

## تأثیرالیاف مختلف بر ترک‌های انقباضی سنین اولیه و مقاومت مکانیکی بتن پر مقاومت

علی صدر ممتازی<sup>۱\*</sup>، بهزاد طهمورسی<sup>۲</sup>، اشکان سرادار<sup>۳</sup>

۱- دانشیار، گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲- کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۳- کارشناسی ارشد مهندسی سازه، پردیس دانشگاهی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

### چکیده

زمانی که بتن رطوبت خود را از دست می‌دهد، دچار جمع شدگی (آبرفتگی) و کاهش حجم شده و در نهایت باعث ایجاد ترک و افزایش تغییر شکل بتن می‌شود. در این پژوهش اثر الیاف‌های پلی‌پروپیلن، فولادی، شیشه، بازالت و پلیمری بر مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و ترک‌های انقباضی (سنین اولیه) مخلوط‌های بتنی پر مقاومت ارزیابی می‌شود. آزمایش انقباض از نوع مهار شده (مقید داخلی)، بر روی نمونه‌های بتنی به شکل حلقه با ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر، قطر داخلی ۳۰ میلی‌متر و قطر خارجی ۴۰ میلی‌متر مطابق استاندارد *ASTM C 1581* انجام شد. پارامترهای اصلی مورد مطالعه در این پژوهش عرض و نوع ترک و نیز سن ترک خوردگی ناشی از انقباض مهار شده است. نتایج نشان داد که افزودن الیاف موجب افزایش مقاومت فشاری در سن ۳، ۷ و ۲۸ روز به ترتیب تا ۱۶٪، ۲۰٪ و ۳٪ و نیز موجب افزایش شاخص چقرمگی خمشی تا ۷/۷ برابر می‌شود. الیاف فولادی و شیشه عملکرد خوبی در تامین مقاومت خمشی داشتند اما در کاهش سرعت و زمان ترک خوردگی انقباضی، عملکرد نسبتاً ضعیفی داشتند. همچنین ترک در تمام حلقه‌های بتنی به جز مخلوط حاوی پلی‌پروپیلن به ترک عمقی (*full depth crack*) توسعه پیدا کرد. مخلوط‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن تا ۸۴٪ کاهش عرض ترک و ۶۲٪ افزایش سن ترک خوردگی را از خود نشان دادند.

کلمات کلیدی: الیاف، بتن پر مقاومت، ترک، انقباض سنین اولیه، مقاومت مکانیکی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2017.88262.1223	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.88262.1223	۱۳۹۷/۰۸/۳۰	۱۳۹۶/۰۶/۲۴	۱۳۹۶/۰۶/۲۴	۱۳۹۶/۰۵/۲۷	۱۳۹۶/۰۳/۱۳
علی صدر ممتازی					* نویسنده مسئول:	
sadmomtazi@Guilan.ac.ir					پست الکترونیکی:	

## Effect of various fiber on early- age shrinkage cracks and mechanical strength of high strength concrete

Ali Sadrmomtazi<sup>1\*</sup>, Behzad Tahmouresi<sup>2</sup>, Ashkan Saradar<sup>3</sup>

1- Associate Professor, Civil Engineering Dept, University of Guilan., Rasht, Iran.

2- M.Sc in Structural Engineering, Civil Engineering Dept, University of Guilan., Rasht, Iran.

3- M.Sc in Structural Engineering, Civil Engineering Dept, Campus University, University of Guilan., Rasht, Iran.

### ABSTRACT

When the concrete loses its moisture, shrinkage and volume reduction is happening and eventually cracks create and deformations in the concrete are increased. In this study, the effect of polypropylene, steel, glass, basalt and polymer fiber on compressive strength, flexural strength and shrinkage cracks (early ages) of high strength concrete mixtures were evaluated. The restrained shrinkage test was performed on concrete ring specimens with height of 150 mm, inner diameter of 30 mm and outer diameter of 40 mm according to ASTM C 1581 standard. The crack width and age of restrained shrinkage cracking were main parameters studied in this research. The results showed that, adding fiber, caused increases the compressive strength 16%, 20% and 3% at the age of 3, 7 and 28 days respectively, and also, increased flexural toughness index up to 7.7 times. steel and glass fiber provided good performance in flexural strength, but had relatively poor action in the velocity reduction and cracking time of restrained shrinkage. Also, crack in all of concrete ring specimens except polypropylene containing mixture, was developed to full depth crack. The mixture of polypropylene fiber containing showed reduction in crack width up to 62% and increasing age cracking up to 84%.

### ARTICLE INFO

Received: 03/06/2017

Revised: 18/08/2017

Accepted: 15/09/2017

### Keywords:

Fiber

High Strength Concrete  
Crack

Early- age Shrinkage  
Mechanical Strength

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2017.88262.1223

\*Corresponding author: Ali Sadrmomtazi.

Email address: sadrmomtazi@Guilan.ac.ir

## ۱- مقدمه

امروزه بتن به عنوان یکی از پرمصرف ترین مصالح ساختمانی در جهان شناخته شده است. اقتصادی بودن، در دسترس بودن اجزاء تشکیل دهنده، مقاومت خوب آن در مقابل شرایط محیطی مختلف و همچنین مقاومت فشاری بالا عواملی است که سبب مقبولیت عمومی در استفاده بتن به عنوان یک ماده ساختمانی می‌گردد [۱]. صنعت بتن طی سال‌های اخیر رشد و پیشرفت چشمگیری را تجربه کرده است، به طوری که منجر به تولید و توسعه بتن‌هایی با کیفیت و کاربری بالا مانند بتن با عملکرد بالا (HPC) و بتن‌های پر مقاومت (HSC) شده است [۲ و ۳]. از طرفی بتن در کشش و کرنش دارای ضعف است که با استفاده از انواع میلگردها یا الیاف مختلف تا حدی قابل جبران است [۴].

در سال‌های اخیر استفاده از بتن مسلح به الیاف (FRC) به طور گسترده‌ای در زیرساخت‌های مهندسی عمران و نیز کاربردهای نظامی از قبیل روسازی جاده‌ها، پل‌ها، تونل‌ها، دال‌ها، فرودگاه، پناه‌گاه‌ها، انبارهای نگهداری مواد منفجره و غیره افزایش داشته است. با توجه به مقاومت کششی کم بتن و نیز شکننده بودن آن، در چند دهه اخیر از الیاف با نسبت طول به قطر بالا که در تمام حجم بتن توزیع و پراکنده شده، استفاده می‌شود. به کارگیری الیاف در بتن و کامپوزیت‌های پایه سیمانی، به منظور افزایش چقرمگی و شکل‌پذیری در ناحیه پسا ترک به طور قابل توجهی افزایش یافته است. انهدام و خرابی بتن به شدت به تشکیل ماکروتترک‌ها و میکروتترک‌ها تحت اثر بارگذاری و یا تأثیرات محیطی وابسته است [۵-۹]. تغییرات گرمایی و رطوبتی در خمیر سیمان باعث ایجاد ریز ترک‌ها می‌شود که در سطح دانه‌های درشت متمرکز می‌شوند. با افزایش بارگذاری و نیز سایر مسائل محیطی، ریز ترک‌ها در جسم بتن منتشر می‌شود. استفاده از الیاف مختلف یک عامل موثر در کاهش انتشار ترک‌ها و بهبود خاصیت جذب انرژی و طاقت بتن می‌شود که می‌تواند به نحو مطلوبی خطر شکست سازه‌های بتنی به خصوص در مناطقی که تحت بارهای مکرر و لرزه‌ای قرار می‌گیرند را کاهش دهد [۱۰]. استفاده از الیاف نقش عمده در جلوگیری از ورقه‌شدگی، ترک‌های انقباضی و ترک‌های حرارتی به عنوان جایگزین با آرماتور حرارتی، دارد. همچنین حضور مواد مکمل سیمانی مانند دوده سیلیسی و خاکستر بادی و نیز شکل، اندازه، نوع، حجم و نحوه توزیع الیاف بر بهره‌وری فنی و اقتصادی بتن تأثیر گذار است. طیف گسترده‌ای از الیاف با خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی مختلف برای مسلح سازی ماتریس‌های سیمانی مطرح و استفاده شده است. از جمله الیاف‌های در دسترس و قابل کاربرد در کامپوزیت‌های سیمانی می‌توان به الیاف‌های فولادی، پلی‌پروپیلن، شیشه، کربن و بازالت اشاره کرد [۱۱-۱۲]. شکل ۱ شماتیک تأثیر الیاف بر فرآیند شکافته شدن بتن تحت بارگذاری کششی را نشان می‌دهد.

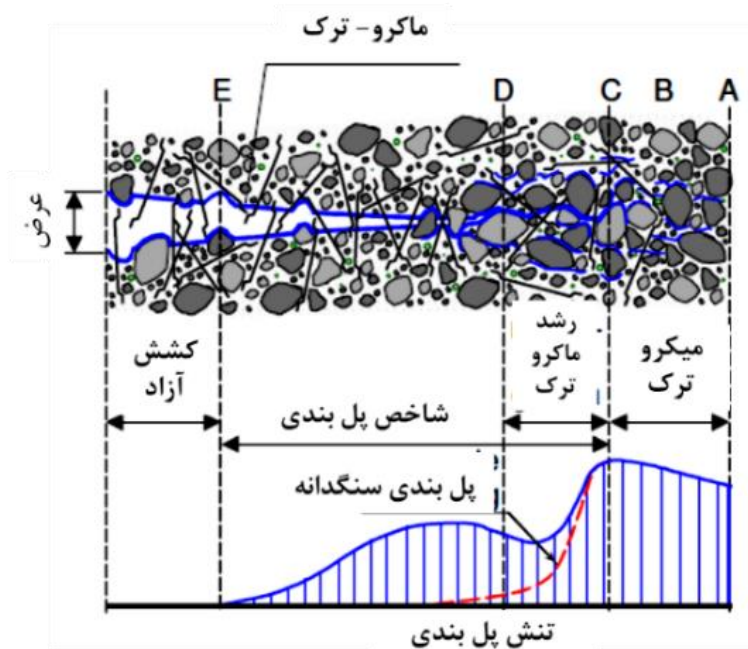
جمع‌شدگی به طور کلی به چهار دسته تقسیم می‌شود: جمع‌شدگی در سنین اولیه (جمع‌شدگی پلاستیک یا مویینه)، جمع‌شدگی خودبه‌خودی، جمع‌شدگی کربناتاسیون و جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن. جمع‌شدگی سنین اولیه در بتن تازه به علت تبادل رطوبت از سطح به محیط توسط تبخیر و تبادل جرم از درون بتن به سطح آن صورت می‌گیرد. جمع‌شدگی پلاستیک در چند ساعت اولیه بعد از ریختن بتن اندازه‌گیری می‌شود که با طرح اختلاط بهینه و روش عمل‌آوری مناسب قابل پیشگیری می‌باشد. فعل و انفعالات بین خمیر سیمان سخت شده و کربن دی‌اکسید منجر به جمع‌شدگی کربناتاسیون می‌شود. کاهش حجم ناشی از این پدیده به آهستگی و در محیط پیرامونی صورت می‌گیرد و نسبت به جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن قابل نظر می‌باشد. جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن به علت تبادل رطوبت ناشی از تغییرات رطوبت نسبی بین محیط و بتن بوجود می‌آید. نوع اخیر، قسمت عمده‌ای از تغییرات حجم ناشی از جمع‌شدگی در بتن با مقاومت معمولی و بالا را شامل می‌شود، به همین دلیل در این مقاله به طور اخص به بررسی این نوع جمع‌شدگی پرداخته شده است [۱۴ و ۱۵].

تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در زمینه تأثیر انواع مختلف الیاف شامل الیاف طبیعی و مصنوعی بر روی خصوصیات بتن انجام گرفته است. اولین تلاش برای مسلح کردن بتن به وسیله جاگذاری الیاف فولادی توسط باستون و راموالدی در سال ۱۹۶۰ در امریکا صورت گرفت [۱۶]. بعد از آن تحقیقات و کاربردهای صنعتی بسیاری درباره بتن مسلح با الیاف فولادی و دیگر الیاف‌ها به منظور بهبود خواص مکانیکی و دوام آن، صورت گرفته است. مطابق نتایج مطالعات پژوهشگران، چهار عامل اصلی در مقاومت و ظرفیت باربری کامپوزیت‌های سیمانی الیافی مؤثرند: کیفیت ماتریس، نسبت ابعاد، حجم مصرفی و مقاومت پیوند الیاف. واندوال [۱۷] آزمایشاتی را بر روی بتن مسلح الیافی ترکیبی (طول

و مقدار مختلف الیاف) انجام داد. نتایج بدست آمده از اندازه گیری تغییر مکان باز شدگی ترک نشان داد که الیاف‌های با طول کوتاه در مناطق با باز شدگی ترک‌های کوچک بسیار موثر است. در حالی که الیاف با طول بلند شکل پذیری خوبی را در ترک‌های بزرگ و عریض تامین می‌کند. الیاف‌های کوتاه و بلند به ترتیب موجب پل‌بندی میکروتکرک‌ها و ماکروتکرک‌ها می‌شوند که در نهایت افزایش کرنش و ظرفیت باربری پسا ترک را نتیجه می‌دهد. گسیختگی الیاف در ماتریس سیمانی نیز به صورت شکست به دلیل کشامدگی (پارگی) و با بیرون آمدگی رخ می‌دهد [۱۸].

طی سال‌های اخیر، الیاف پلیمری نسل جدید عمدتاً بر پایه پلی‌پروپیلن با عملکرد بهبود یافته، ارائه شد به طوری که با افزایش قطر و طول این الیاف، امکان کاربرد آنها در حجم‌های به مراتب بالاتر فراهم شده است. لذا محققین زیادی در زمینه کاربرد این نوع الیاف و تأثیر آن بر روی عملکرد بتن تحقیقات خود را انجام دادند. به عنوان نمونه، مستوفی نژاد و حاتمی [۱۹] به بررسی تأثیرات استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن بر ترک خوردگی ناشی انقباض و کارایی بتن پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش درصد و طول الیاف به طور موثری سطح ترک‌های آبرفتگی پلاستیک تا ۸۶٪ در مقایسه با نمونه فاقد الیاف کاهش می‌یابد. حسن ساقی و حسن دلبری [۲۰] تأثیر الیاف پلیمری و مقاومت بتن بر میزان ترک خوردگی ناشی از جمع شدگی پلاستیک در دال‌های بتنی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش الیاف مصرفی از ۲٪ به ۳٪، سطح ترک‌های آبرفتی پلاستیک تا ۹۸٪ کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد الیاف، عرض ترک و زمان لازم جهت ایجاد ترک در سطح بتن به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. تاسو و لوبل [۲۱] در تحقیقی خواص مکانیکی بتن حاوی الیاف شیشه را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودن الیاف به مخلوط‌های بتنی تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری یا مدول الاستیسیته ندارد اما به طور قابل توجهی باعث افزایش مقاومت خمشی و مقاومت برشی مستقیم می‌شود که این موضوع با افزودن مقدار الیاف تشدید پیدا می‌کند. در تحقیق دیگری با موضوع پیش بینی روش‌های انقباض خشک در دیوارهای بتنی مسلح لی و سئو [۲۲] نشان دادند: عرض ترک به شدت تحت تأثیر مقاومت فشاری بتن، قطر آرماتورها، و نسبت آرماتورقرار دارد. اما بندرت تحت تأثیر انقباض خشک، نسبت مقید شدگی، طول دیوار و ضریب خزش تأثیر می‌گیرد. همچنین به طور کلی، تعداد ترک‌ها و عرض ترک‌های انقباض پیش بینی شده به مقادیر بدست آمده از آزمایشات تجربی نزدیک بودند.

هدف از این پژوهش بررسی اثر انواع الیاف مختلف بر انقباض سن اولیه، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی بتن‌های با مقاومت بالا است. پارامترهای مورد مطالعه در این پژوهش عرض و نوع ترک و نیز سن ترک خوردگی ناشی از انقباض مهار شده است. به همین منظور الیاف با درصد حجمی ۰/۱ در مخلوط‌های بتنی با نسبت آب به مواد سیمانی ثابت ۰/۳۸ استفاده شد.



شکل ۱. شماتیک تاثیر الیاف بر فرآیند شکافته شدن بتن تحت بارگذاری کششی

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح مصرفی

سیمان استفاده شده در این پژوهش از نوع تیپ ۴۲۵-۱ مطابق ضوابط ASTM C150 است. دوده سیلیسی مصرفی نیز به عنوان یک ماده پوزولانی معدنی، جایگزین بخشی از وزن سیمان در مخلوط‌های بتنی، شد. خواص فیزیکی و ترکیب شیمیایی سیمان و دوده سیلیسی در جدول ۱ آمده است. درشت‌دانه (شن) مصرفی در این پژوهش از نوع طبیعی شکسته با چگالی ۲/۶۹ و حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر، همچنین ریزدانه (ماسه) مصرفی از نوع طبیعی شسته با چگالی ۲/۶ و حداکثر اندازه ۴/۷۵ میلی‌متر استفاده شد. شکل ۲ دانه‌بندی سنگدانه مصرفی را نشان می‌دهد. در این پژوهش از ۵ نوع الیاف مختلف شامل: پلی‌پروپیلن، فولادی، شیشه، بازالت و پلیمری با ۰/۰۱٪ حجمی مخلوط بتن استفاده شد. در جدول ۲ خصوصیات الیاف‌ها آمده است.

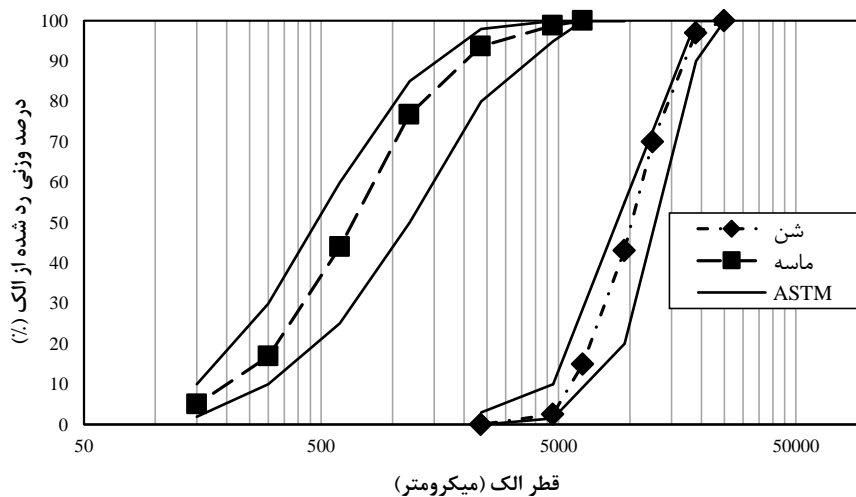
### ۲-۲- مخلوط‌های بتنی

در این پژوهش ۶ طرح مخلوط بتنی (یک طرح شاهد و پنج طرح الیافی) با نسبت آب به مواد سیمانی ثابت ۰/۳۸ و جایگزینی ۱۰٪ وزنی دوده سیلیسی با سیمان، ساخته شد. با توجه به نسبت آب به مواد سیمانی پایین جهت رسیدن به کارایی مطلوب از مواد افزودنی فوق روان کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات با نام تجاری p10-3R تهیه شده از شرکت شیمی ساختمان استفاده شد. طرح‌های مخلوط در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

مخلوط‌های بتنی پس از انجام آزمایش کارایی در داخل قالب‌ها ریخته شدند و بعد از تراکم بر روی میز ویبره، با یک روکش پلاستیکی (جهت جلوگیری از بخار رطوبت اولیه) پوشانده شدند. پس از ۲۴ ساعت نمونه‌های بتنی از قالب‌ها بیرون آورده شدند و تا روز آزمایش در مخزن آب در دمای معمولی عمل آوری شدند (شکل ۳).






جدول ۱. مشخصات سیمان و دوده سیلیسی

خواص فیزیکی		ترکیبات شیمیایی (% وزنی)							
چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	سطح ویژه (m <sup>2</sup> /kg)	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
۳/۱۵	۳۱۰	۶۴/۳۷	۲۱/۰۸	۵/۳۶	۳/۶۴	۲	۰/۸۲	۰/۵	۲/۲
۲/۲	۱۹۵۰	۱/۵	۹۲	۱/۵	۲/۵	۲	-	-	-



شکل ۲: دانه بندی سنگدانه مصرفی

جدول ۲. مشخصات الیاف مصرفی

الیاف	شکل	مقاومت کششی (MPa)	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	قطر (mm)	طول (mm)
فولادی		۱۰۰۰	۷/۸۵	۰/۲	۱۳
پلی پروپیلن		۴۵۱	۰/۹۱	۰/۰۲	۱۲
شیشه		۱۸۵۰	۲/۷	۰/۰۱۲	۱۲
بازالت		۲۱۰۰	۲/۶۷	۰/۰۱	۱۲
پلیمری		۷۰۰	۱/۳	۰/۰۹	۱۲

جدول ۳- طرح های مخلوط بتنی ساخته شده ( $\text{Kg/m}^3$ )

کد طرح	آب به مواد سیمان	سیمان	دوده سیلیسی	ریزدانه	درشت دانه	فوق روان کننده	الیاف		
							پلی پروپیلن	فولادی	شیشه
HSC-0*	۰/۳۸	۴۰۵	۴۵	۷۸۱	۱۰۱۶	۲/۳۲	۰	۰	۰
HSC-P	۰/۳۸	۴۰۵	۴۵	۷۸۱	۱۰۱۶	۳	۰/۹۱	۰	۰
HSC-S	۰/۳۸	۴۰۵	۴۵	۷۸۱	۱۰۱۶	۲/۹	۰	۷/۸۵	۰
HSC-G	۰/۳۸	۴۰۵	۴۵	۷۸۱	۱۰۱۶	۲/۵۵	۰	۰	۲/۷
HSC-B	۰/۳۸	۴۰۵	۴۵	۷۸۱	۱۰۱۶	۲/۷۵	۰	۰	۲/۶۷
HSC-PL	۰/۳۸	۴۰۵	۴۵	۷۸۱	۱۰۱۶	۲/۶۵	۰	۰	۱/۳

°: بدون الیاف، P: الیاف پلی پروپیلن، S: الیاف فولادی، G: الیاف شیشه، B: الیاف بازالت، PL: الیاف پلیمری



شکل ۳: نمونه های بتنی تحت عمل آوری

## ۲-۳- روش های آزمایش

### ۲-۳-۱- کارایی

بر خلاف بتن معمولی که در آن میزان افت بتن پس از بالا کشیدن مخروط اسلامپ بیانگر کارایی است، در بتن های الیافی زمان جریان بتن در مخروط اسلامپ وارونه تحت ویبره خارجی به عنوان معیار کارایی است. این آزمایش مطابق استاندارد ASTM C 995 انجام شد.

### ۲-۳-۲- آزمایش مقاومت فشاری

مقاومت فشاری مخلوط های بتنی با استفاده از نمونه های مکعبی با بعد ۱۵۰ میلی متر در سن ۳، ۷ و ۲۸ روز مطابق استاندارد BS EN 12390-3 ارزیابی شد. سرعت بارگذاری بکار گرفته شده در این آزمایش ۰/۳ مگاپاسکال بر ثانیه بود. نتایج متوسط مقاومت فشاری سه نمونه به عنوان نتیجه آزمایش گزارش شد.

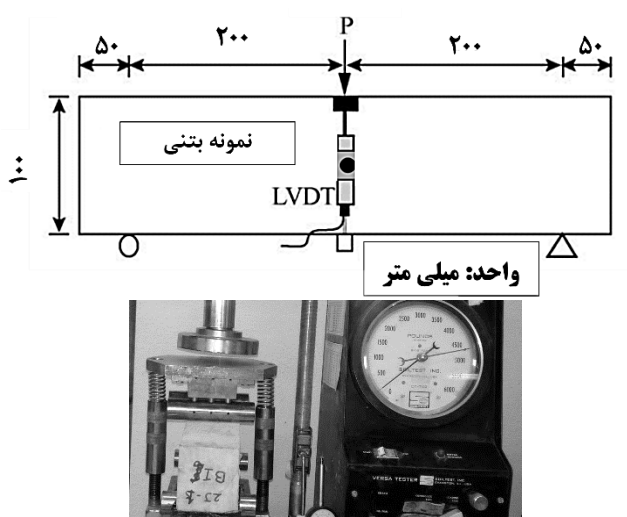
### ۲-۳-۳- آزمایش مقاومت خمشی

آزمایش مقاومت خمشی با بارگذاری در وسط دهانه تیر به صورت چهار نقطه ای توسط دستگاه SANTAM STM-150 با سرعت بارگذاری ۰/۵ میلی متر بر ثانیه مطابق استاندارد ASTM C1609 بر روی نمونه های منشوری ۱۰۰×۱۰۰×۵۰۰ میلی متر در سن ۲۸ روز انجام

شد. فاصله بین دو تکیه گاه مطابق شکل ۴۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. چقرمگی خاصیتی از یک ماده است که مقاومت آن را در برابر گسیختگی تحت تنش‌های وارده بیان می‌کند. بر اساس تعریف چقرمگی خمشی نسبت انرژی جذب شده (مساحت زیر منحنی نیرو-جابجایی) در فرآیند آزمایش خمشی بر سطح مقطع نمونه می‌باشد که مطابق رابطه (۱) و بر اساس استاندارد ASTM C 1080 قابل محاسبه است:

$$b \times h / \text{انرژی جذب شده} = \text{چقرمگی} \quad (1)$$

که در آن:  $b$  عرض سطح مقطع نمونه منشوری بر حسب میلی‌متر (mm) و  $h$  عمق سطح مقطع نمونه منشوری بر حسب میلی‌متر (mm).

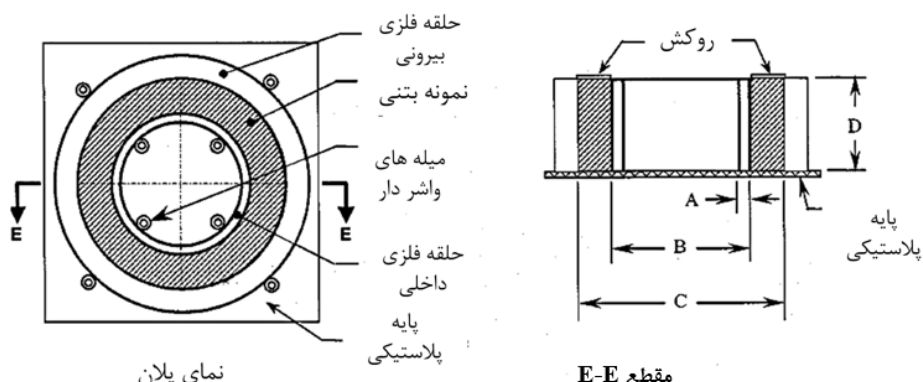


شکل ۴: دستگاه اندازه‌گیری مقاومت خمشی

## ۲-۳-۴- آزمایش انقباض مهار شده با حلقه

آزمایش انقباض مهار شده با حلقه مطابق استاندارد ASTM C 1581 انجام شد. برای انجام این آزمایش نمونه‌های بتنی به شکل حلقه با ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر، قطر داخلی ۳۰ میلی‌متر و قطر خارجی ۴۰ میلی‌متر ساخته شدند. در شکل ۵ جزئیات نمونه حلقه بتنی نشان داده شده است. حلقه‌های بتنی بر روی یک صفحه ضد آب (از جنس پلاستیک) قرار داده شدند. بعد ۲۴ ساعت حلقه‌های بتنی از قالب خارج شدند و قسمت فوقانی آن‌ها با واکس پارافین جهت جلوگیری از خروج رطوبت پوشش داده شد. دو کرنش سنج در وسط ارتفاع حلقه فولادی به صورت مقابل هم، جهت اندازه‌گیری کرنش حلقه فولادی نصب شدند. جهت قرائت و ثبت پیوسته اطلاعات از یک داده بردار (Data-Logger) استفاده شد. در شکل ۶ فرآیند اندازه‌گیری انقباض حلقه‌های بتنی نشان داده شده است. اندازه‌گیری انقباض حلقه‌های بتنی، بعد از خروج از قالب شروع شد. با توجه به حساسیت بالا و وابستگی شدید انقباض در سنین اولیه به عوامل محیطی از جمله دما و رطوبت، حلقه‌های بتنی در اتاق با دمای ثابت ۲۲ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۶۰٪ نگهداری شدند که به طور مداوم شرایط محیطی پایش می‌شد.

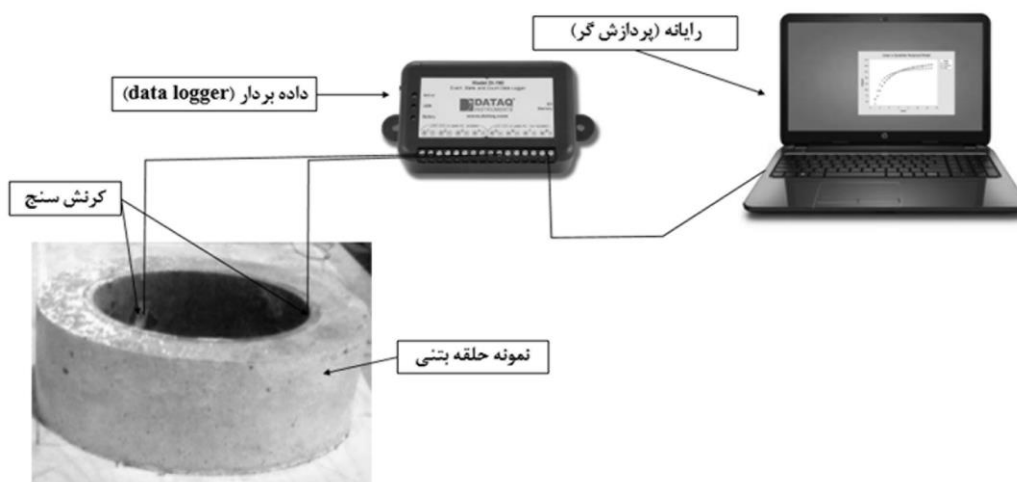




E-E مقطع

ابعاد نمونه	واحد (میلی متر)
A	12/5 ± 0/13
B	330 ± 3
C	406 ± 3
D	150 ± 6

شکل ۵: جزئیات نمونه حلقه بتنی برای آزمایش انقباض



شکل ۶: فرآیند اندازه گیری انقباض حلقه های بتنی

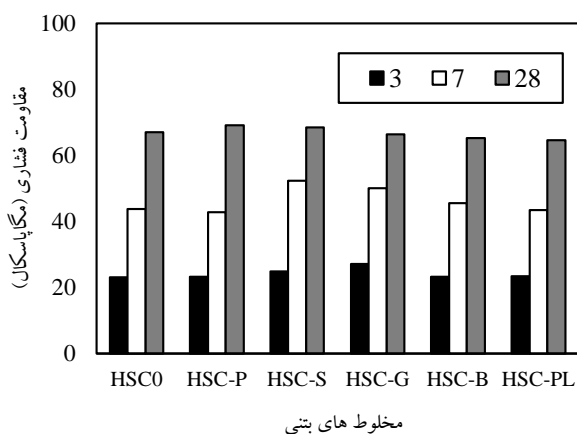
### ۳- بحث و بررسی نتایج

#### ۳-۱- کارایی بتن تازه

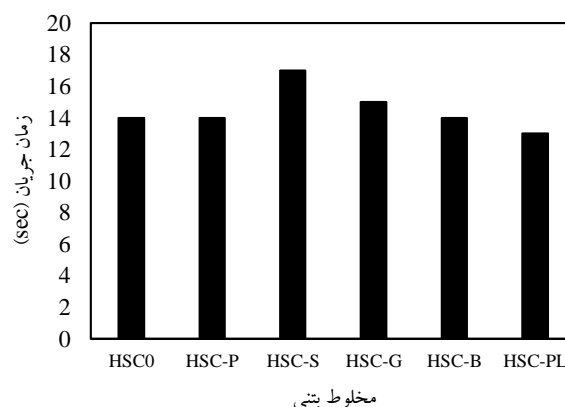
نحوه افزودن الیاف به مخلوط بتن در تویی یا توده ای شدن آن تاثیر دارد. به منظور کاهش حالت های ذکر شده، الیاف قبل افزودن آب، با درشت دانه و ریز دانه مخلوط شد. به طوری بعد از دو نیم کردن نمونه های مکعبی یک روزه، الیاف به طور مطلوبی در حجم ماتریس سیمانی توزیع شده بود. زمان جریان مخلوط های بتنی به عنوان شاخصی برای کارایی، در شکل ۷ نشان داده شده است. مشاهده می شود که افزودن الیاف تاثیر قابل توجهی بر زمان جریان مخلوط بتنی نداشته است. در مخلوط حاوی الیاف فولادی زمان جریان کمی افزایش یافته است. قابل ذکر است که زمان جریان ۱۵ ثانیه، برابر ۲۵ میلی متر اسلامپ است که اسلامپ مد نظر در این پژوهش می باشد.

## ۳-۲- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری در سه سن مختلف ۳، ۷ و ۲۸ انجام شد که نتایج آن‌ها در شکل ۸ آمده است. مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری سنین اولیه بتن‌های الیافی در مقایسه با بتن شاهد در سن ۳ و ۷ روزه به ترتیب تا ۱۶٪ و ۲۰٪ افزایش داشته است که با بالا سن تا ۲۸ روز تا ۳٪ افزایش می‌یابد. این نتیجه نشان دهنده تاثیر مثبت الیاف در سنین اولیه است. با توجه به بکارگیری بتن در بخش‌های مختلفی از جمله روکش راه‌ها و پیاده روها، دال‌های روی زمین، سیستم‌های کف، بتن شاتکریت و رویه‌های بتنی و با توجه به نیاز به کسب مقاومت بالا در سنین اولیه در موارد ذکر شده، استفاده از الیاف می‌تواند به‌طور مثبتی موثر واقع شود. در سن ۷ روزه مقاومت تمام مخلوط‌ها (به جز مخلوط HSC-P) بالاتر از مقاومت بتن شاهد بود. به نظر می‌رسد کیفیت پیوند سطح مشترک الیاف-ماتریس سیمان ضعیف بوده که منجر به افت مقاومت شده است. در سن ۲۸ روز مخلوط حاوی الیاف پلیمری دچار افت مقاومت شد، پس از سگشت نمونه مکعبی مشاهده شد که اثر تویی شدن الیاف در بخش‌هایی از نمونه مانع از توزیع یکنواخت نیرو و تثبیت مطلوب الیاف شده است.



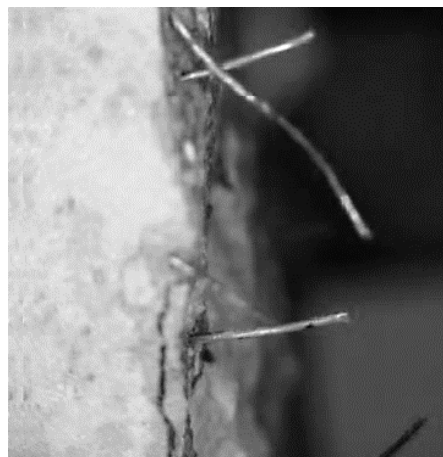
شکل ۸: مقاومت فشاری مخلوط های بتنی



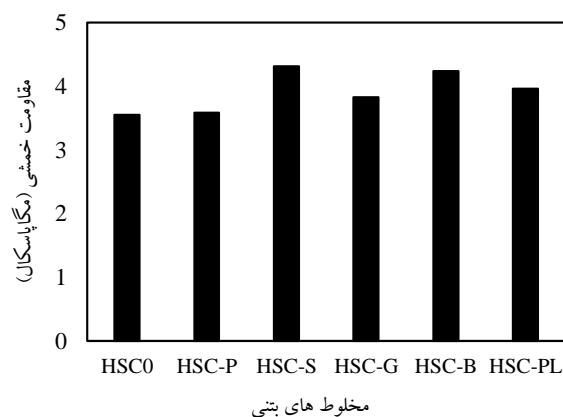
شکل ۷: زمان جریان مخلوط های بتنی

## ۳-۳- مقاومت خمشی

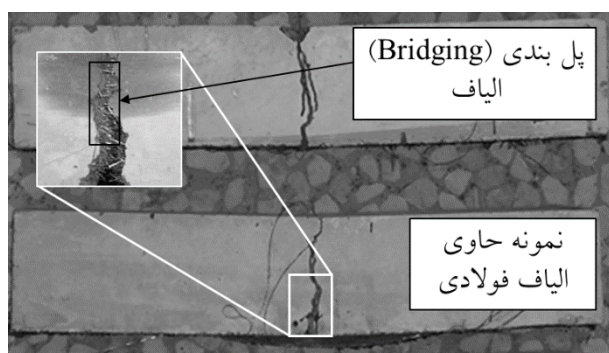
آزمایش مقاومت خمشی مخلوط‌های بتنی در سن ۲۸ روز انجام شد که در شکل ۹ نتایج آن‌ها آورده شده است. انتظار می‌رود که بتن الیافی رفتار و عملکرد مطلوبی را در مقایسه با بتن معمولی تحت خمش از خود نشان دهد، اما با توجه به درصد حجمی الیاف استفاده شده، هدف بهبود مقاومت ترک خوردگی بتن در سنین اولیه است. مقاومت خمشی نمونه‌های الیافی حداکثر تا ۲۲٪ بالاتر از مقاومت بتن شاهد بود که بیشترین آن متعلق به مخلوط HSC-S می‌باشد. الیاف‌های با سختی بالا (فولادی و بازالت) بیشترین مقاومت را از خود نشان دادند. در این آزمایش پس از بارگذاری دو نوع حالت شکست مشاهده شد. حالت اول: برای الیاف‌های با مقاومت کششی پایین، گسیختگی به سرعت پس از شکست کششی الیاف رخ داد. حالت دوم: نمونه‌ها پس از اولین ترک کششی رفتار بار پذیری از خود نشان دادند. شکل ۱۰ کشیدگی (Pull-out) الیاف فولادی را نشان می‌دهد. به جز مخلوط حاوی الیاف فولادی، هیچکدام از مخلوط‌های بتنی رفتار پسا ترک از خود نشان ندادند که مقدار کم الیاف دلیل آن است. مخلوط HSC-S به طور متوسط ۰/۷۵ مگاپاسکال تنش پسماند در ناحیه پسا اوج از خود نشان داد. شکل ۱۱ نمونه‌های منشوری با و بدون الیاف پس از بارگذاری خمشی را نشان می‌دهد. چقرمگی خمشی یکی از معیارهای اندازه گیری مقاومت پسا ترک بتن‌های الیافی است. در این پژوهش با توجه به دونیم شدن نمونه‌های منشوری شاهد و الیافی امکان اندازه گیری چقرمگی وجود نداشت. و تنها چقرمگی مخلوط حاوی الیاف فولادی (که رفتار پسا ترک از خود نشان داده بود) اندازه گیری شد. جدول ۴ نتایج چقرمگی خمشی مخلوط‌های بتنی را نشان می‌دهد.



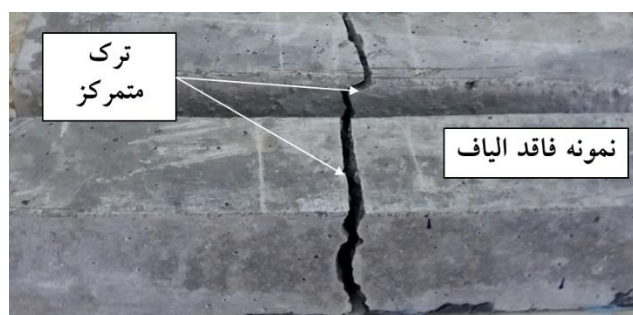
شکل ۱۰: بیرون کشیدگی (Pull-out) الیاف فولادی



شکل ۹: مقاومت خمشی مخلوط‌های بتنی



نمونه خمشی حاوی الیاف فولادی



الف: نمونه خمشی فاقد الیاف

شکل ۱۱: نمونه‌های منشوری تحت بارگذاری خمشی

جدول ۴. خلاصه نتایج چقرمگی مخلوط‌های بتنی

کد طرح	نیروی اولین ترک (N)	خیز اولین ترک (mm)	مقاومت اولین ترک (MPa)	چقرمگی اولین ترک (N-mm)	$I_5$	$I_{10}$	$R_{5,10}$
HSC0	12099.1	0.0228	3.5	124.28	-	-	-
HSC-P	12455	0.0228	3.6	146.88	-	-	-
HSC-S	14594.6	0.025	4.2	225.96	۴/۱	۷/۷	۷۲
HSC-G	13046.6	0.0228	3.7	146.88	-	-	-
HSC-B	14710.2	0.0228	4.2	169.47	-	-	-
HSC-PL	13642.6	0.0228	3.96	158.17	-	-	-

### ۳-۴- انقباض

ترک خوردگی حلقه‌های بتنی با استفاده از انقباض مهار شده (مقید داخلی) ارزیابی شد. این آزمایش مقایسه پتانسیل نسبی مخلوط‌های بتنی مسلح به الیاف در جلوگیری و کنترل ترک‌های انقباضی سنین اولیه را نشان می‌دهد. نتایج انقباض در جدول ۵ و شکل ۱۲ آورده شده است. سه پارامتر در این آزمایش بررسی شد: (۱) سن ترک خوردگی، (۲) عرض ترک نمونه و (۳) نوع ترک خوردگی. سن ترک خوردگی با استفاده از نمودارهای کرنش-زمان بررسی شد. دونوع ترک در حلقه‌های بتنی مشاهده شد: (۱) ترک‌های عمقی (full depth crack)، (۲) ترک‌های سطحی (superficial crack). با توجه به شکل ۱۲، ترک‌هایی که به طور کامل شکاف برداشته اند با افت ناگهانی در

کرنش (بیشتر از ۳۰ میکرو کرنش) و یا افت سازگار کرنش همراه هستند. همچنین ترک سطحی (ترک‌هایی که به طور کامل به عمق نمونه نفوذ نکرده بودند) در نمودار کرنش- زمان به صورت افت موضعی همراه هستند.

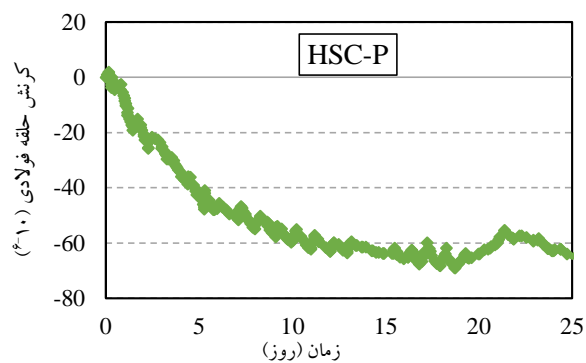
با توجه به شکل ۱۲ می‌توان دید که در تمام نمونه‌ها پس از خروج از قالب، در طول مدت ۲۸ روز، ترک‌های ایجاد شده در سطح حلقه‌های بتنی به ترک عمقی توسعه پیدا کرده اند. اما در مخلوط (HSC-P) نمونه حاوی الیاف پلی پروپیلن نشانه‌ای از ایجاد ترک‌های عمقی مشاهده نشد. این نتیجه نشان می‌دهد که عرض ترک برای این مخلوط تقویت شده است.

مخلوط‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن و فولادی به ترتیب کمترین مقدار عرض ترک را داشتند. مخلوط حاوی الیاف پلی پروپیلن بهترین نتیجه را با توجه به پارامترهای عرض و زمان ترک کسب کرد. سن ترک خوردگی از ۱۳ روز به ۲۱ روز افزایش پیدا کرده است (۶۲٪ افزایش، ۱۳ روز برای بتن شاهد و ۲۱ روز برای بتن حاوی الیاف پلی پروپیلن). همچنین عرض ترک تا ۸۴٪ کاهش پیدا کرده است (۰/۴ میلی‌متر برای بتن شاهد و ۰/۰۶۵ میلی‌متر برای بتن حاوی الیاف پلی پروپیلن).

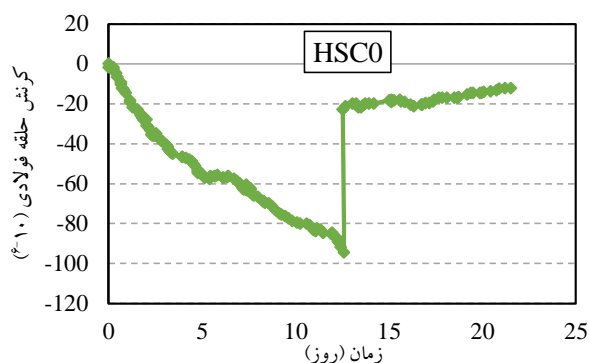
الیاف فولادی عرض ترک کمتری (کمتر از نصف در مقایسه با بتن شاهد) را در زمان اولین ترک (در سن ۱۱ روز) نشان می‌دهد. مشاهده شد که در شرایط آزمایشگاهی در بخش‌هایی از سطح حلقه بتنی حاوی الیاف فولادی، علائم خوردگی به وجود آمده است. همچنین با افزایش زمان عرض ترک خوردگی در مقایسه با بتن شاهد افزایش می‌یابد. این موضوع می‌تواند به دلیل مقاومت خمشی نسبتاً بالای الیاف استفاده شده در مخلوط باشد. مخلوط‌های حاوی الیاف شیشه، بازالت و پلیمری زمان ترک خوردگی بالاتری در مقایسه با بتن شاهد داشتند، اما با این حال عرض ترک آن‌ها اختلاف چندانی با بتن شاهد نداشت. شکل ۱۳ تصویر نزدیک از ترک به وجود آمده در سطح حلقه‌های بتنی را نشان می‌دهد که مربوط به نمونه حاوی الیاف پلی پروپیلن و نمونه فاقد الیاف است.

جدول ۵- نتایج متوسط سن ترک خوردگی و عرض ترک مخلوط‌های بتنی

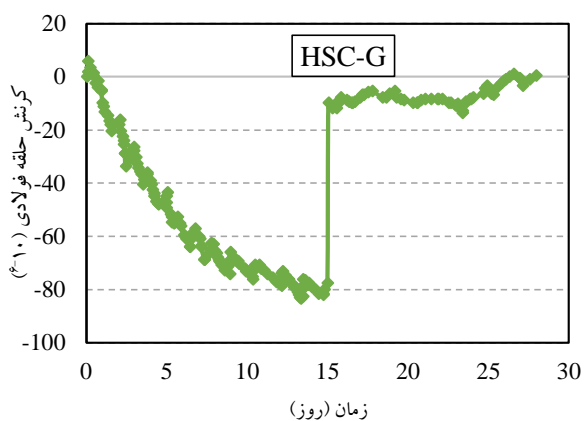
کد طرح	ضخامت ترک (میلی متر)	متوسط سن ترک خوردگی (روز)	ترک خوردگی تمام عمق	انحراف از معیار
HSC0	0.41	13	بلی	0
HSC-P	0.065	21	خیر	0
HSC-S	0.2	11	بلی	4.31
HSC-G	0.45	15	بلی	8.7
HSC-B	0.45	14	بلی	4.17
HSC-N	0.4	20	بلی	0.35



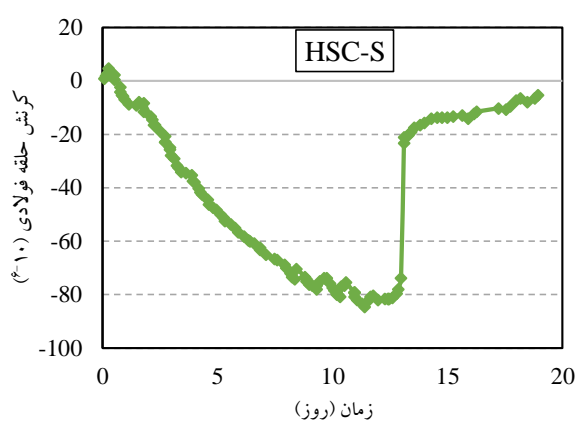
ب) بتن حاوی الیاف پلی پروپیلن



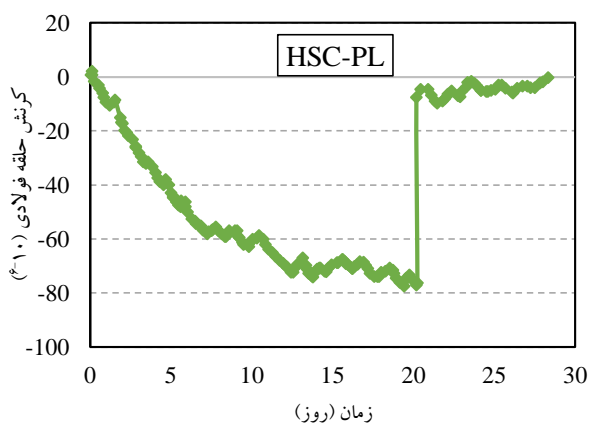
الف) بتن شاهد



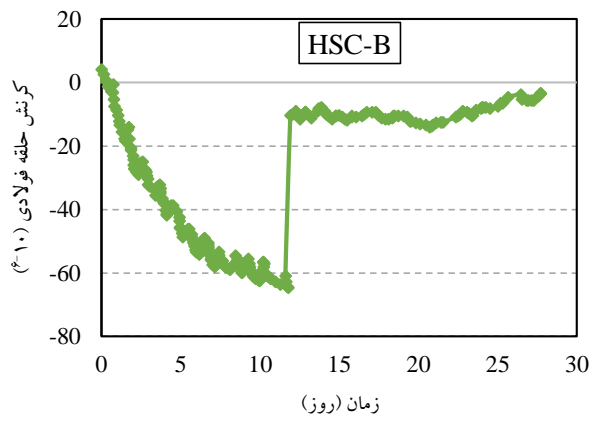
ت) بتن حاوی الیاف شیشه



پ) بتن حاوی الیاف فولادی



ج) بتن حاوی الیاف پلیمری

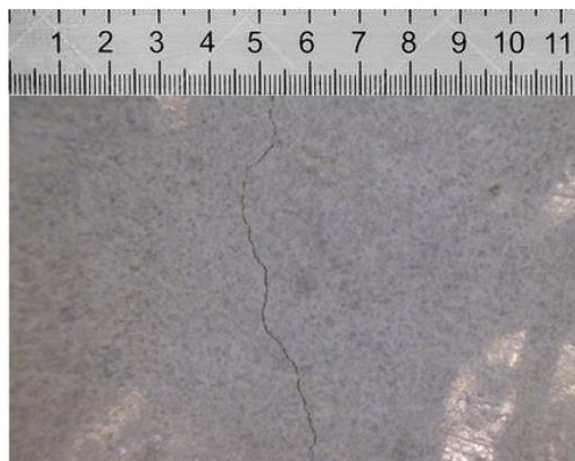


ث) بتن حاوی الیاف بازالت

شکل ۱۲: نمودار کرنش - زمان مخلوط های بتنی



ب: نمونه فاقد الیاف (شاهد)



الف: نمونه حاوی الیاف پلی پروپیلن

شکل ۱۳: عرض ترک انقباضی حلقه بتنی

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش اثر الیاف های پلی پروپیلن، فولادی، شیشه، بازالت و پلیمری بر مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و انقباض (سن اولیه) بتن پر مقاومت بررسی شد که نتایج زیر قابل استخراج است:

۱- حضور الیاف در بتن تازه به هنگام اختلاط موجب تویی شدن و در بتن سخت شده موجب افت نسبی در دراز مدت مقاومت شد. افزودن الیاف موجب افزایش مقاومت فشاری در سن ۳، ۷ و ۲۸ روز به ترتیب تا ۱۶٪، ۲۰٪ و ۳٪ شد.

۲- در بین مخلوط بتنی تنها نمونه حاوی الیاف فولادی تحت خمش، رفتار پسا ترک از خود نشان داد. به طوری که شاخص های چقرمگی آن I5 و I10 مطابق استاندارد ASTM C 1080 به ترتیب ۴/۱ و ۷/۷ بود و نیز میزان تنش پسماند آن ۰/۷۵ مگاپاسکال بود.

۳- افزودن الیاف به مخلوط بتنی موجب افزایش سن ترک خوردگی و کاهش عرض ترک شد. مقایسه بین نتایج انقباض نشان داد که الیاف دارای سختی بالا (مقاومت خمشی بالا) نظیر الیاف فولادی یا شیشه عملکرد خوبی در تامین مقاومت خمشی دارند اما در کاهش سرعت و زمان ترک خوردگی انقباضی مهار شده، نسبتاً ضعیف عمل می کنند. بنا بر این الیاف های نظیر فولادی، شیشه و بازالت برای مهار کردن ترک خوردگی سنین اولیه توصیه نمی شوند به طوری که موجب افزایش عرض ترک و کاهش سن ترک خوردگی می شوند. الیاف های پلیمری و پلی پروپیلن می توانند در مهار انقباض سنین اولیه عملکرد خوبی را از خود نشان دهند.

۴- دونوع ترک در حلقه های بتنی مشاهده شد: (۱) ترک های عمقی (full depth crack)، (۲) ترک های سطحی (Superficial crack) (در طول مدت ۲۸ روز، ترک های ایجاد شده در سطح حلقه های بتنی به ترک عمقی توسعه پیدا کرد اما، در مخلوط حاوی الیاف پلی پروپیلن نشانه ای از ایجاد ترک های عمقی مشاهده نشد. مخلوط های حاوی الیاف پلی پروپیلن کمترین مقدار عرض ترک را داشت به طوری که تا ۸۴٪ موجب کاهش آن شد و نیز سن ترک خوردگی را تا ۶۲٪ افزایش داد.

#### تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از سرکار خانم مهندس حاج جعفری کارشناس آزمایشگاه بتن و مصالح ساختمانی دانشگاه گیلان که ما را در انجام این تحقیق یاری نمودند، صمیمانه تشکر و قدردانی می نمایند.

#### مراجع

[1] Aggarwal, Y. and Siddique, R., (2014). Microstructure and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand as partial replacement of fine aggregates. *Construction and Building Materials*, 54, pp.210-223.

- [2] Wille, K., Naaman, A.E. and Parra-Montesinos, G.J., (2011). Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way. *ACI Materials Journal*, 108(1).
- [3] Johari, M.M., Brooks, J.J., Kabir, S. and Rivard, P., (2011). Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 25(5), pp.2639-2648.
- [4] Neville, A.M., (2011). *Properties of Concrete*, 4th Edition. London: Pitman Publishing, 687, pp 10-20.
- [5] Khalaj, M.J., Khoshakhlagh, A., Bahri, S., Khoeini, M. and Nazerfakhari, M., (2015). Split tensile strength of slag-based geopolymer composites reinforced with steel fibers: Application of Taguchi method in evaluating the effect of production parameters and their optimum condition. *Ceramics International*, 41(9), pp.10697-10701.
- [6] Iqbal, S., Ali, A., Holschemacher, K. and Bier, T.A., (2015). Mechanical properties of steel fiber reinforced high strength lightweight self-compacting concrete (SHLSCC). *Construction and Building Materials*, 98, pp.325-333.
- [7] Hannawi, K., Bian, H., Prince-Agbodjan, W. and Raghavan, B., (2016). Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behavior of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes. *Composites Part B: Engineering*, 86, pp.214-220.
- [8] Zhang, P. and Li, Q.F., (2013). Effect of polypropylene fiber on durability of concrete composite containing fly ash and silica fume. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), pp.1587-1594.
- [9] Santarelli, M.L., Sbardella, F., Zuena, M., Tirillò, J. and Sarasini, F., (2014). Basalt fiber reinforced natural hydraulic lime mortars: A potential bio-based material for restoration. *Materials & Design*, 63, pp.398-406.
- [10] Husem, M., (2006). The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete. *Fire Safety Journal*, 41(2), pp.155-163.
- [11] Kodur, V.K.R., Cheng, F.P., Wang, T.C. and Sultan, M.A., (2003). Effect of strength and fiber reinforcement on fire resistance of high-strength concrete columns. *Journal of Structural Engineering*, 129(2), pp.253-259.
- [12] Bayasi, Z. and Zeng, J., (1993). Properties of polypropylene fiber reinforced concrete. *Materials Journal*, 90(6), pp.605-610.
- [13] Martinelli, E., Caggiano, A. and Xargay, H., (2015). An experimental study on the post-cracking behaviour of Hybrid Industrial/Recycled Steel Fibre-Reinforced Concrete. *Construction and Building Materials*, 94, pp.290-298.
- [14] Güneysi, E., Gesoğlu, M., Karaoğlu, S. and Mermerdaş, K., (2012). Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes. *Construction and Building Materials*, 34, pp.120-130.
- [15] Gesoğlu, M., Özturan, T. and Güneysi, E., (2006). Effects of cold-bonded fly ash aggregate properties on the shrinkage cracking of lightweight concretes. *Cement and Concrete Composites*, 28(7), pp.598-605.
- [16] Darwish, F. A., Oliveira, T. M., Coura, C. G., Kitamura, S., Barbosa, M. T. G., Santos, W., (2008). "Influence of Fiber Ratio in the Size Effect", Proceedings, *Int'l Conference Concrete: Construction's sustainable option*, Dundee, UK, pp 123-130.
- [17] Vandewalle, L., (2006). *Hybrid fiber reinforced concrete*. Measuring, monitoring and modeling concrete properties, pp.77-82.
- [18] Beglarigale, A. and Yazıcı, H., (2015). Pull-out behavior of steel fiber embedded in flowable RPC and ordinary mortar. *Construction and Building Materials*, 75, pp.255-265.
- [19] Mostofinejad, d. And Hatem, n. (2004). The effect of polypropylene fibers on cracking caused plastic shrinkage and concrete performance, *Journal of Civil Engineering*, 14 (1), pp73-86. (In presian)
- [20] Tassew, S. T., & Lubell, A. S. (2014). Mechanical properties of glass fiber reinforced ceramic concrete. *Construction and Building Materials*, 51, 215-224.
- [21] Saghi, H. and Delbari, H. (2015). The effect of the polymer fibers and concrete strength on plastic shrinkage cracking in concrete slabs. *Journal of Concrete Research*, 8(2), pp35-46. (In presian)
- [22] Lee, M.S. and Seo, T.S., (2014). Prediction method of drying shrinkage crack in reinforced concrete walls. *International Journal of Civil Engineering*, 12(1 A), pp.73-81.