

# تأثیر طول و ترکیب الیاف در مقاومت‌های فشاری و خمشی بتن

علی همتی\* (استادیار)

داود نظری (دانشجوی کارشناسی ارشد)

علیرضا مؤمن آبادی (دانشجوی کارشناسی ارشد)  
گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سمنان

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۴۰۳)  
دوری ۳۰، شماره ۱، صص. ۳۳-۴۱، (نژدهشی)

استفاده از الیاف اغلب با هدف افزایش شکل پذیری و ظرفیت باربری بتن مورد نظر است. در این مقاله ۱۵ طرح اختلاط بتن برای انجام آزمایش مقاومت فشاری و خمشی ساخته شد. ۳ طرح اختلاط به عنوان مرجع با ۳ نسبت آب به سیمان (۰/۲۹، ۰/۳۰، ۰/۳۴) بدون الیاف و با الیاف با ۳ طول مختلف الیاف پلی پروپیلن میلی متر ساخته شد. یک طرح با الیاف فلزی و طرح دیگری با ترکیب الیاف فلزی و پلی پروپیلن مورد بررسی قرار گرفتند. بالاترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه های دارای الیاف ترکیبی بود که ۹/۱۲ درصد نسبت به نمونه مرجع افزایش داشت. نمونه دارای الیاف فلزی بالاترین مقاومت خمشی را داشته و نسبت به نمونه بدون الیاف ۶۰ درصد افزایش مقاومت را نشان می دهد. با افزایش طول الیاف پلی-پروپیلن کارایی و مقاومت فشاری بتن کاهش یافت اما شکل پذیری نمونه های بتنی افزایش داشت و مقاومت خمشی و شکل پذیری نمونه ها افزایش یافت.

واژگان کلیدی: الیاف پلی پروپیلن، الیاف فولادی، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی.

ali.hemmati@semnaniau.ac.ir  
davoudnazari7073@gmail.com  
alireza.mo5515@gmail.com

## ۱. مقدمه و تاریخچه ی پژوهش

مکانیکی بتن، آزمایش سه نقطه یی خمش روی تیرهای شیاردار انجام داد و دریافت که اضافه کردن الیاف در انرژی شکست تأثیر قابل توجهی دارد، ولی اثر قابل توجهی در مقاومت فشاری و مدول کشسانی نمونه های بتنی ندارد.<sup>[۱]</sup> فلاح حسینی و حاجی کریمی (۲۰۱۷)، در خصوص درصدهای حجمی (۰/۵، ۱، ۱/۵) طول های (۱۹، ۳۰ و ۵۰ میلی متر) و شکل های هندسی الیاف (ساده و شبکه) پلی اولفین<sup>۱</sup> در بتن پر مقاومت به این نتیجه رسیدند که افزایش طول الیاف، اثر مثبتی در مشخصات مکانیکی و شکست بتن داشته است.<sup>[۲]</sup> آلبرتی<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۷)، مطالعه یی در مورد بتن الیافی خودتراکم با ترکیب الیاف پلی اولفین و فولادی قلاب دار انجام دادند و دریافتند که با ترکیب دو الیاف اخیر، مقاومت خمشی و چقرمگی شکست بتن نسبت به نمونه با الیاف تکی افزایش می یابد.<sup>[۳]</sup> یو<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۷)، مطالعه یی روی مقایسه ی رفتار خمشی بتن توانمند با الیاف فلزی ترکیبی با طول های مختلف (۱۳، ۱۹/۵ و ۳۰ میلی متر) انجام دادند و دریافتند که الیاف با طول های متوسط و بلند، عملکرد خمشی را بهبود می بخشد. همچنین، استفاده از الیاف های ترکیبی کوتاه و بلند، چقرمگی و رفتار ترک خوردگی را بهبود

بتن دارای یک نقطه ضعف مهم در خصوص مقاومت کششی است، که فاقد تحمل کرنش زیاد پس از رسیدن به مقاومت فشاری بیشینه است و بعد از رسیدن به مقاومت فشاری بیشینه، بتن به صورت ترد دچار خرابی می شود.

هدف اصلی استفاده از الیاف در بتن، کنترل گسترش ترک است، به گونه یی که مقطع پس از تشکیل اولین ترک ها، توانایی تحمل تغییر شکل و نیروی بیشتری را داشته باشد. الیاف به صورت تصادفی درون مخلوط بتن توزیع می شود و در عرض ترک ها پل می زند. همچنین، گسترش آنها را کنترل و از به هم پیوستن آنها جلوگیری می کند. در این حالت، الگوی تشکیل و رشد ترک عامل گسیختگی، از یک ترک بزرگ به تعدادی ترک ریز تغییر می کند. پل زدن الیاف روی ریز ترک ها و جلوگیری از تشکیل ترک های بزرگ، باعث افزایش شکل پذیری و توانایی جذب انرژی بتن می شود.<sup>[۱]</sup> ارسالان (۲۰۱۶)، در پژوهشی پیرامون آثار الیاف بازالت و شیشه ی خرد شده با نسبت های ۰/۵، ۱/۲ و ۳ کیلوگرم بر مترمکعب در انرژی شکست و ویژگی های

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۸/۲۸، اصلاحیه ۱۴۰۲/۲/۲۳، پذیرش ۱۴۰۲/۲/۲۵.

استناد به این مقاله:

همتی، علی، نظری، داود، و مؤمن آبادی، علیرضا، ۱۴۰۳. تأثیر طول و ترکیب الیاف در مقاومت های فشاری و خمشی بتن. مهندسی عمران شریف، ۴۰(۱)، صص. ۳۳-۴۱.

DOI:10.24200/J30.2023.61231.3159

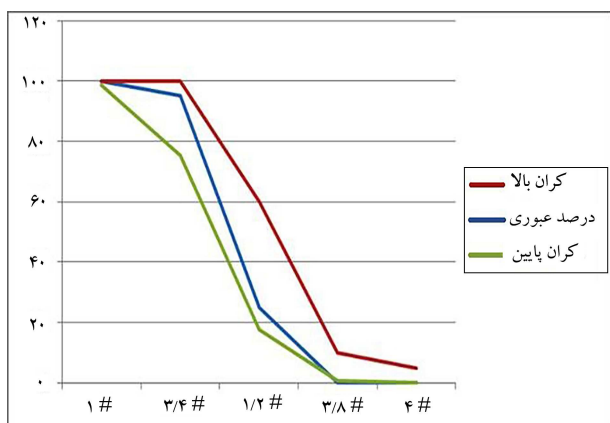
آسان در کشور اجتناب ناپذیر به نظر می‌رسد. به همین منظور الیاف پلی‌پروپیلن به طول‌های ۶، ۱۲ و ۱۸ میلی‌متر و الیاف فولادی به طول ۴۰ میلی‌متر برای انجام پژوهش حاضر انتخاب شده‌اند. در نوشتار حاضر، کاربرد الیاف پلی‌پروپیلن با طول‌های متفاوت با در نظر گرفتن سه نسبت آب به سیمان و نیز در ترکیب با الیاف فولادی جهت بررسی مشخصات فشاری و خمشی بتن بررسی شده است.

## ۲. مواد و روش‌ها

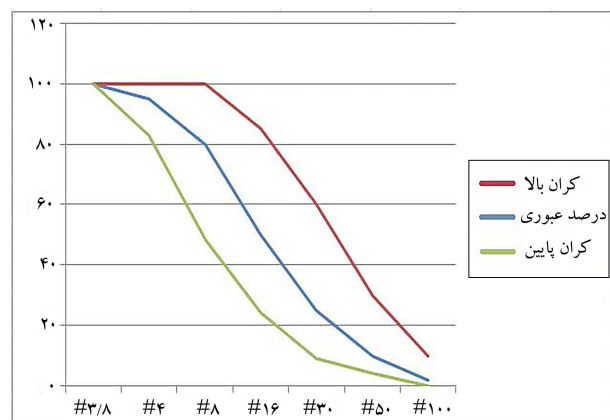
- **مصالح مصرفی:** درشت‌دانه‌ی مصرفی (سنگ‌دانه‌ها) مطابق با دانه‌بندی مجاز استاندارد ASTM\_C۳۳<sup>[۱۹]</sup> تا اندازه‌ی بیشینه‌ی ۲۵ میلی‌متر تهیه شده است، که مدول نرمی آن ۰/۷۴ بوده است (شکل ۱). ریزدانه‌ی مصرفی نیز مطابق دانه‌بندی مجاز استاندارد ASTM\_C۳۳<sup>[۱۹]</sup> تهیه شده است، که مدول نرمی آن طبق استاندارد اخیر، ۴/۳ تعیین شده است (شکل ۲).

سیمان پرتلند تیپ II مطابق با استاندارد ASTM\_C۱۵۰<sup>[۲۰]</sup> استفاده شده است، که ویژگی‌های آن در جدول ۱ ارائه شده است.

- **ژل میکروسیلیس (SF-MIX):** یکی از مناسب‌ترین افزودنی‌های بتن در مناطق همجوار با آب دریا و یا در معرض هجوم یون‌های خوردنده‌ی کلر و سولفات است، که به دلیل داشتن ترکیب پوزولانی، علاوه بر افزایش روانی و مقاومت‌های مکانیکی بتن، سبب نفوذناپذیری در برابر آب و املاح خوردنده و در نهایت افزایش



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی شن.



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی ماسه.

می‌بخشند.<sup>[۵]</sup> پاکروان و همکاران (۲۰۱۷)، با بررسی ترکیب الیاف‌های فولادی، پلیمری و طبیعی کوتاه در بتن گزارش کردند که ترکیب آنها، افزایش چقرمگی و جذب انرژی بتن را به همراه دارد.<sup>[۶]</sup> کومار<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۳)، تأثیر افزودن الیاف پلی‌پروپیلن در روسازی‌های بتنی را مطالعه کردند و گزارش دادند که الیاف پلی‌پروپیلن تأثیر زیادی در افزایش مقاومت سایشی و کاهش ترک‌خوردگی بتن روسازی دارد.<sup>[۷]</sup> بنتگری<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، با مطالعه‌ی بتن‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن نشان دادند که کاربرد الیاف پلی‌پروپیلن، اثر مثبتی در ارتقاء مشخصات مکانیکی بتن، مقاومت آن در برابر جمع‌شدگی و آتش‌سوزی دارد. اما در خصوص مقاومت فشاری، نتایج گوناگون و گاهی مغایر با یکدیگر گزارش شده است.<sup>[۸]</sup> چن<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، با بررسی کاربرد الیاف فولادی موجود در لاستیک دریافتند که شکل الیاف فولادی و نسبت ابعادی آنها، تأثیر زیادی در کارایی و کیفیت بتن دارد. با افزایش مقدار الیاف فولادی به میزان ۰/۷۵٪ حجم بتن، مقاومت‌های فشاری استاتیکی و دینامیکی به‌طور قابل‌توجهی بهبود یافته و به مقدار بیشینه رسیده است.<sup>[۹]</sup> لیانگ<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۲۲)، با بررسی روسازی‌های بتن غلتکی مسلح به الیاف پلی‌پروپیلن دریافتند که افزودن آن، اثر قابل توجهی در مقاومت‌های فشاری و کششی بتن غلتکی داشته است. الیاف با طول کوتاه در افزایش مقاومت سنن اولیه و الیاف بلند در مسلح‌سازی بتن پس از آن مؤثرتر بوده‌اند.<sup>[۱۰]</sup> ایشان همچنین در مطالعه‌ی دیگری در همان سال، با بررسی رفتار بتن مسلح به الیاف پلی‌پروپیلن به طول‌های ۱۹ و ۵۰ میلی‌متر در برابر حمله‌ی سولفاتی دریافتند که وجود الیاف کوتاه سبب افزایش بیشتر دوام بتن مسلح شده است.<sup>[۱۱]</sup> کومار و همکاران (۲۰۲۱)، نیز در مطالعه‌ی دیگری بر روی رفتار برشی تیرهای بتن الیافی نشان دادند که ترکیب الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن باعث افزایش سختی اولیه‌ی تیرهای مذکور، افزایش شکل‌پذیری و مقاومت برشی آنها شده است.<sup>[۱۲]</sup> بهمنی و مستوفی‌نژاد (۲۰۱۸)، بررسی خواص مکانیکی بتن با عملکرد بسیار بالای مسلح شده به الیاف پلی‌پروپیلن و الیاف ماکروی مصنوعی در بتن را در دستور کار قرار دادند. میزان کلی الیاف در همه‌ی نمونه‌ها معادل ۱/۵٪ حجم بتن در نظر گرفته شد. نتایج بیانگر آن بود که تمامی نمونه‌های مسلح شده به انواع الیاف به مقاومت خمشی بیش از ۸ مگاپاسکال رسیده‌اند.<sup>[۱۳]</sup> قاسمی و همکاران (۱۳۹۸)، در بررسی اثر ترکیب الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن به همراه سنگ‌دانه‌های بازبافتی در مقاومت بتن، شاهد افزایش طاقتم نمونه‌ها بودند.<sup>[۱۴]</sup> دنگ<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۲۳)، اثر مشخصات الیاف در مقاومت سایشی بتن بازبافتی را مطالعه کردند و دریافتند که با افزایش طول الیاف پلی‌پروپیلن، مقاومت سایش بتن‌های بازبافتی نیز افزایش یافته است.<sup>[۱۵]</sup> علی و همکاران (۲۰۲۲) نیز نشان دادند که افزایش طول الیاف سبب افزایش انرژی شکست نمونه‌های بتن الیافی می‌شود.<sup>[۱۶]</sup> دینگ<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، با مطالعه بر روی الیاف پلی‌وینیل الکل در بتن‌های توانمند به این نتیجه رسیدند که طول ۹ تا ۱۰ میلی‌متر، طول بهینه‌ی الیاف مذکور برای بتن‌های توانمند است.<sup>[۱۷]</sup> پهلوانلی و اوزون<sup>۱۰</sup> (۲۰۲۲)، با مطالعه‌ی اثر طول الیاف پلی‌پروپیلن شامل الیاف به طول‌های ۳، ۶ و ۱۲ میلی‌متر در مشخصات بتن سبک‌گازی دریافتند که مقاومت‌های فشاری و خمشی بتن با افزایش طول الیاف پلی‌پروپیلن زیاد می‌شوند.<sup>[۱۸]</sup>

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مطالعات متعددی بر روی مشخصات الیاف و نیز ترکیب آنها با یکدیگر و اثر آنها در ویژگی‌های بتن انجام شده است. اما بیشترشان بر روی بتن‌های توانمند و خاص با الیاف فولادی، بازبافتی، یا پلیمری متمرکز بوده‌اند. در حالی که معمولاً مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به بتن معمولی افزایش چندانی ندارد، اما ضرورت استفاده از آن به جهت قیمت مناسب و دسترسی

جدول ۱. ویژگی های سیمان.

ویژگی های فیزیکی سیمان پرتلند نوع II		
ISIRI ۳۸۹ & ASTM C ۱۵۰	ویژگی	
حداقل ۲۸۰° حداکثر ۰/۸	سطح مخصوص - بلین (سانتی متر بر گرم) انبساط اتوکلاو (درصد)	
حداقل ۴۵ حداکثر ۶	اولیه (دقیقه) ثانویه (ساعت)	زمان گیرش
حداقل ۱۰۰ حداقل ۱۷۵ حداقل ۳۱۵	۳ روزه ۷ روزه ۲۸ روزه	مقاومت فشاری (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)
ویژگی های شیمیایی سیمان پرتلند نوع II		
ISIRI ۳۸۹ & ASTM C ۱۵۰	کارخانه	ویژگی
حداقل ۲۰ حداکثر ۶ حداکثر ۶ حداکثر ۵ - حداکثر ۰/۷۵ حداکثر ۳ حداکثر ۳ حداکثر ۸	۲۱/۱۱ ۴/۴۸ ۳/۹۱ ۱/۳۷ ۶۳/۳۶ - - ۲/۵ ۵/۱	اکسید سیلیسیم اکسید آلومینیوم اکسید آهن اکسید منیزیم اکسید کلسیم باقیمانده نامحلول کسر وزن در اثر سرخ شدن تری اکسید گوگرد سه کلسیم آلومینات

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و شیمیایی ژل میکروسیلیس.

ژل میکروسیلیس SF - MIX	نوع ژل میکروسیلیس	
ژله ای	حالت فیزیکی	
خاکستری	رنگ	
$1/3 \pm 0/05 (gr/cm^3)$	وزن مخصوص	
ندارد	یون کلر	
۱۰ تا ۹	PH	
ASTM C ۴۹۴ & C ۱۲۰۲	استاندارد	
۵ الی ۱۰ درصد وزن سیمان	میزان مصرف	
تا یک سال در انبار مناسب دور از یخ زدگی و تابش مستقیم آفتاب	زمان و شرایط نگهداری	

جدول ۳. مشخصات فیزیکی و شیمیایی فوق روان کننده.

PX - MIX	نوع فوق روان کننده
مابع	حالت فیزیکی
زرد روشن	رنگ
$1/03 \pm 0/01 (gr/cm^3)$	وزن مخصوص
۵ الی ۶	PH
ISIRI ۲۹۳۰ - ۲ & ASTM C ۴۹۴ TYPE F	استاندارد

دوام بتن خواهد شد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی ژل میکروسیلیس در جدول ۲ ارائه شده است.

- فوق روان کننده (PX-MIX): محصولی پلیمری با ترکیب های خاص بر پایه ی پلی کربوکسیلات اتر است، که نقش عمده یی در بهبود خواص رئولوژی بتن، از جمله: روانی، مقاومت فشاری و دوام به عنوان یک افزودنی سودمند دارد و به طور چشم گیری کارایی ملات و بتن را با ثابت نگه داشتن نسبت آب به سیمان افزایش می دهد. محصول اخیر، فاقد یون کلر است و هیچ گونه تأثیر نامناسبی در بتن و آرماتورها ندارد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی فوق روان کننده در جدول ۳ ارائه شده است.

الیاف استفاده شده در نوشتار حاضر، الیاف پلی پروپیلن و فولادی قلابی موج دار است. الیاف پلی پروپیلن در طول های ۶، ۱۲ و ۱۸ میلی متر استفاده شده است، که در شکل های ۳ الی ۵ مشاهده می شود. همچنین مشخصات آن نیز در جدول ۴ ارائه شده و برای هر سه طول ذکر شده ی الیاف پلی پروپیلن یکسان بوده است.

در نوشتار حاضر، از الیاف فولادی قلاب دار با طول ۴۰ میلی متر استفاده (شکل ۶) و مشخصات آنها در جدول ۵ ارائه شده است. آب استفاده شده در نوشتار حاضر، از آب شرب شهر سمنان تهیه شده است، که از نظر کیفیت مورد قبول بوده است.

جدول ۴. مشخصات الیاف پلی پروپیلن.

رنگ ظاهری	سفید	درصد ازدیاد طول	۸°
وزن مخصوص	$0.91 \text{ (gr/cm}^3\text{)}$	غوطه وری در آب	۳ الی ۵ ثانیه
قطر	۲۳ میکرون	محدوده ذوب	۱۶۵ درجه سانتی گراد
مقاومت کششی	$40 \text{ Mpa}$	-	-

جدول ۵. مشخصات الیاف فولادی قلاب دار.

نوع جنس	فولاد کم کربن و نورد سرد
رنگ	خاکستری و مسی
وزن مخصوص	$7.8 \pm 0.1 \text{ (gr/cm}^3\text{)}$
طول	۳۵ - ۵۰ (mm)
قطر	$0.8 - 1.2 \text{ (mm)}$
مقاومت کششی	$700 - 1200 \text{ (Mpa)}$
مقاومت خمشی	$180 - 210 \text{ (Mpa)}$

### ۲.۳. آزمایش مقاومت خمشی

آزمایش مقاومت خمشی براساس استاندارد ASTM C ۲۹۳<sup>[۲۲]</sup>، به وسیله‌ی دستگاه خمش جک یونیورسال SANTAM و به صورت خمش سه نقطه‌یی انجام شده است.

### ۳.۳. آزمایش اسلامپ

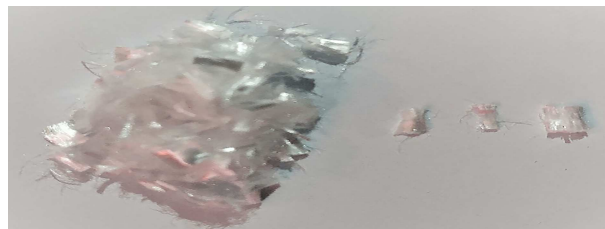
آزمایش اسلامپ براساس استاندارد ASTM - C ۱۴۳<sup>[۲۳]</sup>، انجام شده است. نتایج به دست آمده از آزمایش اسلامپ در نوشتار حاضر قبل از اضافه کردن فوق روان‌کننده، ژل میکروسیلیس و الیاف، در نسبت آب به سیمان ۰/۲۴ در طرح‌های مختلف طرح اختلاط در محدوده‌ی ۱۰ الی ۲۰ میلی‌متر و در نسبت آب به سیمان ۰/۲۹ در طرح‌های مختلف طرح اختلاط در محدوده‌ی ۲۰ الی ۳۵ میلی‌متر و در نسبت آب به سیمان ۰/۳۴ اسلامپ اندازه‌گیری شده در طرح‌های مختلف طرح اختلاط در محدوده‌ی ۳۵ الی ۵۰ میلی‌متر بوده است.

### ۴.۳. عمل‌آوری

بعد از خارج کردن نمونه‌ها از قالب، با رعایت الزام‌های میحث نهم مقررات ملی ساختمان، نمونه‌ها به حوضچه‌ی آب انتقال داده شدند. سپس نمونه‌ها بعد از گذشت ۷ و ۲۸ روز از حوضچه‌ی آب خارج و آزمایش شدند.

### ۵.۳. طرح اختلاط

در ابتدا برای رسیدن به یک طرح اختلاط هدف، چند طرح اختلاط بتن بررسی و برای هر طرح، ۳ نمونه‌ی بتن مکعبی به ابعاد (۱۵ × ۱۵ × ۱۵) سانتی‌متر ساخته شد. پس از عمل‌آوری و انجام آزمایش مقاومت فشاری براساس استاندارد ISIRI ۶۰۴۸<sup>[۲۱]</sup> با استفاده از جک بتن‌شکن، مقاومت ۷ روزه‌ی تمامی طرح‌ها بررسی شده است. نسبت‌های آب به سیمان مختلف (۰/۲۳، ۰/۲۶، ۰/۲۹، ۰/۳۲، ۰/۳۵ و ۰/۳۸) انتخاب و نمونه‌های بتنی ساخته شدند. رسیدن به مقاومت فشاری حدود ۵۰ مگاپاسکال به عنوان هدف اولیه‌ی پژوهش حاضر، مورد نظر بود که از میان طرح‌های اختلاط‌هایی که مقایسه شدند، یک طرح به نام طرح (T\_M۲) به عنوان طرح اختلاط مرجع انتخاب شد. مقاومت فشاری میانگین نمونه‌های مکعبی



شکل ۳. الیاف به طول ۶ میلی‌متر.



شکل ۴. الیاف به طول ۱۲ میلی‌متر.



شکل ۵. الیاف به طول ۱۸ میلی‌متر.



شکل ۶. الیاف فلزی فولادی قلاب دار.

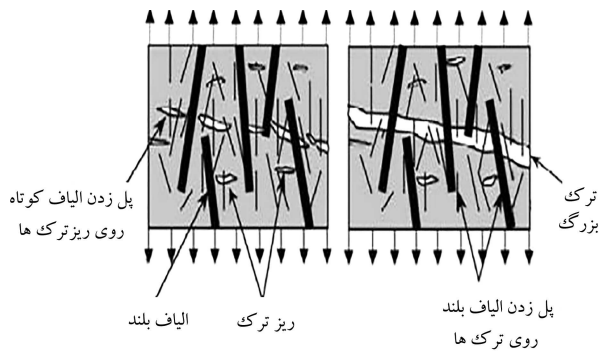
## ۳. شرح آزمایش‌ها

### ۱.۳. آزمایش مقاومت فشاری

در نوشتار حاضر، برای آزمایش مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۵۰ × ۱۵۰ × ۱۵۰ میلی‌متر و همچنین از استاندارد ملی ایران (ISIRI ۶۰۴۸)<sup>[۲۱]</sup> استفاده شده است.

جدول ۶. طرح‌های اختلاط بتن.

نام طرح مصلح و مواد افزودنی	W/C	سیمان ( $kg/m^3$ )	شن ( $kg/m^3$ )		ماسه ( $kg/m^3$ )	آب ( $kg/m^3$ )	زل میکروسیلیس ( $kg/m^3$ )	فوق روان کننده ( $kg/m^3$ )	الیاف پلی پروپیلن ( $kg/m^3$ )	الیاف فلزی ( $kg/m^3$ )
			حداکثر اندازه 25mm	حداکثر اندازه 12/5mm						
T-M2	۳۳%	۶۵۰	۴۳۱/۸۸	۳۵۹/۹	۶۴۷/۸۲	۱۶۱/۲	۴۵/۵	۳/۹	-	-
M0	۲۴%	۶۵۰	۴۳۱/۸۸	۳۵۹/۹	۶۴۷/۸۲	۱۰۷/۹	۴۵/۵	۳/۹	-	-
M1	۲۹%	۶۵۰	۴۳۱/۸۸	۳۵۹/۹	۶۴۷/۸۲	۱۴۰/۴	۴۵/۵	۳/۹	-	-
M2	۳۴%	۶۵۰	۴۳۱/۸۸	۳۵۹/۹	۶۴۷/۸۲	۱۷۲/۹	۴۵/۵	۳/۹	-	-
P0	۲۴%	۶۵۰	۴۳۱/۸۸	۳۵۹/۹	۶۴۷/۸۲	۱۰۷/۹	۴۵/۵	۳/۹	۹/۱	-
P1	۲۹%	۶۵۰	۴۳۱/۸۸	۳۵۹/۹	۶۴۷/۸۲	۱۴۰/۴	۴۵/۵	۳/۹	۹/۱	-
P2	۳۴%	۶۵۰	۴۳۱/۸۸	۳۵۹/۹	۶۴۷/۸۲	۱۷۲/۹	۴۵/۵	۳/۹	۹/۱	-
F1	۲۹%	۶۵۰	۴۳۱/۸۸	۳۵۹/۹	۶۴۷/۸۲	۱۴۰/۴	۴۵/۵	۳/۹	-	۷۸/۵
H1	۲۹%	۶۵۰	۴۳۱/۸۸	۳۵۹/۹	۶۴۷/۸۲	۱۴۰/۴	۴۵/۵	۳/۹	۹/۱	۷۸/۵



شکل ۷. چگونگی عملکرد الیاف با طول‌های متفاوت در بتن. [۶]

ریز بل می‌زنند و از به هم پیوستن آنها و شکل‌گرفتن ترک‌های بزرگ‌تر جلوگیری می‌کنند. این شرایط می‌تواند منجر به افزایش مقاومت و طاقت بتن شود. با افزایش بارگذاری و تشکیل ترک‌های بزرگ‌تر، الیاف با طول بلند وارد عمل می‌شوند و با گسترش آنها مقابله می‌کنند، که می‌تواند منجر به افزایش شکل‌پذیری بتن شود. [۶]

## ۴. نتایج و بحث

### ۴.۱. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

با استفاده از نتایج به دست آمده از دستگاه آزمایش (جک بتن‌شکن) در پژوهش حاضر می‌توان اظهار داشت که طرح اختلاط بتن الیافی با الیاف ترکیبی (H1) با الیاف فلزی قلاب‌دار به طول ۴۰ میلی‌متر و الیاف پلی‌پروپیلن به طول ۱۲ میلی‌متر، بهترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه را در بین تمام طرح‌های اختلاط بتن پژوهش حاضر داشته است.

پس از شکست نمونه‌های مکعبی استاندارد به ابعاد (۱۵ × ۱۵ × ۱۵) سانتی‌متر و آشکار شدن عمق بتن به واسطه‌ی ترک‌های بزرگ‌تر مشاهده شد که الیاف‌های فلزی قلاب‌دار به طول ۴۰ میلی‌متر در داخل بتن بین ترک‌ها پل زده و باعث جلوگیری از

با طرح اختلاط (T-M2) برابر ۵۱/۸۵ مگاپاسکال و نسبت آب به سیمان در طرح اخیر، ۳۴٪ بوده است، که منجر به بالاترین مقاومت فشاری شد. پس از انجام آزمایش‌های مورد نیاز، ۱۴ طرح در پژوهش حاضر انجام شدند، که مشخصات آنها در جدول ۶ ارائه شده است.

در طرح اختلاط (T-M2)، تمامی پارامترها، ثابت در نظر گرفته شده و فقط پارامتر نسبت آب به سیمان، متغیر فرض شده و نمونه‌های مرجع با نسبت آب به سیمان (۲۴٪، ۲۹٪، ۳۴٪) به ترتیب به نام‌های (M0، M1، M2) در ابعاد مکعبی (۱۵ × ۱۵ × ۱۵) سانتی‌متر برای انجام آزمایش مقاومت فشاری به تعداد ۱۸ نمونه و در ابعاد (۱۵ × ۱۵ × ۶۰) سانتی‌متر برای انجام آزمایش مقاومت خمشی به تعداد ۹ نمونه‌ی بتنی ساخته شدند. علت انتخاب این نسبت‌های آب به سیمان، که با گام‌های کاهش ۵٪ از نسبت مرجع، ۳۴٪ در نظر گرفته شده‌اند، بررسی امکان افزایش بیشتر مقاومت‌های فشاری و خمشی بتن با کاهش نسبت آب به سیمان بوده است.

مشخصات سایر طرح‌های اختلاط، شامل: نمونه‌های بتنی حاوی الیاف پلی‌پروپیلن با طول‌های مختلف ۶، ۱۲ و ۱۸ میلی‌متر و نسبت‌های متفاوت آب به سیمان ۲۴٪، ۲۹٪ و ۳۴٪، نمونه‌های بتنی حاوی الیاف فولادی قلاب‌دار به طول ۴۰ میلی‌متر با نسبت آب به سیمان ۲۹٪، که میانگین سه نسبت آب به سیمان اخیر است و نیز ترکیب الیاف فولادی قلاب‌دار ۴۰ میلی‌متری و الیاف پلی‌پروپیلن ۱۲ میلی‌متری با نسبت آب به سیمان ۲۹٪ در جدول ۶ ارائه شده است.

پس از عمل‌آوری تمامی نمونه‌های ذکر شده، آزمایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه طبق استاندارد ASTM - C33 [۱۹] و آزمایش مقاومت خمشی ۲۸ روزه طبق استاندارد ASTM - C293 [۲۱] ضمناً میانگین وزن مخصوص برای: بتن مرجع ۲۲۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب؛ بتن الیافی با الیاف پلی‌پروپیلن ۲۲۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب، بتن با الیاف فولادی ۲۳۵۸ کیلوگرم بر مترمکعب و بتن با الیاف ترکیبی ۲۳۶۷ کیلوگرم بر مترمکعب اندازه‌گیری شده است.

همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، الیاف کوتاه معمولاً بر روی ترک‌های

ریزترک‌ها و ترک‌های بزرگ، عملکرد بهتری به لحاظ پل زدن دارند. هر چند که به علت مقاومت کششی کم الیاف پلی‌پروپیلن، اثر پل زدن در ریزترک‌ها بیشتر به چشم می‌خورد.

در طرح‌های اختلاط بتن مرجع (M)، بهترین مقاومت فشاری ۲۸ روزه مربوط به طرح اختلاط بتن (M<sup>o</sup>) بوده است، که بتن آن، بتن بدون الیاف و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بالای ۷۰ مگاپاسکال را داشته است، که به نظر می‌رسد نسبت آب به سیمان (۰/۲۴) در طرح اختلاط اخیر بتن (M) و به جای آن افزودن فوق روان‌کننده برای افزایش کارایی بتن و همچنین افزودن ژل میکروسیلیس موجب افزایش چشم‌گیر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن در طرح اخیر شده است. استفاده از افزودنی‌های ذکر شده، در ساخت بتن گرچه مقاومت فشاری را افزایش داده است، اما منجر به بهبود رفتار بتن از نظر شکل‌پذیری نشده و شکست نمونه‌های طرح (M) بعد از آزمایش توسط دستگاه آزمایش (جک بتن شکن) به صورت کاملاً ترد به گونه‌یی بوده است که نمونه بعد از شکست کاملاً از هم فرو پاشیده است.

#### میانگین مقاومت فشاری تمام طرح‌های اختلاط بتن

در شکل ۹، نمودار میانگین مقاومت فشاری تمام طرح‌های اختلاط بتن مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، در بین تمام طرح‌های اختلاط بتن مرجع و بتن الیافی با الیاف پلی‌پروپیلن، طرح‌های اختلاط بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۲۴، بیشترین مقاومت فشاری را نسبت به بتن‌های ساخته شده با نسبت آب به سیمان ۰/۲۹ و ۰/۳۴ داشته‌اند. ضمن اینکه مقاومت فشاری بتن‌های الیافی پلی‌پروپیلن نسبت به بتن بدون الیاف با نسبت آب به سیمان یکسان، کاهش مقاومت داشته‌اند. در حالی که در مورد بتن با الیاف فولادی و ترکیبی، افزایش مقاومت مشاهده می‌شود. کاهش مقاومت بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن معمولاً به سبب مقاومت کششی پایین الیاف پلی‌پروپیلن در مقایسه با الیاف فولادی است، که در مراجع متعددی به آن اشاره شده است.<sup>[۶]</sup> اما در بین بتن‌های الیافی با الیاف پلی‌پروپیلن، بالاترین میانگین مقاومت مربوط به طرح اختلاط P - ۰۶ - ۶۳/۹۹ مگاپاسکال بوده است، اما به‌طور کلی مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده در تمام طرح‌های مربوط به پژوهش حاضر در طرح‌های اختلاط (M<sup>o</sup>، F<sub>1</sub>، H<sub>1</sub>) مشاهده شده است، که میانگین مقاومت فشاری ۷۲/۳۶ مگاپاسکال رسیده است. طرح اختلاط F<sub>1</sub> بتن با الیاف فلزی قلاب‌دار به طول ۴۰ میلی‌متر و نسبت آب به سیمان ۰/۲۹ بوده و میانگین مقاومت فشاری آن به ۷۰/۴۲ مگاپاسکال رسیده است. همچنین در طرح اختلاط H<sub>1</sub> بتن با الیاف ترکیبی، که در ساخت آن از الیاف فلزی قلاب‌دار به طول ۴۰ میلی‌متر و الیاف پلی‌پروپیلن به طول ۱۲ میلی‌متر استفاده شده و نسبت آب به سیمان آن، ۰/۲۹ بوده است؛ به میانگین مقاومت فشاری ۷۲/۵۳ مگاپاسکال، که بالاترین میانگین مقاومت فشاری در پژوهش حاضر بوده است، رسیده است. ضمن اینکه مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح H<sub>1</sub> به ۷۶/۱۶ مگاپاسکال رسیده و بالاترین مقاومت فشاری در پژوهش حاضر را از آن خود کرده است. همچنین بالاترین مقاومت فشاری طرح H<sub>1</sub> نسبت به طرح مرجع M<sub>1</sub>، ۱۶/۴٪ رشد داشته است.

#### ۲.۴. نتایج آزمایش مقاومت خمشی

با استفاده از نتایج به‌دست آمده از دستگاه آزمایش (جک یونیورسال)، و بررسی نمودارهای استخراج شده (شکل ۱۰) و مقایسه‌ی انهدام نمونه‌ها (شکل‌های ۱۱

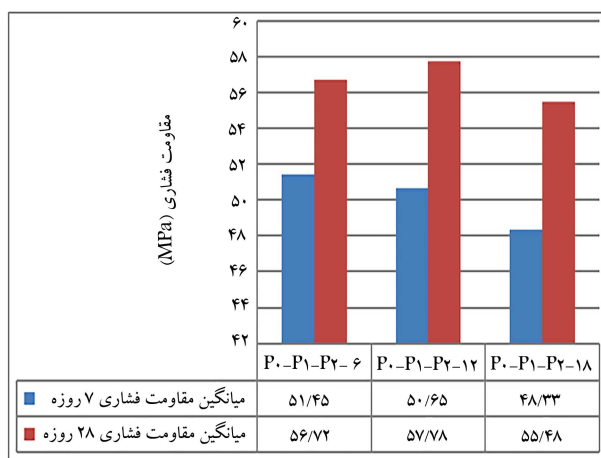
گسترش ریزترک‌ها به ترک‌های بزرگ‌تر شده‌اند. الیاف پلی‌پروپیلن نیز نقش جلوگیری از به‌وجود آمدن و گسترش ریزترک‌ها را داشته و الیاف‌ها در بین ترک‌های ریز بتن پل زده‌اند. وجود دو الیاف اخیر در کنار هم بهترین نقش را ایفا کرده و موجب افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت باربری در بتن شده است.

در بین طرح‌های اختلاط (P) با طول‌های مختلف الیاف پلی‌پروپیلن (۱۲، ۱۸ و ۱۸ میلی‌متر) و نسبت‌های مختلف آب به سیمان (۰/۲۴، ۰/۲۹ و ۰/۳۴) میانگین مقاومت فشاری در مورد نمونه‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۲۴، مربوط به نمونه‌ی P - ۰۶ - ۶۳/۹۹ به میزان ۶۳/۹۹ مگاپاسکال بوده است. در نسبت آب به سیمان ۰/۲۹، بالاترین میانگین مقاومت فشاری مربوط به طرح اختلاط P<sub>1</sub> - ۱۲ - ۶۰/۲۴ به میزان ۶۰/۲۴ مگاپاسکال و در نسبت آب به سیمان ۰/۳۴، بیشینه‌ی میانگین مقاومت فشاری مربوط به طرح اختلاط P<sub>2</sub> - ۱۲ - ۵۱/۲۷ مگاپاسکال بوده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت آب به سیمان، مقاومت فشاری نمونه‌های دارای الیاف پلی‌پروپیلن کاهش یافته است، اما طول الیافی که منجر به این مقدار بیشینه شده است، افزایش یافته است. یعنی در نسبت آب به سیمان کمتر، الیاف با طول کمتر و در نسبت آب به سیمان بیشتر، طول الیاف بزرگ‌تر منجر به بیشترین مقاومت فشاری برای بتن می‌شود.

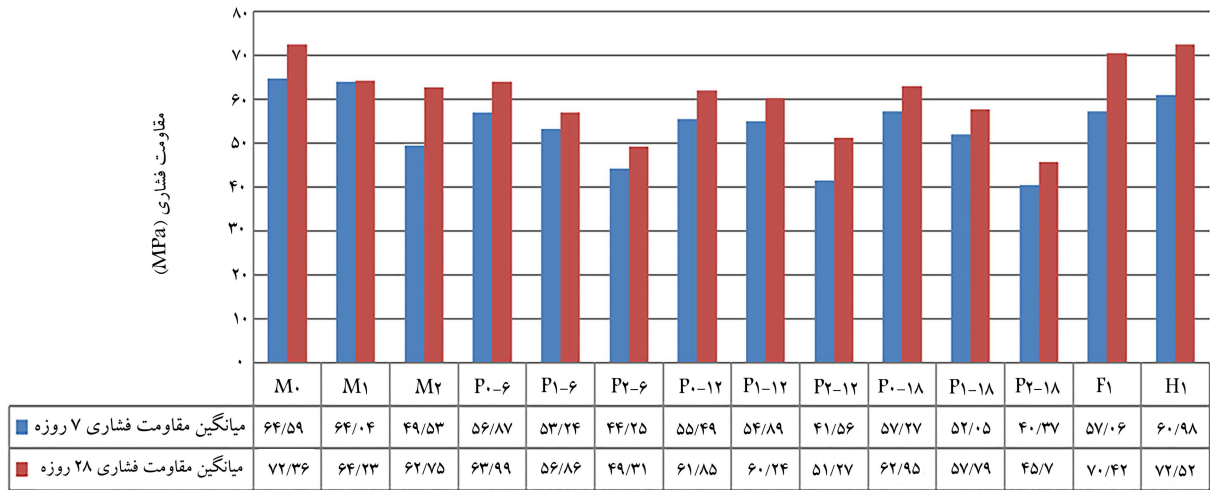
پس از شکست نمونه‌ها برای آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه و مشاهده‌ی عمق ترک‌ها در بتن می‌توان اظهار داشت که الیاف پلی‌پروپیلن با طول ۱۸ میلی‌متر، پل زدن بهتری را نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن با طول‌های ۶ و ۱۲ میلی‌متر در بین ریزترک‌ها داشته و شکست نمونه‌ها هم نرم‌تر بوده است؛ اما به واسطه‌ی مقاومت پایین الیاف پلی‌پروپیلن (به لحاظ جنس و مشخصات هندسی و مکانیکی)، پس از گسترش ریزترک‌ها به ترک‌های بزرگ‌تر، پل زدن الیاف پلی‌پروپیلن بلند کامل نشده منجر به پاره شدن الیاف‌ها شده است.

در طرح‌های اختلاط با الیاف پلی‌پروپیلن، الیاف با طول ۱۲ میلی‌متر بالاترین میانگین مقاومت فشاری را نسبت به سایر طول‌های الیاف طرح‌های اختلاط (P) از خود نشان داده است (شکل ۸).

میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با الیاف پلی‌پروپیلن با طول‌های مختلف در شکل ۸ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، الیاف به طول ۱۲ میلی‌متر در تمام نسبت‌های آب به سیمان به‌طور میانگین بیشترین مقاومت فشاری را برای بتن در پی داشته‌اند. لذا چنین به نظر می‌رسد که الیاف ۱۲ میلی‌متری در هر دو مورد



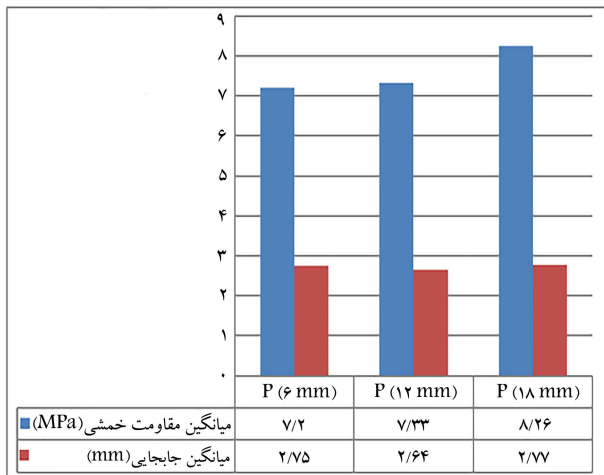
شکل ۸. میانگین مقاومت فشاری طرح‌های P به تفکیک طول الیاف.



شکل ۹. نمودار میانگین مقاومت فشاری تمام طرح‌ها.

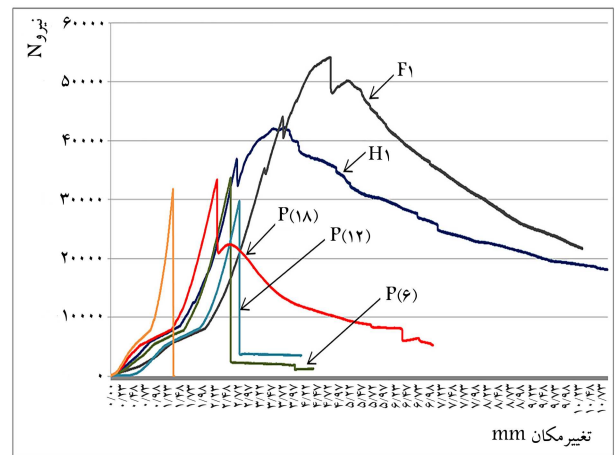


شکل ۱۳. مقایسه‌ی انهدام نمونه‌های با نسبت آب به سیمان  $W/c = 0/34$ .

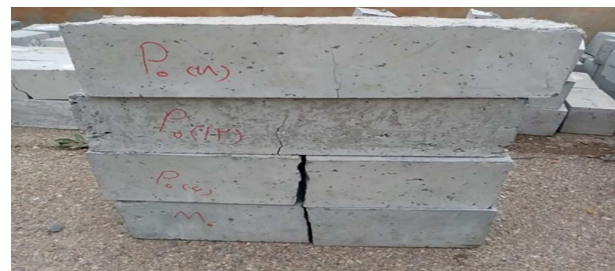


شکل ۱۴. مقایسه‌ی میانگین مقاومت خمشی و میانگین جابجایی به تفکیک طول الیاف.

الی (۱۳) در پژوهش حاضر می‌توان اظهار داشت که بتن الیافی (F1) با الیاف فلزی قلاب‌دار به طول ۴۰ میلی‌متر با میانگین مقاومت خمشی ۱۲/۸۵ مگاپاسکال بیشترین مقاومت خمشی ۲۸ روزه را در بین تمام طرح‌ها داشته است، که به نظر می‌رسد مقاومت کششی بالاتر الیاف فلزی نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن و طول بلندتر آنها سبب شده است که الیاف فلزی، عملکرد پل‌زدن بهتری بر روی ترک‌های بزرگ داشته باشند، که افزایش مقاومت خمشی را نیز به دنبال داشته است. پس



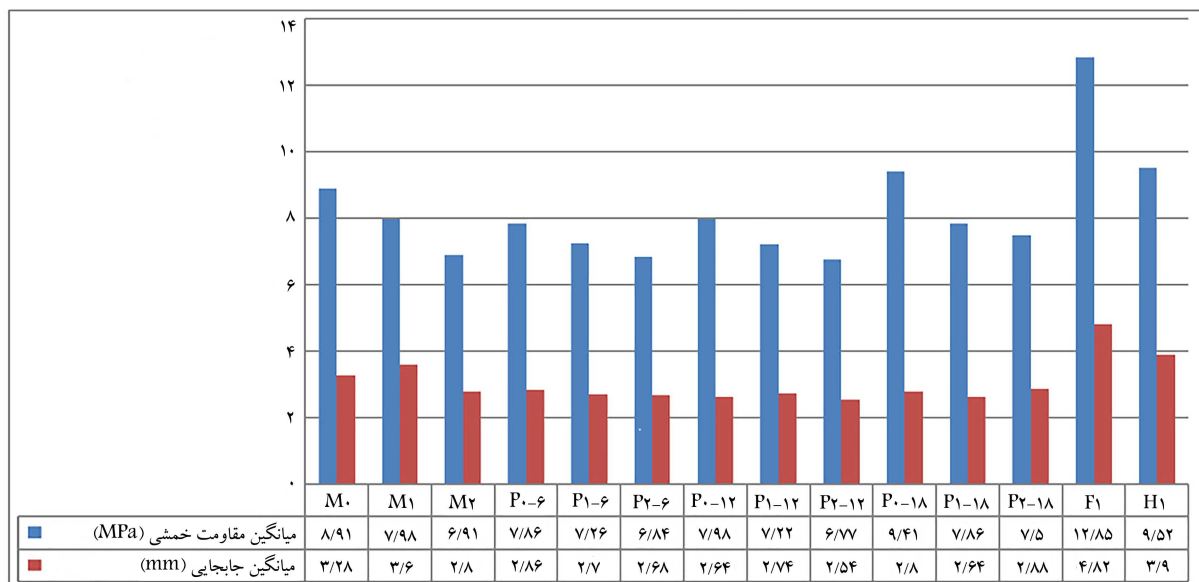
شکل ۱۵. نمودار نیرو - تغییر مکان مقایسه‌ی طرح‌های (۶ - ۱۲ - ۱۸) P، H1 و F1 نمونه‌ی بدون الیاف.



شکل ۱۱. مقایسه‌ی انهدام نمونه‌های با نسبت آب به سیمان  $W/c = 0/24$ .



شکل ۱۲. مقایسه‌ی انهدام نمونه‌های با نسبت آب به سیمان  $W/c = 0/29$ .



شکل ۱۵. نمودار میانگین مقاومت خمشی و میانگین جابجایی تمامی طرح‌ها.

از افزودنی‌های اخیر در ساخت بتن، گرچه مقاومت خمشی را افزایش داده، اما منجر به بهبود رفتار بتن از نظر شکل‌پذیری نشده و شکست نمونه‌های طرح‌های مرجع بعد از آزمایش توسط دستگاه (جک یونیورسال) به صورت کاملاً ترد بوده است، به‌گونه‌ای که نمونه بعد از شکست کاملاً دو نیم شده است.

#### ۳.۴. میانگین مقاومت خمشی تمام طرح‌های اختلاط بتن

در شکل ۱۵، میانگین مقاومت خمشی ۲۸ روزه و میانگین جابجایی تمامی طرح‌های اختلاط بتن در پژوهش حاضر مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، در بین تمامی طرح‌ها، طرح‌های اختلاط با نسبت آب به سیمان ۰/۲۴، بیشترین مقاومت خمشی را نسبت به نمونه‌های بتنی ساخته شده با نسبت آب به سیمان ۰/۲۹ و ۰/۳۴ داشته است.

با توجه به نمودار اخیر، در بین بتن‌های الیافی با الیاف پلی‌پروپیلن، بالاترین میانگین مقاومت خمشی مربوط به طرح ۱۸ - P<sup>0</sup> با میانگین مقاومت خمشی ۹/۴۱ مگاپاسکال بوده است. به‌طورکلی بالاترین نتایج به‌دست آمده مربوط به طرح F<sub>1</sub> با میانگین مقاومت خمشی ۱۲/۸۵ مگاپاسکال بوده است.

#### ۵. نتیجه‌گیری

به‌طورکلی می‌توان بیان کرد که استفاده از الیاف سبب عملکرد بهتر بتن می‌شود. درخصوص الیاف پلی‌پروپیلن با افزایش طول الیاف، کارایی بتن کاهش، اما به جهت کم شدن قابلیت پل‌زدن آنها بر روی ریزترک‌ها، شکل‌پذیری و ظرفیت خمشی بتن افزایش یافته است. در بین تمام طرح‌های اختلاط نوشتار حاضر، نمونه‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۲۴، بالاترین مقاومت‌های فشاری و خمشی را در مقایسه با طرح‌های مشابه از خود نشان داده‌اند. استفاده از ترکیب الیاف فلزی و الیاف پلی‌پروپیلن در بتن به جهت ترکیب قابلیت پل‌زدن بر روی ریزترک‌ها و ترک‌های بزرگ، منجر به افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت خمشی در بتن شده است.

از شکست نمونه تیرهای بتنی با ابعاد (۱۵ × ۱۵ × ۶۰) سانتی‌متر و بررسی نوع ترک‌های ایجاد شده، مشاهده شد که الیاف فلزی فلاپ‌دار به طول ۴۰ میلی‌متر در داخل بتن بین ترک‌ها پل زده و سبب جلوگیری از گسترش ریزترک‌ها و تبدیل به ترک‌های بزرگ‌تر شده است. الیاف پلی‌پروپیلن نیز نقش جلوگیری از به‌وجود آمدن و گسترش ریزترک‌ها را داشته و الیاف‌ها در بین ترک‌های ریز بتن پل زده‌اند.

در طرح H<sub>1</sub>، که بتن الیافی از نوع الیاف ترکیبی بوده است، وجود دو الیافی که به آن اشاره شده است، در کنار هم بهترین نقش را ایفا کرده و موجب افزایش شکل‌پذیری در بتن شده و نمونه‌های بتنی طرح H<sub>1</sub> بعد از نمونه‌های طرح F<sub>1</sub>، بیشترین مقاومت خمشی را در بین تمام طرح‌ها داشته و با توجه به نمودارهای نیرو - تغییرمکان طرح‌های اختلاط، طرح H<sub>1</sub> شکل‌پذیری فوق‌العاده‌تری را نسبت به سایر طرح‌های اختلاط بتن داشته است. در بین طرح‌های اختلاط (P) بتن با الیاف پلی‌پروپیلن، بیشترین مقاومت خمشی را در بین ۹ طرح، طرح اختلاط ۱۸ - P<sup>0</sup> با میانگین مقاومت خمشی ۹/۴۱ مگاپاسکال از خود نشان داده است. پس از شکست نمونه‌ها برای آزمایش مقاومت خمشی ۲۸ روزه توسط دستگاه آزمایش و مشاهده ترک‌های ناشی از شکست می‌توان اظهار داشت که الیاف پلی‌پروپیلن با طول ۱۸ میلی‌متر، پل‌زدگی بهتری را نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن با طول‌های ۶ و ۱۲ میلی‌متر در بین ترک‌ها داشته و منجر به شکستی نرم‌تر در نمونه‌ها شده است؛ اما به واسطه مقاومت پایین الیاف پلی‌پروپیلن، پس از گسترش ریزترک‌ها و پل‌زدن الیاف، منجر به پاره شدن الیاف‌ها شده است. طرح اختلاط ۱۸ - P<sup>0</sup> در بین طرح‌های بتنی الیافی با الیاف پلی‌پروپیلن، شکل‌پذیری بهتر و شکستی فوق‌العاده نرم‌تر از خود نشان داده است (شکل ۱۴).

در بین طرح‌های اختلاط بتن مرجع (M)، بهترین مقاومت خمشی ۲۸ روزه مربوط به طرح M<sup>0</sup> بوده است، که طرحی بدون الیاف با نسبت آب به سیمان ۰/۲۴ بوده است، که به جای بالا بردن نسبت آب به سیمان از افزودن فوق روان‌کننده برای افزایش کارایی بتن استفاده شده است. همچنین افزودن ژل میکروسیلیس سبب افزایش چشم‌گیر مقاومت خمشی ۲۸ روزه بتن در طرح M<sup>0</sup> شده است. استفاده



1. polyolefin
2. Alberti
3. Yoo
4. Kumar
5. Bentegri
6. Chen
7. Liang
8. Deng
9. Ding
10. Pehlivanli & Uzun

### منابع (References)

1. Daneti, S.B., Wee, T.H. and Thangayah, T., 2011. Effect of polypropylene fibers on the shrinkage cracking behavior of lightweight concrete. *Magazine of Concrete Research*, 63(11), pp.871-881. DOI:10.1680/mac.2011.63.11.871.
2. Emin Arsalan, M., 2016. Effects of basalt and glass chopped fibers addition on fracture energy and mechanical properties of ordinary concrete: CMOD measurement. *Construction and Building Materials*, 114, pp.383-391. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.03.176.
3. Haji Karimi, P. and Fallah Hosseini, S., 2017. Investigating the effect of volume percentage, length and geometric shape of polyolefin fibers on the mechanical characteristics and fracture characteristics of high strength concrete. *Concrete Research*, 12(1), pp.59-70 [In Persian]. DOI:10.22124/JCR.2018.10946.1307.
4. Alberti, M., Enfedaque, A. and Gálvez, J., 2017. Fibre reinforced concrete with a combination of polyolefin and steel-hooked fibres. *Composite Structures*, 171, pp.317-325. DOI:10.1016/j.compstruct.2017.03.033.
5. Yoo, D.Y., Kim, S.W. and Park, J.J., 2017. Comparative flexural behavior of ultra-high-performance concrete reinforced with hybrid straight steel fibers. *Construction and Building Materials*, 132, pp.219-229. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.11.104.
6. Pakravn, H., Latifi, M. and Jamshidi, M., 2017. Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 142, pp.280-294. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.059.
7. Kumar, R., Goel, P. and Mathur, R., 2013. Suitability of concrete reinforced with synthetic fiber for the construction of pavements. *3rd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*.
8. Bentegri, I., Boukendakdji, O., Kadri, E.H., Ngo, T.T. and Soualhi, H., 2020. Rheological and tribological behaviors of polypropylene fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 261. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.119962.
9. Chen, M., Si, H., Fan, X., Xuan, Y. and Zhang, M., 2022. Dynamic compressive behaviour of recycled tyre steel fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 316, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.125896.
10. Liang, N., You, X., Yan, R., Miao, O. and Liu, X., 2022. Experimental investigation on the mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced roller-compacted concrete pavements. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 16(1), DOI:10.1186/s40069-021-00493-6.
11. Liang, N., Mao, J., Yan, R., Liu, X. and Zhou, X., 2022. Corrosion resistance of multiscale polypropylene fiber-reinforced concrete under sulfate attack. *Case Studies in Construction Materials*, 16, DOI:10.1016/j.cscm.2022.e01065.
12. Rajeev Kumar, P., Balaji Shankar, S., Vidhya, K., Sawant, R.S. and Arun, M., 2021. The steel and polypropylene reinforced concrete beams: Shear behavior. *Materials Today: Proceedings*. DOI:10.1016/j.matpr.2021.07.181.
13. Bahmani, H. and Mostufinejad, D., 2018. Investigation of mechanical properties of concrete with very high performance reinforced with polypropylene fibers and synthetic macro fibers. *Concrete Research*, 12(1), pp.15-26 [In Persian]. DOI:10.14359/51724596.
14. Ghasemi, S., Shafaei, J. and Jalali, M., 2022. Experimental evaluation of the effect of steel and polypropylene fibers and recycled aggregates on the mechanical properties of concrete. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 38-2(3-2), pp.21-32. [In Persian]. DOI:10.24200/J30.2022.56347.3074.
15. Deng, Q., Zhang, R., Liu, C., Duan, Z. and Xiao, J., 2023. Influence of fiber properties on abrasion resistance of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 362. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.129750.
16. Ali, A.Y.F., El-Emam, H.M., Seleem, M.H., Sallam, H.E.M. and Moawad, M., 2022. Effect of crack and fiber length on mode I fracture toughness of matrix-cracked FRC beams. *Construction and Building Materials*, 341, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.127924.
17. Ding, C., Guo, L. and Chen, B., 2020. An optimum Polyvinyl alcohol fiber length for reinforced high ductility cementitious composites based on theoretical and experimental analyses. *Construction and Building Materials*, 259, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.119824.
18. Pehlivanli, Z.O. and Uzun, I., 2022. Effect of polypropylene fiber length on mechanical and thermal properties of autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*, 322, DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.126506.
19. ASTM C33., 2016. Standard specification for concrete aggregates.
20. ASTM C150., 2015. Standard specification for portland cement.
21. ISIRI 6048., 2017. Determination of compressive strength of cylindrical specimens-Test methods.
22. ASTM C293., 2016. Standard test method for flexural strength of concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading).
23. ASTM C143., 2015. Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete.