

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

Original Article

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 ترک خوردگی 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 جمع‌شدگی 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 (۲۵٪ و ۵٪ درصد مصرف) هستند. در 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 ترک خوردگی 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

با توسعه‌ی فناوری 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 در حدود ۲۰ تا ۱۰۰ میکرومتر است. بررسی‌های انجام شده در خصوص 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 ۲٪ درصد است، نمی‌توان از این الیاف انتظار عملکرد قابل مقایسه با مش‌های فولادی را داشت.^[۱-۹] 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 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 ۲۵٪ و ۱٪ میلی‌متر کاهش می‌دهد.^[۱۳]

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 قرار گرفتن در محیط به دلیل تبادل رطوبتی و خروج رطوبت از منافذ دچار انقباض قابل توجهی می‌شود (حدود 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 ترک خوردگی شود.^[۱-۳] در دال‌های بتنی روی زمین - نظیر کف کارخانه‌ها و پارکینگ‌ها و غیره و همچنین در روزه‌های بتنی، یکی از موارد مهم طراحی، کنترل ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدگی خشک شدن بتن است.^[۴-۶] برای کنترل ترک خوردگی معمولاً لحاظ کردن درزهای انقباضی در فواصل معین که بستگی به نوع بتن به لحاظ مقدار جمع‌شدگی، ضخامت کف یا روزه و نیز میزان قید اعمالی از کف دارد، ضروری است. در صورت استفاده از تسلیح نظیر مش‌های فولادی، فواصل درزها قابل افزایش است.^[۷-۹]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۷/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۷/۳/۱، پذیرش ۱۳۹۷/۴/۱۳

DOI:10.24200/J30.2018.5210.2221

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. ماسه ی مورد استفاده عمدتاً غیرشکسته و شن مورد استفاده نیمه شکسته است. با توجه به این که حداکثر اندازه ی مجاز مصالح دانه یی مورد استفاده در بتن برای آزمایش حلقه ی جمع شدگی مقید طبق استاندارد ASTM C1581^[۱۹] باید به ۱۳ میلی متر محدود شود، بیشینه اندازه ی مصالح درشت دانه معادل ۱۲٫۵ میلی متر در نظر گرفته شده است. دانه بندی شن و ماسه در محدوده ی استاندارد ۳۰۲ ایران^[۲۰] بوده است. مقادیر جذب آب و جرم حجمی ماسه ی مورد استفاده ۴٫۸ درصد و ۲٫۴۵ گرم بر سانتی متر مکعب تعیین شد و مقادیر متناظر برای نمونه شن ۳٫۳ درصد و ۲٫۵۴ گرم بر سانتی متر مکعب حاصل شد.

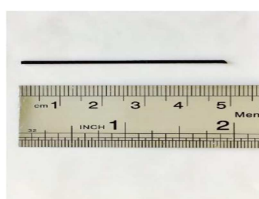
۳.۲.۲. الیاف

در این پژوهش از دو نوع الیاف پلیمری در اندازه ی ماکرو، یک نوع الیاف پلیمری میکرو و یک نوع الیاف فولادی استفاده شده است. الیاف پلیمری ماکرو شامل الیاف پلیمری چند رشته یی فورتا، الیاف پلیمری تک رشته یی بارچیب سیاه و الیاف فولادی از نوع قلاب دار 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 بیشینه ی مقاومت کششی توسط تولیدکنندگان مشخص نشده بود این مقادیر با انجام آزمایش تعیین مدول الاستیسیته الیاف طبق استاندارد ASTM ۱۵۵۷^[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 |



الیاف پلیمری ماکرو بارچیب



الیاف پلیمری چند رشته یی فورتا



الیاف پلیمری میکرو



الیاف فولادی

شکل ۱. تصاویر الیاف مورد استفاده.

الیاف پلیمری ماکرو در مقایسه با الیاف پلیمری میکرو و الیاف فولادی جدیدترند. طول این الیاف حدوداً ۳۰ تا ۶۰ میلی متر است و طبق الزامات استاندارد ASTM C ۱۱۱۶^[۱۴] قطر معادل الیاف ماکرو بیشتر از ۰٫۳ میلی متر است. ابعاد بزرگتر الیاف پلیمری ماکرو استفاده از این الیاف را در مقادیر بالاتر از آنچه برای الیاف میکرو معمول است ممکن می سازد. تحقیقات انجام شده روی این نوع الیاف به لحاظ کنترل ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی نسبتاً محدود بوده است. شرکت های تولیدکننده ی 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، ضعیف تر است.^[۱۵] همچنین نتایج دیگر بررسی ها نشان می دهد که در مقادیر مصرف پایین (حدود ۰٫۲۵ درصد) تفاوت قابل توجهی بین الیاف فولادی و الیاف پلیمری در به تأخیر انداختن زمان ترک خوردگی وجود ندارد؛ مقایسه ی عملکرد این الیاف در مقادیر بالای مصرف بیانگر عملکرد بهتر الیاف فولادی است.^[۱۶] تحقیق اخیر یوسفیه و همکاران نیز که محدود به بیشینه ی 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 جمع شدگی بوده است.^[۱۶] بررسی های Yin و همکاران^[۱۷] درخصوص عملکرد الیاف مختلف نیز، به لحاظ کنترل ترک خوردگی ناشی از خشک شدن جمع بندی مشخصی ارائه نداده است. دیگر بررسی های انجام شده در مورد اثر الیاف بر جمع شدگی آزاد^[۱۸] نشان می دهد که حضور الیاف تأثیر محسوسی در این خصوص ندارد.

با توجه به در دسترس قرار گرفتن الیاف پلیمری ماکرو در داخل کشور، مشخص کردن اثر کاربرد این الیاف در مقایسه با الیاف فولادی در کنترل ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی خشک شدن حائز اهمیت است. تحقیقات قبلی انجام شده درخصوص الیاف پلیمری ماکرو با لحاظ کردن نسبت های مختلف استفاده و مقایسه ی هم زمان با الیاف فولادی محدود است و جمع بندی دقیقی نیز در این خصوص ارائه نشده است. در عین حال الیاف پلیمری ماکرو علاوه بر حالت تک رشته یی ضخیم، به صورت الیاف متشکل از رشته های تابیده شده (multi strand) نیز عرضه می شود که مقایسه ی مستقیمی در این خصوص صورت نگرفته است. در تحقیق حاضر عملکرد دو نوع الیاف پلیمری شامل تک رشته یی ضخیم و چند رشته یی تابیده شده با عملکرد الیاف پلیمری میکرو و الیاف فولادی در درصدهای مختلف مصرف به لحاظ جمع شدگی آزاد و جمع شدگی مقید مقایسه شده است.

۲. برنامه ی آزمایشگاهی

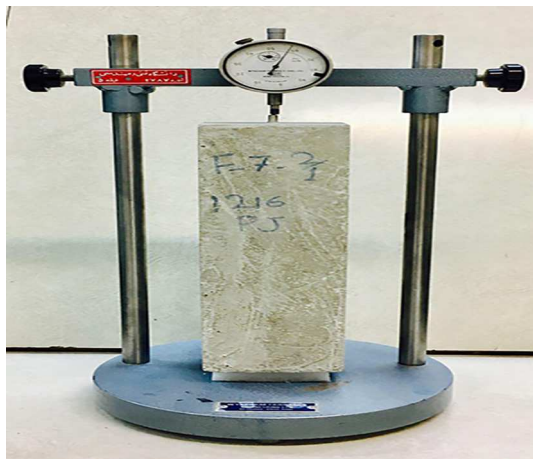
۱.۲. کلیات

در این تحقیق عملکرد الیاف پلیمری مختلف و الیاف فولادی در کنترل ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی 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 قرار گرفته است. با احتساب مخلوط کنترل (مخلوط بدون الیاف) تعداد مخلوط های مورد مطالعه ۱۱ عدد بوده است. آزمایش های انجام شده شامل آزمایش تعیین مقاومت فشاری و کششی، جمع شدگی آزاد و جمع شدگی مقید با استفاده از حلقه ی جمع شدگی بوده است.

جدول ۲. مشخصات الیاف مورد استفاده.

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

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



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



شکل ۲. آزمایش تعیین مدول الاستیسیته الیاف پلیمری ماکرو.

۴.۲. آزمایش‌های انجام شده

۱.۴.۲. خواص مقاومتی

مقاومت فشاری مخلوط‌های ساخته شده طبق استاندارد ۳۲۰۶ ایران [۲۳] روی آزمون‌های مکعبی به ابعاد ۱۰ سانتی‌متر در سن ۲۸ روز تعیین شد. آزمایش برزیلی برای تعیین مقاومت کششی مخلوط‌های مختلف طبق استاندارد ASTM C۴۹۶ [۲۴] روی آزمون‌های استوانه‌یی ۲۰ × ۱۰ سانتی‌متر انجام شد.

۲.۴.۲. جمع‌شدگی آزاد

جمع‌شدگی آزاد طبق استاندارد ASTM C۱۵۷ [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 ± ۵ درصد نگهداری شده و در زمان‌های مختلف میزان جمع‌شدگی آزاد آن‌ها با دستگاه کامپراتور به دقت ۰/۰۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شد (شکل ۳).

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 نظر گرفته شده است. اسلایم متوسط برای همه‌ی مخلوط‌ها برابر ۷ سانتی‌متر (محدوده‌ی S۲ استاندارد ۳۵۱۹ ایران [۲۲] ۵ تا ۹ سانتی‌متر) در نظر گرفته 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 در کد مخلوط‌ها نشان‌دهنده‌ی درصد مصرف الیاف مورد استفاده است. جزئیات مربوط به مخلوط‌های مورد مطالعه در این تحقیق در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. جزئیات مخلوط‌های مورد بررسی.

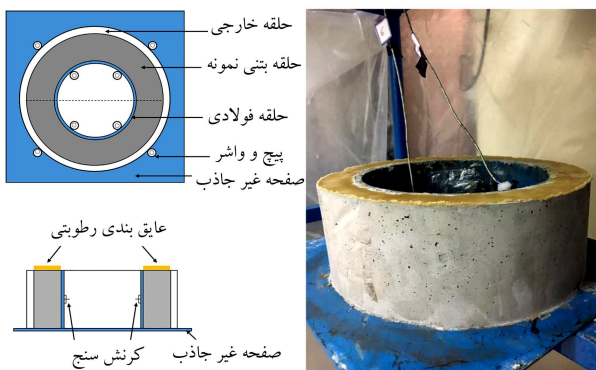
| کد مخلوط | سیمان ($\frac{kg}{m^3}$) | آب ($\frac{kg}{m^3}$) | درشت‌دانه ($\frac{kg}{m^3}$) | ریزدانه ($\frac{kg}{m^3}$) | جرم حجمی بتن تازه ($\frac{g}{m^3}$) | الیاف | | فوق روان‌کننده ($\frac{kg}{m^3}$) |
|----------|----------------------------|-------------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|-------------------|-------------|-------------------------------------|
| | | | | | | 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، اما تنها آزمایش استاندارد ASTM C۱۵۸۱ تدوین شده، آزمایش جمع‌شدگی حلقه‌ی مقید طبق استاندارد ASTM C۱۵۸۱ است. 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 ۴ الف 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 آزمون‌ها، بلافاصله روی سطح بالایی آن‌ها با نایلون پوشیده شد تا از خروج رطوبت جلوگیری شود. پس از ۲۴ ساعت قالب‌های دور آزمون‌ها 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 ۴ ب 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 به منظور افزایش دقت اندازه‌گیری، برای هر مخلوط دو آزمون 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. به محض 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 آزمون 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 حلقه‌ی جمع‌شدگی به کار رفته در تحقیق حاضر. ب) تصویری از نمونه‌ی بتنی تحت آزمایش (الف) کرنش‌سنج عایق بندی رطوبتی صفحه غیر جاذب کرنش سنج

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.

$$\epsilon_{net} = \alpha \sqrt{t} + k \quad (1)$$

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

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

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

که در آن، q نرخ توسعه‌ی تنش کششی در یک حلقه بتنی (مگاپاسکال بر روز)، G معادل $72/2$ گیگاپاسکال و t_r زمان سپری شده تا لحظه‌ی ترک خوردگی یا در صورت ترک نخوردن آزمون 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 می شود. استاندارد ASTM C1581 پتانسیل ترک خوردگی مخلوط‌های بتنی را براساس نرخ متوسط توسعه‌ی تنش کششی به چهار رده‌ی زیاد، متوسط تا زیاد، کم تا متوسط و کم طبقه بندی کرده است. نرخ توسعه‌ی تنش بیشتر از $0/34$ مگاپاسکال بر روز به عنوان پتانسیل کم زیاد ترک خوردگی و اعداد کم تر از $0/1$ مگاپاسکال بر روز به عنوان پتانسیل کم ترک خوردگی در نظر گرفته می شوند.

۳. نتایج به دست آمده و تفسیر آن‌ها

۳.۱. 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 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 ۵ درصد تأثیر قابل توجهی روی مقاومت کششی نداشته است، اما در مقدار استفاده‌ی ۱ درصد، الیاف فولادی مقاومت کششی را تا حدودی افزایش داده است. با توجه به مدول کشسانی بالای فولاد در مقایسه با بتن، انتظار می رود با افزایش مقدار مصرف 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 کم تر 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. جمع بندی عمومی نشانگر آن است که تأثیر الیاف چه فولادی و چه پلیمری در مقادیر نسبتاً کم استفاده تا حد ۱ درصد روی خواص مقاومت - چه کششی و چه فشاری - محدود است و تأثیر اصلی الیاف در افزایش طاقت پس از رسیدن به مقاومت بیشینه است. [۲۷، ۱۵]

۳.۲. جمع شدگی آزاد

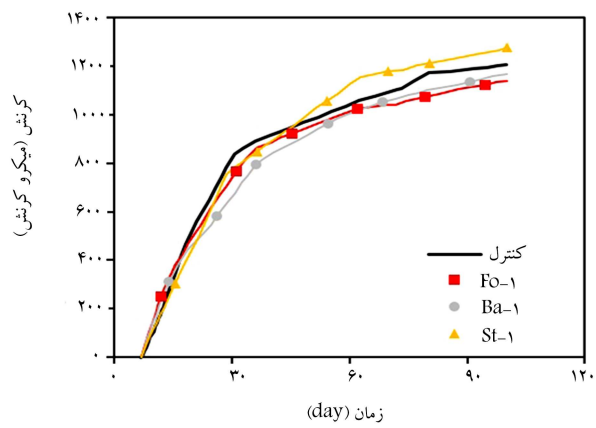
نتایج به دست آمده از آزمایش تعیین جمع شدگی آزاد مخلوط کنترل و مخلوط‌های حاوی الیاف مختلف با درصد‌های مصرف مشخص شده نشان می دهد که اثر الیاف در جمع شدگی آزاد ناچیز است. شایان توجه است که نتیجه‌ی حاصل از تحقیق حاضر، مشابه نتایج حاصل از بررسی انجام شده در خصوص اثر الیاف پلیمری [۱۸] و نیز اثر الیاف فولادی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

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 به صورت مجزا از این طریق نیز مشخص شد (شکل ۵). پس از وقوع ترک خوردگی، عرض ترک‌ها در چند نقطه از طول ترک اندازه گیری شد. بیشینه عرض ترک برای هر مخلوط در سن ۲۸ روز با دقت $0/05$ میلی متر مشخص شد (شکل ۶). بدیهی است بیشینه‌ی



شکل ۵. میکروسکوپ چشمی (Crackscope).

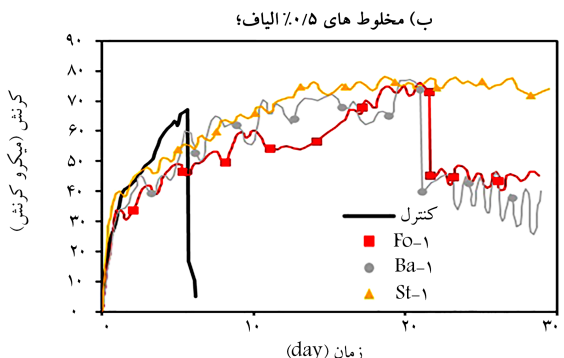
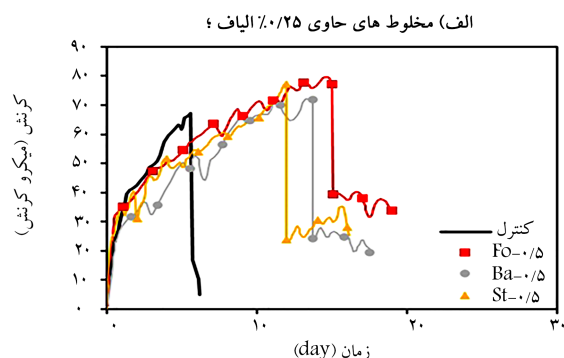
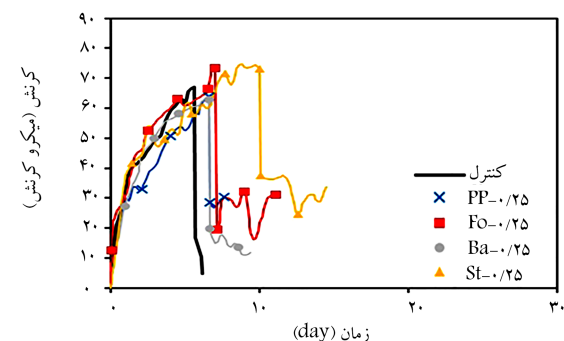


شکل ۷. اثر الیاف در ۱٪ حجمی استفاده بر جمع شدگی آزاد.



شکل ۶. نمونه‌ی بی از ترک اندازه گیری شده.

| کد مخلوط | نوع الیاف | درصد حجمی الیاف (%) | مقاومت | | زمان وقوع اولین ترک (روز) | زمان خالص ترک خوردگی (روز) | نرخ متوسط توسعه تنش برای معیار زمان خالص (توسعه تنش کششی (S)) | پتانسیل ترک خوردگی | |
|----------|--------------|---------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|---|--------------------|--------------------|
| | | | کششی ($\frac{kg}{cm^2}$) | فشاری ($\frac{kg}{cm^2}$) | | | | براساس نرخ متوسط | توسعه 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-H |
| 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 |



شکل ۸. منحنی‌های کرنش حلقه‌های حاوی ۱٪ الیاف.

شکل ۸. منحنی‌های کرنش حلقه‌های فولادی برای مخلوط‌های مختلف.

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

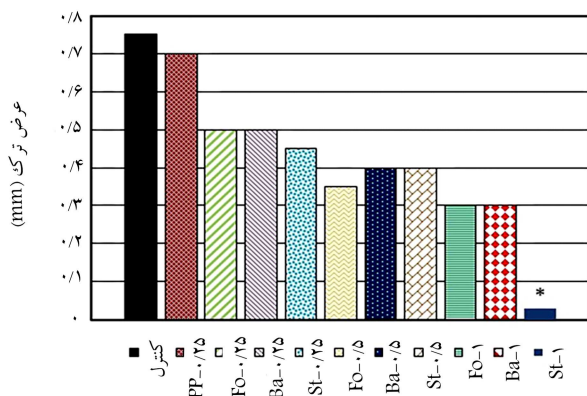
۳.۳ جمع‌شدگی مقید

۱.۳.۳. زمان وقوع اولین ترک خوردگی

چنان که در بخش ۱.۳.۴.۲ اشاره شد، زمان وقوع ترک با بررسی منحنی کرنش فشاری حلقه‌های فولادی داخلی و مشخص کردن زمان آزاد شدن کرنش فشاری در حلقه‌های فولادی در اثر ترک خوردن حلقه‌های بتنی قابل تشخیص است. در شکل ۸ الف 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 ترک خوردگی 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 ترک خوردگی حاصل می‌شود اما در این درصد مصرف، زمان ترک خوردگی الیاف پلیمری ماکرو بیشتر از الیاف فولادی است (شکل ۸ ب). در شکل ۸ ج منحنی‌های کرنش برحسب زمان حلقه‌های 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 ترک خوردگی مشاهده می‌شود. استفاده از ۱ درصد الیاف پلیمری ماکرو مشکلی و فوراً مشابه بوده و باعث افزایش زمان ترک خوردگی 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 ترک خوردگی نشده است. نتایج زمان وقوع ترک خوردگی برای مخلوط‌های مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. پتانسیل ترک خوردگی مخلوط‌های مختلف براساس معیار زمان ترک خوردگی مطابق با طبقه‌بندی ارائه شده توسط ASTM C ۱۵۸۱^[۱۹] در جدول ۴ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که بتن کنترل پتانسیل زیادی برای ترک خوردگی دارد. استفاده از ۰٫۲۵ درصد الیاف مختلف تأثیر نسبتاً جزئی در بهبود این پتانسیل دارد.

جدول ۵. بیشینه‌ی عرض ترک خوردگی در سن ۲۸ روز.

| کد مخلوط | نوع الیاف | درصد کاربرد الیاف (%) | زمان وقوع اولین ترک (روز) | بیشینه‌ی بازشدگی ترک در ۲۸ روز (میلی متر) |
|----------|--------------|-----------------------|---------------------------|---|
| 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 | ۲۸ روز ترک نخورد | ۲۸ روز ترک نخورد |



شکل ۹. بیشترین عرض ترک در سن ۲۸ روز.

ماکرو به ۱ درصد میزان بازشدگی بیشینه عرض ترک حدود ۰٫۳ میلی متر 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 تک رشته‌یی و الیاف به هم 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.

و مخلوط‌ها عمدتاً دارای پتانسیل ترک خوردگی 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 ترک خوردگی الیاف پلیمری کم تا متوسط ارزیابی می‌شود. برای الیاف فولادی پتانسیل ترک خوردگی در ۱ درصد مصرف کم ارزیابی شده است. در این تحقیق علاوه بر معیار سن ترک خوردگی خالص، برای طبقه‌بندی پتانسیل ترک خوردگی مخلوط‌ها از معیار نرخ متوسط توسعه‌ی تنش کششی نیز استفاده شد که نتایج آن با طبقه بندی براساس معیار سن ترک خوردگی 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 ترک خوردگی زیاد قرار می‌گیرند در حالی که وضع برای الیاف فولادی در همین درصد مصرف بهتر بوده و پتانسیل ترک خوردگی را یک رده کاهش می‌دهد. این در حالی است که برای همین مقدار کاهش در پتانسیل ترک خوردگی مخلوط‌های حاوی الیاف پلیمری به ۰٫۵ درصد مصرف نیاز است. نرخ توسعه‌ی تنش کششی در مقدار ۱ درصد مصرف الیاف، برای الیاف فولادی کم تر از ۰٫۱ به دست آمده که طبق طبقه بندی استاندارد ASTM C ۱۵۸۱ در رده‌ی پتانسیل ترک خوردگی 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 میلی متر اندازه‌گیری شد. کاربرد الیاف پلیمری میکرو در ۰٫۲۵ درصد در کاهش عرض ترک بی‌تأثیر بوده است. اثر استفاده از الیاف پلیمری ماکرو و حتی الیاف فولادی در ۰٫۲۵ درصد مصرف در کاهش عرض ترک نسبتاً کم بوده است و مقدار بازشدگی ترک در حدود ۰٫۵ میلی متر اندازه‌گیری شده است. با افزایش مقدار مصرف الیاف پلیمری ماکرو و الیاف فولادی به ۰٫۵ درصد، مقدار عرض ترک حدود ۰٫۴ میلی متر اندازه‌گیری شده که مؤید کاهش حدود ۵۰ درصدی در عرض ترک نسبت به مخلوط کنترل است. با افزایش مقدار مصرف الیاف پلیمری

Archive of SID

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 به مراتب عملکرد بهتری داشته به‌گونه‌ی که در سن ۲۸ از بروز ترک‌خوردگی جلوگیری کرد. اما الیاف پلیمری ماکرو در ۱ درصد مصرف باعث کاهش حدود ۰/۶٪ درصد در عرض ترک در مقایسه با مخلوط بدون الیاف شدند.

• تفاوت در شکل الیاف پلیمری ماکرو که شامل الیاف ماکرو به صورت رشته‌های به هم تابیده (فورتا) و الیاف ماکرو به صورت تک رشته‌ی بارچیب 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)

- 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).
- Mindess, S., Young, J.F., and Darwin, D. "Concrete", Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 2th Edition (2003).
- 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).
- 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).
- 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).
- ACI 360R-10, "Guide to Design of Slabs-on-Ground, ACI Committee 360 (2010).
- ACI 325.12R-02 Reapproved 2013, "Guide to design of jointed concrete pavements for streets and local roads", ACI Committee 325 (2002).
- ACI 224.4R-13- "Guide to design detailing to mitigate cracking", ACI Committee 224 (2014).
- 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).
- 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).

• 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 مقادیر کم مصرف (۰/۲۵ درصد) تأثیر بسیار کمی در کنترل ترک‌خوردگی ناشی از خشک شدن داشته‌اند و پتانسیل ترک‌خوردگی این مخلوط‌ها در رده‌ی پتانسیل زیاد ترک‌خوردگی قرار گرفته 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

- 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).
- 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).
- Lamond, J.F. and Pielert, J. H. "Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials", West Conshohocken, ASTM International, STP169D, pp. 578-590 (2007).
- ASTM C1116-03, "Standard specification for fiber reinforced concrete and shotcrete", ASTM international (2003).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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.
- Concrete Aggregates-Specifications, INSO, NO 302, (2015).

Archive of SID

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).