

## بررسی تأثیر استفاده از الیاف فولادی بر پارامترهای مقاومتی بتن

سیف‌الدین رضایی<sup>۱</sup>؛ فریدون خسروی<sup>۲</sup>؛ یاسر علیلو کسجینی<sup>۳</sup>؛ جعفر خانی<sup>۴\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد تونل و فضاهای زیرزمینی، دانشکده عمران، آب و انرژی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

۲- استاد دانشکده عمران، آب و انرژی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

۳- پژوهشگر دانشکده عمران، آب و انرژی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

۴- پژوهشگر و مربی دانشکده عمران، آب و انرژی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۴ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۴

(\*نویسنده مسئول: [kpghanij@ihu.ac.ir](mailto:kpghanij@ihu.ac.ir))

### چکیده

امروزه سازه‌های بتنی با توجه به کاربردهای مختلف در تنش‌های مختلف قرار می‌گیرند. این سازه‌ها اغلب در برابر تنش فشاری، مقاومت بالایی دارند اما در مقابل کشش و خمش عملکرد ضعیفی دارند. برای تقویت بتن در برابر نیروهای کششی و خمشی نیاز است سازه‌ها تسلیح شوند. در این مطالعه خصوصیات بتن مسلح با الیاف فولادی بررسی شده است. ۱۶ طرح اختلاط برای میزان سیمان ۲۰۰ تا ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب بتن (عیار سیمان) و با الیاف بین ۰/۵ تا ۱/۵ درصد حجمی تهیه شدند. پس از ۲۸ روز عمل‌آوری نمونه‌ها در شرایط استاندارد، آزمایش‌های تعیین خصوصیات مکانیکی بتن الیافی شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی انجام شدند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن به ترتیب وابسته به عیار سیمان و درصد الیاف فولادی استفاده شده است. در عیار سیمان ۳۵۰، ۰/۵ درصد الیاف باعث افزایش ۱۰ تا ۲۰ درصدی مقاومت فشاری می‌شود. اما میزان افزایش مقاومت کششی تا ۵۴٪ در صورت استفاده از ۱/۵ درصد الیاف حاصل می‌شود. افزایش مقاومت خمشی با درصد مصرفی الیاف ارتباط مستقیم دارد و هرچه میزان الیاف در نمونه بتنی افزایش یابد، مقاومت خمشی هم بیشتر شده اما آهنگ رشد این افزایش بعد از ۰/۵ درصد الیاف در عیار سیمان ۳۵۰ کاهش می‌شود. الیاف فولادی مانع از گسترش ترک‌ها می‌شوند و از تشکیل ترک‌های عمیق جلوگیری می‌کنند. از طرفی با افزایش مقدار درصدی الیاف، بتن رفتار نرم‌شوندگی از خود نشان می‌دهد و جذب انرژی فشاری بتن افزایش می‌یابد و آهنگ کاهش مقاومت فشاری کندتر می‌شود.

### واژگان کلیدی

بتن مسلح، الیاف فولادی، طرح اختلاط، عیار سیمان، پارامترهای مقاومتی بتن

### ۱- مقدمه

بعنوان المان مقاوم کششی یا آرماتور است [۱]. این مسلح سازی به روش جاگذاری میلگرد، فولاد پیش تنیده، نصب شبکه بافته شده یا شبکه جوش شده فولادی، انواع الیاف پخش شده درون بتن امکان‌پذیر است. در این مطالعه از الیاف فلزی به منظور مسلح‌سازی بتن استفاده شده است. از پارامترهای مهم الیاف می‌توان به مواردی همچون شکل الیاف، اندازه الیاف، نسبت ظاهری، خاصیت و ضریب ارتجاعی،

در دهه‌های گذشته روش‌های متفاوتی به منظور افزایش و بهبود پارامترهای مقاومتی بتن مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجا که ماسه، شن و ماتریس سیمانی شده بتن، در برابر بارهای کششی و برشی ضعیف هستند، جهت برطرف نمودن خاصیت ترد و شکنندگی آن‌ها و بهبود رفتار همگن در داخل بتن، نیاز به انتقال این تنش‌ها به عنصری دیگر درون بتن

شده است، نسبت به میلگرد فولادی، کرنش‌های کمتری در نمونه بتن مشاهده شده است. با توجه به ضریب انبساط حرارتی برای الیاف شیشه‌ای، ناحیه آسیب دیده اطراف الیاف GFRP<sup>۴</sup> بیشتر از میلگرد فولادی بوده است. مارکالیکووا<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، به بررسی مقایسه رفتار مکانیکی بتن مسلح با انواع مختلف الیاف پرداخته‌اند [۷]. نوع و مقدار الیاف استفاده شده بصورت قلاب‌دار و بدون قلاب بوده است و مقدار الیاف استفاده شده بصورت ۴۰، ۷۵ و ۱۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب (معادل ۱/۵، ۱ و ۱/۵ درصد حجمی) است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که در هر دو نوع بتن الیافی، مقاومت فشاری برای مقدار الیاف مصرفی ۷۵ کیلوگرم بر متر مکعب تا ۱۵ درصد افزایش جزئی داشته است. همچنین برای مقدار مصرفی ۱۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب، کاهش نامطلوبی در مقاومت فشاری مشاهده شده است. در ادامه برای مقدار الیاف مصرفی ۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب، زمانی که از الیاف قلاب دار استفاده شده است، مقاومت کششی بتن بصورت قابل توجهی افزایش پیدا کرده است. رحیم‌نژاد و همکاران (۱۳۹۸)، به بررسی مکانیزم شکست تیرهای بتن با الیاف فولادی به روش اجزای محدود پرداخته‌اند [۸]. نتایج مطالعه نشان داده است که الیاف فولادی تاثیر قابل توجهی را بر شکل‌پذیری و جلوگیری از شکست تیر دارد و میزان تغییر مکان تیر بتن الیافی در مقایسه با تیر بتن مسلح معمولی بصورت تقریبی ۱۰ برابر بوده است. همچنین در مقایسه میزان انرژی تلف شده برای حالت معمولی و مسلح شده، مشاهده شده است که در میلگرد با الیاف میزان انرژی تلف شده دو برابر میلگرد بدون الیاف است. در حالت کلی میزان انرژی ذخیره شده برای هر دو حالت، تقریباً یکسان بوده است. اکبرزاده و همکاران (۱۳۹۷)، به بررسی تاثیر الیاف پلیمری بر خواص مکانیکی شاتکریت پرداخته‌اند [۹]. مطالعه موردی در تونل انتقال آب کرمان بوده است. در این تحقیق از بتن مسلح با استفاده از الیاف پلیمری استفاده شده است. علاوه بر طرح اختلاط بدون الیاف، از نسبت حجمی الیاف ۱/۵، ۱ و ۱/۵ درصد در طرح اختلاط استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان داده است که افزایش الیاف تا مقادیر بهینه، منجر به افزایش پارامترهای

قابلیت پیوستگی الیاف به ماتریس، خصوصیات بین سطوح، بافت سطحی، ضریب پواسون، ضریب کششی، کرنش‌پذیری و نحوه‌ی قرار گرفتن الیاف در ماتریس اشاره کرد [۲]. تحقیقات انجام شده نشان داده است که استفاده از انواع الیاف می‌تواند رفتارهای مکانیکی مختلفی را برای بتن ایجاد کند. سعید و همکاران (۲۰۲۲)، به بررسی تاثیر الیاف بر مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح پرداخته‌اند [۳]. نتایج تحقیق نشان داده است که مقاومت برشی نهایی، سختی، شکل‌پذیری و چقرمگی تیرهای تقویت‌شده به ترتیب تا ۱/۴۹، ۲/۷۵، ۳/۳۷ و ۴/۷۷ برابر نسبت به تیرهای مقاوم‌نشده افزایش یافته است. افزایش نسبت الیاف فولادی در طرح اختلاط، استحکام و شکل‌پذیری تیرهای تقویت شده را بهبود بخشیده است به طوری که تیرهای تقویت شده با محتوای الیاف فولادی ۳ درصد در مقایسه با تیرهای تقویت شده با محتوای الیاف فولادی ۱/۵ درصد انعطاف‌پذیری بیشتری را نشان داده است. آرتوشی<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۲)، به بررسی تاثیر الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن بر رفتار مکانیکی بتن مسلح شده پرداخته‌اند [۴]. نتایج تحقیق نشان داده است که رفتارهای مکانیکی بتن آماده شده به طور چشمگیری با افزایش کسر حجمی الیاف بهبود پیدا می‌کند، به طوری که بتن تقویت شده با درصد حجمی ۲/۲۵ درصد الیاف فولادی، مقاومت مکانیکی بهینه را نشان می‌دهد. در نمونه‌های بتنی تقویت شده با الیاف پلی‌پروپیلن، مقاومت کششی پایین‌تری نسبت به الیاف فولادی بدست آمده است. احمد<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۲۱)، به بررسی تاثیر استفاده از الیاف فولادی و پلاستیکی بازیافتی بر کامپوزیت‌های بتنی پرداخته‌اند [۵]. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که ادغام الیاف بازیافتی در بتن معمولی بر کارایی مخلوط‌های بتن تأثیر منفی می‌گذارد. همچنین، انواع مختلف الیاف بازیافتی تأثیرات متفاوتی بر مقاومت فشاری بتن دارد. افزایش جزئی در مقاومت فشاری بتن با گنجاندن الیاف فولادی تا ۱٪ حاصل می‌شود، پس از آن کاهش مقاومت با افزایش الیاف مشاهده شده است. اسدیری<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، به بررسی مدلسازی عددی رفتار مکانیکی بتن مسلح با الیاف شیشه‌ای و میلگرد فولادی پرداخته‌اند [۶]. زمانی که از الیاف شیشه‌ای استفاده

<sup>4</sup> - Glass Fiber Reinforced Polymer

<sup>5</sup> - Marcalikova

<sup>1</sup> - Artushi

<sup>2</sup> - Ahmed

<sup>3</sup> - Sdiri

محدودیت‌های موجود در یکی از پروژه‌های دفاعی کشور پرداخته شد که جزییات آن قابل ذکر نیست. جهت طرح اختلاط بتن الیافی از آنجایی که تاکنون هیچ استاندارد تدریجی نشده است، ۱۶ طرح اختلاط در نظر گرفته شد و سپس با استفاده از الیاف فولادی استفاده شده با درصدهای حجمی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد اقدام به ساخت نمونه‌های بتنی شد. در این تحقیق از آزمایش‌های اسلامپ، مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی و خمشی برای دو نوع بتن، بدون الیاف (نمونه شاهد) و بتن دارای الیاف استفاده شده است.

مقاومتی شده است؛ اما در صورت استفاده بیشتر خود الیاف به عنوان ترک عمل کرده و منجر به کاهش مقاومت می‌شوند. در جدول ۱، خلاصه‌ای از نتایج مطالعات انجام شده در خصوص تأثیر انواع الیاف بر پارامترهای مقاومتی بتن جمع‌آوری شده است. از آنجایی که استفاده از بتن‌های الیافی در پروژه‌های دفاعی کشور مورد توجه است و اجرای این پروژه‌ها گاه با محدودیت‌هایی در تأمین مصالح مواجه است لذا در تحقیق حاضر به بررسی آزمایشگاهی تأثیر استفاده از الیاف فولادی بر شاخصه‌های مقاومتی بتن با توجه به

#### جدول ۱- خلاصه‌ای از نتایج مطالعات انجام شده در ارتباط با تأثیر الیاف بر پارامترهای مکانیکی بتن.

توضیحات	کسر حجمی الیاف (%)	انواع الیاف	سال	محقق/مرجع
الیاف با ابعاد طولی مختلف، رفتارهای مکانیکی متفاوتی را برای بتن ایجاد کرده است.	۰/۲۵	انواع الیاف فولادی	۲۰۲۰	Zeyad, A.M. [۱۲]
مقاومت فشاری نمونه‌ها در ابتدا افزایش و در ادامه با افزایش الیاف، مقدار مقاومت فشاری و کرنش‌ها به ترتیب حالت کاهشی و افزایش داشته است.	۰/۴، ۰/۸، ۱/۲	شیشه‌ای، پلی پروپیلن، پلی اکریلونیتریل	۲۰۲۰	Cao, S. [۱۳]
به حداقل رساندن پوسته پوسته شدن بتن تقویتی با الیاف در هنگام قرار گرفتن در معرض دمای بیش از ۸۰۰ درجه سانتی گراد	-	پلی پروپیلن	۲۰۲۰	Al-Najjar [۱۴]
الیاف فولادی پیچ خورده، بیشترین مقاومت در برابر کشش را نشان داده و به دنبال آن الیاف فولادی قلاب‌دار و ساده قرار دارند.	۱۰/۲۷	فولادی (ساده، قلاب‌دار، پیچ خورده)	۲۰۱۹	Kim, J.J. [۱۵]
با افزایش مقدار کسر حجمی الیاف بهینه، استحکام فشاری نمونه‌های بتنی بصورت قابل توجهی افزایش می‌یابند.	۰/۲۰، ۰/۱۰	بازالتی	۲۰۱۹	Wang, X. [۱۶]
افزودن ۱/۱۵٪ نانوسیلیس، ۱٪ نانو آلومینیوم و ۰/۷٪ فیبر شیشه‌ای برای بتن معمولی، به ترتیب باعث افزایش ۲۰/۶۸ و ۵۰/۷۶ درصدی مقاومت فشاری و خمشی بتن شده است.	۰/۱۵، ۱، ۰/۷	نانو، شیشه‌ای	۲۰۱۸	Khooshechin, M. [۱۷]
افزودن الیاف به مخلوط شاکریت دارای سولفوآلومینات کلسیم، سیمان پرتلند معمولی و سولفات کلسیم باعث کاهش جذب آب و حجم فضای منافذ نفوذپذیر می‌شود که به صورت غیرمستقیم نفوذ پذیری را منعکس می‌کند. پارامتر نفوذپذیری کاهش یافته، باعث کاهش انبساط و در نتیجه دوام مخلوط می‌شود.	-	نایلونی، شیشه‌ای	۲۰۱۸	Yu, H. [۱۸]
برای الیاف فولادی از نوع قوسی با استفاده از سیم فولادی به طول ۳۰ میلی‌متر، کشش بدون شکستگی الیاف در همه نمونه‌ها مشاهده شد. برای سایر نمونه‌های آزمایش الیاف فولادی از نوع قوسی، به استثنای شعاع انحنا ۱۰ میلی‌متر، حداکثر بار کشش با شعاع انحنا و طول خم افزایش می‌یابد. نتایج، رفتار کششی پایدار را نشان داده است، به طوری که خطاها در نزدیکی بار حداکثر با شعاع انحنا افزایش می‌یابد.	-	فولادی	۲۰۱۶	Lee, S.J. [۱۹]
افزودن الیاف شیشه‌ای بسیار ریز می‌تواند راه حلی برای مشکل ترک خوردگی در بتن باشد.	-	شیشه‌ای	۲۰۱۴	Bryne, L.E. [۲۰]
الیاف فولادی در ترک‌های بزرگ ممکن است خورده شوند و منجر به از دست رفتن ظرفیت تحمل بار رسوبی و در نتیجه انرژی پس از ترک شوند.	-	فولادی، پلیمر	۲۰۱۴	Kaufmann, J.P. [۲۱]

## ۲- مواد و روش تحقیق

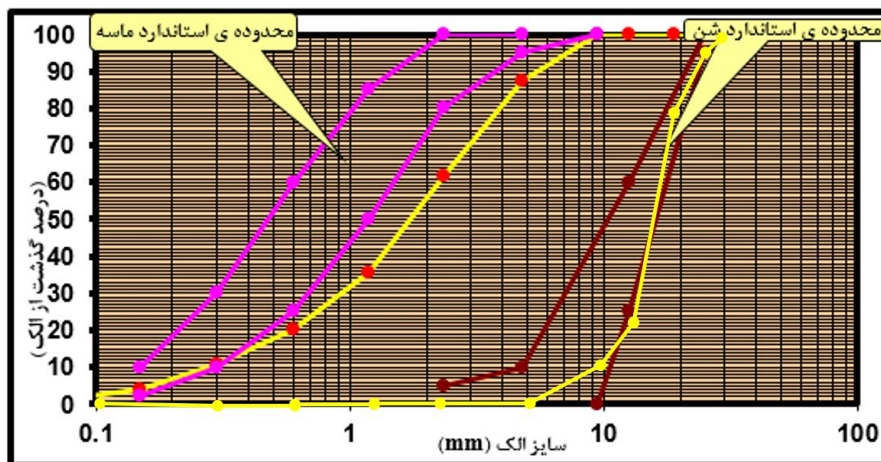
یکی از مهم‌ترین و ارزان‌ترین مصالح موجود که در دنیا کاربرد وسیعی دارد، بتن است [۱۰]. تعیین نسبت مخلوط‌های بتن که به تعیین نسبت‌های اختلاط و طرح اختلاط بتن نیز موسوم است، روندی است که بوسیله آن می‌توان به ترکیب درست سیمان، سنگدانه، آب و مواد افزودنی برای ساخت بتن طبق مشخصات داده شده رسید. حدود سه‌چهارم حجم بتن، تشکیل شده از سنگدانه‌ها است. از این رو سنگدانه‌ها می‌توانند بر مقاومت و خصوصیات دوام بتن تأثیرگذار باشند. در روش ملی طرح اختلاط بتن، ابتدا می‌توان نسبت آب به سیمان را با توجه به مقاومت، نوع سیمان و شکل سنگدانه درشت به دست آورد و پس از آن با توجه به دوام بتن مقدار آن را کنترل کرد [۱۱]. ماسه‌ها سنگدانه‌های ریز بتن هستند که دارای قطر کمتر از ۴/۷۵ میلی‌متر هستند و نقش پرکنندگی بین مصالح

درشت‌دانه را دارند. ماسه‌ها باید عاری از هرگونه آلودگی و گل‌ولای باشند.

جهت دستیابی به یک بتن متراکم و باکیفیت خوب، دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی می‌بایست در محدوده مجاز ارائه شده توسط *ASTM C33* قرار گیرد تا میزان خلل و فرج کاهش یافته و مقاومت افزایش یابد [۲۲]. شن و ماسه مورد استفاده در این مطالعه از سنگ‌شکن داخل پروژه تهیه شد. به‌منظور انجام آزمایش دانه‌بندی، ماسه قبل از انجام آزمایش دانه‌بندی به‌صورت کامل خشک شده و در ادامه ماسه به میزان ۲ کیلوگرم در داخل لرزاننده مطابق شکل ۱ قرار داده شده است. پس از کارکرد چنددقیقه‌ای دستگاه، الک‌ها را جدا نموده و با توجه به وزن باقی‌مانده بر روی هر الک، نتایج حاصل از آزمایش دانه‌بندی ماسه در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۱- آزمایش دانه بندی ماسه (الف) وزن ماسه باقی‌مانده روی هر الک، (ب) دانه‌بندی ماسه به‌وسیله لرزاننده



شکل ۲- نمودار دانه‌بندی ماسه و شن مصرفی در بتن

استفاده از محدوده استاندارد کمی بیرون زدگی دارد که دلیل آن لزوم استفاده از مصالح تولیدی سنگ شکن پروژه است. اما دانه بندی شن مورد استفاده تقریباً در محدوده استاندارد قرار دارد.

سیمان ماده اصلی چسبندگی در بتن است. هر نوع سیمان بسته به میزان مواد تشکیل دهنده آن، دارای خواص شیمیایی متفاوت است و می تواند در شرایط مختلف واکنش متفاوتی از خود نشان دهند. سیمان مورد استفاده در این تحقیق سیمان تیپ ۲ تهران با ترکیب شیمیایی ذکر شده در جدول ۲ می باشد. این سیمان دارای وزن مخصوص  $3000 \pm 50$  کیلوگرم بر مترمکعب، زمان گیرش اولیه  $95 \pm 5$  دقیقه و گیرش نهایی  $105 \pm 10$  دقیقه است.

جدول ۲- ترکیبات شیمیایی سیمان مصرفی در بتن

L.O.I	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	درصد عناصر شیمیایی
0.1/2	0.1/0.25/15	0.1/0.49/2	1.0/0.5/2	1.0/0.9/2	0.64/5	3.0/8.2/2	0.5/0.3	0.22/4	مقدار در استاندارد
									۳۸۹

از طرفی درشت دانه ها یکی از اجزای مهم بتن هستند. به گونه ای که اندازه بزرگ ترین سنگدانه مصرفی در طرح اختلاط مؤثر است همچنین به هنگام شکست بتن، در صورتی که خمیر سیمان دارای ضعف نباشد و دارای مقاومتی در حد سنگدانه ها باشد، سطح شکستگی از سنگدانه ها هم عبور می کند. به همین دلیل در بتن های با عملکرد بالا مقاومت اجزای سنگدانه ها می تواند بر مقاومت فشاری تأثیرگذار باشد. شن تهیه شده از نوع شکسته بوده و انطباق خوبی با الزامات شکل هندسی سنگدانه مناسب برای استفاده در بتن را دارد. در ادامه آزمایش دانه بندی بر روی شن نیز همانند ماسه صورت گرفت و نتایج حاصل در شکل ۲ گزارش شده است. همانطور که در شکل قابل مشاهده است، دانه بندی ماسه مورد

وجود دارد از جمله طرح ACI، طرح PCI، طرح یونسکو، طرح BS، طرح فرانسه، طرح کانادا و ده ها طرح دیگر که استفاده می شوند.



شکل ۳- الیاف فولادی دو سر قلاب دار

به دلیل کاهش کارایی بتن در ترکیب با الیاف، از فوق روان ساز کاهنده آب، جهت افزایش کارایی بتن استفاده شد. این ماده با نام تجاری Dezobuild D-10 از شرکت رایحه بتن سبز ایران تهیه شد. فوق روان ساز مورد استفاده مایعی غلیظ به رنگ زرد است که دارای وزن مخصوص ۱/۱۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مکعب است و عدد قلیایی فوق روان کننده ۶/۵ است. همچنین، الیاف مورد استفاده در ساخت نمونه ها از جنس فولاد با انتهای قلاب دار تولیدی شرکت رایحه سبز بتن ایران است. شکل ۳، الیاف مورد استفاده در این مطالعه را نشان می دهد. الیاف فولادی مورد استفاده در طرح، دارای مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگاپاسکال، وزن مخصوص ۷/۸ گرم بر سانتیمتر مکعب، طول ۵ سانتیمتر، قطر ۰/۵ میلی متر و نوع آن دو سر قلاب و گالوانیزه و از تولیدات داخلی است.

## ۱-۲- طرح اختلاط

جهت طرح اختلاط بتن الیافی تاکنون هیچ استاندارد تدوین نشده است اما برای بتن های بدون الیاف طرح های بسیاری

اکثر روش های طرح اختلاط بر اساس خواص مصالحی است که در هر منطقه یا کشور موجود بوده، تنظیم شده و طبیعتاً کاربرد آن ها در یک منطقه دیگر چندان دقیق نخواهد بود [۲۳]. استاندارد آمریکا، ACI 211.1، از این مزیت برخوردار

مورد استفاده در این مطالعه بر طبق دستورالعمل *ACI 211.1* بوده است. در این تحقیق ۱۶ طرح اختلاط برای مقادیر سیمان بین ۲۰۰ تا ۳۵۰ کیلوگرم در هر مترمکعب (عیار سیمان) و الیاف ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد حجمی در نظر گرفته شد. جزئیات طرح اختلاط‌های مورد نظر در جدول ۳ نشان شده است.

است که در مراحل پایانی طراحی، با ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی و انجام چند آزمایش ساده نتایج مراحل قبلی را اصلاح کرده و به این ترتیب تأثیر خواص مصالح هر منطقه را به نحو مناسب در محاسبات دخالت می‌دهد. به همین دلیل روش این استاندارد در اکثر مناطق از جمله ایران نتایج دقیق‌تری را به دنبال خواهد داشت [۲۴]. طرح اختلاط

جدول ۳- طرح اختلاط بتن الیافی در یک مترمکعب بتن

شماره	نام طرح	آب (کیلوگرم)	درصد حجمی الیاف (%)	ماسه SSD (کیلوگرم)	شن SSD (کیلوگرم)	وزن الیاف (کیلوگرم)	سیمان در متر مکعب (کیلوگرم)	فوق روان کننده (کیلوگرم)
۱	FRC-0/5-200	۹/۱	۰/۵	۸۸	۷۲	۳/۹۲۵	۲۰۰	۰/۱۶
۲	FRC-1-200	۱۵/۵	۱	۸۸	۷۲	۷/۸۵	۲۰۰	۰/۱۶
۳	FRC-1/5-200	۱۳/۸۶	۱/۵	۸۸	۷۲	۹/۴۲	۲۰۰	۰/۱۶
۴	FRC-0/5-250	۱۴/۱۳	۰/۵	۸۸	۷۲	۳/۱۴	۲۵۰	۰/۲
۵	FRC-1-250	۱۷/۷	۱	۸۸	۷۲	۶/۲۸	۲۵۰	۰/۲
۶	FRC-1/5-250	۱۴/۹	۱/۵	۸۸	۷۲	۹/۴۲	۲۵۰	۰/۲
۷	FRC-0/5-300	۱۵/۲۴	۰/۵	۸۸	۷۲	۳/۱۴	۳۰۰	۰/۲۴
۸	FRC-1-300	۱۴/۱۷	۱	۸۸	۷۲	۶/۲۸	۳۰۰	۰/۲۴
۹	FRC-1/5-300	۱۵/۹	۱/۵	۸۸	۷۲	۹/۴۲	۳۰۰	۰/۲۴
۱۰	FRC-0/5-350	۱۶/۷۷	۰/۵	۸۸	۷۲	۳/۱۴	۳۵۰	۰/۲۸
۱۱	FRC-1-350	۱۹/۹	۱	۸۸	۷۲	۶/۲۸	۳۵۰	۰/۲۸
۱۲	FRC-1/5-350	۱۶/۶	۱/۵	۸۸	۷۲	۹/۴۲	۳۵۰	۰/۲۸
۱۳	PC-200	۱۳/۲۵	۰	۸۸	۷۲	۰	۲۰۰	۰/۱۶
۱۴	PC-250	۱۲/۸۱	۰	۸۸	۷۲	۰	۲۵۰	۰/۲
۱۵	PC-300	۱۲/۶۵	۰	۸۸	۷۲	۰	۳۰۰	۰/۲۴
۱۶	PC-350	۱۴	۰	۸۸	۷۲	۰	۳۵۰	۰/۲۸

سیمان، افزودن آب، افزودن الیاف مورد نظر، افزودن مواد فوق روان کننده انجام شد. در این تحقیق به منظور بررسی رفتار مکانیکی بتن در طرح اختلاط‌های ارائه شده از آزمایش مقاومت فشاری تک محوره، آزمایش مقاومت کششی و آزمایش مقاومت خمشی استفاده شده است. ابعاد نمونه‌های مورد استفاده در جدول ۴ ارائه شده است.

## ۲-۲- آماده سازی نمونه‌ها

مراحل بتن‌ریزی در آماده کردن قالب‌های استوانه‌ای و مکعبی بصورت آغشته کردن روغن درون قالب‌ها به منظور سهولت خارج کردن بتن‌های سخت شده از درون قالب، آماده‌سازی خلطه برای عمل ترکیب مواد تشکیل دهنده بتن، ترکیب کردن شن و ماسه درون خلطه به مدت ۲ دقیقه، اضافه کردن

جدول ۴- قالب‌های در نظر گرفته شده برای انجام آزمایش‌های بتن

ابعاد (میلیمتر در میلیمتر)	شکل نمونه	نوع آزمایش
۲۰۰×۱۰۰	استوانه	مقاومت فشاری
۲۰۰×۱۰۰	استوانه	مقاومت کششی برزیلی
۵۰۰×۱۰۰×۱۰۰	مکعب مستطیل	مقاومت خمشی
۳۰۰×۱۵۰	استوانه	بررسی رفتار تنش کرنش فشاری
۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰	مکعب مربع	وزن مخصوص

### ۳- تحلیل نتایج

#### ۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری تک محوره

در این آزمایش از قالب‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متری استفاده شده است. پس از آن، نمونه‌ها با گذشت ۲۴ ساعت از قالب‌ها خارج شده و سپس وارد حوضچه‌های عمل‌آوری شده و پس از ۲۸ روز نمونه‌ها مورد آزمایش قرار می‌گیرند. در شکل ۴، نحوه بارگذاری نمونه‌ها و الگوی شکست نمونه‌ها در آزمایش مقاومت فشاری تک محوره

نشان داده شده است. نتایج حاصل از آزمایش انجام شده در نمودار شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج آزمایش اسلامپ نشان داده است که با افزودن الیاف، اسلامپ بتن کاهش پیدا کرده، اما رابطه‌ی مستقیمی بین میزان الیاف و کاهش اسلامپ وجود ندارد. همچنین با افزایش میزان آب مصرفی در آب، بتن روانی بیشتری داشته و آزمایش اسلامپ عدد بزرگ‌تری را نشان می‌دهد.

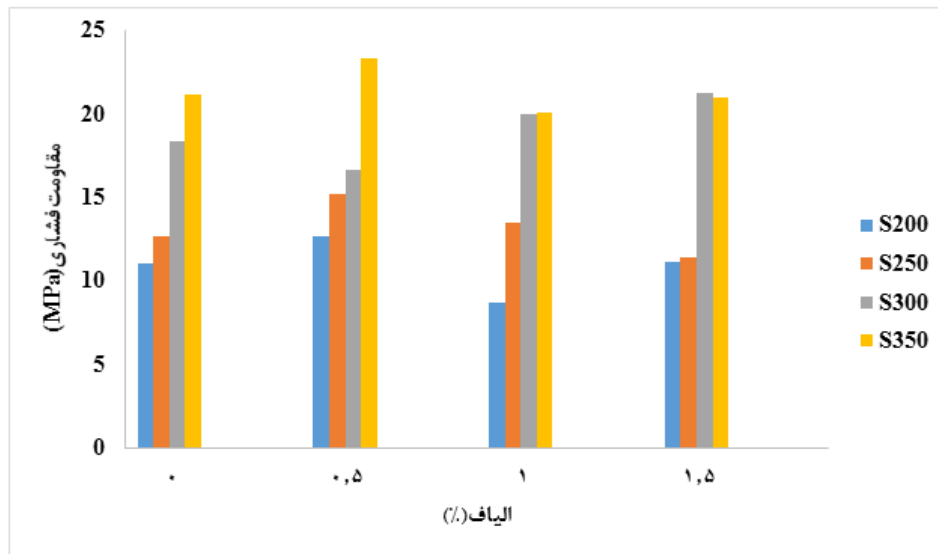


شکل ۴- آزمایش مقاومت فشاری تک محوره (الف) دستگاه بارگذاری (ب) شکست نمونه تحت بارگذاری (ج) الگوهای

#### شکست نمونه

با توجه به شکل ۴ قسمت ج، از ارزیابی الگوی شکست نمونه‌های بتنی حاوی درصد‌های مختلف الیاف فولادی در آزمایش مقاومت فشاری می‌توان دریافت که در نمونه‌های بتنی حاوی الیاف فولادی، در مقایسه با نمونه‌ی بدون الیاف،

سطح شکست نامنظمی مشاهده می‌شود. الیاف فولادی به‌وسیله‌ی عمل پل زدن بین ترک‌ها، باعث پیوستگی بیشتر



شکل ۵- نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های بتن براساس درصد الیاف بکاررفته

بتن، سنگدانه‌ها بر جهت‌گیری الیاف تأثیر می‌گذارند به‌طوری‌که الیاف موازی با جهت بارگذاری به دلیل رخ دادن کماتش برای آن‌ها مقاومت فشاری کمتری را تولید می‌کنند، اما الیاف عمود برجهت بارگذاری، مقاومت فشاری نمونه را افزایش می‌دهند، چراکه الیاف فولادی تمایل به محدود کردن انبساط نمونه و کاهش گسترش ترک را دارد.

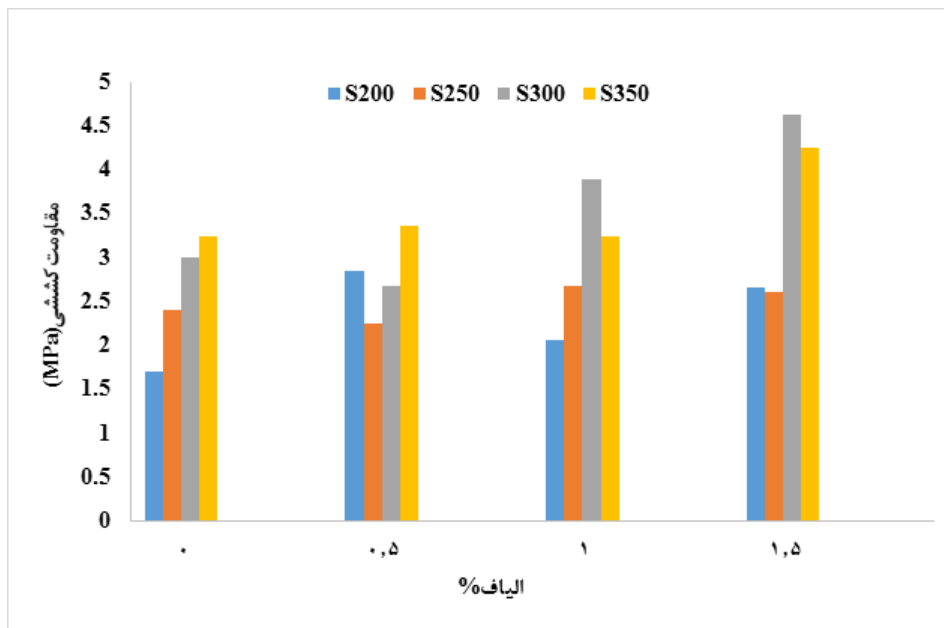
### ۲-۳- آزمایش مقاومت کششی

در نمونه‌های بتن الیافی، مشخص نمودن مقاومت کششی با مشکلات بیشتری نسبت به بتن معمولی همراه است، زیرا مصالح دارای خاصیت تردی و ایزوتروپ نیستند. آزمایش مقاومت کششی (شکافت)، فقط تا لحظه اولین ترک اطلاعات دقیقی از مقاومت نمونه به دست می‌دهد، زیرا نحوه توزیع تنش از بعد رخداد ترک، نامشخص است. غیر ایزوتروپ بودن نمونه‌های بتن الیافی ناشی از توزیع نامشخص و نحوه جهت‌گیری الیاف در بتن است. به دلیل اینکه الیاف فولادی میل دارند به‌صورت عمود برجهت نیروی ثقل در بتن قرارگیرند، مقاومت کششی بزرگ‌تری در صفحات موازی با نیروی ثقل حاصل می‌شود [۲۵]. نتایج آزمایش شکافت برای بتن‌های الیافی به‌شدت تحت تأثیر تعداد الیاف حاضر در محل گسیختگی، جهت‌گیری آن‌ها و جهت صفحه گسیختگی قرار

ملات بتن می‌شود. با توجه به شکل ۵، با افزایش میزان سیمان و درصد الیاف فولادی، رفتار مکانیکی بتن حالت‌های مختلفی را داشته است. با توجه به عیار سیمان ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۵۰ برای درصد الیاف ۰/۵، ۱ و ۱/۵ مقاومت فشاری نمونه‌های بتن در ابتدا حالت افزایشی و در ادامه با افزایش درصد الیاف، حالت کاهش را نشان داده است. برای عیار سیمان ۳۰۰، با افزایش درصد الیاف فولادی، مقاومت فشاری تک محوره نمونه‌های بتن حالت افزایشی را داشته است. در حالت کلی می‌توان گفت که با افزایش میزان سیمان استفاده‌شده در طرح اختلاط مقدار مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که بیشترین مقاومت فشاری ثبت‌شده متعلق به طرح اختلاط ایجادشده با عیار سیمانی ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. همچنین، افزایش مقاومت فشاری و بیشینه مقدار ثبت‌شده، به نسبت سیمان استفاده‌شده در ترکیب وابسته است، چراکه در عیارهای سیمانی ۲۰۰ و ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب بیشترین مقاومت فشاری ثبت‌شده به نمونه‌های ایجادشده با الیاف به میزان ۰/۵ درصد است، اما با افزایش میزان سیمان و در عیارهای ۳۰۰ و ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب بیشترین مقاومت فشاری به نمونه‌های ایجادشده با الیاف به میزان ۱/۵ درصد تعلق دارد. از دلایل کاهش مقاومت فشاری با افزایش درصد الیاف فولادی می‌توان گفت که در ماتریس

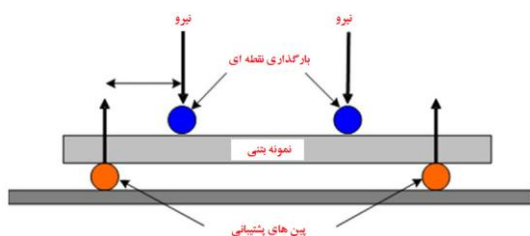
درصد مقاومت کششی آن افزایش پیدا کرده است. از طرفی برای عیار ۳۰۰ و ۳۵۰ با افزایش درصد الیاف، مقاومت کششی نمونه‌های بتنی نیز افزایش پیدا کرده است و برای عیارهای ۲۰۰ و ۲۵۰ نمونه‌های بتنی با افزایش درصد الیاف، حالت مشخصی را نشان نداده‌اند. برای عیار سیمان ۲۵۰ و ۳۰۰، زمانی که درصد الیاف اضافه شده برابر با ۰/۵ بوده است، مقاومت کششی نمونه‌های بتنی حالت کاهش را نشان داده است.

دارد. تحقیقات پترزوسکی که بر روی نمونه‌های مکعبی انجام شده است نشان داد که در نمونه‌هایی که جهت اعمال بار آزمایش شکافت در صفحه‌ای عمود بر جهت نیرو ثقل وارد شد، نتیجه‌های حاصل از روی نمونه‌های حاوی الیاف بسیار نزدیک به نتیجه‌های به‌دست‌آمده از نمونه‌های ساده و بدون الیاف است [۲۵]. با توجه به شکل ۶ می‌توان گفت که با افزایش عیار سیمان، مقاومت کششی نمونه‌های بتنی افزایش پیدا کرده است. به طوری که برای نمونه بتنی با عیار ۳۰۰، ۵۴



شکل ۶- نمودار مقاومت کششی نمونه‌های بتن براساس درصد الیاف بکاررفته

استحکام نمونه‌ها مشاهده شده است. از طرفی با افزایش مقدار مصرفی آب و عدد اسلامپ، ماکزیمم مقدار مقاومت خمشی بدست آمده است.



شکل ۷- آزمایش بارگذاری دونقطه‌ای برای تعیین مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی

### ۳-۳- آزمایش خمشی چهارنقطه‌ای

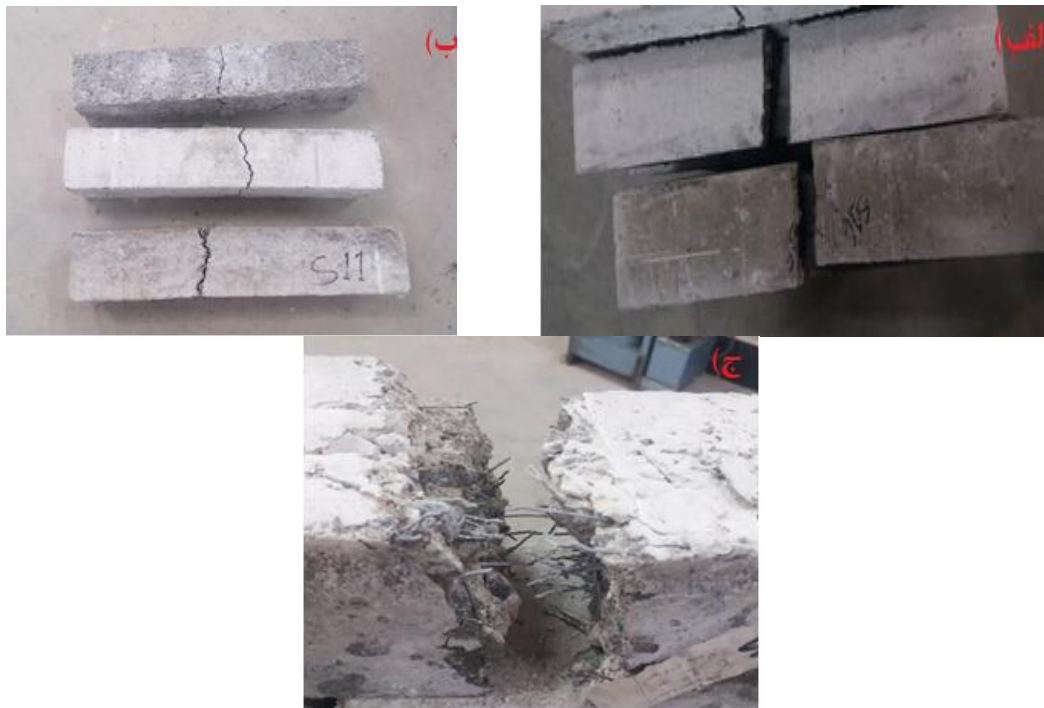
یکی دیگر از آزمایش‌های بررسی خواص مکانیکی بتن، تحلیل نتایج آزمایش‌های مقاومت خمشی بتن در سن ۲۸ روز مطابق با استاندارد *ASTM C469* است، برای انجام آزمایش مقاومت خمشی از نمونه‌های مکعب مستطیلی با ابعاد  $100 \times 100 \times 500$  میلی‌متری استفاده شده است. آزمایش مطابق شکل ۷ و با روش بارگذاری دونقطه‌ای انجام شده است. با توجه به شکل ۸، با افزایش عیار سیمان مقدار مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی افزایش پیدا کرده است. تنها در مواردی که عیار سیمان برابر با ۳۵۰ است، با افزایش درصد الیاف، استحکام خمشی نمونه‌های بتنی حالت افزایشی داشته است. در بقیه موارد حالت‌های مختلفی از افزایش و کاهش



شکل ۸- نمودار مقاومت خمشی نمونه‌های بتن براساس درصد الیاف بکاررفته

پایین، نمونه‌ها ترک برداشته، به طوری که ابعاد ترک قابل توجه می‌باشد. همچنین، نمونه‌های خمشی با افزایش الیاف ترک برداشته اما ابعاد ترک‌ها به طور کاملاً محسوسی کاهش می‌یابد.

با توجه به شکل ۹ می‌توان گفت که برای نمونه‌های خمشی در بتن‌های بدون الیاف و با عیار سیمانی متفاوت، نمونه‌ها از وسط به دو نیم تقسیم می‌شوند. در ادامه برای نمونه‌های خمشی در بتن‌هایی با الیاف کم و مقاومت

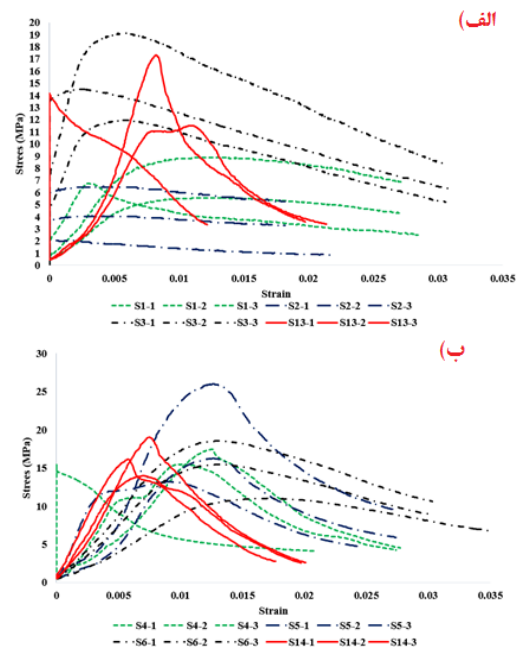


شکل ۹- شکست نمونه‌های بتنی در آزمایش خمش (الف) بدون الیاف فولادی (ب) با الیاف فولادی (ج) نمونه تیر بتنی مسلح شده

### ۴-۳- بررسی رفتار منحنی تنش- کرنش

به‌طور کلی هنگامی که بر یک نمونه بتنی، تنش فشاری تک‌محوری وارد می‌شود، ترک‌های ریزی در ناحیه تماس بین دانه‌ها و ملات سیمان ایجاد شده و باعث می‌شود که بتن، رفتار غیرخطی داشته باشد. این ترک‌های ریز برای تنشی کمتر از حدود سی درصد مقاومت فشاری بتن، نسبتاً پایدار بوده و گسترش نمی‌یابند و لذا رفتار بتن در این ناحیه کشسان خطی است. افزایش تنش باعث رشد و گسترش ترک‌های ریز، کاهش سختی مصالح و در نتیجه رفتار غیرخطی بتن می‌شود. گسترش ترک‌های ریز در داخل ملات، انبساط حجمی و افزایش ضریب پواسون را به همراه خواهد داشت. با بزرگ شدن ترک‌های مذکور و تبدیل آن‌ها به صورت نوار، بار اعمالی کاهش یافته و ناحیه نزولی منحنی تنش-کرنش به وجود می‌آید. سرانجام در اثر اتصال همه ترک‌های موجود به یکدیگر، بتن به‌طور کامل گسیخته می‌شود. در شکل ۱۰، منحنی تنش-کرنش بتن از دو شاخه صعودی و نزولی تشکیل می‌شود که شاخه صعودی برای تعیین ویژگی‌هایی نظیر مدول الاستیسیته بتن و شیب شاخه نزولی برای تعیین میزان شکل‌پذیری مورد استفاده قرار می‌گیرد.

شاخه نزولی با شیب تند، خرابی ماده در شرایط تردی را نشان می‌دهد درحالی‌که رفتار تنش-کرنش با شیب تخت یا شاخه افقی پس از تنش حداکثر، یک ماده کاملاً خمیری را نشان می‌دهد. نمونه بتن معمولی تا حدی شاخه نزولی با شیب تند دارد که به دلیل مقاومت کمتر سنگدانه‌ها است. در شکل ۱۰-الف، برای نمونه‌های بتن بدون الیاف (قرمز رنگ)، نمونه‌ها بعد از رسیدن به ماکزیمم مقدار نهایی، شیب نزولی با شیب تندی را داشته‌اند. در ادامه برای نمونه‌های بتنی با درصد الیاف ۰/۵ و ۱ درصد (به ترتیب سبز و آبی)، نمونه‌ها نسبت به حالت معمولی، کرنش بیشتری را نشان داده و مقاومت نهایی نمونه‌ها به ترتیب ۴۷٪ و ۶۴٪ درصد کاهش یافته است. همچنین زمانی که درصد افزایش الیاف ۱/۵ بوده است، نمودارهای تنش-کرنش مقاومت و کرنش بیشتری را نسبت به نمونه‌های بدون الیاف نشان داده‌اند، به طوری که ماکزیمم مقدار نمونه بتنی حاوی الیاف ۱/۵، مقدار عددی ۱۱ درصد افزایش استحکام فشاری را نشان داده است. در شکل ۱۰-ب، برای نمونه‌های بتن بدون الیاف (قرمز رنگ)، همانند قسمت الف، نمودار بعد از رسیدن به ماکزیمم مقدار نهایی خود شیب نزولی تندی را داشته است. در نمودارهای رسم شده برای عیار ۲۵۰، ماکزیمم مقدار استحکام نمونه‌های کششی علاوه بر افزایش مقدار عددی کرنش برخلاف عیار ۲۰۰ برای نمونه با درصد الیاف ۱ درصد بدست آمده است. به طوری که مقدار افزایش استحکام بدست آمده نسبت به نمونه معمولی برابر با ۴۴ درصد بوده است. در حالت کلی با افزایش درصد الیاف، نمونه‌ها کرنش بیشتری نسبت به حالت معمولی بتن نشان داده‌اند و در بعضی موارد مقدار مقاومت نهایی نمونه‌ها با افزودن الیاف فولادی بیشتر از حالت معمولی بتن شده است. در شکل ۱۱-الف برای عیار ۳۰۰، نمونه‌های بدون الیاف فولادی، دارای ماکزیمم مقدار استحکام فشاری هستند. برای نمونه‌های حاوی الیاف فولادی، کرنش بیشتری نسبت به حالت معمولی بتن مشاهده شده است. زمانی که درصد الیاف فولادی استفاده شده برابر با ۱/۵ درصد بوده است (نمودار سیاه رنگ)، کرنش بیشتری نسبت به بقیه حالت‌های بتن بدست آمده است. همچنین استحکام فشاری نمونه‌های بتنی با درصد الیاف ۰/۵ کمتر از نمونه‌های بتنی با درصد الیاف ۱ درصد بوده است.

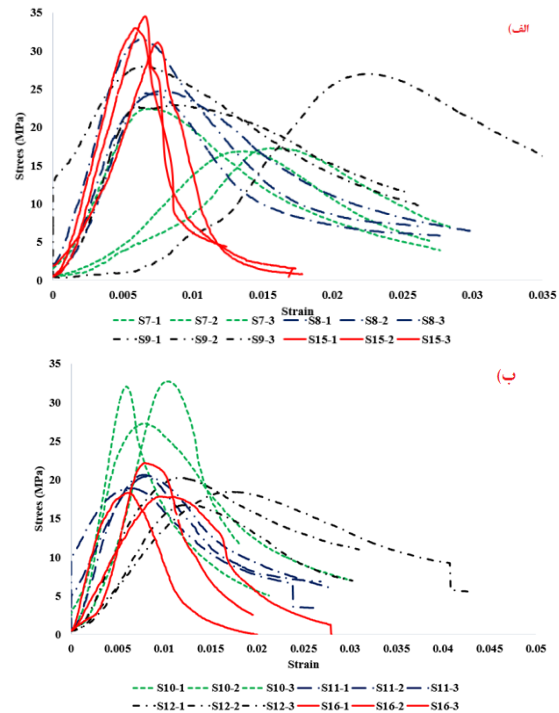


شکل ۱۰- نمودارهای تنش-کرنش در طرح اختلاط‌های مختلف الف) با عیار ۲۰۰ ب) با عیار ۲۵۰

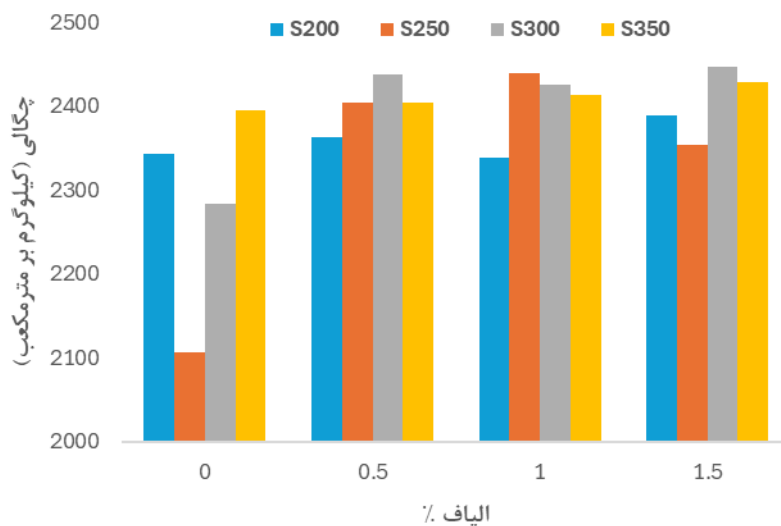
در شکل ۱۱-ب، برای نمونه با درصد الیاف ۰/۵ استحکام فشاری بیشتری نسبت به بقیه حالت‌های طرح اختلاط مشاهده شده است. همچنین زمانی که از درصد الیاف ۱/۵ استفاده شده است، کرنش‌های بیشتری نسبت به بقیه حالت‌های طرح اختلاط بدست آمده است. در حالت کلی می‌توان گفت که استفاده از الیاف سبب می‌شود که آهنگ کاهش مقاومت فشاری در شاخه‌ی نزولی با روند کندتری صورت بگیرد و بتن رفتار نرم‌تری می‌گیرد که این امر منجر به جذب انرژی بیشتر بتن الیافی نسبت به بتن بدون الیاف می‌شود.

### ۳-۵- چگالی

در شکل ۱۲، چگالی تر نمونه‌ها براساس طرح اختلاطها محاسبه و مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به شکل ۱۲ می‌توان نتیجه گرفت که به طور کلی با افزایش میزان الیاف چگالی بتن‌های ساخته شده افزایش می‌یابد (البته این روند ثابت نیست و با تغییراتی گاه‌آهکشی همراه است) که این امر می‌تواند مضراتی برای کارایی بتن داشته باشد.



شکل ۱۱- نمودارهای تنش-کرنش در طرح اختلاط‌های مختلف (الف) با عیار ۳۰۰ (ب) با عیار ۳۵۰



شکل ۱۲- تغییرات چگالی تر نمونه‌ها براساس تغییرات در عیار سیمان و درصد الیاف

#### ۴- نتیجه گیری

استفاده شده وابسته است و هرچه قدر الیاف بیشتر می شود مقاومت های کششی نیز به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. ۳- افزودن الیاف فولادی به بتن، باعث تعویق در رخداد اولین ترک در مقطع بتنی می شود؛ و به همین دلیل مقاومت خمشی افزایش می یابد. افزایش مقاومت خمشی با درصد مصرفی الیاف ارتباط مستقیم دارد و هرچه میزان الیاف در نمونه بتنی افزایش یابد، مقاومت خمشی هم بیشتر می شود.

۴- نتایج حاصل از بررسی منحنی تنش- کرنش یکنواخت بتن مسلح به الیاف فولادی نشان دادند که افزودن الیاف فولادی به بتن تأثیر قابل توجهی بر شاخه ی صعودی منحنی تنش- کرنش ندارد. این در حالی است که شاخه ی نزولی منحنی به طور قابل ملاحظه ای متأثر از الیاف فولادی است و با افزایش مقدار الیاف، بتن رفتار نرم تری از خود نشان می دهد و جذب انرژی فشاری بتن افزایش می یابد. همچنین آهنگ کاهش مقاومت فشاری، کندتر می باشد.

۵- با افزایش رده مقاومتی بتن تأثیر افزایش الیاف در افزایش مقاومت های فشاری، کششی و خمشی بتن نیز بیشتر می شود.

در این تحقیق با توجه به اینکه برای طرح اختلاط بتن الیافی تاکنون هیچ استاندارد تدوین نشده است، از ۱۶ طرح اختلاط با نسبت های افزایشی الیاف با درصدهای ۱، ۵/۱۰ و ۱/۵ و در عیار سیمان ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۳۵۰ (میزان سیمان در یک متر مکعب بتن) نمونه های مورد نظر در آزمایشگاه آماده سازی شده اند. بعد از مدت زمان ۲۸ روز بر روی نمونه ها آزمایش مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی، آزمایش خمش و محاسبات مربوط به چگالی انجام شد و در نهایت نتایج زیر استخراج شده است:

۱- با افزودن الیاف فولادی به بتن، مقاومت فشاری بتن به میزان ۱۰ تا ۲۰ درصد افزایش می یابد؛ اما این افزایش وابسته به مقاومت بتن است. به طوری که افزایش الیاف در بتن های با عیار سیمانی پایین حتی تأثیر منفی روی مقاومت فشاری بتن الیافی دارد.

۲- استفاده از الیاف فولادی مقاومت های کششی دونیم شدگی بتن را به طور چشمگیری افزایش می دهد. به طوری که در آزمایش ها مشخص شد، مقاومت کششی تا ۵۴ درصد افزایش داشته است. البته میزان افزایش مقاومت به میزان الیاف

#### ۵- منابع

- [1] Hemmati, A. and Ezzoddin, S., 2019. Behavior of reinforced concrete beam strengthened by HPFRCC material. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 4(1), pp.86-99.
- [2] DJ, H., 1978. Fibre cements and fibre concretes. *wiley-interscience, New York*, 219 pp.
- [3] Said, A., Elsayed, M., Abd El-Azim, A., Althoey, F. and Tayeh, B.A., 2022. Using ultra-high performance fiber reinforced concrete in improvement shear strength of reinforced concrete beams. *Case Studies in Construction Materials*, 16, p.e01009.
- [4] Aisheh, Y.I.A., Atrushi, D.S., Akeed, M.H., Qaidi, S. and Tayeh, B.A., 2022. Influence of polypropylene and steel fibers on the mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 17, p.e01234.
- [5] Ahmed, H.U., Faraj, R.H., Hilal, N., Mohammed, A.A. and Sherwani, A.F.H., 2021. Use of recycled fibers in concrete composites: A systematic comprehensive review. *Composites Part B: Engineering*, 215, p.108769.
- [6] Sdiri, A., Kammoun, S. and Daoud, A., 2021. Numerical modeling of the interaction between reinforcement and concrete at early age—A comparison between glass fiber reinforced polymer and steel rebars. *Structural Concrete*, 22(1), pp.168-182.
- [7] Marcalikova, Z., Racek, M., Mateckova, P. and Cajka, R., 2020. Comparison of tensile strength fiber reinforced concrete with different types of fibers. *Procedia structural integrity*, 28, pp.950-956.

- [۸] رحیم نژاد و همکاران، ۱۳۹۸. بررسی مکانیزم شکست تیرهای بتن مسلح با الیاف فولادی به روش اجزای محدود. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رامسر.
- [۹] اکبرزاده و همکاران، ۱۳۹۷. بررسی تاثیر الیاف پلیمری بر خواص مکانیکی شاتکریت. پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد. دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- [10] He, W., Hao, W., Meng, X., Zhang, P., Sun, X. and Shen, Y., 2021. Influence of graphite powder on the mechanical and acoustic emission characteristics of concrete. *Buildings*, 12(1), p.18.
- [۱۱] حق طلب و همکاران، ۱۳۹۰. نرم افزار طرح مخلوط بتن به روش ملی ایران C. سومین کنفرانس ملی بتن ایران، تهران، <https://civilica.com/doc/119714>
- [12] Zeyad, A.M., 2020. Effect of fibers types on fresh properties and flexural toughness of self-compacting concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), pp.4147-4158.
- [13] Cao, S., Zheng, D., Yilmaz, E., Yin, Z., Xue, G. and Yang, F., 2020. Strength development and microstructure characteristics of artificial concrete pillar considering fiber type and content effects. *Construction and Building Materials*, 256, p.119408.
- [14] Al-Najjar, A., Sultan, H.K. and Musa, S.S., 2020. Polypropylene Fibers to Resist Concrete Spalling Caused by Fire. *Test Engineering and Management*, 83, pp.8914-8924.
- [15] Kim, J.J. and Yoo, D.Y., 2019. Effects of fiber shape and distance on the pullout behavior of steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 103, pp.213-223.
- [16] Wang, X., He, J., Mosallam, A.S., Li, C. and Xin, H., 2019. The effects of fiber length and volume on material properties and crack resistance of basalt fiber reinforced concrete (BFRC). *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019.
- [17] Khooshechin, M. and Tanzadeh, J., 2018. Experimental and mechanical performance of shotcrete made with nanomaterials and fiber reinforcement. *Construction and Building Materials*, 165, pp.199-205.
- [18] Yu, H., Wu, L., Liu, W.V. and Pourrahimian, Y., 2018. Effects of fibers on expansive shotcrete mixtures consisting of calcium sulfoaluminate cement, ordinary Portland cement, and calcium sulfate. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*, 10(2), pp.212-221.
- [19] Lee, S.J., Eom, A.H., Ryu, S.J. and Won, J.P., 2016. Optimal dimension of arch-type steel fibre-reinforced cementitious composite for shotcrete. *Composite Structures*, 152, pp.600-606.
- [20] Bryne, L.E., Ansell, A. and Holmgren, J., 2014. Investigation of restrained shrinkage cracking in partially fixed shotcrete linings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 42, pp.136-143.
- [21] Kaufmann, J.P., 2014, May. Durability performance of fiber reinforced shotcrete in aggressive environment. In *World Tunnelling Congress* (p. 7).
- [22] Standard, A.S.T.M., 2003. C33, Specification for Concrete Aggregates. ASTM International.

[۲۳] باقرپور و همکاران، ۱۳۹۰. ارزیابی سیستم نگهداری دائم فضاهای زیر زمینی با استفاده از شاتکریت الیافی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان.

[24] Dewar, J., 2003. Concrete mix design. *Advanced Concrete Technology*, pp.3-40.

[25] Potrzebowski, J., 1983. The splitting test applied to steel fibre reinforced concrete. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 5(1), pp.49-53.



## Investigating the Effect of Using Steel Fibers on the Strength Parameters of Concrete

Seyfoldin Rezaei<sup>1</sup>, Fereydon Khosravi<sup>1</sup>, Yaser Alilou Kasjini<sup>1</sup>, Jafar Khani<sup>1\*</sup>

1- Water, Energy and Environment Center, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.

Received: 04. January. 2024 Accepted: 14. March. 2024

(\*Corresponding author: kpkhanij@ihu.ac.ir)

---

### *Keywords*

Reinforced concrete  
Steel Fibers  
Mixing plan  
cement content  
Strength Parameters of Concrete

---

### *Final English Extended Abstract*

Nowadays, concrete structures are subjected to various stresses depending on their applications. These structures typically exhibit high compressive strength but perform poorly under tensile and flexural stresses. To enhance the resistance of concrete against tensile and flexural forces, reinforcement is necessary. This study investigates the properties of steel fiber-reinforced concrete. Due to the nature of this research, which was conducted for a national defense project, certain limitations were encountered in material selection. In this study, 16 mix designs were prepared with cement contents ranging from 200 to 350 kg/m<sup>3</sup> (cement content) and fiber volumes between 0.5% and 1.5%. After 28 days of curing under standard conditions, mechanical properties of the fiber-reinforced concrete, including compressive strength, tensile strength, and flexural strength, were evaluated. The results indicate that the increase in compressive and tensile strengths of concrete is dependent on the cement content and the percentage of steel fibers used, respectively. The addition of steel fibers to concrete enhances its compressive strength; however, this increase is influenced by the cement content. For instance, in low-cement-content mixes, an increase in fiber volume may even have a negative effect on compressive strength. In mixes with a cement content of 350 kg/m<sup>3</sup>, the addition of 0.5% fibers resulted in a 10–20% increase in compressive strength. The use of steel fibers significantly improves the splitting tensile strength of concrete. The extent of this improvement depends on the fiber volume, with higher fiber volumes leading to more substantial increases in tensile strength. For example, the tensile strength increased by up to 54% when 1.5% fibers were used. The addition of steel fibers delays the formation of the first crack in the concrete section, thereby enhancing flexural strength. The increase in flexural strength is directly related to the fiber volume, with higher fiber volumes leading to greater flexural strength. However, the rate of increase in flexural strength diminishes beyond 0.5% fiber volume in mixes with a cement content of 350 kg/m<sup>3</sup>. The results from the stress-strain curve analysis of steel-fiber-reinforced concrete reveal that the addition of steel fibers does not significantly affect the ascending branch of the curve. In contrast, the descending branch is notably influenced by the presence of steel fibers. As the fiber volume increases, the concrete exhibits more ductile behavior, and its energy absorption capacity under compressive loading improves. Additionally, the rate of compressive strength degradation slows down. With an increase in the concrete strength grade, the effect of fiber addition on enhancing compressive, tensile, and flexural strengths becomes more pronounced. Steel fibers inhibit crack propagation and prevent the formation of deep cracks. Furthermore, as the fiber volume increases, the concrete demonstrates greater ductility, improved energy absorption capacity, and a slower rate of compressive strength degradation.

---