

## بررسی تأثیر الیاف ماکروسنتتیک و فولادی بر نمودار تنش- کرنش بتن الیافی و تأثیر متقابل آن بر دوام بتن

رضا فرخ زاد \*

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

بهروز کریمی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

### چکیده

امروزه بتن یکی از اصلی ترین مصالح در صنعت ساخت و ساز محسوب شده، ولی این ماده ساختمانی علاوه بر مزایایی که دارد ترد و شکننده بوده و همچنین مقاومت کششی آن نسبت به مقاومت فشاری پایین تر می باشد. با توجه به گسترش علم و تکنولوژی استفاده از الیاف مختلف نظیر فلزی، پلیمری، شیشه ای و طبیعی در صنعت ساخت و ساز به عنوان یک گام موثر در رفع ضعف مقاومت کششی بتن معمولی محسوب شده است. لذا در این پژوهش به بررسی الیاف فولادی و ماکروسنتتیک بر مدل رفتاری بتن و تأثیر متقابل بر خواص مکانیکی (مقاومت فشاری، کششی، مدول الاستیسیته) و دوامی (مقاومت الکتریکی، میزان نفوذ پذیری در بتن تحت فشار آب) پرداخته شده است. بدین منظور در این تحقیق از ۱۰ طرح اختلاط با سه نوع الیاف متفاوت شامل الیاف فولادی و ماکروسنتتیک پلی الفین و ماکروسنتتیک پلی پروپیلن با ۰/۵، ۱، ۱/۵ درصد حجمی مورد آزمایش قرار گرفت که نتایج نشان می دهد استفاده از الیاف فولادی تأثیر به سزایی روی مقاومت فشاری در درصد بالا تر از ۰/۵ نداشته و مقاومت کششی را به صورت محسوسی افزایش داده و مقاومت الکتریکی را کاهش می دهد و همچنین الیاف ماکروسنتتیک پلی الفین و پلی پروپیلن تأثیر چندانی روی مقاومت فشاری نداشته و حتی در درصد های بالا مقاومت فشاری را کاهش داده است و تأثیر مثبتی روی مقاومت کششی و مقاومت الکتریکی و نفوذ آب تحت فشار داشته است و استفاده از الیاف باعث افزایش مساحت زیر منحنی تنش-کرنش شده است.

واژه‌های کلیدی: بتن الیافی، الیاف فولادی، ماکروسنتتیک، خواص مکانیکی، دوام.

\* نویسنده مسئول: r.farokhzad@qiau.ac.ir

## ۱- مقدمه

بولت<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی تاثیر استفاده از الیاف مصنوعی بر خواص فیزیکی و مکانیکی بتن پرداختند، در این آزمایش از سه نوع الیاف فلزی، پلی پروپیلن، پلی استر استفاده کردند و مشاهده نمودند که نوع الیاف و ساختار هندسی آنها بر افت بتن تأثیر می‌گذارد و کمترین اسلامپ برای پلی استر بوده و همچنین که با افزایش مقدار سختی الیاف موجب کاهش اسلامپ می‌شود و الیاف باعث بالا رفتن مقدار هوای فشرده در بتن شده و بر وزن واحد حجم بتن تازه تأثیر نمی‌گذارد و همچنین باعث کاهش جذب آب شده و مقاومت در برابر عوامل انجماد را افزایش می‌دهد [۸]. کاگیانو<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی خصوصیات تجربی واکنش پس از ترک خوردگی در بتن الیافی ترکیبی از پلی پروپیلن و فولادی پرداختند الیاف فولادی و پلی پروپیلن را به صورت ترکیبی با هم مورد استفاده قرار دادند استفاده ترکیبی از این الیاف تأثیری بر مقاومت فشاری نداشته، اما نقش کلیدی در رفتار بتن پس از ترک خوردگی در فشار و خمش ایفا می‌کنند [۹]. پاکروان<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی تقویت بتن با الیاف کوتاه ترکیبی پرداختند و مشاهده کردند که الیاف با مقاومت کم مانند پلی پروپیلن، نایلن، الیاف اکریلیک در بهبود شکل‌پذیری و کاهش ترک خوردگی مؤثر هستند و الیاف با مقاومت بالا مانند کربن، پلی وینیل الکل، فولاد، آزیست، الیاف شیشه مقاومت بتن را افزایش می‌دهند ولی رفتار شکننده ذاتی آنها باعث بهبود انعطاف پذیری نمی‌شود و مشاهده کردند که هندسه الیاف از جمله اندازه و طول و شکل بر خواص مخلوط بتن نه تنها در حالت سخت بلکه در حالت تازه تأثیر می‌گذارد و کسر حجمی الیاف ترکیبی و نسبت ترکیب، عامل مهمی هست که می‌تواند خواص فیزیکی و مکانیکی بتن مسلح را تعیین کند [۱۰]. سان<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی رفتار تنش-کرنش الیاف ترکیبی فولادی و pva تحت فشار تک محوره پرداختند، مشاهده کردند که استفاده از الیاف ترکیبی در مقایسه با الیاف تکی می‌تواند عملکرد بهتری از خود نشان دهد و استفاده از الیاف pva و الیاف فولادی باعث بالا رفتن قابلیت انعطاف پذیری کامپوزیت سیمانی شده در حالی که استفاده از الیاف pva اثر بسیار محدودی بر مقاومت فشاری داشته

استفاده از الیاف طبیعی، از روزگاران قدیم و به قبل از پیدایش بتن مسلح بر می‌گردد. استفاده تجاری از الیاف آزیست در ماتریس خمیر سیمان در سال ۱۸۹۸ شروع شد. [۱] در اواخر دهه ۱۹۵۰ و اواخر دهه ۱۹۶۰ نشانگر اولین گام برای تولید و ساخت بتن مسلح با الیاف فولادی بوده است [۱-۳]. در سال‌های اخیر استفاده از الیاف صاف از بین رفته است و بیشتر الیاف که مورد استفاده قرار می‌گیرند دارای سطح زبر با دو انتهای قلاب دار هستند یا در طول آن‌ها دارای موج است، این خصوصیات باعث می‌شود که قابلیت مقاومت در برابر خارج شدن الیاف از درون ماتریس‌ها با پایه سیمانی بهبود یابد [۳] زنگ و همکاران [۴] در سال ۲۰۲۰ بر روی الیاف پلیمری (سنتتیک) تحقیقاتی به انجام رسانیدند. این الیاف از لحاظ قطر الیاف به دو دسته ماکرو و میکرو تقسیم می‌شوند به الیاف با قطر معادل بیشتر از ۰/۳ میلیمتر الیاف ماکرو سنتتیک و الیاف با قطر کمتر از ۰/۳ میلیمتر الیاف میکرو سنتتیک گفته می‌شود. در سال ۲۰۰۸ آیین نامه aci به صورت رسمی، آیین نامه بتن الیافی بازنگری شده ارائه نمود. [۲] بالندرن<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۱) به بررسی تأثیر الیاف فولادی بر مقاومت و شکل‌پذیری بتن معمولی و سبک و پر مقاومت پرداختند و نتیجه گرفتند که حجم کم الیاف فولادی باعث افزایش مقاومت کششی سیلندر و مدول گسیختگی می‌شود و اثر بخشی الیاف فولادی بستگی به خواص ماتریس بتن دارد و این بهبود در کشش و خمش برای بتن سبک، بیشتر از بتن معمولی است و با افزایش اندازه نمونه، قدرت تفکیک و مقاومت خمشی کاهش می‌یابد و رفتار شکست ترد می‌شود [۵].

چن<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی عملکرد بتن الیافی فولادی و پرداختند. آن‌ها در این تحقیق نمودار تنش-کرنش بتن الیافی را بر اساس انرژی مورد تحقیق قرار دادند. و در نهایت نتایج را به خواص مکانیکی گسترش دادند [۶]. چایفونتیس<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی تأثیر خواص هندسی و مکانیکی الیاف پلی پروپیلن بر رفتار شکست بتن‌ها با مقاومت کم، متوسط، بالا پرداختند و مشاهده کردند که استفاده از الیاف باعث بهبود در مقاومت کششی، فشاری، مدول گسیختگی می‌شود [۷].

<sup>5</sup> Caggiano

<sup>6</sup> Pakravan

<sup>7</sup> sun

<sup>1</sup> Balendran

<sup>2</sup> Chen

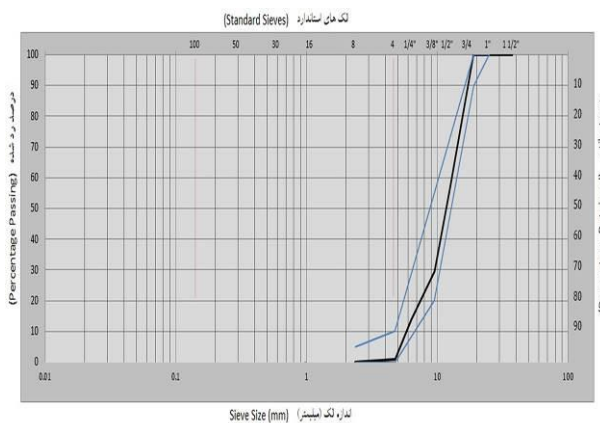
<sup>3</sup> Chifuentes

<sup>4</sup> Bolat

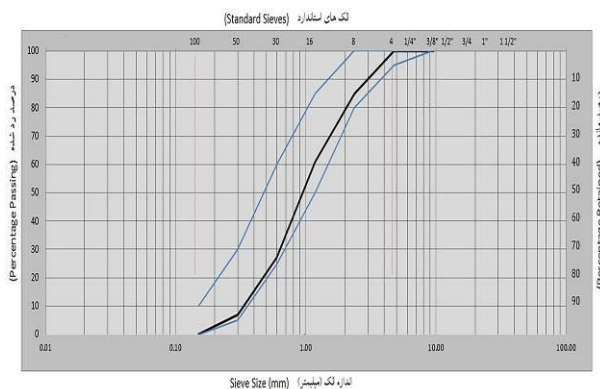
کارخانه سیمان آبیگ بوده که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول (۲) قابل مشاهده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی سنگ دانه ها

سنگ دانه	حداکثر قطر سنگ دانه (mm)	چگالی نسبی	جذب آب (درصد)	مدول نرمی
شن	۱۹	۲/۵۹	۱/۵	-
ماسه	۴/۷۵	۲/۵۱	۲/۱۵	۳/۱۶



شکل ۱- منحنی دانه بندی درشت دانه



شکل ۲- منحنی دانه بندی ریزدانه ها

### ۲-۱-۳- آب

در ساخت مخلوط بتن از آب شرب استفاده شده است.

### ۲-۱-۴- فوق روان کننده

در این تحقیق از فوق روان کننده با پایه شیمیایی پلی کربوکسیلاتی شرکت حدید فام که مدل آن MAGA PLAST و مطابق با استاندارد EN 934-2 و ISIRI 2930 می باشد، استفاده شده

و استفاده از الیاف ترکیبی تأثیر کمی بر مدول الاستیسیته بتن گذاشته است [۱۱]. باسکیو و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی ویژگی مکانیکی بتن حاوی الیاف پلی پروپیلن پرداخته و الیاف جدیدی به نام الیاف بازالت در بتن معرفی نمودند. آن‌ها دریافتند این الیاف باعث کاهش روانی بتن خواهند شد و این کاهش در الیاف فولادی بیشتر است و بیشترین مقاومت مربوط به نمونه حاوی ۱ درصد الیاف فولادی و بعد از آن نمونه با ۰/۷۵ درصد فولادی و ۲۵ درصد پلی پروپیلن است و افزودن سیلکافیوم در طرح اختلاط بر رفتار مقاومتی بتن کمک کرده و الیاف باعث بهبود رفتار تنش-کرنش شده به نحوی که با حفظ تقریبی مدول الاستیسیته، مقاومت افزایش یافت [۱۲].

در این تحقیق، هدف اصلی، دستیابی به مقدار بهینه الیاف در بتن به منظور رسیدن به بهترین عملکرد و بررسی ویژگی‌های مکانیکی و دوامی بتن بوده است و در این تحقیق از یک نوع سیمان و سه نوع الیاف متفاوت برای تهیه مخلوط بتن استفاده شده است. باید این را در نظر داشت که مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان و دانه بندی در تمام آزمایش ثابت نگه داشته شده است و فقط نوع الیاف و درصد آنها تغییر می کند.

### ۲- برنامه آزمایشگاهی

#### ۲-۱-۲- مصالح مصرفی

##### ۲-۱-۱-۲- مصالح سنگی

مصالح سنگی تهیه شده در این تحقیق آزمایشگاهی شامل درشت دانه و ریزدانه بوده است. سنگ دانه های مصرفی از یکی از معادن واقع در قزوین شهرستان آبیگ، معدن قسم تهیه شده است شن مصرفی از نوع رودخانه‌ای با ظاهری شکسته و نسبتاً گرد بوده با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلیمتر (رد شده از الک سه چهارم اینچ) و ماسه مصرفی از نوع رودخانه ای دوبار شسته شده با حداکثر اندازه ۴/۷۵ میلیمتر (رد شده از الک نمره ۴) است. سنگ دانه ها بر اساس استاندارد ۳۰۲ نمونه برداری شده [۱۴] و منحنی دانه بندی سنگ دانه‌ها مورد استفاده در محدوده استاندارد می باشد. مشخصات فیزیکی سنگدانه ها در جدول (۱) و منحنی دانه بندی در شکل (۱) و (۲) آورده شده است.

#### ۲-۱-۲- سیمان

سیمان استفاده شده در این تحقیق سیمان پرتلند نوع ۲ محصول

است. مشخصات فوق روان کننده مصرفی مطابق جدول (۳) است.

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سیمان [۱۵]

خصوصیات فیزیکی	مقدار	فرمول شیمیایی	درصد	فرمول شیمیایی	درصد
گیرش اولیه (دقیقه)	۱۵۴	IR	۰/۴۲	CaO	۶۲/۱۶
گیرش نهایی (دقیقه)	۲۲۱	LOI	۱/۸۲	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۹۶
مقاومت ۷ روزه	۳۵۷	K <sub>2</sub> O	۰/۷۷	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴/۸۹
مقاومت ۲۸ روزه	۵۱۷	Na <sub>2</sub> O	۰/۳۶	SiO <sub>2</sub>	۲۰/۶۵
		SO <sub>3</sub>	۱/۷۹	MgO	۳/۱۴

جدول ۳- مشخصات فوق روان کننده

شرکت	حدید فام
مدل	MEGA PLAST
حالت فیزیکی	مایع
وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )	۱/۰۴ ± ۰/۰۵
رنگ	قهوه ای

### ۲-۱-۵- الیاف

در این آزمایش از الیاف فلزی و الیاف ماکرو سنتتیک پلیمری نوع MEX200 و MEX300 از شرکت میسون تهیه شده است. مشخصات الیاف در جداول (۴) و (۵) و (۶) و تصویر الیاف مورد استفاده در آزمایش در شکل (۳) آورده شده است.



شکل ۳- الیاف فولادی و MEX200 و MEX300

جدول ۴- الیاف فولادی

طول (میلیمتر)	۵۰
ضخامت (میلیمتر)	۰/۸
مقاومت کششی (مگاپاسکال)	۱۱۰۰
وزن مخصوص (گرم بر سانتیمتر مکعب)	۷/۸
نقطه ذوب (سانتی گراد)	۱۵۱۶
رنگ	طوسی
واکنش با قلیا	ندارد
مدول الاستیسیته فولاد (گیگا پاسکال)	۱۸۵

جدول ۵- الیاف ماکرو سنتتیک MEX200

رزین پایه	اولفین اصلاح شده
طول الیاف (میلیمتر)	۴۰
وزن مخصوص (گرم بر سانتیمتر مکعب)	۰/۹۱
مقاومت کششی (مگاپاسکال)	۴۵۰
درجه ذوب (سانتی گراد)	۱۶۰
رنگ	طبیعی (سفید)
جذب آب	صفر
مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)	۶۸،۵

جدول ۶- الیاف ماکرو سنتتیک MEX300

مواد پایه	پلی پروپیلن
طول الیاف (میلیمتر)	۴۰
وزن مخصوص (گرم بر سانتیمتر مکعب)	۰/۹۱
مقاومت کششی (مگاپاسکال)	۷۵۰-۶۰۰
درجه ذوب (سانتی گراد)	۱۶۵
رنگ	طوسی
جذب آب	صفر
مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)	۸۷،۵

### ۲-۲- طرح اختلاط

در این تحقیق از ۱۰ طرح اختلاط با سه نوع الیاف متفاوت شامل الیاف فلزی و ماکرو سنتتیک پلی الفین و ماکرو سنتتیک پلی پروپیلن با ۰/۵، ۱، ۱/۵ درصد حجمی با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵ و مقدار مواد سیمانی ۳۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب ساخته شد و از فوق روان کننده به مقدار ۰/۴ درصد عیار سیمان استفاده شده و در جدول (۷) طرح اختلاط و همچنین جدول (۸) نامگذاری آورده شده است.

سیمان را به مخلوط اضافه کرده و به مدت یک دقیقه میکسر را روشن کرده تا بهم بخورد و پس از آن آب را به صورت کم کم به مصالح اضافه کرده و فوق روان کننده را با یک سوم آب طرح مخلوط کرده و به صورت آرام آرام اضافه کرده و به مدت دو دقیقه هم زده و در نهایت الیاف مورد استفاده طرح به آن اضافه شده و به مدت دو دقیقه در داخل میکسر بهم خورده، در حین اختلاط در صورت چسبیدن مصالح به دیواره میکسر ابتدا میکسر را خاموش کرده و با کاردک دیواره میکسر تمیز کرده تا مصالح به خوبی با هم مخلوط شود و سپس میکسر را روشن نموده و ادامه اختلاط صورت می گیرد. آزمایش اسلامپ مخلوط بتنی مطابق استاندارد ASTM C143 اندازه گیری شده [۱۶] و مقدار آن ۱۱/۵۰ سانتیمتر بوده است. قالب ها را تمیز کرده و سطح داخل قالب با روغن مخصوص، روغنی کرده و پس از ساخت مخلوط بتنی آن را در سه مرحله در قالب بتن ریخته و در هر مرحله که ریخته شد به وسیله میله فولادی (تخماق) یا وسیله مشابه متراکم می کنیم و به وسیله ماله سطح آن را صاف می کنیم. پس از قالب گرفتن به مدت ۲۴ ساعت جهت سخت شدن بتن در شرایط دمایی و رطوبتی ثابت، نگهداری شده و پس از ۲۴ ساعت نمونه ها را از قالب ها خارج کرده و جهت عمل آوری آن ها را در حوضچه آب با دمای تقریبی  $20 \pm 2$  درجه سانتی گراد به مدت ۲۸ روزه قرار می دهیم.

### ۳- آزمایش های انجام شده

#### ۳-۱- آزمایش تعیین مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد [۱۷] B.S.1881-116 جهت اندازه گیری مقاومت فشاری نمونه های مکعبی  $10 \times 10 \times 10$  سانتیمتر که در شرایط استاندارد عمل آوری شده و در سن ۲۸ روزه و طبق استاندارد با سرعت ۳ KN/S مورد آزمایش قرار گرفته است. نحوه قرار گیری نمونه در شکل (۴) آورده شده است.

#### ۳-۲- آزمایش تعیین مقاومت کششی (برزیلی)

آزمایش مقاومت کششی بر اساس استاندارد ASTM C496 [۱۸] جهت اندازه گیری مقاومت کششی نمونه های استوانه ای با ارتفاع ۲۰ سانتیمتر و قطر ۱۰ سانتیمتر که در شرایط استاندارد عمل آوری شده و در سن ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفته است. نحوه قرار گیری نمونه در شکل (۵) آورده شده است.

### جدول ۷- طرح اختلاط

طرح اختلاط بتن (بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب)	
وزن (کیلوگرم)	نام مصالح
۳۱۰	سیمان
۱۵۵	آب
۱۱۶۱	ماسه
۷۷۴	شن
۳۹	۰/۵ درصد حجمی
۷۸	۱ درصد حجمی
۱۱۷	۱/۵ درصد حجمی
۴/۵۵	۰/۵ درصد حجمی
۹/۱	۱ درصد حجمی
۱۳/۶۵	۱/۵ درصد حجمی
۴/۵۵	۰/۵ درصد حجمی
۹/۱	۱ درصد حجمی
۱۳/۶۵	۱/۵ درصد حجمی

### جدول ۸- نامگذاری نمونه

نام گذاری	حجم الیاف (درصد)	طول الیاف (میلیمتر)	نوع نمونه
بدون الیاف	-	-	بدون الیاف
ST-0.5	۰/۵	-	فولادی
ST-1	۱	۵۰	فولادی
ST-1.5	۱/۵	-	فولادی
M2-0.5	۰/۵	-	پلی الفین
M2-1	۱	۴۰	پلی الفین
M2-1.5	۱/۵	-	پلی الفین
M3-0.5	۰/۵	-	پروپیلن
M3-1	۱	۴۰	پروپیلن
M3-1.5	۱/۵	-	پروپیلن

### ۳-۲- نحوه اختلاط و آماده سازی نمونه ها

برای ساخت بتن، ابتدا مطابق طرح اختلاط وزن کشی انجام شده، مصالح شامل شن و ماسه را درون میکسر ریخته و به مدت یک دقیقه شن و ماسه را به صورت خشک مخلوط می کنیم و سپس



شکل ۶- آزمایش اندازه گیری مدول الاستیسیته و منحنی تنش- کرنش

تعریف مدول سکانت را شیب خطی که از مبدا به نقطه‌ای از منحنی تنش-کرنش که متناظر ۴۰ درصد تنش حداکثر است وصل می شود و مدول الاستیسیته و تری را اصلاح شده ای از تعریف مدول سکانت دانسته با این تفاوت که به جای مبدا از یک نقطه منحنی که متناظر با کرنش ۰,۰۰۰۰۵ می باشد و دلیل آن به جهت تصحیح تعقر کمی است که اغلب در شروع تنش-کرنش مشاهده می شود.

### ۳-۴- آزمایش مقاومت الکتریکی

جهت اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بر روی آزمون‌های استاندارد بتنی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتیمتر در سن ۲۸ روزه توسط دستگاه تست مقاومت الکتریکی انجام می گردد. این آزمایش برای تعیین میزان مقاومت بتن در برابر عبور جریان الکتریکی که یکی از پارامترهای مهم مربوط به خوردگی بتن است استفاده می گردد. در این آزمایش فرکانس جریان روی ۱ کیلو هرتز تنظیم شده است. نحوه قرارگیری نمونه در شکل (۷) آورده شده است.



شکل ۷- نمونه مکعبی تحت آزمایش مقاومت الکتریکی



شکل ۴- قرار گیری نمونه زیر جک مقاومت فشاری

مقدار تنش کششی از رابطه (۱) محاسبه می شود.

$$T = \frac{2P}{\pi DL} \quad (1)$$

که در آن؛ T تنش کششی بر حسب مگاپاسکال، P بار شکست بر حسب نیوتن، L طول نمونه بر حسب میلیمتر و D قطر استوانه بر حسب میلیمتر می باشد.



شکل ۵- آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدگی (برزیلی)

### ۳-۳- آزمایش مدول الاستیسیته و نمودار تنش-کرنش

آزمایش مدول الاستیسیته بر اساس استاندارد ASTM C469 [۱۹] جهت اندازه گیری مدول الاستیسیته نمونه‌های استوانه‌ای با ارتفاع ۳۰ سانتیمتر و قطر ۱۵ سانتیمتر که در شرایط استاندارد عمل آوری شده و در سن ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفته است و سرعت بار گذاری مطابق استاندارد ۰/۰۲۱ میلیمتر بر ثانیه تنظیم شده است. به وسیله رابطه (۲) مدول الاستیسیته بدست می آید. در شکل (۶) تصویر دستگاه و نحوه قرارگیری نمونه آورده شده است.

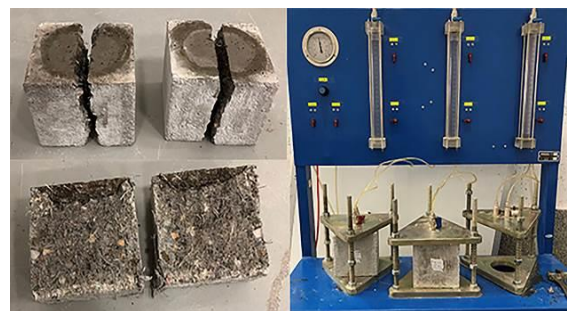
$$E = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0.00005} \quad (2)$$

که در آن؛ E مدول الاستیسیته، S<sub>2</sub> تنش معادل ۴۰ درصد نیروی ماکزیمم، S<sub>1</sub> تنش معادل کرنش طولی ۰,۰۰۰۰۵، ε<sub>2</sub> کرنش طولی حاصل شده با تنش S<sub>2</sub> می باشد.

### ۳-۵- آزمایش نفوذ آب تحت فشار

الیاف MEX300 منحنی رشد به ترتیب ۶/۰۲ و ۳/۳۱ و ۲/۱۰- درصد بوده است که بیشترین افزایش برای بتن حاوی ۰/۵ درصد الیاف بوده با توجه نتایج مشاهده شد که در هر سه نوع الیاف با ۰/۵ درصد الیاف مقاومت فشاری افزایش داشته می توان دلیل آن را پل زنی الیاف بین ترک ها دانست و در درصد های حجمی پایین الیاف تأثیر بیشتری بر مقاومت فشاری داشته و با اضافه کردن درصد الیاف بیشتر از ۰/۵ درصد روند نزولی مقاومت فشاری را شاهد هستیم که می توان دلیل کاهش مقاومت فشاری آن را گلوله گلوله شدن الیاف در درصد های بالا دانست و همچنین دومین دلیل جمع شدگی و به هم خوردن ماتریس بتن بوده و سومین علت نیز می تواند به دلیل جلوگیری از تراکم کافی در بتن باشد. در الیاف فولادی و الیاف MEX200 و الیاف MEX300 بهینه ترین درصد برای هر سه نوع الیاف در مقاومت فشاری، ۰/۵ درصد حجمی بتن بوده است که با کمترین درصد بالاترین مقاومت را داشته است.

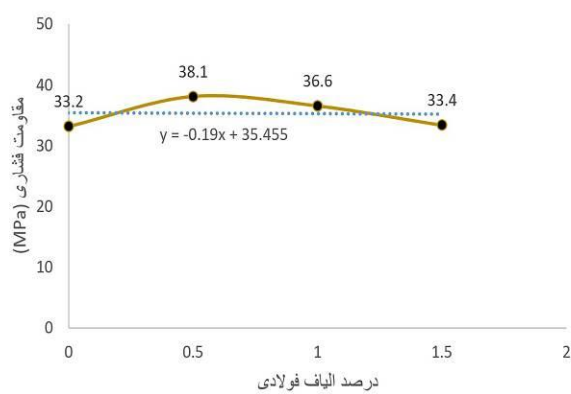
آزمایش نفوذ آب تحت فشار بر اساس استاندارد BS EN 12390 [۲۰] برای تعیین میزان نفوذ پذیری و دوام بتن در برابر عوامل بیرونی انجام می شود. جهت انجام این آزمایش از نمونه های مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ سانتیمتر که در شرایط استاندارد عمل آوری شده و در سن ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفته است. طریقه انجام آزمایش به این صورت می باشد که نمونه را بین دو صفحه فلزی دستگاه قرار داده و سپس آن را آب بندی کرده فشار هوا را روی ۵ بار تنظیم کرده و پس از ۷۲ ساعت نمونه را از دستگاه خارج کرده و همچنین نمونه را توسط جک مخصوص به دو نیم تبدیل کرده و میزان بیشترین نفوذ آب را به وسیله کولیس اندازه گیری کرده و نحوه قرار گیری و دو نیم شدن نمونه ها در شکل (۸) آورده شده است.



شکل ۸- دستگاه آزمایش نفوذ آب تحت فشار و دو نصف کردن نمونه های حاوی الیاف

جدول ۹- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نوع الیاف	درصد حجمی الیاف	مقاومت فشاری MPa
شاهد	۰	۳۳/۲
فولادی	۰/۵	۳۸/۱
	۱	۳۶/۶
	۱/۵	۳۳/۴
Mex200	۰/۵	۳۶/۱
	۱	۳۳/۶
	۱/۵	۳۳/۲
Mex300	۰/۵	۳۵/۲
	۱	۳۴/۳
	۱/۵	۳۲/۵



شکل ۹- مقاومت فشاری با الیاف فولادی

### ۴- ارائه و تفسیر نتایج

#### ۴-۱- مقاومت فشاری

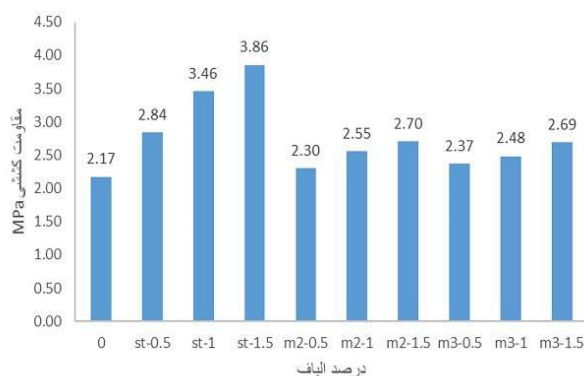
نتایج حاصل از میانگین مقاومت فشاری سه نمونه مکعبی برای هر طرح اختلاط در سن ۲۸ روزه در جدول (۹) و نمودار آن در شکل (۹) تا (۱۱) آورده شده است که نشان می دهد با اضافه کردن ۰/۵ و ۱ و ۱/۵ درصد حجمی الیاف فولادی منحنی رشد به ترتیب ۱۴/۷۵ و ۱۰/۲۴ و ۰/۶ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته که بیشترین افزایش برای ۰/۵ درصد الیاف بوده و با اضافه شدن بیشتر از ۰/۵ درصد الیاف، مقاومت فشاری به صورت نزولی کاهش پیدا کرده است و در الیاف MEX200 منحنی رشد به ترتیب ۸/۷۳ و ۱/۲ و ۳/۰۱- درصد بوده که بیشترین افزایش برای ۰/۵ درصد الیاف بوده و حتی مشاهده شد که در ۱/۵ درصد الیاف مقاومت فشاری از بتن بدون الیاف (شاهد) کمتر شده است و در

فوق با مرجع شماره [۲۲] نیز مطابقت دارد.

که با توجه به نتایج استفاده از الیاف فولادی نسبت به الیاف ماکروسنتتیک مقاومت کششی را به طور قابل توجهی افزایش می دهد و همچنین به خاطر شکل ظاهری الیاف فولادی (دمبلی شکل بودن انتهای دو سر آنها) گیرداری آن در بتن بیشتر شده و همچنین الیاف MEX200 به دلیل داشتن شکل موجدار نسبت به الیاف MEX300 مقاومت کششی بالاتری داشته و همچنین می توان بیان نمود با زیاد شدن تعداد الیاف در ناحیه دو نیم شدگی باعث شده بتن کاملاً مسلح شده و مقاومت کششی را افزایش پیدا کند و بیشترین افزایش برای بتن حاوی الیاف فولادی ۱/۵ درصد بوده است.

جدول ۱۰- نتایج آزمایش مقاومت کششی

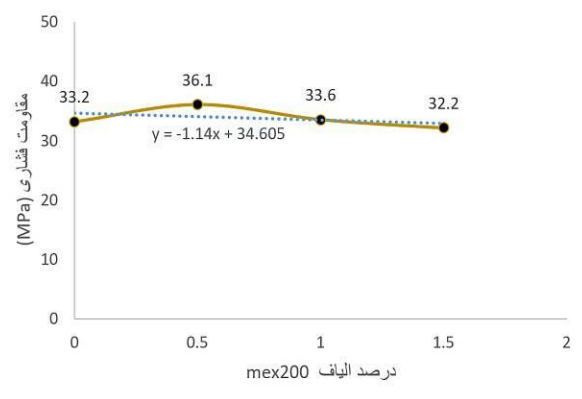
نوع الیاف	درصد حجمی الیاف	مقاومت کششی MPa
شاهد	۰	۲/۱۷
فولادی	۰/۵	۲/۸۴
	۱	۳/۴۶
	۱/۵	۳/۸۶
	۰/۵	۲/۳۰
Mex200	۱	۲/۵۵
	۱/۵	۲/۷۰
	۰/۵	۲/۳۷
Mex300	۱	۲/۴۸
	۱/۵	۲/۶۹



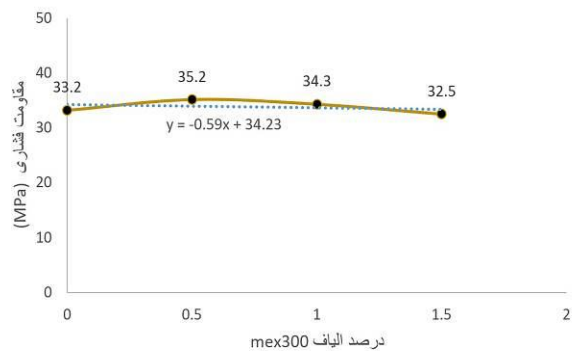
شکل ۱۲- مقاومت کششی با الیاف فولادی و MEX200 و MEX300

### ۴-۳- مدول الاستیسیته و نمودار تنش - کرنش

نتایج حاصل از میانگین آزمایش مدول الاستیسیته برای دو نمونه



شکل ۱۰- مقاومت فشاری با الیاف MEX200



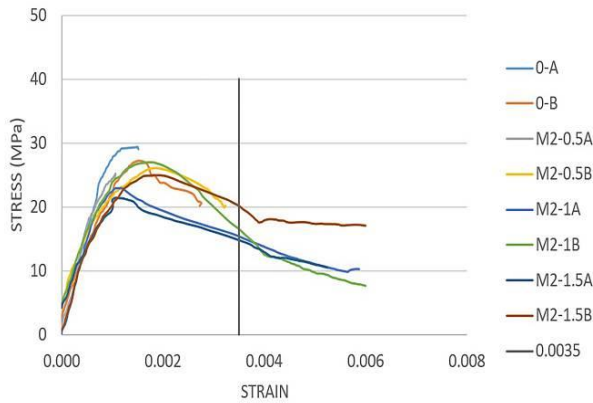
شکل ۱۱- مقاومت فشاری با الیاف MEX300

در مرجع [۲۳] در مورد الیاف فولادی مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج حاصل در این تحقیق مطابقت خوبی وجود دارد.

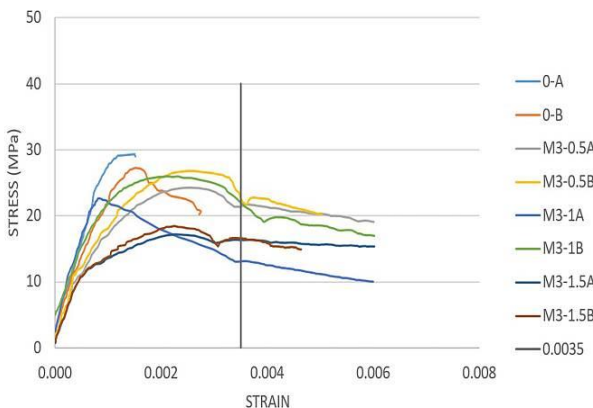
### ۴-۲- مقاومت کششی (برزیلی)

نتایج حاصل از میانگین مقاومت کششی، سه نمونه استوانه ایی برای هر طرح اختلاط در سن ۲۸ روزه در جدول (۱۰) و نمودار آنها در شکل (۱۲) آورده شده است. می دانیم که بتن معمولی دارای مقاومت کششی پایین می باشد با توجه به نتایج آزمایش مشاهده می شود که استفاده از الیاف به طور کلی باعث بالا رفتن مقاومت کششی و کاهش عرض ترک خوردگی بتن می شود. مقاومت کششی نمونه های بتنی حاوی ۰/۵ و ۱ و ۱/۵ درصد الیاف فولادی نسبت به بتن شاهد به ترتیب ۳۰/۸۷ و ۵۹/۴۴ و ۷۷/۸۸ درصد افزایش یافته است و در الیاف MEX200 به ترتیب ۵/۹۹ و ۱۷/۵۱ و ۲۴/۴۲ درصد افزایش پیدا کرده و همچنین در الیاف MEX300 به ترتیب ۹/۲۱ و ۱۴/۲۸ و ۲۳/۹۶ درصد افزایش داشته است. میزان استفاده الیاف در بتن با میزان افزایش مقاومت کششی بتن رابطه تقریباً خطی ایجاد کرده است که قسمتی از نتایج





شکل ۱۴- نمودار تنش- کرنش با الیاف MEX200



شکل ۱۵- نمودار تنش- کرنش با الیاف MEX300

جدول ۱۱- مساحت زیر نمودارها

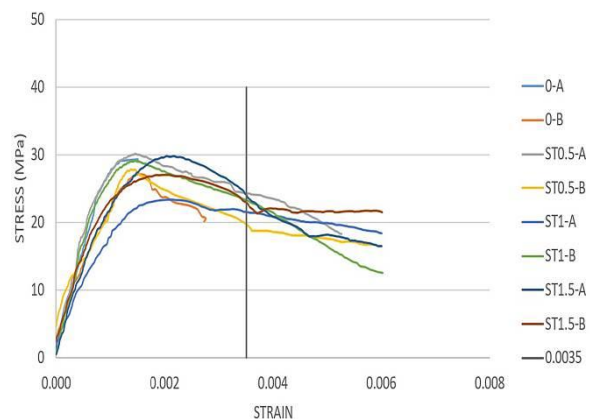
الیاف	مساحت زیر نمودار (MPa.mm)
شاهد	۰/۰۴۳۲
الیاف	۰/۱۱۹۹
فولادی	۰/۱۲۱۸
	۰/۱۳۱۴
الیاف MEX200	۰/۰۶۸۶
	۰/۰۹۵۴
	۰/۰۹۷۰
الیاف MEX300	۰/۱۱۲۳
	۰/۱۰۶۱
	۰/۰۷۹۹

#### ۴-۴- مقاومت الکتریکی

نتایج حاصل از میانگین مقاومت الکتریکی دو نمونه مکعبی برای هر طرح اختلاط در سن ۲۸ روزه با فرکانس ۱ KHZ در شکل (۱۹) تا (۲۱) آورده شده است.

استوانه‌ایی برای هر طرح اختلاط در سن ۲۸ روزه در شکل های (۱۳) تا (۱۸) و در جدول (۱۱) مساحت زیر نمودارها و جدول (۱۲) مقدار مدول سکانت و مدول وتری آورده شده است. مساحت زیر نمودار هر یک از منحنی ها نشان می دهد که استفاده از الیاف باعث زیاد شدن سطح زیر منحنی، نسبت به بتن شاهد شده است بیانگر آن می باشد که استفاده از الیاف باعث بالا رفتن جذب انرژی در بتن شده است در الیاف فولادی و MEX200 این افزایش به صورت صعودی بوده و با اضافه شدن درصد الیاف مساحت زیر نمودار بیشتر شده و بیشترین مساحت برای ۱/۵ درصد حجمی الیاف فولادی بوده است که بیانگر افزایش طاقت و ظرفیت جذب انرژی می باشد ولی در الیاف MEX300 این افزایش در ۰/۵ درصد خود به حداکثر رسیده و با افزایش الیاف روند نزولی مساحت را شاهد هستیم و می توان دلیل این کاهش را شکل صاف این الیاف دانسته و زیاد شدن مقدار این الیاف باعث گلوله گلوله شدن الیاف در بتن و برهم خوردن ماتریس بتن می شود.

همچنین مدول الاستیسیته سکانت شیب خطی است که از مبدا به نقطه ای از منحنی تنش کرنش که متناظر با ۴۰ درصد تنش حداکثر وصل می شود و همچنین مدول الاستیسیته وتری حالت اصلاح شده آن بوده است [۲۱] هر چه شیب این نمودار بیشتر باشد نشانه ی ترد شدن بتن است. با توجه به جدول (۱۲) ملاحظه می شود استفاده از الیاف فولادی و ماکروستتیک در بتن در درصدهای بیشتر از ۱ باعث کم شدن مدول الاستیسیته شده و مقدار مدول سکانت یک مقدار بیشتر از مدول الاستیسیته وتری بوده که این افزایش به خاطر تقعر در قسمت ابتدای شروع نمودار بوده که در مدول الاستیسیته وتری آن را اصلاح کرده اند.

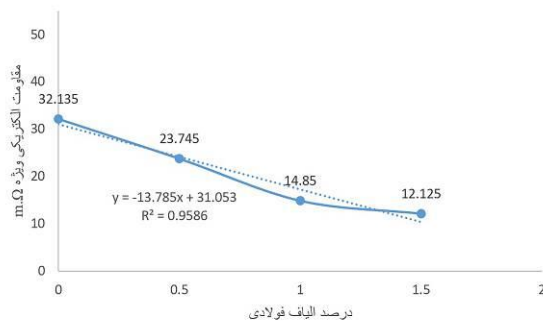


شکل ۱۳- نمودار تنش- کرنش با الیاف فولادی

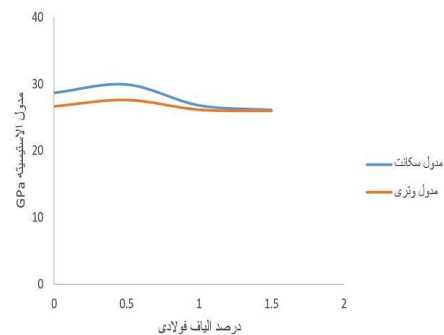
با بالا رفتن مقاومت الکتریکی جریان عبوری از بتن کاسته شده و خوردگی کمتر می شود، با توجه به نتایج نمونه های حاوی الیاف مشاهده می شود که با اضافه کردن الیاف فولادی مقاومت الکتریکی کاهش پیدا کرده است به این دلیل که الیاف فولادی رسانا بوده و باعث می شود انتقال جریان در بتن به راحتی صورت گیرد با افزایش درصد الیاف تعداد الیاف بیشتر شده و انتقال جریان هم بیشتر می شود ولی در الیاف MEX200 و MEX300 به خاطر جنس و رسانا بودن آنها مقاومت الکتریکی را به خوبی افزایش داده اند که می توان بیان کرد استفاده از الیاف ماکروسنتتیک خوردگی را کاهش می دهند.

جدول ۱۲- مدول الاستیسیته

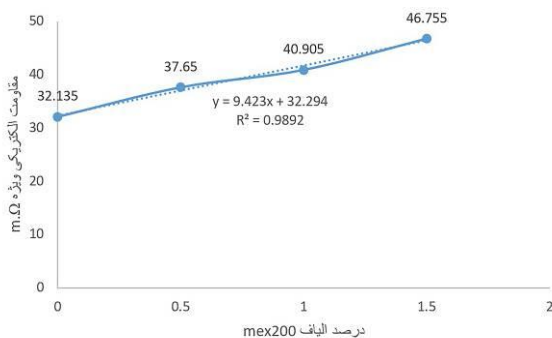
الیاف	مدول سکانت GPa	مدول وتری GPa
شاهد	۲۸/۶۷	۲۶/۶۵
الیاف فولادی	۲۹/۹۳	۲۷/۶۲
الیاف mex200	۲۶/۷۷	۲۶/۱۳
الیاف mex300	۲۶/۰۸	۲۵/۹۵
الیاف mex200	۲۹/۱۰	۲۸/۲۹
الیاف mex200	۲۷/۸۲	۲۷/۲۵
الیاف mex200	۲۴/۶۱	۲۵/۴۲
الیاف mex300	۲۸/۱۴	۲۸/۰۹
الیاف mex300	۲۷/۷۴	۲۷/۴۹
الیاف mex300	۲۲/۸۹	۲۱/۱۵



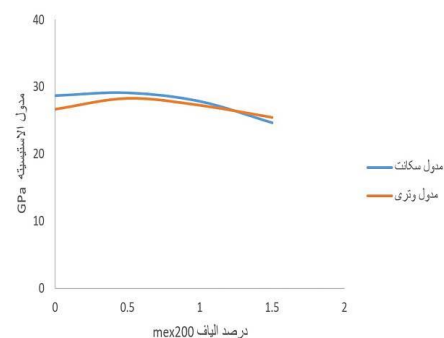
شکل ۱۹- مقاومت الکتریکی ویژه با الیاف فولادی



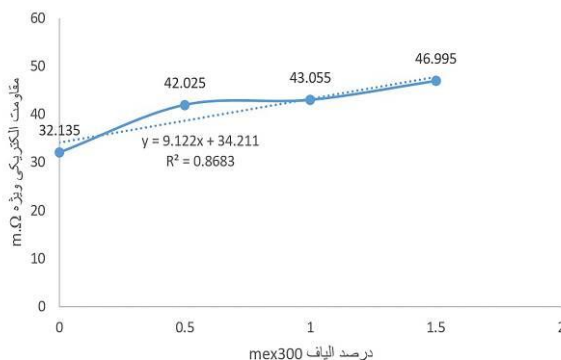
شکل ۱۶- مدول الاستیسیته با الیاف فولادی



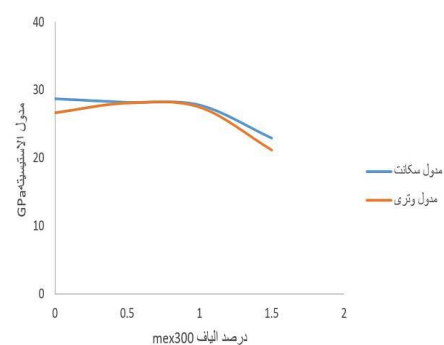
شکل ۲۰- مقاومت الکتریکی ویژه با الیاف MEX200



شکل ۱۷- مدول الاستیسیته با الیاف MEX200



شکل ۲۱- مقاومت الکتریکی ویژه با الیاف MEX300

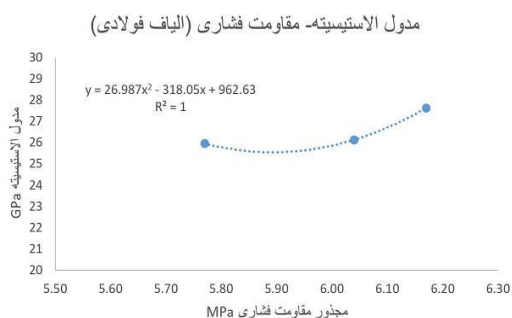


شکل ۱۸- مدول الاستیسیته با الیاف MEX300

#### ۴-۶- بررسی وجود رابطه میان خصوصیات نمودار

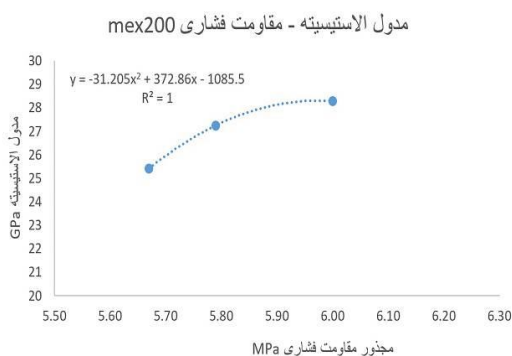
##### مدول الاستیسیته با مجذور مقاومت فشاری

در شکل (۲۵) تا (۲۷) نمودار مدول الاستیسیته-مجزور مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف فولادی و ماکرو سنتتیک MEX200 و MEX300 در سن ۲۸ روزه آورده شده است. با توجه به صعودی بودن این نمودارها که با افزایش مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته افزایش پیدا کرده که نشان دهنده رابطه مستقیم این دو می باشد و در آن شکل ها رابطه و ضریب همبستگی آورده شده است.



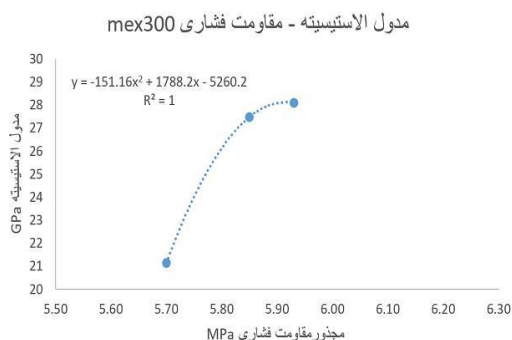
#### شکل ۲۵- نمودار مدول الاستیسیته-مجزور مقاومت فشاری با

##### الیاف فولادی



#### شکل ۲۶- نمودار مدول الاستیسیته-مجزور مقاومت فشاری با

##### الیاف MEX200

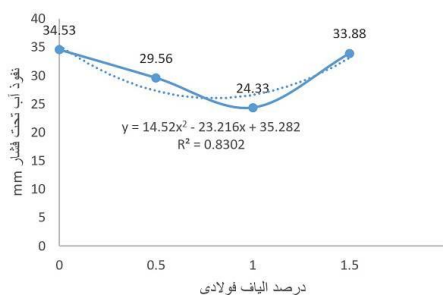


#### شکل ۲۷- نمودار مدول الاستیسیته-مجزور مقاومت فشاری با

##### الیاف MEX300

#### ۴-۵- آزمایش نفوذ آب تحت فشار

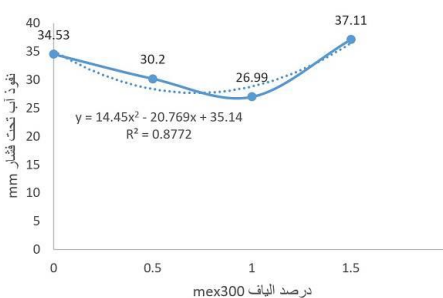
نتایج حاصل از میانگین آزمایش دو نمونه ی مکعبی برای هر طرح اختلاط در سن ۲۸ روزه در شکل (۲۲) تا (۲۴) آورده شده است که نشان می دهد که نفوذ پذیری نمونه ها با استفاده از الیاف کاهش یافته است که کمترین نفوذ پذیری برای هر سه نوع الیاف، ۱ درصد حجمی بتن بوده و استفاده از الیاف فولادی و MEX200 و MEX300 به مقدار ۱ درصد به ترتیب ۲۹/۵۳ و ۲۰/۰۱ و ۲۱/۸۳ درصد نفوذ پذیری بتن را کاهش داده که می توان علت آن را، کاهش ریز ترک ها و ترک خوردگی بتن دانست و همچنین استفاده بیشتر از ۱ درصد الیاف در هر سه نوع باعث افزایش عمق نفوذ شده که دلیل آن را می توان زیاد شدن تعداد الیاف و گلوله گلوله شدن آنها و ایجاد منافذ ریز و همچنین تخلخل در داخل بتن دانست.



#### شکل ۲۲- نفوذ آب تحت فشار الیاف فولادی



#### شکل ۲۳- نفوذ آب تحت فشار الیاف MEX200



#### شکل ۲۴- نفوذ آب تحت فشار الیاف MEX300

## ۵- نتیجه گیری

بر اساس تحقیقات انجام شده نتایج زیر بیان می شود:

دلیل آن را زیاد شدن و گلوله گلوله شدن الیاف و ایجاد منافذ ریز و تخلخل در بتن دانست.

- با توجه به نتایج آزمایش ها، بهینه ترین مقدار مصرف برای الیاف فولادی و هر دو الیاف ماکروسنتتیک به مقدار ۱ درصد حجمی می باشد.

- الیاف فولادی با ۰/۵ درصد حجمی با افزایش ۱۴/۷۵ درصد مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد بیشترین تاثیر مثبت را بر بتن داشته و بیشترین کاهش برای الیاف mex200 با ۱/۵ درصد حجمی الیاف بوده که مقاومت فشاری را ۳/۰۱ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش داده است.

## ۶- مراجع

[1] Mehta PK. Concrete. Structure, properties and materials. oct 20, 2001.

[2] ACI Committee. State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete-ACI 544.1 R-96 (Reapproved 2002). ACI Manual of Concrete Practice, Part. 2008;6:2008.

[۳] اکبرزاده ن. "بتن های الیافی". تالیف سیمان پرتلند. نو آور ۱۳۹۲. ص ۱۲۸.

[4] Zeng JJ, Ye YY, Gao WY, Smith ST, Guo YC. Stress-strain behavior of polyethylene terephthalate fiber-reinforced polymer-confined normal-, high- and ultra high-strength concrete. Journal of Building Engineering. 2020 Jul 1;30:101243.

[4] ACI-Committee. ACI 544.3 R-08 Guide for Specifying, Proportioning, and Production of Fiber-Reinforced Concrete, ACI American Concrete Institute. 2008.

[5] Balendran RV, Zhou FP, Nadeem A, Leung AY. Influence of steel fibres on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete. Building and environment. 2002 Dec 1;37(12):1361-7.

[6] Chen L, Zhang X, Liu G. Analysis of dynamic mechanical properties of sprayed fiber-reinforced concrete based on the energy conversion principle. Construction and Building Materials. 2020 Sep 10;254:119167.

[7] Cifuentes H, García F, Maeso O, Medina F. Influence of the properties of polypropylene fibres on the fracture behaviour of low-, normal- and high-strength FRC. Construction and Building Materials. 2013 Aug 1;45:130-7

[8] Bolat H, Şimşek O, Çullu M, Durmuş G, Can Ö. The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete. Composites Part B: Engineering. 2014 May 1;61:191-8.

[9] Caggiano A, Gambarelli S, Martinelli E, Nisticò N, Pepe M. Experimental characterization of the post-cracking response in hybrid steel/polypropylene fiber-reinforced concrete. Construction and Building Materials. 2016 Oct 30;125:1035-43.

- اضافه کردن ۰/۵ درصد حجمی الیاف به بتن باعث بیشتر شدن مقاومت فشاری و همچنین باعث بیشتر شدن مدول الاستیسیته شده که نشان می دهد مقاومت فشاری ارتباط مستقیم با مدول الاستیسیته دارد اگر چه افزایش الیاف بیشتر از ۰/۵ درصد باعث افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه بدون الیاف شده ولی نرخ افزایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته رو به کاهش بوده است.

- استفاده از الیاف باعث افزایش مقاومت کششی بتن شده است و بیشترین افزایش برای بتن الیافی حاوی ۱/۵ درصد الیاف فولادی بوده و میزان استفاده از الیاف با افزایش مقاومت کششی بتن رابطه تقریباً خطی ایجاد کرده و می توان دلیل آن را زیاد شدن تعداد الیاف در ناحیه دو نیم شدگی و مسلح شدن کامل بتن دانست.

- با توجه به مساحت زیر منحنی تنش-کرنش بیشترین مساحت برای الیاف ۱/۵ درصد الیاف فولادی بوده و با زیاد شدن درصد الیاف از ۰/۵ تا ۱/۵ درصد روند صعودی داشته و در الیاف ماکروسنتتیک MEX300 مساحت زیر منحنی در بتن حاوی ۰/۵ درصد به حداکثر خود رسیده و با زیاد شدن درصد الیاف روند کاهشی داشته که می توان دلیل این کاهش را شکل صاف این الیاف دانست که با زیاد شدن مقدار این الیاف باعث گلوله گلوله شدن و برهم خوردن ماتریس بتن شده است.

- استفاده از الیاف MEX200 و MEX300 باعث بالا رفتن مقاومت الکتریکی شده ولی استفاده از الیاف فولادی باعث کاهش مقاومت الکتریکی شده که این کاهش به دلیل رسانا بودن آن می باشد.

- استفاده از الیاف فولادی و MEX200 و MEX300 در بتن باعث کاهش نفوذ پذیری بتن تحت فشار آب تا ۱ درصد حجمی الیاف شده است که نفوذ پذیری را به ترتیب ۲۹/۵۳ و ۲۰/۰۱ و ۲۱/۸۳ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش داده است ولی استفاده از الیاف بیشتر از ۱ درصد نفوذ آب را افزایش داده که می توان

[10] Pakravan HR, Latifi M, Jamshidi M. Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review. *Construction and building materials*. 2017 Jul 1;142:280-94.

[11] Yun HD, Kim SW, Lee YO, Rokugo K. Tensile behavior of synthetic fiber-reinforced strain-hardening cement-based composite (SHCC) after freezing and thawing exposure. *Cold regions Science and technology*. 2011 Jun 1;67(1-2):49-57.

[12] Baasankhuu B, Choi D, Ha S. Behavior of small-scale concrete cylinders in compression laterally confined by basalt fiber and PEN fiber reinforced polymer composites. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2020 Dec;14(1):1-9.

[13] Liu X, Wu T, Chen H, Liu Y. Compressive stress-strain behavior of CFRP-confined lightweight aggregate concrete reinforced with hybrid fibers. *Composite Structures*. 2020 Jul 15;244:112288.

[14] Do TM, Lam TQ. Design parameters of steel fiber concrete beams. *Magazine of Civil Engineering*. 2021 Feb 1;102(2).

[۱۵] کریمی نیا م، امینیان ن، پیروی م، "بررسی دمای اولیه سیمان بر خواص فیزیکی و مکانیکی و دوامی بتن آماده تازه و سخت شده" پنجمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران- تهران- ۱۵ مهر ماه ۱۳۹۲.

[16] American Society for Testing and Materials. ASTM C143, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. Philadelphia: ASTM.

[17] BS 1881-116. Method for determination of compressive strength of concrete cubes; 1983.

[18] AstmC496. Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. Annual book of astm standard;2011.

[19] zolfagharzadeh, M., Farokhzad, R. Effect of different types of fibers on the static and dynamic viscosity of self-compacting concrete and its interaction on mechanical and Electrical Resistivity. *Asas Journal*, 2020; 22(59).

[20] BS EN 12390-8,(2009).testing hardend concrete. Depth of penetration of water under pressure, british standard institution,London.

[۲۱] مستوفی نژاد د. "سازه های بتن آرمه" جلد اول، سال ۱۳۹۰.

[۲۲] اکبری ج، عابدی ا، "ارزیابی اثر الیاف های فولادی و شیشه- ای بر خواص مکانیکی بتن" پژوهش های تجربی در مهندسی عمران.

[۲۳] رخشانی مهر م، بخشی ب، "بررسی تأثیر مقدار الیاف و رده مقاومت بر مشخصات مکانیکی بتن با الیاف فولادی" تحقیقات بتن شماره(اول)ص ۱۱۲-۱۰۱.

## Investigation on The effect of macro synthetic and steel fibers on stress strain and mechanical properties and durability of fiber reinforced concrete

Reza Farokhzad \*

Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

Behrooz Karimi

Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

### Abstract

Today, concrete is regarded as one of the main materials in the construction industry, but besides its advantages, it is brittle and fragile and its tensile strength is lower than compressive strength. Due to the development of science and technology, the use of metal, polymer, glass and natural fibers in the construction industry is considered as an effective step in eliminating the poor tensile strength of ordinary concrete. Thus, in this research, the effect of steel and macro synthetic fibers on the behavioral model of concrete and mechanical properties (compressive and tensile strength, modulus of elasticity) and durability (electrical resistance, water permeability of concrete) have been investigated. Hence, in this research, 10 mixing designs with three different types of fibers, including steel, macro synthetic, polyolefin, and polypropylene fibers with 0.5, 1, 1.5 vol% were tested, and the results show that the steel fibers have no considerable effect on the compressive strength at a percentage higher than 0.5 and significantly increase the tensile strength and reduce the electrical resistance. The macro synthetic fibers of polyolefin and polypropylene have insignificant effect on compressive strength and even reduced compressive strength at high percentages and have a positive effect on tensile strength, electrical resistance, and water permeability, and the fibers can be used to increase the area under the stress-strain curve.

**Keywords:** fiber concretes, steel fibers, macro synthetic fibers, mechanical properties, Durability of concrete.

---

\* Corresponding Author: r.farokhzad@qiau.ac.ir