫۵	۱٫۶
Fo-۱	۴۰۰	۱۸۴	۶۶۸	۱۰۰۲	۲٫۲۹۵	فورتا	۱	۳٫۳
Ba-۰٫۲۵	۴۰۰	۱۸۴	۶۶۸	۱۰۰۲	۲٫۳۱۷	پلیمری ماکرو مشکی	۰٫۲۵	۰٫۷
Ba-۰٫۵	۴۰۰	۱۸۴	۶۶۸	۱۰۰۲	۲٫۳۲	پلیمری ماکرو مشکی	۰٫۵	۱
Ba-۱	۴۰۰	۱۸۴	۶۶۸	۱۰۰۲	۲٫۲۹۵	پلیمری ماکرو مشکی	۱	۱٫۱۷
PP-۰٫۲۵	۴۰۰	۱۸۴	۶۶۸	۱۰۰۲	۲٫۲۳	پلیمری میکرو	۰٫۲۵	۱٫۸۳
St-۰٫۲۵	۴۰۰	۱۸۴	۶۶۸	۱۰۰۲	۲٫۳۳۱	فولادی	۰٫۲۵	۱
St-۰٫۵	۴۰۰	۱۸۴	۶۶۸	۱۰۰۲	۲٫۳۵۳	فولادی	۰٫۵	۱٫۲
St-۱	۴۰۰	۱۸۴	۶۶۸	۱۰۰۲	۲٫۳۷۳	فولادی	۱	۱٫۴۳

۳.۴.۲. جمع‌شدگی مقید

محققین از آزمایش‌های مختلفی برای ارزیابی پتانسیل ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی مقید استفاده کرده‌اند،[۲۶] اما تنها آزمایش استانداردی که در این خصوص تدوین شده، آزمایش جمع‌شدگی حلقه‌ی مقید طبق استاندارد ASTM C۱۵۸۱ است.[۱۹] این آزمایش در تحقیق حاضر مبنای ارزیابی عملکرد مخلوط‌های مختلف قرار گرفت. با توجه به جدید بودن نسبی این آزمایش در کشور از یک سو و اطلاعات مختلفی که از این آزمایش قابل حصول است، در ادامه جزئیاتی درخصوص این آزمایش ارائه می‌شود. چنان که در شکل ۴الف مشخص است، تجهیزات آزمایش شامل یک حلقه‌ی فولادی داخلی به ضخامت ۱۵ میلی‌متر و قطر خارجی ۳۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر است. برای قالب خارجی نیز یک حلقه‌ی فولادی نازک با قطر داخلی ۴۰۵ میلی‌متر به کار می‌رود. با توجه به ابعاد حلقه و قالب، ضخامت حلقه‌ی بتنی برابر با ۴۰ میلی‌متر حاصل می‌شود. پس از قالب‌گیری آزمونه‌ها، بلافاصله روی سطح بالایی آن‌ها با نایلون پوشیده شد تا از خروج رطوبت جلوگیری شود. پس از ۲۴ ساعت قالب‌های دور آزمونه‌ها باز شد و روی سطح بالایی آن‌ها با پارافین پوشش داده شد؛ بدین ترتیب خروج رطوبت فقط از سطوح جانبی نمونه صورت گرفت. چنان که در شکل ۴ب مشاهده می‌شود دو عدد کرنش‌سنج متصل به دستگاه ثبت داده‌ها روی وجه داخلی حلقه‌ی فولادی نصب شده که کرنش‌های اعمال شده به حلقه‌ی فولادی داخلی ناشی از جمع‌شدگی حلقه‌ی بتنی را اندازه‌گیری می‌کند. در این پژوهش به‌منظور افزایش دقت اندازه‌گیری، برای هر مخلوط دو آزمونه حلقه‌ی بتنی در نظر گرفته شد و نتایج ارائه شده از میانگین نتایج این دو حلقه حاصل شد.

- **مشخص کردن زمان وقوع ترک**

جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن حلقه بتنی باعث اعمال فشار به حلقه فولادی و ایجاد کرنش‌های فشاری در آن می‌شود که توسط کرنش‌سنج‌های نصب شده روی سطح داخلی حلقه فولادی اندازه‌گیری و با دستگاه ثبت داده‌ها ثبت می‌شود. به‌محض ترک‌خوردگی حلقه‌ی بتنی بخش قابل توجهی از تنش‌ها آزاد می‌شود و کرنش‌سنج‌ها افت سریع کرنش‌های فشاری را نشان می‌دهند که به‌عنوان زمان وقوع ترک در نظر گرفته می‌شود. زمان وقوع ترک (سن ترک‌خوردگی) برابر است با مدت زمان سپری شده از قالب‌گیری آزمونه تا وقوع ترک. زمان خالص وقوع ترک (t_{cr}) برابر است با مدت زمان بین شروع خشک شدن و ترک خوردن

الف) شکل شماتیک آزمایش جمع شدگی حلقه ی مفید؛

ب) تصویری از نمونه ی بتنی تحت آزمایش حلقه ی جمع شدگی به کار رفته در تحقیق حاضر.

شکل ۴. جزئیات آزمایش حلقه جمع شدگی مقید.

و به عنوان معیاری از پتانسیل ترک‌خوردگی در نظر گرفته می‌شود. استاندارد ASTM C۱۵۸۱ مخلوط‌های بتنی را براساس زمان خالص وقوع ترک به چهار رده با پتانسیل زیاد، با پتانسیل متوسط تا زیاد، با پتانسیل کم تا متوسط و با پتانسیل کم ترک‌خوردگی تقسیم‌بندی می‌کند. مخلوط‌های با زمان ترک‌خوردگی کم‌تر از ۷ روز دارای پتانسیل زیاد ترک‌خوردگی و مخلوط‌های با زمان خالص ترک‌خوردگی بیشتر از ۲۸ روز دارای پتانسیل ترک‌خوردگی کم هستند.

- **تعیین نرخ توسعه‌ی تنش کششی در حلقه بتنی**

طبق استاندارد ASTM C۱۵۸۱ برای تعیین پتانسیل ترک‌خوردگی علاوه بر پارامتر سن ترک‌خوردگی خالص (t_{cr})، پارامتر دیگری مطرح شده که نرخ توسعه‌ی تنش کششی در حلقه‌ی بتنی (S) نام دارد مطرح شده است که با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه است.

ابتدا نمودار کرنش اندازه‌گیری شده توسط دو کرنش‌سنج روی حلقه بر حسب جذر زمان رسم می‌شود و با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی نمودار، شیب خط که معرف فاکتور نرخ کرنش (α) است به دست می‌آید.

$$\varepsilon_{net} = \alpha\sqrt{t} + k \qquad (۱)$$

نرخ متوسط فاکتور کرنش (α_{avg}) با گرفتن میانگین فاکتور نرخ کرنش برای دو کرنش‌سنج نصب شده روی هر حلقه به دست می‌آید. در ادامه برای محاسبه نرخ توسعه‌ی تنش کششی در حلقه بتنی از رابطه‌ی ۲ استفاده می‌شود.

$$q = \frac{G|\alpha_{avg}|}{2\sqrt{t_r}} \quad (2)$$

که در آن، q نرخ توسعه‌ی تنش کششی در یک حلقه بتنی (مگاپاسکال بر روز)، G معادل ۷۲٫۲ گیگاپاسکال و t_r زمان سپری شده تا لحظه‌ی ترک‌خوردگی یا در صورت ترک نخوردن آزمونه زمان پایان آزمایش (روز) است. با میانگین گرفتن از نرخ توسعه‌ی تنش کششی (q) برای دو حلقه‌ی مربوط به هر مخلوط پارامتر نرخ متوسط توسعه‌ی تنش (S) محاسبه می‌شود. استاندارد ASTM C۱۵۸۱ پتانسیل ترک‌خوردگی مخلوط‌های بتنی را براساس نرخ متوسط توسعه‌ی تنش کششی به چهار رده‌ی زیاد، متوسط تا زیاد، کم تا متوسط و کم طبقه‌بندی کرده است. نرخ توسعه‌ی تنش بیشتر از ۰٫۳۴ مگاپاسکال بر روز به‌عنوان پتانسیل زیاد ترک‌خوردگی و اعداد کم‌تر از ۰٫۱ مگاپاسکال بر روز به‌عنوان پتانسیل کم ترک‌خوردگی در نظر گرفته می‌شوند.

۴.۴.۲. میزان بازشدگی عرض ترک‌ها با استفاده از میکروسکوپ چشمی

علاوه بر کنترل کرنش‌ها، سطوح حلقه‌های بتنی متناوباً با میکروسکوپ چشمی (Crackscope) مورد بررسی قرار گرفته و زمان وقوع اولین ترک به‌صورت مجزا از این طریق نیز مشخص شد (شکل ۵). پس از وقوع ترک‌خوردگی، عرض ترک‌ها در چند نقطه از طول ترک اندازه‌گیری شد. بیشینه عرض ترک برای هر مخلوط در سن ۲۸ روز با دقت ۰٫۰۵ میلی‌متر مشخص شد (شکل ۶). بدیهی است بیشینه‌ی

شکل ۵. میکروسکوپ چشمی (Crackscope).

شکل ۶. نمونه‌یی از ترک اندازه‌گیری شده.

بازشدگی ترک پارامتری مهم در ارزیابی عملکرد الیاف در کنترل ترک‌خوردگی ناشی از انقباض خشک شدن است.

۳. نتایج به دست آمده و تفسیر آن‌ها

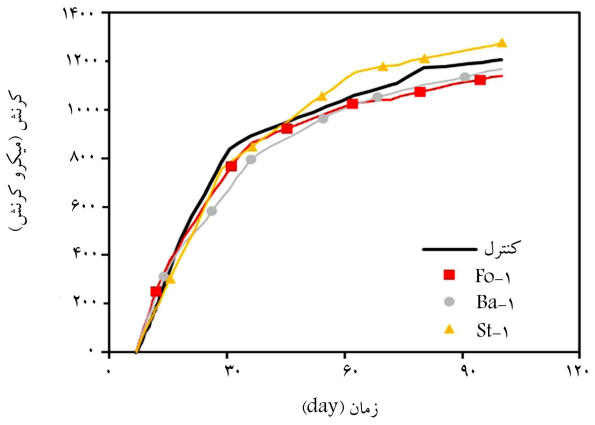
۱.۳. مقاومت‌های فشاری و کششی

در جدول ۴ نتایج آزمایش مقاومت فشاری مخلوط‌های مختلف ارائه شده است. نتایج نشانگر این است که کاربرد الیاف فولادی تا ۱ درصد و الیاف پلیمری ماکرو تا ۰٫۵ درصد تأثیر محسوسی روی مقاومت فشاری بتن نداشته است. برای مخلوط‌های حاوی الیاف پلیمری ماکرو در ۱ درصد استفاده شاهد قدری افت مقاومت فشاری هستیم که این اثر برای الیاف فورتا بیشتر است.

تأثیر استفاده از الیاف در مقاومت کششی بتن نیز تا حدودی مشابه با مقاومت فشاری است. استفاده از الیاف مختلف پلیمری و فولادی تا ۰٫۵ درصد تأثیر قابل توجهی روی مقاومت کششی نداشته است، اما در مقدار استفاده‌ی ۱ درصد، الیاف فولادی مقاومت کششی را تاحدودی افزایش داده است. با توجه به مدول کشسانی بالای فولاد در مقایسه با بتن، انتظار می‌رود با افزایش مقدار مصرف الیاف فولادی، مقاومت کششی بهبود یابد. الیاف پلیمری ماکرو در ۱ درصد مصرف برخلاف الیاف فولادی باعث کاهش مقاومت کششی شده است. با توجه به مدول کشسانی بسیار کم‌تر الیاف پلیمری در مقایسه با بتن و نیز دشواری در پخش این الیاف در مقادیر بالا، روند مشاهده شده قابل انتظار است. در رابطه با تأثیر الیاف بر خواص مکانیکی بتن مطالعات زیادی انجام شده است. جمع‌بندی عمومی نشانگر آن است که تأثیر الیاف چه فولادی و چه پلیمری در مقادیر نسبتاً کم استفاده تا حد ۱ درصد روی خواص مقاومت ـ چه کششی و چه فشاری ـ محدود است و تأثیر اصلی الیاف در افزایش طاقت پس از رسیدن به مقاومت بیشینه است.[۱۵و۲۷]

۲.۳. جمع‌شدگی آزاد

نتایج به دست آمده از آزمایش تعیین جمع‌شدگی آزاد مخلوط کنترل و مخلوط‌های حاوی الیاف مختلف با درصدهای مصرف مشخص شده نشان می‌دهد که اثر الیاف در جمع‌شدگی آزاد ناچیز است. شایان توجه است که نتیجه‌ی حاصل از تحقیق حاضر، مشابه نتایج حاصل از بررسی انجام شده درخصوص اثر الیاف پلیمری[۱۸] و نیز اثر الیاف فولادی[۱۲] بوده است. به عنوان نمونه‌یی از نتایج حاصله، در شکل ۷



شکل ۷. اثر الیاف در ۱٪ حجمی استفاده بر جمع‌شدگی آزاد.

جدول ۴. مشخصات مکانیکی و پتانسیل ترک خوردگی مخلوط‌ها.

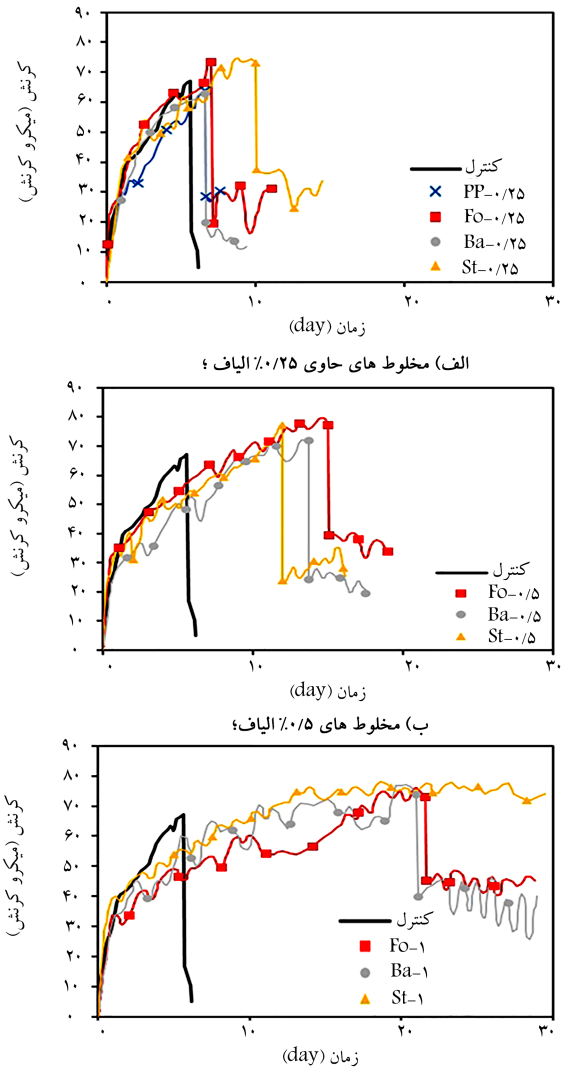
کد مخلوط	نوع الیاف	درصد حجمی الیاف (٪)	مقاومت فشاری ($\frac{kg}{cm^2}$)	مقاومت کششی ($\frac{kg}{cm^2}$)	زمان وقوع اولین ترک (روز)	زمان خالص ترک‌خوردگی (روز)	نرخ متوسط توسعه‌ی تنش کششی (S)	پتانسیل ترک‌خوردگی برای معیار زمان خالص ترک‌خوردگی (t_{cr})	پتانسیل ترک‌خوردگی براساس نرخ متوسط توسعه‌ی تنش کششی (S)
کنترل	-	-	۴۶۷٫۵	۴۱٫۳۸	۵٫۶	۴٫۶	۰٫۴۲	H	H
Fo-۰٫۲۵	فورتا	۰٫۲۵	۴۸۴	۴۰٫۵۳	۷	۶	۰٫۳۶	H	H
Fo-۰٫۵	فورتا	۰٫۵	۴۷۳٫۵	۳۸٫۸۴	۱۵	۱۴	۰٫۱۷	M-H	M-H
Fo-۱	فورتا	۱	۳۴۴	۳۰٫۵۶	۲۱٫۶	۲۰٫۶	۰٫۱۱	M-H	M-L
Ba-۰٫۲۵	بارچیپ سیاه	۰٫۲۵	۴۶۷٫۵	۳۹٫۷۹	۶٫۶	۵٫۶	۰٫۴	H	H
Ba-۰٫۵	بارچیپ سیاه	۰٫۵	۴۸۰	۳۷٫۶۷	۱۳٫۷	۱۲٫۷	۰٫۱۸	M-H	M-H
Ba-۱	بارچیپ سیاه	۱	۳۸۹٫۵	۳۸٫۲	۲۱	۲۰	۰٫۱۱	M-L	M-L
PP-۰٫۲۵	پلیمری میکرو	۰٫۲۵	۳۶۱	۴۱٫۱۶	۶٫۶	۵٫۶	۰٫۳۴	H	H
St-۰٫۲۵	فولادی	۰٫۲۵	۴۸۴	۳۶٫۲۸	۱۰	۹	۰٫۲۶	M-H	M-H
St-۰٫۵	فولادی	۰٫۵	۴۶۶	۴۴٫۳	۱۲	۱۱	۰٫۱۷	M-H	M-H
St-۱	فولادی	۱	۴۷۵	۵۴٫۳۲	در ۲۸ روز ترک نخورد	≤ ۲۸	۰٫۰۸	L	L

منحنی جمع‌شدگی آزاد مخلوط کنترل و مخلوط‌های حاوی ۱ درصد الیاف ارائه شده است.

۳.۳. جمع‌شدگی مقید

۱.۳.۳. زمان وقوع اولین ترک‌خوردگی

چنان که در بخش ۱.۳.۴.۲ اشاره شد، زمان وقوع ترک با بررسی منحنی کرنش فشاری حلقه‌ی فولادی داخلی و مشخص کردن زمان آزاد شدن کرنش فشاری در حلقه‌ی فولادی در اثر ترک خوردن حلقه‌ی بتنی قابل تشخیص است. در شکل ۸الف منحنی‌های کرنش برحسب زمان اندازه‌گیری شده مربوط به مخلوط کنترل و مخلوط‌های حاوی ۰٫۲۵ درصد مصرف الیاف مختلف ارائه شده است. چنان که مشاهده می‌شود استفاده از الیاف پلیمری میکرو و الیاف پلیمری ماکرو در مقدار کم استفاده (۰٫۲۵ درصد)، بر افزایش مدت زمان لازم برای وقوع ترک‌خوردگی تأثیری جزئی دارد. در این درصد مصرف، الیاف فولادی عملکرد نسبتاً بهتری در مقایسه با سایر الیاف داشته‌اند. با افزایش مقدار مصرف الیاف پلیمری ماکرو و فولادی به ۰٫۵ درصد افزایش بیشتری در مدت زمان ترک‌خوردگی حاصل می‌شود اما در این درصد مصرف، زمان ترک‌خوردگی الیاف پلیمری ماکرو بیشتر از الیاف فولادی است (شکل ۸ب). در شکل ۸ج منحنی‌های کرنش برحسب زمان حلقه‌ی فولادی مربوط به مخلوط کنترل و مخلوط‌های حاوی ۱ درصد الیاف مختلف ارائه شده است. چنان که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار مصرف الیاف پلیمری ماکرو به ۱ درصد افزایش بسیار قابل توجهی در مدت زمان ترک‌خوردگی مشاهده می‌شود. استفاده از ۱ درصد الیاف پلیمری ماکرو مشکی و فورتا مشابه بوده و باعث افزایش زمان ترک‌خوردگی ۵٫۵ روز مربوط به مخلوط کنترل به حدود ۲۱ روز شده است. همچنین عملکرد الیاف فولادی در ۱ درصد مصرف بهتر از الیاف پلیمری بوده است و در دوره‌ی سنجش کرنش‌ها که تا ۲۸ روز بوده، دچار ترک‌خوردگی نشده است. نتایج زمان وقوع ترک‌خوردگی برای مخلوط‌های مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. پتانسیل ترک‌خوردگی مخلوط‌های مختلف براساس معیار زمان ترک‌خوردگی مطابق با طبقه‌بندی ارائه شده توسط ASTM C1581 [۱۹] در جدول ۴ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که بتن کنترل پتانسیل زیادی برای ترک‌خوردگی دارد. استفاده از ۰٫۲۵ درصد الیاف مختلف تأثیر نسبتاً جزئی در بهبود این پتانسیل دارد



الف) مخلوط های حاوی ۰٫۲۵٪ الیاف ؛

ب) مخلوط های ۰٫۵٪ الیاف؛

ج) مخلوط های حاوی ۱٪ الیاف.

شکل ۸. منحنی‌های کرنش حلقه فولادی برای مخلوط‌های مختلف.

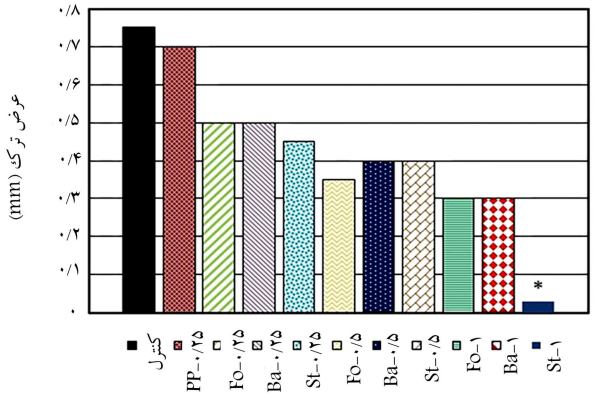
جدول ۵. بیشینه‌ی عرض ترک‌خوردگی در سن ۲۸ روز.

کد مخلوط	نوع الیاف	درصد کاربرد الیاف (٪)	زمان وقوع اولین ترک (روز)	بیشینه‌ی بازشدگی ترک در ۲۸ روز (میلی‌متر)
کنترل	-	-	۵/۶	۰/۷۵
PP-۰/۲۵	پلیمری میکرو	۰/۲۵	۶/۶	۰/۷
Fo-۰/۲۵	فورتا	۰/۲۵	۷	۰/۵
Fo-۰/۵	فورتا	۰/۵	۱۵	۰/۳۵
Fo-۱	فورتا	۱	۲۱/۶	۰/۳
Ba-۰/۲۵	بارچیپ سیاه	۰/۲۵	۶/۶	۰/۵
Ba-۰/۵	بارچیپ سیاه	۰/۵	۱۳/۷	۰/۴
Ba-۱	بارچیپ سیاه	۱	۲۱	۰/۳
St-۰/۲۵	فولادی	۰/۲۵	۱۰	۰/۴۵
St-۰/۵	فولادی	۰/۵	۱۲	۰/۴
St-۱	فولادی	۱	در ۲۸ روز ترک نخورد	در ۲۸ روز ترک نخورد

و مخلوط‌ها عمدتاً دارای پتانسیل ترک‌خوردگی زیاد یا متوسط هستند. افزایش مقدار الیاف به ۰/۵ درصد باعث قدری بهبود در وضعیت می‌شود، اما استفاده از ۱ درصد الیاف باعث بهبود قابل توجه در عملکرد شده و پتانسیل ترک‌خوردگی الیاف پلیمری کم تا متوسط ارزیابی می‌شود. برای الیاف فولادی پتانسیل ترک‌خوردگی در ۱ درصد مصرف کم ارزیابی شده است. در این تحقیق علاوه بر معیار سن ترک‌خوردگی خالص، برای طبقه‌بندی پتانسیل ترک‌خوردگی مخلوط‌ها از معیار نرخ متوسط توسعه‌ی تنش کششی نیز استفاده شد که نتایج آن با طبقه‌بندی براساس معیار سن ترک‌خوردگی خالص یکسان است. همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، در ۰/۲۵ درصد مصرف الیاف پلیمری، با وجود کاهش در نرخ توسعه‌ی تنش کششی نسبت به مخلوط کنترل، همچنان مخلوط‌ها در رده‌ی پتانسیل ترک‌خوردگی زیاد قرار می‌گیرند در حالی که وضع برای الیاف فولادی در همین درصد مصرف بهتر بوده و پتانسیل ترک‌خوردگی را یک رده کاهش می‌دهد. این در حالی است که برای همین مقدار کاهش در پتانسیل ترک‌خوردگی مخلوط‌های حاوی الیاف پلیمری به ۰/۵ درصد مصرف نیاز است. نرخ توسعه‌ی تنش کششی در مقدار ۱ درصد مصرف الیاف، برای الیاف فولادی کم‌تر از ۰/۱ به دست آمده که طبق طبقه‌بندی استاندارد ASTM C۱۵۸۱ در رده‌ی پتانسیل ترک‌خوردگی کم قرار می‌گیرد و این به عبارتی بهترین وضعیت نسبت به سایر الیاف است.

۴.۳. بیشینه عرض ترک

با اندازه‌گیری عرض ترک‌ها توسط دستگاه ترک‌سنج (Crackscope) بیشترین مقدار بازشدگی ترک‌ها برای هر نمونه در سن ۲۸ روز به دست آمد. نتایج حاصله در جدول ۵ و شکل ۹ ارائه شده‌اند. بیشترین بازشدگی عرض ترک برای مخلوط کنترل در ۲۸ روز ۰/۷۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. کاربرد الیاف پلیمری میکرو در ۰/۲۵ درصد درکاهش عرض ترک بی‌تأثیر بوده است. اثر استفاده از الیاف پلیمری ماکرو و حتی الیاف فولادی در ۰/۲۵ درصد مصرف درکاهش عرض ترک نسبتاً کم بوده است و مقدار بازشدگی ترک در حدود ۰/۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. با افزایش مقدار مصرف الیاف پلیمری ماکرو و الیاف فولادی به ۰/۵ درصد، مقدار عرض ترک حدود ۰/۴ میلی‌متر اندازه‌گیری شده که مؤید کاهش حدود ۵۰ درصدی در عرض ترک نسبت به مخلوط کنترل است. با افزایش مقدار مصرف الیاف پلیمری



شکل ۹. بیشترین عرض ترک در سن ۲۸ روز.

ماکرو به ۱ درصد میزان بازشدگی بیشینه عرض ترک حدود ۰/۳ میلی‌متر حاصل شد که نشان‌گر کاهش حدود ۶۰ درصد در عرض ترک در مقایسه با کنترل است. هر دو نوع الیاف پلیمری ماکرو مورد استفاده، شامل الیاف تک‌رشته‌یی و الیاف به‌هم تابیده، به لحاظ کنترل عرض ترک عملکرد مشابهی داشته‌اند. نکته‌ی قابل توجه این است که الیاف فولادی در ۱ درصد مصرف بهترین عملکرد را دارند و می‌توانند کاملاً از وقوع ترک جلوگیری کنند. شایان توجه است که عملکرد الیاف پلیمری ماکرو در مقادیر کم و متوسط استفاده مشابه عملکرد الیاف فولادی یا مشابه است. تحقیقات قبلی انجام شده در این خصوص عملکرد بهتر الیاف فولادی حتی در مقادیر کم و متوسط بوده است.

۴. نتیجه‌گیری

- الیاف فولادی و الیاف پلیمری ماکرو تا ۰/۵ درصد مصرف تأثیر قابل توجهی روی خواص مقاومتی بتن نداشته‌اند. در مقدار ۱ درصد مصرف الیاف پلیمری ماکرو باعث قدری کاهش در مقاومت فشاری و کششی بتن شده است، اما الیاف فولادی در ۱ درصد مصرف باعث افزایش مقاومت کششی بتن شده‌اند.

- استفاده از الیاف مختلف پلیمری و فولادی در مقادیر مورد بررسی تأثیر محسوس و مشخصی روی جمع‌شدگی آزاد (غیرمقید) نداشته است.
- نتایج آزمایش حلقه‌ی جمع‌شدگی که پتانسیل ترک‌خوردگی مخلوط‌ها را براساس معیارهای سن خالص ترک‌خوردگی و نرخ توسعه‌ی تنش تعیین می‌کند، نشان می‌دهد که انواع مختلف الیاف مورد مطالعه، در مقادیرکم مصرف (۰٫۲۵ درصد) تأثیر بسیارکمی درکنترل ترک‌خوردگی ناشی از خشک شدن داشته‌اند و پتانسیل ترک‌خوردگی این مخلوط‌ها در رده‌ی پتانسیل زیاد ترک‌خوردگی قرارگرفته است. با افزایش مقدار مصرف الیاف به ۰٫۵ درصد عملکرد آن‌ها بهبود یافته است. عملکرد الیاف پلیمری ماکرو و الیاف فولادی در این مقدار مصرف مشابه بوده و پتانسیل ترک‌خوردگی آن‌ها «متوسط تا زیاد» ارزیابی شده است. در مقدار استفاده ۱ درصد، الیاف فولادی بهترین عملکرد را در بین الیاف مورد مطالعه داشته‌اند و پتانسیل ترک‌خوردگی آن «کم» تعیین شده است.
- به لحاظ کنترل مقدار بازشدگی عرض ترک، تأثیر الیاف پلیمری ماکرو و الیاف فولادی در ۰٫۲۵ درصد مصرف مشابه بوده و باعث کاهش حدود ۳۵ درصدی عرض ترک‌ها شده‌اند. با افزایش درصد استفاده به ۰٫۵ درصد، عملکرد الیاف پلیمری و فولادی کماکان مشابه بوده و بیشینه‌ی بازشدگی ترک‌ها حدوداً ۵۰ درصد در مقایسه با مخلوط بدون الیاف کاهش یافته است. در ۱ درصد مصرف، الیاف فولادی در مقایسه با الیاف پلیمری ماکرو به‌مراتب عملکرد بهتری داشته به‌گونه‌یی که در سن ۲۸ از بروز ترک‌خوردگی جلوگیری کرد. اما الیاف پلیمری ماکرو در ۱ درصد مصرف باعث کاهش حدود ۶۰٪ درصد در عرض ترک در مقایسه با مخلوط بدون الیاف شدند.
- تفاوت در شکل الیاف پلیمری ماکرو که شامل الیاف ماکرو به‌صورت رشته‌های به هم تابیده (فورتا) و الیاف ماکرو به‌صورت تک رشته‌یی بارچیپ بوده‌اند تأثیر محسوسی در عملکرد این دو نوع الیاف نشان نداد.

تقدیر و تشکر

از شرکت دانش‌رویان یکتا ماندگار (دریم) برای پشتیبانی از تحقیق انجام شده و تأمین الیاف پلیمری مورد استفاده در تحقیق قدردانی می‌شود.

منابع (References)

1. Jafarifar, N., Pilakoutas, K. and Bennett, T. "Moisture transport and drying shrinkage properties of steel reinforced concrete", *Construction and Building Materials*, **73**, pp. 41-50 (2014).
2. Mindess, S., Young, J.F., and Darwin, D. "Concrete", Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 2th Edition (2003).
3. Radlinska, A. and Weiss, J. "Toward the development of a performance-related specification for concrete shrinkage", *ASCE Journal of Material in Civil Engineering*, **24**(1), pp. 64-71 (2012).
4. Hamad, M. "Determination of shrinkage crack risks in industrial concrete floors trough analyzing tests", M.S. Thesis, Dept. structural. Eng., KTH Univ., Stockholm, Sweden (2012).
5. Narin, F. and Wiklund, O. "Design of slabs on ground regarding shrinkage cracking", M.S. Thesis, Dept. Civil and Environmental. Eng., CHALMERS Univ., Gothenburg, Sweden, pp. 59 (2012).
6. ACI 360R-10, "Guide to Design of Slabs-on-Ground, ACI Committee 360 (2010).
7. ACI 325.12R-02 Reapproved 2013, "Guide to design of jointed concrete pavements for streets and local roads", ACI Committee 325 (2002).
8. ACI 224.4R-13- "Guide to design detailing to mitigate cracking", ACI Committee 224 (2014).
9. Trottier, J.F., Mahoney, M. and Forgeron, D. "Can synthetic fibers replace welded-wire mesh in slabs-on-ground?", *Concrete International*, **24**(11), pp. 59-68 (2002).
10. Voigt, T., Bui, V.K. and Shah, S.P. "Drying shrinkage of concrete reinforced with fibers and welded wire fabric", *ACI Materials Journal*, **101**(3), pp. 233-241 (2004).
11. Banthia, N., Bindiganavile, V., Jones, J. and et al. "Fiber-reinforced concrete in precast concrete applications: Research leads to innovative products", *PCI Journal*, **57**(3), pp. 33-46 (2012).
12. Shah, H.R., "Quantifying the role of steel fiber reinforcement in mitigating restrained shrinkage cracking in concrete", M.S. Thesis, Dept. civil. Eng., Purdue Univ., West Lafayette, United States (2004).
13. Lamond, J.F. and Pielert, J. H. "Significance of tests and properties of cncrete and concrete-making materials", West Conshohocken, ASTM International, STP169D, pp. 578-590 (2007).
14. ASTM C1116-03, "Standard specification for fiber reinforced concrete and shotcrete", ASTM international (2003).
15. Corinaldesi, V. and Nardinocchi, A. "Experimental study on cracking behavior of fiber reinforced concrete by ring test", *International Journal of Structural and Design*, **2**(1), pp. 37-43 (2015).
16. Yousefieh, N., Joshaghani, A., Hajibandeh, E. and et al. "Influence of fibers on drying shrinkage in restrained concrete", *Construction and Building Materials*, **148**, pp. 833-845 (2017).
17. Yin, S., Tuladhar, R., Shi, F. and et al. "Use of macro plastic fiber in concrete, A review", *Construction and Building Materials*, **93**, pp. 180-188 (2015).
18. Ideker, J.H. and Banuelos, J. "The use of synthetic blended fibers to reduce cracking risk in high performance concrete", university of Washington, final report, report NO. FHWA-OR-RD-15-05 (September 2014).
19. ASTM C1581, "Standard test method for determining age at cracking and induced tensile stress characteristics of mortar and concrete under restrained shrinkage", ASTM international, PO Box C700, 1-6 (2009). pp.
20. Concrete Aggregates-Specifications, INSO, NO 302, (2015).

21. ASTM C1557, "Standard test method for tensile strength and young's modulus of fibers" (2003).

22. Concrete-Classification of Consistency, ISIRI, NO 3519, First Edition.

23. Concrete-Determination of Compressive Strength of Test Specimens, ISIRI, NO 3206, First Edition.

24. ASTM C496, "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens" (2011).

25. ASTM C157/157M, "Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete" (2006).

26. Raoufi, K., Pour-Ghaz, M., Poursaee, A. and et al. "Restrained shrinkage cracking in concrete elements: Role of substrate bond on crack development", *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, **23**(6), pp. 895-902 (2011).

27. ACI 544-3, "Guide for specifying, proportioning and production of fiber reinforced concrete", ISBN 978-0-87031-311-0, pp. 4-8 (2008).