

# The Effects of Micro and Macro Synthetic Fibers on Drying Shrinkage of Restrained Concrete

*Oveys Afzali-Naniz\**

*Department of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Lavizan, Tehran, Iran  
Oveys.afzali@sru.ac.ir*

*Alireza Doostmohammadi*

*Department of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Lavizan, Tehran, Iran*

*Jafar Sobhani*

*Associate professor, Road, Housing and Urban Development Research Center (BHRC), Tehran 13145-1696, Iran*

## **Abstract**

*When concrete loses its moisture, it shrinks and results in cracking. In addition to undesirable effects on the appearance of concrete, cracks reduce its strength and durability. Fibers are used in concrete in order to control shrinkage cracks. The goal of this study is to evaluate the effects of micro and macro synthetic fiber in reducing the drying shrinkage and cracking under restrained conditions. For this purpose, in the first phase of the study, the effects of two types of microfibers, polypropylene and double-part, were selected. The results of the first phase of the study showed that polypropylene fibers have a better performance in improving initial cracking time and reducing the maximum crack width. The second phase of the study investigated the effect of macro synthetic fibers as well as the micro and macro synthetic fibers, hybrid mixes, in reducing the drying shrinkage of restrained conditions. The experimental results obtained in the second phase showed that the presence of macro synthetic fibers, due to the high modulus of elasticity, had a significant effect on drying shrinkage. The results also showed that the hybrid mixes had the best performance.*

**Keywords:** *Macro-Synthetic Fiber, Micro-Synthetic Fiber, Concrete Fiber, Shrinkage Cracking.*

# بررسی اثر الیاف میکرو و ماکروسنتتیک بر جمع شدگی ناشی از خشک

## شدن بتن مقید

دریافت مقاله: ۱۳۹۸-۰۳-۰۸

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸-۰۸-۱۳

اویس افضلی نیز\*

دکتری سازه دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران

Oveys.afzali@sru.ac.ir

علیرضا دوست محمدی

کارشناسی ارشد زلزله دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران

جعفر سبحانی

دانشیار عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

### چکیده

هنگامی که بتن رطوبت خود را از دست می‌دهد دچار جمع شدگی و در نتیجه ترک خوردگی می‌شود. ترک‌ها علاوه بر آثار نامطلوب بر ظاهر بتن سبب کاهش مقاومت و دوام آن می‌شوند. یکی از دغدغه‌های مهم در مورد بتن و به‌ویژه بتن‌های مورد استفاده در کف‌سازی‌ها و روبه‌های بتنی بحث ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی بتن است. از جمله راهکارهای کاهش اثرات ترک‌های جمع شدگی استفاده از الیاف در بتن است. هدف تحقیق حاضر ارزیابی و مقایسه اثر الیاف پلیمری میکرو و ماکرو بر جمع شدگی ناشی از خشک شدن بتن مقید و نیز مقاومت فشاری و مدول گسیختگی آن است. بدین منظور در فاز اول تحقیق اثر دو نوع از الیاف میکرو با نام‌های پلی‌پروپیلن و دوجزئی (پلیمری اصلاح شده) بر ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی مقید بتن مورد بررسی قرار گرفت و الیاف بهینه فاز اول انتخاب گردید. نتایج فاز اول تحقیق نشان داد که الیاف پلی‌پروپیلن عملکرد بهتری در جهت افزایش زمان ایجاد نخستین ترک و کاهش حداکثر عرض ترک ایجاد شده دارد. از این رو الیاف پلی‌پروپیلن به منظور استفاده در فاز دوم تحقیق و در کنار الیاف ماکرو انتخاب شدند. فاز دوم تحقیق به بررسی اثر افزودن الیاف ماکرو پلیمری و نیز طرح هیبرید، حاوی هر دو نوع الیاف میکرو و ماکرو، بر ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی و مقایسه آن با بتن بدون الیاف پرداخته شد. نتایج آزمایشگاهی به دست آمده در فاز دوم نشان می‌دهد که حضور الیاف ماکرو به سبب مدول الاستیسیته بالای این نوع از الیاف، تأثیر بسزایی بر ترک‌های جمع شدگی ناشی از خشک شدن داشته است. سن ترک خوردگی برای نمونه بتن شاهد، نمونه حاوی الیاف میکرو پلی‌پروپیلن، نمونه حاوی الیاف ماکرو پلیمری و طرح هیبرید به ترتیب برابر ۲/۷ روز، ۳/۹ روز، ۷ روز و ۷/۳ روز بوده است که نشان از تأثیر قابل توجه الیاف ماکرو بر سن ترک خوردگی دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که استفاده از هر دو نوع الیاف میکرو و ماکرو در کنار هم (طرح هیبرید) بهترین عملکرد را در زمان ایجاد نخستین ترک و نیز کنترل عرض ترک داشته است.

کلمات کلیدی: الیاف ماکرو پلیمری، الیاف میکرو پلیمری، بتن الیافی، جمع شدگی بتن مقید.

استفاده از رویه‌های بتنی در کشورهای دیگر بسیار متداول است و دهه‌های زیادی از به‌کارگیری آن‌ها در کشورهای توسعه‌یافته سپری می‌شود اما در کشور ما با وجود مصالح کافی بنا به دلایلی همچون ارزان بودن قیمت قیر در سالهای پیش، معرفی نشدن گزینه‌های مناسب جایگزین و در مواردی نبود دانش فنی- اجرایی و تجهیزات مورد نیاز، اجرا و ساخت این نوع رویه‌ها متداول نشده است. با این وجود در سال‌های اخیر لزوم به‌کارگیری روسازی‌های بتنی در کشور ما بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. در این بین افزایش طول عمر و دوام رویه‌های بتنی از مسائل قابل توجه فنی و اقتصادی می‌باشد [۱]. استفاده از میلگرد به منظور جلوگیری از گسترش ترک‌های ناشی از افت و حرارت در رویه بتنی به‌طور کامل کنترل‌کننده این مهم نبوده است و در نتیجه هزینه‌های نگهداری و تعمیر زیادی را در اثر چرخه‌های یخ زدن و آب‌شدن در پی خواهد داشت. از این رو استفاده از الیاف در رویه‌های بتنی با توجه به توصیه و دستورالعمل‌های آیین‌نامه‌ای افزایش گسترده‌ای در سطح جهان داشته است. استفاده از الیاف در بتن، یکی از روش‌های مؤثر برای کاهش ترک خوردگی، افزایش طاقت و جذب بهتر انرژی و نیز افزایش مقاومت کششی است.

از گذشته تاکنون انواع مختلفی از الیاف به منظور بهبود خواص مواد با پایه سیمانی استفاده شده است. بسیاری از الیاف از جمله فولادی، پلیمری یا طبیعی به‌طور گسترده در بتن استفاده می‌شود [۲]. این الیاف به‌طور قابل توجهی در خصوصیات، تأثیر، هندسه و هزینه باهم تفاوت دارند. الیاف پلیمری یکی از گزینه‌هایی است که استفاده از آن در بتن در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در حالت کلی الیاف پلیمری بسته به طول و قطر الیاف به دو دسته کلی ماکروپلیمری و میکروپلیمری تقسیم می‌شوند. قطر الیاف میکرو از ۵ تا ۱۰۰ میکرومتر بوده و این در حالی است که الیاف ماکرو قطری بالای ۰/۳ میلی‌متر دارند [۳]. استفاده از الیاف پلیمری (میکرو و ماکرو) در مواد سیمانی مصالحی تولید می‌کند که نظر مقاومت، شکل‌پذیری، سختی و دوام بهبود یافته‌اند. به‌منظور اصلاح رفتار بتن، با پیدایش نخستین ترک‌ها، الیاف با پل زدن بین ترک‌ها به شکل‌پذیری بعد از ترک خوردگی کمک می‌کنند [۲]. مدول الاستیسیته و مقاومت کششی از جمله ویژگی‌های دیگر مهم الیاف است که تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد و رفتار الیاف در بتن دارد. الیاف‌های با مدول و مقاومت بالا مانند الیاف کربن، فولاد، آزبست، شیشه و ماکروپلیمری باعث افزایش مقاومت و طاقت بتن می‌شوند در حالیکه الیاف‌هایی با مدول و مقاومت کم مانند پلی‌پروپیلن، نایلون و آکرلیک بیشتر در کنترل ترک‌های اولیه تأثیرگذار هستند [۴ و ۵].

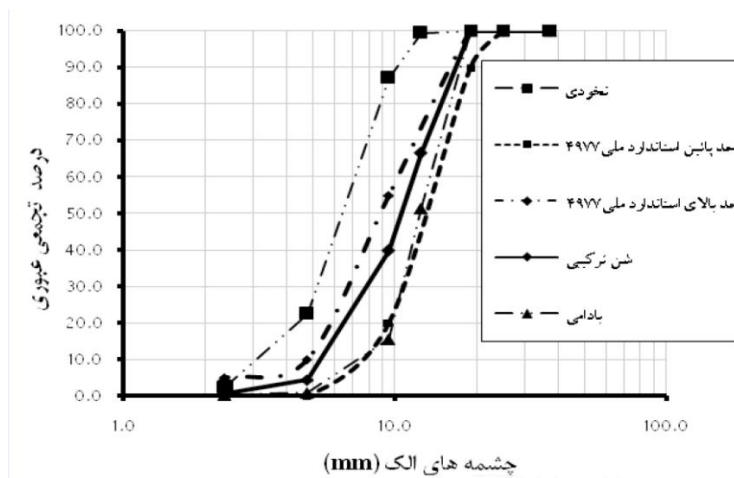
نتایج تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که استفاده از یک نوع الیاف صرفاً می‌تواند در بازه محدودی در برابر گسترش ترک‌ها تأثیرگذار باشد و یا همچنین تنها یکی از خواص مقاومت و یا شکل‌پذیری را اصلاح کند [۶]. ترکیبی از دو یا چند الیاف را طرح هیبریدی می‌نامند. در مطالعات اخیر، استفاده از طرح‌های هیبریدی الیاف در ترکیبات سیمانی برای بدست آوردن ظرفیت کرنشی بالاتر، افزایش دوام و تولید محصول اقتصادی استفاده شده است. همچنین ترکیبات هیبریدی مزایای هر یک از الیاف در حالت منفرد را به‌طور تجمعی و یکجا دارد [۷ و ۸].

جمع شدگی ناشی از خشک شدن یکی از انواع جمع شدگی می‌باشد که به علت تبادل رطوبت ناشی از تغییرات رطوبت نسبی بین محیط و بتن بوجود می‌آید. این نوع جمع شدگی مهم‌ترین دلیل برای ایجاد ترک در سنین اولیه برای بتن‌های معمولی با نسبت‌های آب به مواد سیمانی حدود ۰/۴۵ می‌باشد [۹]. با این وجود نتایج پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که افزودن الیاف به بتن باعث کاهش شدید ترک خوردگی و جمع شدگی بتن می‌شود [۱۰]. اهمیت جمع شدگی ناشی از خشک شدن از یک سو و پتانسیل استفاده از الیاف پلیمری در رویه‌های بتنی از سوی دیگر سبب شد تا در این مطالعه به ارزیابی و مقایسه اثر این نوع از الیاف بر جمع شدگی ناشی از خشک شدن بتن بپردازیم. بدین منظور در فاز اول تحقیق دو نوع از الیاف میکروپلیمری شامل پلی‌پروپیلن و دوجزئی (پلیمری اصلاح شده) مورد بررسی قرار گرفت. سپس در ادامه و در فاز دوم تحقیق با توجه به نتایج بدست آمده در فاز اول تحقیق طرح مخلوط‌های جدیدی به منظور بررسی اثر الیاف ماکرو و میکرو پلیمری (هیبرید) در نظر گرفته شد.

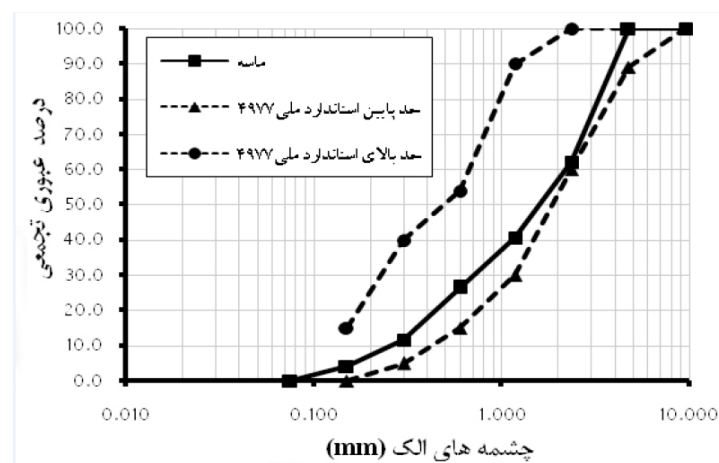
## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح مصرفی

مصالح مصرفی در این تحقیق شامل سنگدانه، سیمان، آب، افزودنی فوق روان کننده و الیاف پلیمری (ماکرو و میکرو) می باشد که در ادامه جزئیات آن آورده شده است. مصالح سنگی مورد استفاده از معدنی در غرب تهران تهیه شده است. سیمان بکارگرفته شده در ساخت کلیه نمونه ها، سیمان نوع ۲ تهران می باشد. خواص شیمیایی این مواد در جدول شماره ۱ آمده است. فوق روان کننده مورد استفاده با پایه پلی کربوکسیلات می باشد. آب مصرفی در ساخت نمونه ها آب شرب شهری است. شن مصرفی از نوع شن نخودی با چگالی و جذب آب به ترتیب برابر ۲/۵ و ۲/۵ درصد و نیز از نوع بادامی با چگالی و جذب آب به ترتیب برابر ۳/۵، ۲/۶ و ۲/۹ درصد می باشد. دانه بندی شن و ماسه مصرفی به ترتیب در شکل های ۱ و ۲ نشان داده شده است. نسبت های دو نوع شن به گونه ای انتخاب شد که دانه بندی ترکیب آن دو نوع شن در محدوده استاندارد ملی ۴۹۷۷ قرار گیرد. همان طور که در شکل ۱ مشخص است دانه بندی شن ترکیبی در محدوده استاندارد قرار دارد. به منظور بررسی و مقایسه اثر الیاف میکرو و ماکرو پلیمری بر ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی از دو تیپ الیاف میکرو پلیمری شامل الیاف پلی پروپیلن و الیاف دوجزئی و یک تیپ الیاف ماکرو پلیمری استفاده شده است.



شکل ۱- منحنی دانه بندی شن مصرفی در این تحقیق.





شکل ۲- منحنی دانه بندی ماسه مصرفی در این تحقیق.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی سیمان مورد استفاده.


نوع ترکیب شیمیایی	$Na_2O$	$K_2O$	$SO_3$	$MgO$	$Fe_2O_3$	$Al_2O_3$	$CaO$	$SiO_2$
درصد	۰/۲	۰/۹	۳/۷	۲/۷	۴/۱	۳/۵	۶۴/۲	۱۷/۷

این الیاف از شرکت نانونخ و گرانول سیرجان تهیه شده است. مشخصات ظاهری و خواص مقاومتی این الیاف در جداول ۲ و ۳ آورده شده است.

جدول ۲- مشخصات الیاف میکروپلیمری مورد استفاده.

ردیف	نوع الیاف	شکل	طول mm	چگالی $gr/cm^3$	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
۱	الیاف پلی پروپیلن		۱۸	۰/۹۱	۳۵۰	۳/۵
۲	الیاف دو جزئی		۱۸	۱/۴	۳۰۰	۲/۸

جدول ۳- مشخصات الیاف ماکروپلیمری مورد استفاده.

ردیف	نوع الیاف	شکل	طول mm	چگالی $gr/cm^3$	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
۱	الیاف امباس مدول و مقاومت بالا بر پایه پلی الفین های اصلاح شده		۴۰	۰/۹۱	۶۰۰	۶/۸

## ۲-۲- طرح مخلوط‌ها

در فاز اول تحقیق دو نوع از الیاف میکروپلیمری شامل پلی پروپیلن و دوجزئی به میزان ۰/۲ درصد حجمی مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۴ طرح مخلوط‌های استفاده شده در فاز اول تحقیق را نشان می‌دهد.

جدول ۴- طرح مخلوط‌های استفاده شده در فاز اول تحقیق.

نام طرح	w/c	سیمان Kg/m <sup>3</sup>	شن نخودی با وضعیت *SSD Kg/m <sup>3</sup>	شن بادامی با وضعیت *SSD Kg/m <sup>3</sup>	ماسه با وضعیت *SSD Kg/m <sup>3</sup>	الیاف میکرو دوجزئی (Vol %)	الیاف میکرو پلی پروپیلن (Vol %)
Control	۰/۴	۴۲۰	۱۸۰	۵۹۸	۹۰۰	۰	۰
FRC-Micro1	۰/۴	۴۲۰	۱۸۰	۵۹۸	۹۰۰	۰	۰/۲
FRC-Micro2	۰/۴	۴۲۰	۱۸۰	۵۹۸	۹۰۰	۰/۲	۰

\*اختلاف رطوبت موجود مصالح با درصد جذب آب برای رسیدن به حالت SSD (اشباع با سطح خشک) لحاظ شده است.

در فاز دوم تحقیق به بررسی اثر الیاف پلیمری ماکرو بر ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی و نیز مقایسه عملکرد این نوع الیاف با بهترین طرح از بین طرح‌های حاوی الیاف میکرو پرداخته شد. جدول شماره ۵، طرح مخلوط‌های فاز دوم تحقیق را نشان می‌دهد.

جدول ۵- طرح مخلوط‌های استفاده شده در فاز دوم تحقیق.

نام طرح	w/c	سیمان Kg/m <sup>3</sup>	شن نخودی با وضعیت *SSD Kg/m <sup>3</sup>	شن بادامی با وضعیت *SSD Kg/m <sup>3</sup>	ماسه با وضعیت *SSD Kg/m <sup>3</sup>	الیاف ماکرو- امباس (Vol %)	الیاف ماکرو- سینوسی (Vol %)	الیاف میکرو- پلی پروپیلن (Vol %)
Control	۰/۴	۴۲۰	۱۸۰	۵۹۸	۹۰۰	۰	۰	۰
FRC-Micro	۰/۴	۴۲۰	۱۸۰	۵۹۸	۹۰۰	۰	۰	۰/۲
FRC-Macro	۰/۴	۴۲۰	۱۸۰	۵۹۸	۹۰۰	۰/۲	۰	۰
FRC-Hybrid	۰/۴	۴۲۰	۱۸۰	۵۹۸	۹۰۰	۰/۲	۰/۲	۰

\*اختلاف رطوبت موجود مصالح با درصد جذب آب برای رسیدن به حالت SSD (اشباع با سطح خشک) لحاظ شده است.

## ۳- روش‌های آزمون

### ۳-۱- آزمون‌های بتن تازه

در این مقاله آزمایش‌های بتن تازه شامل اسلامپ و آزمایش تعیین درصد هوا به ترتیب مطابق با استانداردهای ASTM C143 و ASTN C231 انجام شده است [۱۱ و ۱۲].

### ۳-۲-۲-آزمون‌های بتن سخت‌شده

#### ۳-۲-۱-آزمون مقاومت فشاری

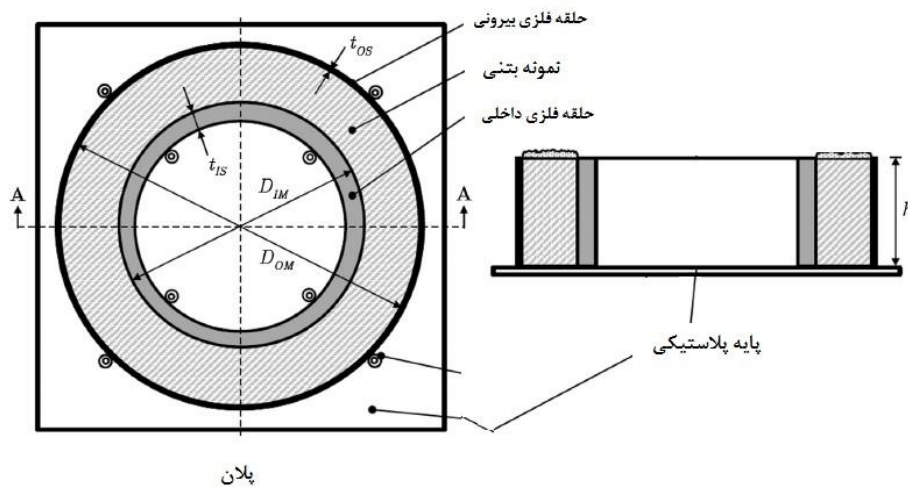
به‌منظور بررسی مقاومت فشاری بتن از آزمون‌های مکعبی با ابعاد  $150 \times 150 \times 150$  میلی‌متر استفاده شد. تمام آزمون‌ها یک روز پس از ساخت قالب برداری شده و در سنین ۱۴،۷ و ۲۸ روز تحت آزمایش مقاومت فشاری طبق استاندارد BS 1881-116 قرار گرفتند [۱۳].

#### ۳-۲-۲-آزمون مدول گسیختگی

آزمون مقاومت خمشی (مدول گسیختگی) بر روی آزمون‌های منشوری شکل با ابعاد  $500 \times 100 \times 100$  میلی‌متر براساس استاندارد ASTM C78 [۱۴] و در سن ۲۸ روز انجام شد.

#### ۳-۲-۳- جمع شدگی ناشی از خشک شدن بتن مقید

این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM C1581 انجام شد [۱۵]. برای انجام این آزمایش نمونه‌های بتنی به شکل حلقه با ارتفاع 150 میلی‌متر، قطر خارجی ۴۰۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۳۰۰ میلی‌متر ساخته شدند. شکل ۳ جزئیات حلقه بتنی جهت انجام این آزمایش را نشان می‌دهد. بدین منظور حلقه‌های بتنی بر روی یک صفحه ضد آب قرار داده شدند و قسمت فوقانی آن‌ها با واکس پارافین جهت جلوگیری از خروج رطوبت پوشش داده شد. از دو کرنش‌سنج در وسط ارتفاع حلقه فولادی به‌صورت مقابل هم، جهت اندازه‌گیری کرنش حلقه فولادی استفاده شد. تمام داده‌های مربوط به کرنش‌سنج‌ها با استفاده از یک دستگاه داده‌برداری ثبت شد. شکل ۴ تصویری از حین انجام این آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۳- جزئیات قالب رینگ بر طبق استاندارد ASTM C1581





شکل ۴- آزمایش جمع شدگی ناشی از خشک شدن بتن مقید.

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- نتایج فاز اول تحقیق (بتن حاوی الیاف پلیمری میکرو)

##### ۴-۱-۱- خواص بتن تازه

جدول ۶ نتایج مشخصات بتن تازه شامل میزان اسلامپ و درصد هوا برای طرح مخلوط‌های مورد استفاده در فاز اول تحقیق را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود اسلامپ کلیه طرح‌ها در محدوده  $10 \pm 60$  میلی‌متر و درصد هوا در محدوده  $1 \pm 3$  قرار دارد.

جدول ۶- خواص بتن تازه در فاز اول تحقیق.

نام طرح	اسلامپ (میلی‌متر)	درصد هوا (%)
Control	۷۰	۲/۸
FRC-Micro1	۵۰	۳
FRC-Micro2	۶۰	۳/۲

##### ۴-۱-۲- خواص بتن سخت شده

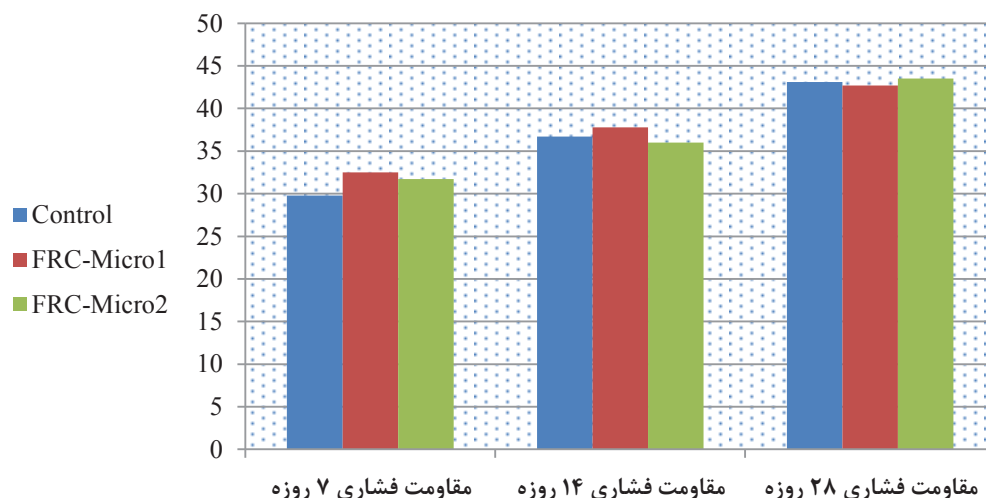
##### ۴-۱-۲-۱- مقاومت فشاری و مدول گسیختگی

شکل ۵ نتایج مقاومت فشاری طرح مخلوط‌های بتن حاوی الیاف میکروپلیمری در مقایسه با بتن شاهد را در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز نشان می‌دهد. این نتایج مربوط به میانگین ۳ نمونه آزمایش شده برای هر طرح در هر سن می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود استفاده از الیاف میکروپلیمری پلی پروپیلن (FRC-Micro1) و دوجزئی (FRC-Micro2) تاثیر چندانی بر مقاومت فشاری نداشته است. مقاومت فشاری بتن بیش از هر چیزی به مقاومت سنگ‌دانه‌ها، خمیر سیمان و اتصال بین این دو ناحیه است و افزودن الیاف میکروپلیمری حتی در صورتی که نمونه‌ها به خوبی متراکم شده باشند تأثیر اندکی بر بهبود مقاومت فشاری خواهد داشت. به‌طور کلی مقاومت فشاری تمام نمونه‌های بتنی با افزایش سن افزایش پیدا می‌کند که این نشان از پیشرفت و تکمیل فرآیند هیدراتاسیون نمونه‌ها با افزایش سن دارد. همچنین با تشکیل ژل سیلیکات کلسیم هیدراته بیشتر ناحیه انتقال بین خمیر و سنگ‌دانه بهبود یافته و باعث افزایش مقاومت فشاری شده است.

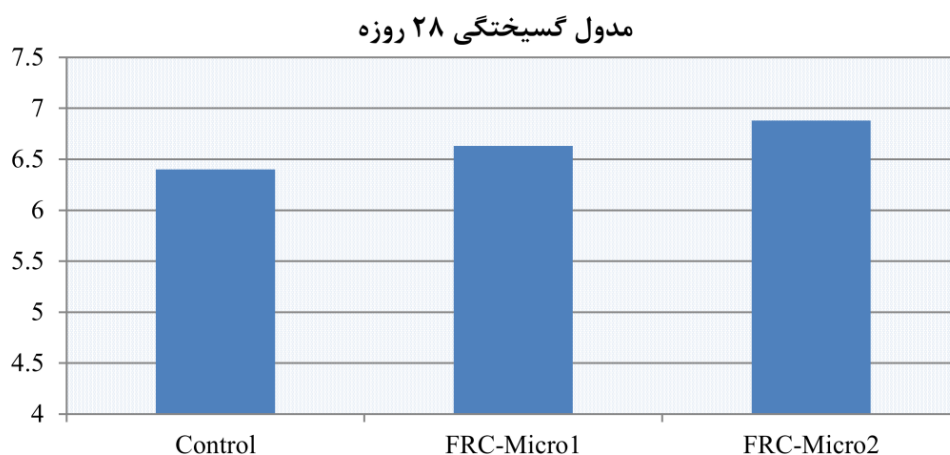
شکل ۶ نتایج آزمایش مدول گسیختگی طرح‌مخلوط‌های بتن حاوی الیاف پلیمری میکرو در مقایسه با نمونه بتن شاهد را در سن ۲۸ روز نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود الیاف میکروپلیمری مورد استفاده در فاز



اول تأثیر افزایش زیادی بر مدول گسیختگی نداشته است. در واقع الیاف پلیمری میکرو بیشتر نقش کنترل ترک را برعهده داشته و به سبب طول کوتاه و نیز مدول الاستیسیته پایین قادر به افزایش حداکثر بار خمشی نیست.



شکل ۵- نتایج آزمایش مقاومت فشاری در فاز اول تحقیق.

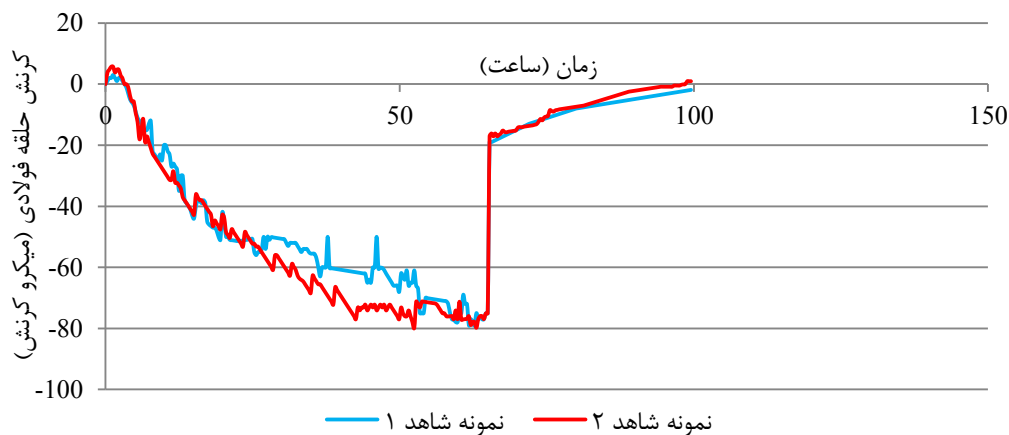


شکل ۶- نتایج آزمایش مدول گسیختگی در فاز اول تحقیق.

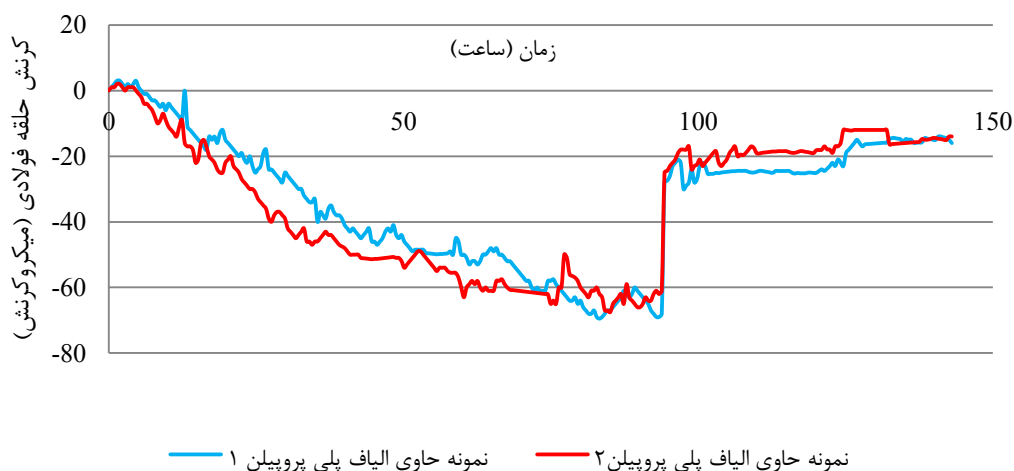
#### ۴-۲-۱-۲- جمع شدگی ناشی از خشک شدن بتن مقید

این آزمایش پتانسیل ترک خوردگی مخلوط‌های بتنی الیافی در جلوگیری و کنترل ترک‌های ناشی از جمع شدگی در سنین اولیه را نشان می‌دهد. سن ترک خوردگی با استفاده از نمودارهای کرنش-زمان بررسی شد. شکل‌های ۷ تا ۹ نتایج مربوط به کرنش حلقه فولادی در مقابل زمان را به ترتیب برای نمونه شاهد، نمونه حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و نمونه حاوی الیاف دوجزئی نشان می‌دهد. همچنین نتایج متوسط سن ترک خوردگی و عرض ترک برای طرح مخلوط‌های بتنی فاز اول تحقیق در جدول ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۷ تا ۹ مشاهده می‌شود، استفاده از هر دو نوع الیاف میکروپلیمری سبب بهبود سن ترک خوردگی در مقایسه با نمونه شاهد شده است. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که الیاف میکرو پلی‌پروپیلن عملکرد بهتری در مقایسه با نمونه میکرو دوجزئی داشته است به گونه‌ای که این استفاده از این الیاف سن ترک خوردگی بتن نسبت به نمونه شاهد را به میزان

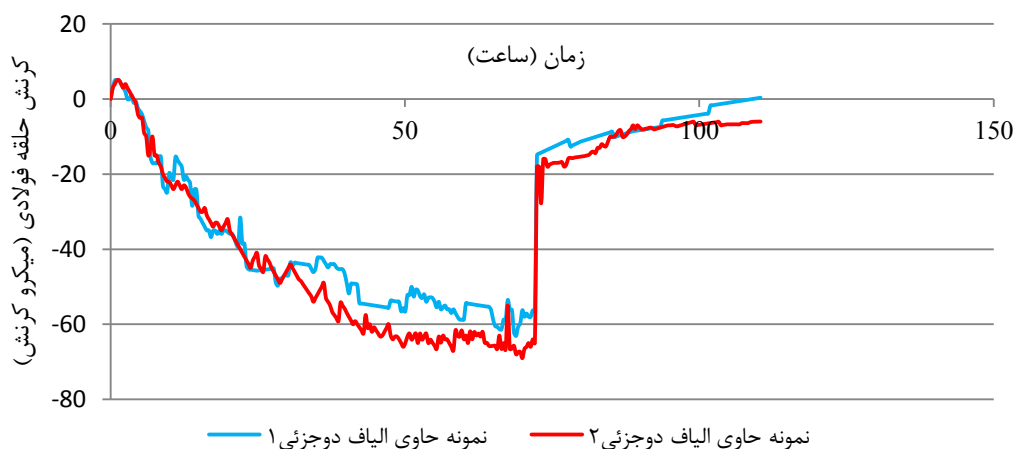
۴۰ درصد افزایش داده است. علاوه بر این کمترین عرض ترک در سن ۲۸ روز مربوط به نمونه حاوی الیاف میکروپلی پروپیلن بوده است. دلیل عملکرد بهتر الیاف پلی پروپیلن می‌تواند به خواص فیزیکی (مدول و مقاومت کششی) این الیاف نسبت داده شود.



شکل ۷- نمودار کرنش حلقه فولادی- زمان برای نمونه شاهد.



شکل ۸- نمودار کرنش حلقه فولادی- زمان برای نمونه حاوی الیاف پلی پروپیلن.



شکل ۹- نمودار کرنش حلقه فولادی- زمان برای نمونه حاوی الیاف دوجزئی.

جدول ۷- نتایج آزمایش جمع شدگی مقید مطابق با استاندارد ASTM C1581 برای طرح مخلوط‌های فاز اول تحقیق.

نام طرح	زمان ایجاد ترک (روز)	حداکثر عرض ترک آزمونه در سن ۲۸ روز (میلی‌متر)	متوسط نرخ ایجاد تنش در حلقه فولادی (مگاپاسکال بر روز)
Control	۲/۷۵	۱/۰۵	۰/۹۶
FRC-Micro1	۳/۹	۰/۷۵	۰/۷۹
FRC-Micro2	۲/۹۶	۰/۸	۰/۸۲

#### ۴-۲- نتایج فاز دوم تحقیق (بتن حاوی الیاف پلیمری ماکرو)

##### ۴-۲-۱- خواص بتن تازه

جدول ۸ نتایج مشخصات بتن تازه شامل میزان اسلامپ و درصد هوا برای طرح مخلوط‌های مورد استفاده در فاز دوم تحقیق را نشان می‌دهد.

جدول ۸- خواص بتن تازه در فاز دوم تحقیق

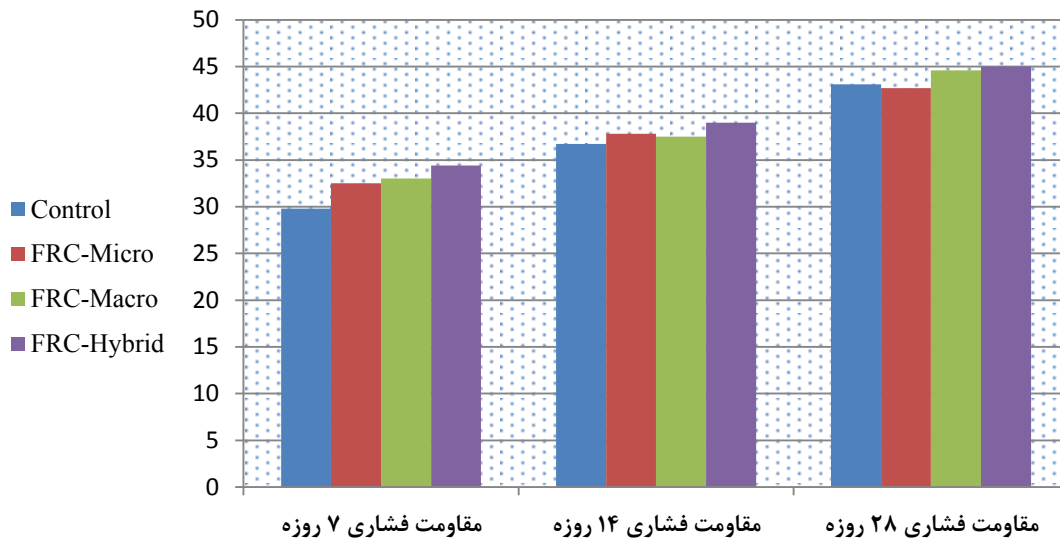
نام طرح	اسلامپ (میلی‌متر)	درصد هوا (%)
Control	۷۰	۲/۸
FRC-Micro	۵۰	۳
FRC-Macro	۶۰	۴
FRC-Hybrid	۵۰	۳/۶

##### ۴-۲-۲- خواص بتن سخت شده

##### ۴-۲-۲-۱- مقاومت فشاری و مدول گسیختگی

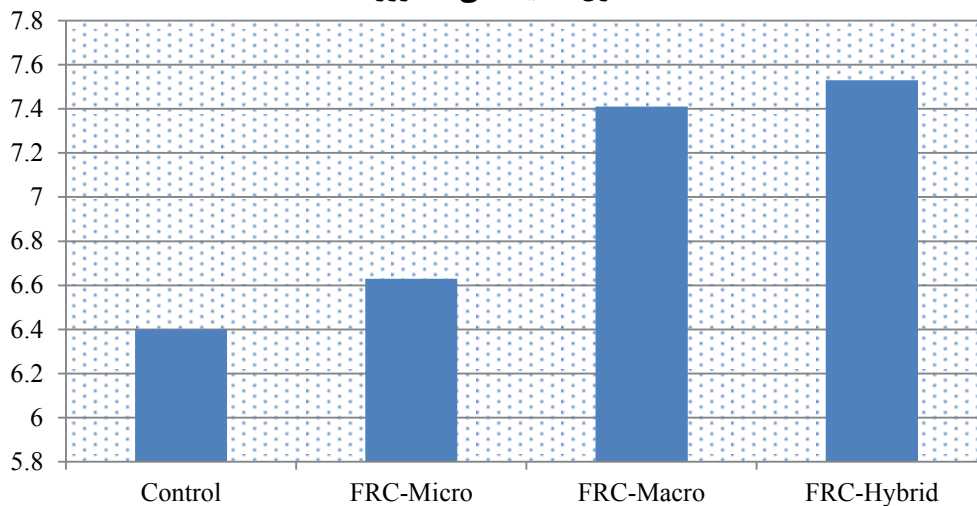
نتایج مقاومت فشاری در سنین ۱۴،۷ و ۲۸ روز برای طرح مخلوط‌های فاز دوم در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانند فاز اول تحقیق، استفاده از الیاف پلیمری ماکرو نیز تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت فشاری نداشته است و افزایش ناچیز مقاومت فشاری ناشی از جذب انرژی الیاف تحت تنش‌های وارده است. در واقع عملکرد الیاف بعد از ترک خوردگی شروع شده و الیاف اثر چندانی بر حداکثر بار شکست ندارد. نتایج بدست آمده با نتایج تحقیقات پیشین در خصوص اثر الیاف پلیمری بر مقاومت فشاری بتن همخوانی دارد [۱۶]. همچنین قابل مشاهده است مقاومت فشاری تمام نمونه‌های بتنی با افزایش سن افزایش پیدا می‌کند که این نشان از پیشرفت و تکمیل فرآیند هیدراتاسیون نمونه‌ها با افزایش سن دارد.

نتایج آزمایش مدول گسیختگی طرح مخلوط‌های فاز دوم تحقیق در شکل ۱۱ آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، مدول گسیختگی تمام طرح‌ها از مدول گسیختگی نمونه‌های شاهد بیشتر شده است. نتایج نشان می‌دهد الیاف ماکروپلیمری در مقایسه با الیاف میکرو پلیمری تأثیرافزایی بیشتری بر مدول گسیختگی داشته است. این افزایش برای طرح حاوی فقط الیاف ماکروپلیمری ۱۵ درصد و برای طرح هیبرید ۱۷ درصد بوده است. مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بالاتر و نیز طول بلندتر این الیاف می‌تواند دلیل بهبود مدول گسیختگی در حالت استفاده از الیاف ماکروپلیمری باشد.



شکل ۱۰- نتایج آزمایش مقاومت فشاری در فاز دوم تحقیق.

#### مدول گسیختگی ۲۸ روزه



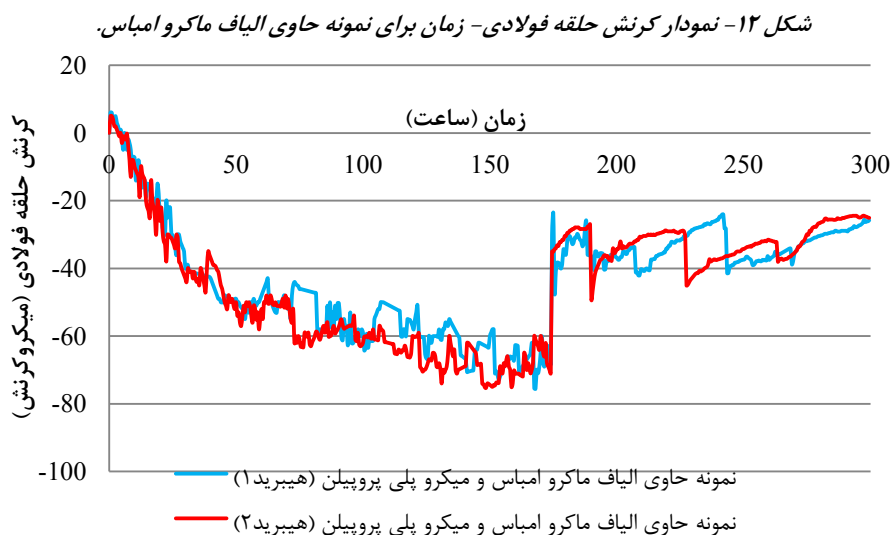
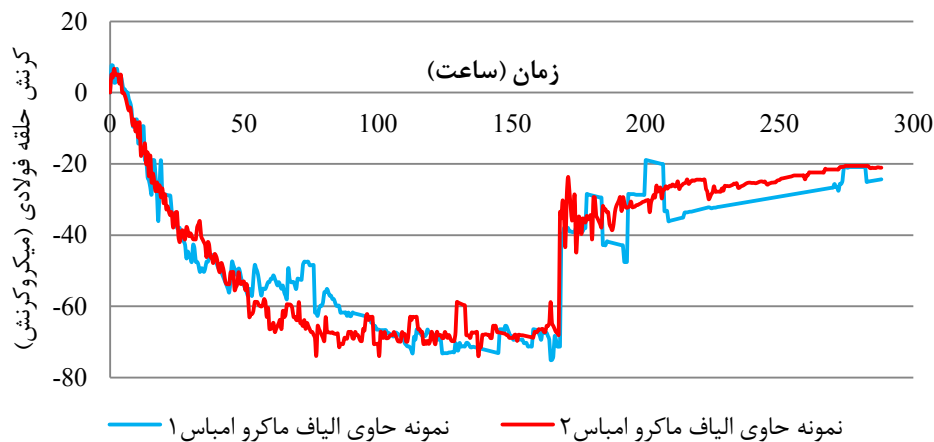
شکل ۱۱- نتایج آزمایش مدول گسیختگی در فاز دوم تحقیق.

#### ۴-۲-۲- جمع شدگی ناشی از خشک شدن بتن مقید

در آزمایش حلقه فولادی به عنوان یک قید عمل کرده و عامل ایجاد تنش کششی در نمونه‌های حلقوی در حین جمع شدگی ناشی از خشک شدن می‌شود. اگر این تنش از مقاومت کششی بتن بیشتر شود سبب ایجاد ترک در نمونه می‌شود. نتایج به دست آمده در فاز دوم تحقیق نشان داد که استفاده از الیاف ماکروپلیمری تأثیر قابل توجهی بر سن ترک خوردگی بتن داشته است. احتمالاً مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بالاتر این الیاف سبب بهبود مقاومت در برابر ترک خوردگی در سنین اولیه شده است. همان‌طور که پیش از این اشاره شد سن ترک خوردگی با استفاده از نمودارهای کرنش- زمان بررسی می‌شود. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نتایج مربوط به کرنش حلقه فولادی در مقابل زمان را به ترتیب برای نمونه حاوی الیاف ماکروپلیمری امباس و نمونه هیبرید حاوی هر دو نوع الیاف ماکرو و میکرو نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که نمودارهای مربوط به نمونه شاهد و نمونه حاوی الیاف میکروپلی پروپیلن

در فاز اول تحقیق آورده شده و از آوردن آن‌ها در این قسمت خودداری شده است. همان‌طور که در نمودارهای شکل ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود با ایجاد نخستین ترک در بتن به سبب رها شدن تنش‌ها، افت ناگهانی کرنش (بیش از ۳۰ میکروکرنش) رخ داده است. در نمونه‌های شاهد این تنش‌ها بلافاصله بعد از ایجاد اولین ترک آزاد شده و سبب می‌شود که مقدار کرنش به صفر برسد. حال آنکه در نمونه‌های حاوی الیاف با ایجاد شدن اولین ترک، الیاف وارد عمل شده و با پل زدن بین دو طرف ترک سبب افزایش ظرفیت کششی و فراهم کردن زمان برای تحمل تنش‌های بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر اضافه کردن الیاف به بتن سبب کاهش تدریجی کرنش به سمت صفر و در نتیجه افزایش سن اولیه ترک خوردگی خواهد شد. نتایج فاز دوم تحقیق نشان داد که طرح هیبرید (حاوی هر دو نوع الیاف ماکرو و میکرو) بهترین عملکرد را در به تأخیر انداختن ترک خوردگی اولیه داشته است.

جدول ۹ نتایج متوسط سن ترک خوردگی و عرض ترک برای طرح مخلوط‌های بتنی فاز دوم تحقیق نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود سن ترک خوردگی برای نمونه بتن شاهد، نمونه حاوی الیاف میکرو پلی‌پروپیلن، نمونه حاوی الیاف ماکرو پلیمری و طرح هیبرید به ترتیب برابر ۲/۷۵ روز، ۳/۹ روز، ۷/۰۱ روز و ۷/۳ روز بوده است که نشان از تأثیر قابل توجهی الیاف ماکرو بر سن ترک خوردگی دارد. همچنین حداکثر عرض ترک در سن ۲۸ روز در نمونه حاوی الیاف ماکرو پلیمری و طرح هیبرید به ترتیب برابر ۰/۴۵ و ۰/۴ میلی‌متر بوده است که نسبت به نمونه شاهد با حداکثر عرض ترک ۱/۰۵ میلی‌متر کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است. عرض ترک ایجاد شده در بتن ارتباط مستقیمی با نفوذپذیری بتن در مقابل حملات خوردگی یونهای تهاجمی دارد. کاهش عرض ترک می‌تواند منجر به بهبود خصوصیات مکانیکی و دوام رویه‌های بتنی الیافی شود.

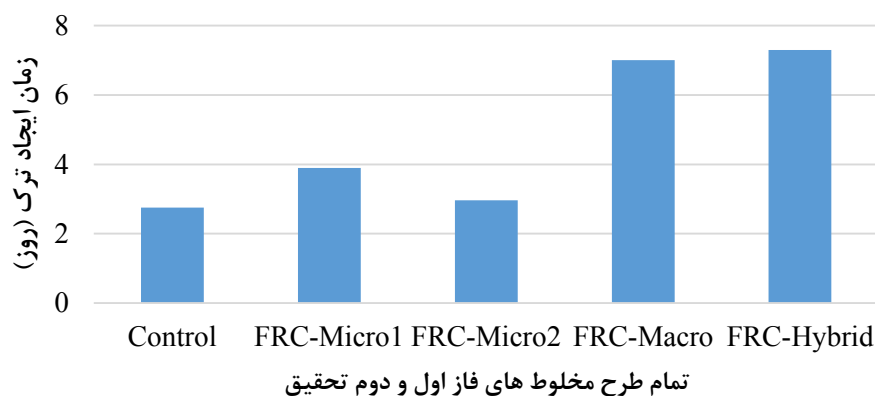


شکل ۱۳- نمودار کرنش حلقه فولادی- زمان برای نمونه حاوی الیاف ماکرو امباس و میکرو پلی پروپیلن (هیبرید).

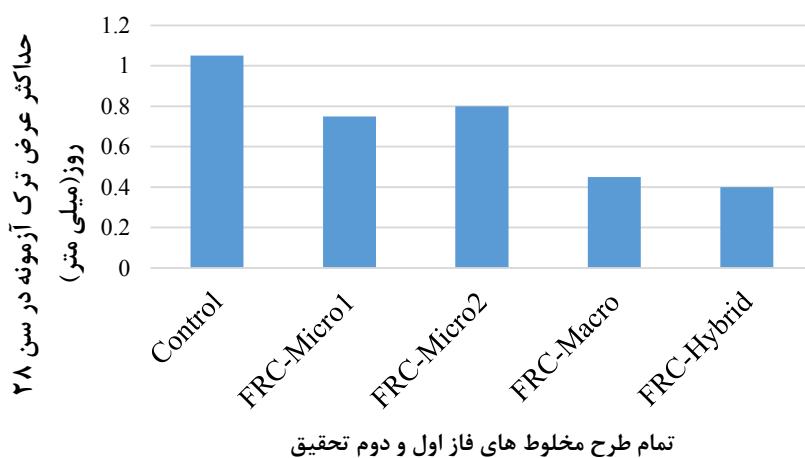
جدول ۹- نتایج آزمایش جمع شدگی مقید مطابق با استاندارد ASTM C1581 برای طرح مخلوط‌های فاز دوم تحقیق.

نام طرح	زمان ایجاد ترک (روز)	حداکثر عرض ترک آزمونه در سن ۲۸ روز (میلی‌متر)	متوسط نرخ ایجاد تنش در حلقه فولادی (مگاپاسکال بر روز)
Control	۲/۷۵	۱/۰۵	۰/۹۶
FRC-Micro	۳/۹	۰/۷۵	۰/۷۹
FRC-Macro	۷/۰۱	۰/۴۵	۰/۳۶
FRC-Hybrid	۷/۳	۰/۴	۰/۳۲

همچنین به منظور مقایسه راحت‌تر نتایج بدست آمده در فاز اول و دوم تحقیق، شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب زمان ایجاد نخستین ترک (روز) و همچنین حداکثر عرض ترک برای کل طرح مخلوط‌های ساخته شده در این تحقیق را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در مجموع فاز اول و دوم تحقیق طرح مخلوط هیبرید (حاوی الیاف میکرو و ماکرو) بهترین عملکرد را از لحاظ افزایش سن ترک‌خوردگی و کاهش حداکثر عرض ترک ایجاد شده داشته است.



شکل ۱۴- مقایسه زمان ایجاد نخستین ترک (روز) در نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق.



شکل ۱۵- مقایسه حداکثر عرض ترک آزمونه در سن ۲۸ روز (میلی‌متر)

## ۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی اثر استفاده از الیاف پلیمری میکرو و ماکروپلیمری بر کنترل ترک‌خوردگی جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن مانند زمان ایجاد اولین ترک، حداکثر عرض ترک و متوسط نرخ ایجاد تنش در حلقه فولادی با استفاده از آزمایش حلقه مقید مطابق استاندارد ASTM C1581 پرداخته شد. همچنین اثر افزودن الیاف بر روی برخی خواص مکانیکی بتن نظیر مقاومت فشاری و مدول گسیختگی نیز مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور در فاز اول تحقیق دو نوع از الیاف میکروپلیمری شامل پلی پروپیلن و دوجزئی مورد بررسی قرار گرفت. در فاز دوم تحقیق طرح مخلوط‌های حاوی الیاف ماکروپلیمری و نیز طرح مخلوط هیبرید (حاوی هر دو نوع الیاف ماکرو و میکرو) مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد:

- ۱- استفاده از الیاف پلیمری (ماکرو و میکرو) تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر مقاومت فشاری نداشته است.
- ۲- الیاف میکروپلیمری مورد استفاده در فاز اول تأثیر افزایشی زیادی بر مدول گسیختگی نداشته حال آنکه نتایج فاز دوم تحقیق نشان داد که الیاف ماکروپلیمری در مقایسه با الیاف میکرو پلیمری تأثیر افزایشی بیشتری بر مدول گسیختگی داشته است. این افزایش برای طرح حاوی فقط الیاف ماکروپلیمری ۱۵ درصد و برای طرح هیبرید ۱۷ درصد بوده است.
- ۳- استفاده از هر دو نوع الیاف میکروپلیمری سبب بهبود سن ترک‌خوردگی در مقایسه با نمونه شاهد شده است. با این وجود الیاف میکرو پلی پروپیلن عملکرد بهتری در مقایسه با نمونه میکرو دوجزئی داشته است. استفاده از الیاف میکرو پلی پروپیلن سن ترک‌خوردگی بتن نسبت به نمونه شاهد را به میزان ۴۰ درصد افزایش داده است.
- ۴- نتایج به دست آمده در فاز دوم تحقیق نشان داد که استفاده از الیاف ماکروپلیمری تأثیر قابل توجهی بر بهبود سن ترک‌خوردگی و نیز کاهش حداکثر عرض ترک در سن ۲۸ روز داشته است. کاهش عرض ترک می‌تواند منجر به افزایش خصوصیات مکانیکی و دوام رویه‌های بتنی الیافی شود.
- ۵- در بین طرح‌های بررسی شده در این تحقیق طرح هیبرید یعنی طرح حاوی هر دو نوع الیاف ماکروپلیمری و میکروپلیمری بهترین عملکرد را داشته است.

## ۶- تقدیر و تشکر

کلیه آزمایش‌های این تحقیق با همکاری بخش بتن مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی و همچنین آزمایشگاه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی انجام شده و همچنین الیاف این تحقیق نیز توسط شرکت نانو نخ و گرانول سیرجان تامین شده است. نویسندگان این مقاله بدین وسیله از همکاری عوامل یاد شده تقدیر و تشکر می‌نمایند.

## مراجع

- [1] Pigeon, M., Marchand, J. and Pleau, R. (1996), "Frost resistant concrete". *Construction and Building Materials*, Vol 10(5), pp 339-48.
- [2] Bentur, A and Mindess, S. (2006), "Fibre Reinforced Cementitious Composites". by CRC Press, Second Edition.
- [3] Fallah, S., and Nematzadeh, M. (2017), "Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume", *Construction and Building Materials*, Vol 132, pp170-187.
- [4] Soe, K.T., Zhang, Y. X., and Zhang, L. C. (2013), "Material properties of a new hybrid fibre-reinforced engineered cementitious composite", *Construction and Building Materials*, Vol 43, pp 399-407.



- [5] Halvaei, M., Jamshidi, M., Pakravan, H. R., and Latifi, M. (2015), "Interfacial bonding of fine aggregate concrete to low modulus fibers", *Construction and Building Materials*, Vol 95, pp117-123.
- [6] Banthia, N., and Gupta, R. (2004), "Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC): fiber synergy in high strength matrices.", *Materials and Structures*, Vol 37 (10), pp707-716.
- [7] Banthia, N., and Soleimani, S.M. (2005), "Flexural response of hybrid fiber-reinforced cementitious composites.", *ACI Materials journal*, Vol 102(6), pp 382.
- [8] Banthia, N., and Nandakumar, N. (2003), "Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites", *Cement and Concrete Composites*, Vol 25(1), pp3-9.
- [9] Monteiro, P. (2006), "Concrete: Microstructure, Properties, and Materials", McGraw-Hill Publishing.
- [10] Hwang, C.L., Tran, V.A., Hong, J.W., Hsieh, Y.C. (2016), "Effects of short coconut fiber on the mechanical properties, plastic cracking behavior, and impact resistance of cementitious composites", *Construction and Building Materials*, Vol 127, pp 984-992.
- [11] ASTM C143 / C143M-15a, *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [12] ASTM C231 / C231M-17a, *Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [13] BS 1881-116:1983, *Testing Concrete Part 116: Method for determination of compressive strength of concrete cubes*, AMD 6097: July 1989; AMD 6720: July 1991.
- [14] ASTM C78-09, *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [15] ASTM C1581 / C1581M-18a. (2018), "Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage", ASTM International, West Conshohocken.
- [16] Banthia, N. (2010), "Report on the Physical Properties and Durability of Fiber Reinforced Concrete", ACI 544.5 R-10, Reported by ACI Committee 544 1-3.