

**I. Rahmani**

Islamic Azad University,  
Maragheh Branch.

**e-mail:**

Iraj\_rahmani\_iau@yahoo.com

**A. Maleki\***

Islamic Azad University,  
Maragheh Branch.

**e-mail:**

a.maleki@iau-maragheh.ac.ir

**M. A. Lotfollahieyaghin**

Tabriz University.

**e-mail:** Lotfollahi@tabrizu.ac.ir

## **Determining the Percentage of Optimal Steel Fibers in Terms of Mechanical Properties in Ordinary Concrete and Self-Compaction with Steel Fibers**

*Reinforced concrete with steel fibers has been widely used in concrete and reinforced concrete structures to improve the properties of concrete. The reason for this widespread use is the myriad technical and economic advantages of using steel fibers in concrete bodies. Reinforced concrete with steel fibers includes a concrete body composed of cement, stone materials, water as well as a percentage of short steel fibers that are mixed in a completely randomly and in different directions in the mixture that the presence of steel fibers characterizes the concrete compared to pure Improves. Determining the optimal percentage of fibers is one of the important factors in terms of economics and efficiency of concrete. In this study, to determine the percentage of optimal fibers in different strength classes, 24 mixing designs were prepared and a mechanical laboratory and fresh concrete were performed. The flexural strength of samples containing 0.9% of steel fibers for categories C40, C50 and C60 was 1.91, 3.86 and 5.14 times higher than the control sample, respectively. Among the self-compacting concrete specimens reinforced with steel fibers, the most optimal mixing design belongs to the specimen in which 0.9% of steel fibers are used; So that the corresponding compressive strength is equal to 71.19 MPa. Among the typical concrete samples reinforced with steel fibers, the most optimal mixing design belongs to the sample in which 0.9% of steel fibers are used; The corresponding compressive strength is 63.7 MPa.*

**Keywords:** Steel Fibers, Mechanical Properties, Self-Compacting Concrete, Compressive Strength, Optimum Percentage.

---

\* Corresponding author

Received 19 July 2021, Revised 28 October 2021, Accepted 13 November 2021.

DOI: 10.22091/cer.2021.7157.1270

## تعیین درصد الیاف فولادی بهینه از نظر خواص مکانیکی در بتن‌های معمولی و خودتراکم دارای الیاف فولادی

بتن مسلح با الیاف فولادی به منظور بهبود بخشیدن به خواص بتن، کاربرد وسیعی را در سازه‌های بتنی و بتن مسلح پیدا کرده است. دلیل این کاربرد گسترده، مزایای بیشمار فنی و اقتصادی در استفاده از الیاف فولادی در جسم بتن می‌باشد. بتن مسلح با الیاف فولادی شامل یک کالبد بتنی مرکب از سیمان، مصالح سنگی، آب و همچنین درصدی از الیاف فولادی کوتاه می‌باشد که به‌طور درهم و کاملاً اتفاقی و در جهات مختلف در مخلوط پراکنده شده که وجود الیاف فولادی مشخصات بتن را نسبت به حالت خالص بهبود می‌بخشد. تعیین درصد بهینه الیاف یکی از فاکتورهای مهم از لحاظ اقتصادی و کارایی بتن است. در این پژوهش برای تعیین درصد الیاف بهینه در رده‌های مقاومتی مختلف ۲۴ طرح اختلاط تهیه و آزمایشگاه مکانیکی و بتن تازه انجام شد. مقاومت خمشی آزمون‌های حاوی ۰/۹ درصد الیاف فولادی برای رده‌های C40، C50 و C60 به ترتیب به مقدار ۱/۹۱، ۳/۸۶ و ۵/۱۴ برابر نسبت به آزمون شاهد بیشتر شده است. از بین آزمون‌های بتنی خودتراکم مسلح با الیاف فولادی، بهینه‌ترین طرح اختلاط متعلق به آزمون‌های است که در آن از ۰/۹ درصد الیاف فولادی استفاده شده است؛ به‌طوری که مقاومت فشاری متناظر با آن برابر ۷۱/۱۹ مگاپاسکال شده است. از بین آزمون‌های بتنی معمولی مسلح با الیاف فولادی، بهینه‌ترین طرح اختلاط متعلق به آزمون‌های است که در آن از ۰/۹ درصد الیاف فولادی استفاده شده است؛ به‌طوری که مقاومت فشاری متناظر با آن برابر ۶۳/۷ مگاپاسکال شده است.

**واژگان کلیدی:** الیاف فولادی، خواص مکانیکی، بتن خودتراکم، مقاومت فشاری، درصد بهینه.

ایرج رحمنی

دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه.

پست الکترونیک:

Iraj\_rahmani\_iau@yahoo.com

احمد ملکی\*

استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی

واحد مراغه.

پست الکترونیک:

a.maleki@iau-maragheh.ac.ir

محمدعلی لطف‌اللهی

یقین

استاد، دانشکده عمران، دانشگاه

تبریز.

پست الکترونیک:

Lotfollahi@tabrizu.ac.ir

### ۱- مقدمه

مختلفی در زمینه تولید این الیاف فعالیت می‌کنند که معروف‌ترین آن‌ها درامیکس، هارکس، ویراند و نووتکس است که درامیکس بلژیک از همه معروف‌تر است. بتن الیافی (الیاف فولادی) ترکیبی است که شامل یک کالبد بتنی مرکب از سیمان، مصالح سنگی و آب و همچنین درصدی از الیاف فولادی کوتاه که به‌طور درهم و کاملاً اتفاقی و در جهات مختلف در مخلوط پراکنده شده که وجود الیاف فولادی مشخصات بتن را نسبت به حالت خالص بهبود می‌بخشد. الیاف فولادی در مخلوط شکننده، تمرکز تنش را در محل ترک‌های به وجود آمده کاهش می‌دهد. معمولاً در الیاف، نسبت طول (L) به قطر (D) به طول حداکثر ۷/۵ سانتیمتر است. الیاف فولادی دارای

استفاده از الیاف فولادی برای اولین بار در کشور آمریکا در سال ۱۹۶۲ به ثبت رسیده است. این الیاف با مقاومت کششی نسبتاً بالا در شکل‌های مختلف به صورت‌های مستقیم، مستقیم قلاب‌دار، مستقیم دم‌پهن، دندان‌های، با انتهای برآمده و پیچیده قلاب‌دار تولید می‌شوند. سطح مقطع آن‌ها معمولاً گرد، مستطیل، نیم‌گرد، بی‌قاعده و یا متغیر می‌باشند. شرکت‌های

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۸، بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۰۶، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۲.

DOI: 10.22091/cer.2021.7157.1270 شناسه دیجیتال

در مطالعه‌ای کریستین اسکریگ<sup>۵</sup> و همکاران به بررسی و مقایسه تجربی تیرهای بتن مسلح مقاوم شده در برابر خمش پرداختند که در آن از انواع مختلف ملات سیمانی استفاده شده است. پنج نوع ملات سیمانی مقاوم شده با الیاف (FRCM<sup>۶</sup>) به‌عنوان تقویت‌کننده خمشی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج در تیرهای آزمایش شده نشان داد همبستگی و ارتباط خوبی بین مصالح تقویت‌کننده و الگوی ترک وجود دارد. همچنین، FRCM باعث افزایش ظرفیت و سختی خمشی تیرهای تقویت شده می‌شود، اما شکل‌پذیری آن را کاهش می‌دهد. در نهایت، روشی جدید برای مطالعه روند ترک‌خوردگی ارائه کردند. پارامترهای متغیر مورد بررسی در این مطالعه شامل مقاومت فشاری (بتن با مقاومت‌های معمولی و بالا تا ۱۰۰ مگاپاسکال)، نسبت دهانه برشی به عمق (۱/۵۰، ۲/۵۰ و ۳/۵۰) و فولادگذاری عرضی (با و بدون خاموت و یا الیاف فولادی) بودند [۱۴]. در مطالعه‌ای پاودا<sup>۷</sup> و همکاران تأثیر مقدار الیاف فولادی را بر مقاومت فشاری و رفتار خستگی تیرهای بتنی مسلح به الیاف فولادی تحت بار چرخه‌ای مورد ارزیابی قرار دادند [۱۵]. در مطالعه‌ای دیگر، با استفاده از حریره بتن الیافی (SIFCON<sup>۸</sup>)، مقاوم‌سازی برشی و بهسازی مصالح موجود در تیرهای بتن مسلح انجام شد. هدف اصلی این پژوهش، ارائه مصالح ساختمانی اثربخش و توسعه استفاده از آن در مقاوم‌سازی تیرهای بتن مسلح بود [۱۶]. عباسقلی‌ها و زاحکار، به بررسی ترکیبات مناسب بتن خودتراکم به‌عنوان پوششی برای مقاوم‌سازی ستون‌های استوانه‌ای پرداختند. نتایج آزمایش، کارایی بتن خودتراکم را به‌عنوان مصالح مقاوم‌سازی نشان داد [۱۷].

وو<sup>۹</sup> و همکاران، پژوهشی تحت عنوان اثرات خوشه‌بندی الیاف بر رفتار خستگی تیرهای بتن مسلح با

شکل و قطرهای متفاوتی بوده و نحوه ساخت آن‌ها نیز متفاوت است [۱-۶].

تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که بین مقاومت کششی و فاصله بین الیاف‌ها و نیز مقاومت کششی و تعداد میانگین الیاف‌ها در واحد سطح همبستگی وجود دارد. البته ضریب همبستگی رابطه مقاومت کششی و تعداد الیاف‌ها در واحد سطح بیشتر از رابطه مقاومت کششی و فاصله بین الیاف‌ها است. زندگی و همکاران برای بیان این مسئله مقاله‌ای تحت عنوان تأثیر توزیع و جهت‌گیری الیاف فولادی در بتن مسلح ارائه کرده‌اند. آن‌ها در این پژوهش تابعی را که با نتایج تجربی و عددی به‌دست آوردند را معرفی کردند که این ارتباط را نشان می‌داد. همچنین گتو<sup>۱</sup> و همکاران به جهت‌گیری الیاف در بتن مسلح با الیاف فولادی (SFRC<sup>۲</sup>) پرداخته و روابطی را ارائه کردند [۷-۹].

گانسان<sup>۳</sup> و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی رفتار اتصالات تیر به ستون بتنی مسلح به الیاف فولادی پرداختند [۱۰]. محققان دیگری به بررسی اجزای محدود تیرهای مسلح به الیاف فولادی پرداخته و نتایج خود را با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند [۱۱]. تاهنی<sup>۴</sup> و همکاران، اثر استفاده از الیاف فولادی را بر مقاومت برشی تیرهای با بتن پرمقاومت مورد ارزیابی قرار دادند [۱۲]. در مطالعه‌ای دیگر، پاسخ خمشی و برشی تیرهای بتنی مسلح به الیاف فولادی مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، تعداد ۳۶ تیر بتن مسلح در حالت‌های با و بدون استفاده از خاموت تحت بارگذاری خمشی چهارنقطه‌ای قرار گرفتند تا بدین ترتیب اثرگذاری الیاف فولادی بر مقاومت‌های خمشی و برشی، شکل‌پذیری، نوع شکست و ترک‌های ایجاد شده مورد ارزیابی قرار گیرد [۱۳].

<sup>5</sup>- Escrig

<sup>6</sup>- Fabric-Reinforced Cementitious Matrix

<sup>7</sup>- Poveda

<sup>8</sup>- Slurry Infiltrated Fiber Concrete

<sup>9</sup>- Wu

<sup>1</sup>- Gettu

<sup>2</sup>- Steel Fiber Reinforced Concrete

<sup>3</sup>- Gencoglu

<sup>4</sup>- Tahenni

پرداخته‌اند. در این پژوهش، بررسی‌هایی برای اثر جایگزینی جزئی سیمان با خاکستر باگاس و گنجاندن الیاف فولادی قلاب‌دار و الیاف شیشه در جایگزینی بهینه خاکستر باگاس بر خواص مکانیکی بتن انجام شده است [۲۱].

چادهاری<sup>۱۲</sup> و همکاران، مقاله‌ای تحت عنوان آنالیز پانل‌های دیواری بتنی تقویت شده با الیاف فولادی تحت بارگذاری فشاری، خمشی و ضربه‌ای انجام داده‌اند. آن‌ها نتیجه گرفتند که مقاومت خمشی پانل‌های دیواری ساخته شده با الیاف فولادی با افزایش درصد الیاف فولادی افزایش یافت و مقدار بهینه برای الیاف ۱۱/۷۵٪ تعیین شد [۲۲].

سیلوا<sup>۱۳</sup> و همکاران، پژوهشی در زمینه بررسی بتن‌های خودتراکم توانمند مسلح به الیاف فولادی انجام داده‌اند. آن‌ها در این پژوهش به بررسی بیرون‌کشیدگی الیاف فولادی پرداختند. نتایج تحقیقات نشان داد که مشخص که الیاف نیمه قلاب شده بهترین عملکرد را دارند و می‌توانند جذب انرژی بیشتری را نسبت به الیاف انتهای قلاب‌دار داشته باشند [۲۳].

## ۲- آزمایش

### ۲-۱- طرح اختلاط

برای طرح اختلاط بتن‌های معمولی و خودتراکم از روش اختلاط استاندارد آیین‌نامه ACI 211.1 و همچنین توصیه‌های EFNARC استفاده شد. جزئیات طرح اختلاط برای هر یک از رده‌های مقاومتی بتن در جدول ۱ ارائه شده است [۲۴ و ۲۵].

### ۲-۲- مواد و مصالح

الیاف فولادی انجام داده‌اند. نتایج نشان داد که طول عمر خستگی تیرهای بتنی با افزایش درصد حجمی الیاف از صفر تا ۱/۰ درصد، افزایش یافته و به دلیل مقدار قابل توجهی از خوشه‌های الیاف برای تیر با ۱/۵ درصد حجم الیاف از حجم ۱/۰ الیاف به ۱/۵ درصد کاهش یافته است و در نتیجه، منجر به کاهش عملکرد خستگی تیر می‌شود. ایشان برای بررسی دقیق‌تر، مدل پلاستیسیته آسیب‌دیده بتن را در نرم‌افزار ABAQUS مدل کردند [۱۸].

آیدین و همکاران در پژوهشی به بررسی اثر میلگردهای FRP<sup>۱۰</sup> در مقاومت خمشی بتن الیافی پرداختند. در این مطالعه، میله‌های مختلف پلاستیکی تقویت شده با الیاف FRP و رفتار خمشی تیرهای ترکیبی با قرار دادن بتن‌های تولید شده با الیاف مختلف در پروفیل‌های جعبه پلاستیک تقویت شده کربن (GFRP<sup>۱۱</sup>) مورد بررسی قرار گرفت. رفتار تیرهای ترکیبی توسط میله پلاستیک تقویت شده با الیاف کربن ۷۰ درصد و بتن الیاف فولادی ۵۳ درصد باعث افزایش مقاومت خمشی شدند [۱۹].

ثابتی‌پور کرمانی و همکاران، به بررسی تیرهای بتنی، مقاوم‌سازی شده با استفاده از الیاف FRP نسبت به سایر روش‌های مقاوم‌سازی پرداختند. در این تحقیق نتایج حاصل از آزمایش ۱۵ تیر بتن آرمه تقویت شده با الیاف، تقویت شده به روش سنتی و تقویت نشده که با تکیه‌گاه دو سر مفصل تحت آزمایش خمش قرار می‌گیرند مقایسه گردیده است. تعیین درصد‌های بهینه طرح اختلاط یکی از نکات حائز اهمیت است. در این پژوهش برای تعیین طرح اختلاط بهینه در رده‌های مقاومتی مختلف ۲۴ طرح اختلاط تهیه و آزمایشگاه مکانیکی و بتن تازه انجام شد [۲۰].

پژوهشگران به بررسی اثر خاکستر باگاس، الیاف فولادی قلاب‌دار و الیاف شیشه بر خواص مکانیکی بتن

<sup>12</sup>- Choudhary

<sup>13</sup>- Silva

<sup>10</sup>- Fiber-Reinforced Plastic

<sup>11</sup>- Glass Fiber Reinforced Plastic

(الف) سیمان: برای انجام این پژوهش از سیمان پرتلند نوع II کارخانه هگمتانه استفاده شده است که در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

جدول ۱- طرح اختلاط

نام آزمونه	رده بتن	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	شن (kg/m <sup>3</sup> )	آب (kg/m <sup>3</sup> )	الیاف فولادی (%)	فوق روان کننده (%)
NC40S0	۴۰	۴۰۰	۱۰۹۹	۸۰۵	۱۶۰	صفر	۰/۵
NC40S0.3	۴۰	۴۰۰	۱۰۹۹	۸۰۵	۱۶۰	۰/۳	۰/۷
NC40S0.6	۴۰	۴۰۰	۱۰۹۹	۸۰۵	۱۶۰	۰/۶	۰/۹
NC40S0.9	۴۰	۴۰۰	۱۰۹۹	۸۰۵	۱۶۰	۰/۹	۱
NC50S0	۵۰	۵۰۰	۱۰۴۰	۷۶۲	۲۰۰	صفر	۰/۶
NC50S0.3	۵۰	۵۰۰	۱۰۴۰	۷۶۲	۲۰۰	۰/۳	۰/۸
NC50S0.6	۵۰	۵۰۰	۱۰۴۰	۷۶۲	۲۰۰	۰/۶	۱
NC50S0.9	۵۰	۵۰۰	۱۰۴۰	۷۶۲	۲۰۰	۰/۹	۱/۱
NC60S0	۶۰	۶۰۰	۹۸۸	۷۲۴	۲۴	صفر	۰/۷
NC60S0.3	۶۰	۶۰۰	۹۸۸	۷۲۴	۲۴۰	۰/۳	۰/۹
NC60S0.6	۶۰	۶۰۰	۹۸۸	۷۲۴	۲۴۰	۰/۶	۱/۱
NC60S0.9	۶۰	۶۰۰	۹۸۸	۷۲۴	۲۴۰	۰/۹	۱/۲
SCC40S0	۴۰	۴۰۰	۱۰۹۹	۸۰۵	۱۶۰	صفر	۲/۸
SCC40S0.3	۴۰	۴۰۰	۱۰۹۹	۸۰۵	۱۶۰	۰/۳	۲/۹
SCC40S0.6	۴۰	۴۰۰	۱۰۹۹	۸۰۵	۱۶۰	۰/۶	۳
SCC40S0.9	۴۰	۴۰۰	۱۰۹۹	۸۰۵	۱۶۰	۰/۹	۳/۳
SCC50S0	۵۰	۵۰۰	۱۰۴۰	۷۶۲	۲۰۰	صفر	۲/۹
SCC50S0.3	۵۰	۵۰۰	۱۰۴۰	۷۶۲	۲۰۰	۰/۳	۳
SCC50S0.6	۵۰	۵۰۰	۱۰۴۰	۷۶۲	۲۰۰	۰/۶	۳/۱
SCC50S0.9	۵۰	۵۰۰	۱۰۴۰	۷۶۲	۲۰۰	۰/۹	۳/۴
SCC60S0	۶۰	۶۰۰	۹۸۸	۷۲۴	۲۴۰	صفر	۳
SCC60S0.3	۶۰	۶۰۰	۹۸۸	۷۲۴	۲۴۰	۰/۳	۳/۱
SCC60S0.6	۶۰	۶۰۰	۹۸۸	۷۲۴	۲۴۰	۰/۶	۳/۲
SCC60S0.9	۶۰	۶۰۰	۹۸۸	۷۲۴	۲۴۰	۰/۹	۳/۵

جدول ۲- مواد شیمیایی تشکیل‌دهنده سیمان

TiO <sub>2</sub>	LOI	K <sub>2</sub> O	Na <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>
صفر	۱/۶۵	۰/۷۸	۰/۴۸	۲/۲۷	۱/۳۷	۶۳/۲۱	۴/۰۹	۴/۹۸	۲۰/۹۵

(پ) الیاف فولادی: الیاف مصرفی از جنس فولاد به شکل ساده با انتهای قلاب‌دار با مقطع استوانه‌ای می‌باشد (شکل ۲). استفاده از چنین اشکالی از الیاف فولادی در افزایش مقاومت بیرون کشیدگی

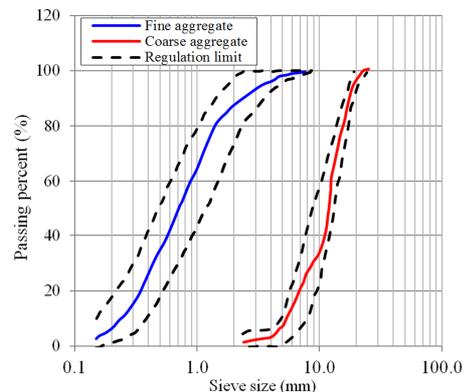
(ب) مصالح سنگی: آزمون برداری از مصالح سنگی پس از تهیه از معدن در آزمایشگاه طبق استاندارد ASTM-D75 انجام پذیرفت. در شکل ۱ دانه‌بندی مصالح سنگی آورده شده است.



شکل ۲- الیاف فولادی مصرفی

(ت) فوق روان کننده: نام تجاری فوق روان کننده مورد استفاده، فوق روان کننده ممتاز ژیکاپلاست می‌باشد که مشخصات آن در جدول ۴ ارائه شده است.

تأثیر زیادی دارد. مشخصات الیاف فولادی مورد استفاده در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی شن و ماسه مصرفی

جدول ۳- مشخصات الیاف فولادی مصرفی

چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	نسبت طول به قطر الیاف	قطر (mm)	طول (mm)
۷۸۵۰	۴۵	۰/۸۰	۳۶

جدول ۴- مشخصات فوق روان کننده مصرفی

ZP	نوع محصول
مایع	حالت فیزیکی
قهوه‌ای	رنگ
۱/۱۰	وزن مخصوص ( $\text{gr/cm}^3$ )
ندارد	یون کلر

از جمله آزمایش‌هایی که در بخش آزمایشگاهی مطالعه حاضر مورد نظر است، آزمایش‌های مربوط به بتن تازه جهت سنجش خودتراکمی بتن (آزمایش قیف V شکل، جعبه L شکل، اسلامپ و T50) و آزمایش‌های مربوط به بتن سخت شده (آزمایش مقاومت فشاری، آزمایش مقاومت کششی) می‌باشد.

۳-۱- اسلامپ، آزمایش قیف V شکل، جعبه L شکل و T50

مقدار اسلامپ مطابق با ACI 211.1-91 برحسب میلیمتر برای ۱۲ آزمون بتن معمولی در جدول ۵ و شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است [۲۴].

۳-۲- ساخت نمونه و عمل‌آوری

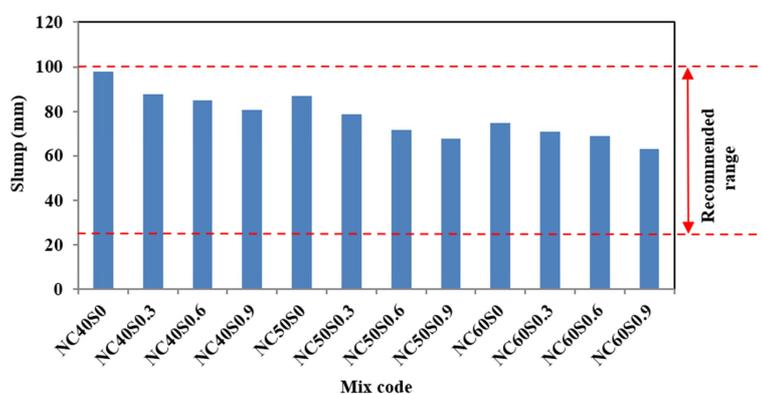
برای اختلاط مصالح و ساخت نمونه‌های بتن الیافی از آیین‌نامه ACI 544.4-18 استفاده شد. نمونه‌های آزمایشگاهی بتن بعد از قالب‌گیری به مدت ۲۴ ساعت درون قالب قرار گرفتند. بعد از این مدت قالب‌ها باز شده و درون حوضچه نگهداری شدند. به منظور نگهداری نمونه‌های بتنی مورد بررسی درون آب از حوضچه‌های پلاستیکی استفاده شده است. همچنین دمای آب حوضچه در طول ۲۴ ساعت  $20 \pm 2$  درجه در نظر گرفته شد.

۳- بررسی آزمایش‌های انجام شده و تحلیل

نتایج

جدول ۵- نتایج آزمایش اسلامپ برای نمونه‌های بتن معمولی

اسلامپ (mm)	نام طرح	شماره طرح
۹۸	NC40S0	۱
۸۸	NC40S0.3	۲
۸۵	NC40S0.6	۳
۸۱	NC40S0.9	۴
۸۷	NC50S0	۵
۷۹	NC50S0.3	۶
۷۲	NC50S0.6	۷
۶۸	NC50S0.9	۸
۷۵	NC60S0	۹
۷۱	NC60S0.3	۱۰
۶۹	NC60S0.6	۱۱
۶۳	NC60S0.9	۱۲



شکل ۳- نتایج آزمایش اسلامپ برای نمونه‌های بتن معمولی



(ب)



(الف)

شکل ۴- (الف) آزمایش مخروط اسلامپ و (ب) آزمایش جریان اسلامپ

مقدار ۱۰، ۱۳ و ۱۷ درصد کاهش داده است. همچنین در نمونه‌های بتنی با رده ۵۰ مگاپاسکال، افزودن ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد الیاف فولادی، اسلامپ بتن را به ترتیب به مقدار ۹، ۱۷ و ۲۲ درصد کاهش داده است. از سوی دیگر،

در تمامی رده‌های مورد بررسی استفاده از الیاف فولادی، اسلامپ بتن را کاهش داده است؛ به طوری که در نمونه‌های بتنی با رده ۴۰ مگاپاسکال، افزودن ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد الیاف فولادی، اسلامپ بتن را به ترتیب به

بتن خودتراکم ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد تمامی آزمون‌های بتنی مورد بررسی در محدوده مجاز EFNARC می‌باشند [۲۰].

با توجه به شکل ۵- الف و جدول ۶ می‌توان بیان نمود که جریان اسلامپ آزمون‌های بتنی خودتراکم حاوی الیاف فولادی با افزایش مقدار سیمان تفاوت چندانی با آزمون‌های فاقد الیاف ندارند.

در آزمون‌های بتنی با رده ۶۰ مگاپاسکال، افزودن ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد الیاف فولادی، سبب کاهش اسلامپ بتن به ترتیب به مقدار ۵، ۸ و ۱۶ شده است.

در جدول ۶ نتایج آزمایش‌های بتن خودتراکم تازه ارائه شده است. مطابق با EFNARC محدوده مجاز جریان اسلامپ بتن‌های خودتراکم برای کاربری‌های بتن‌ریزی متداول در محدوده ۵۵۰ تا ۸۵۰ میلیمتر است. در شکل ۵- الف، مقادیر جریان اسلامپ برای آزمون‌های

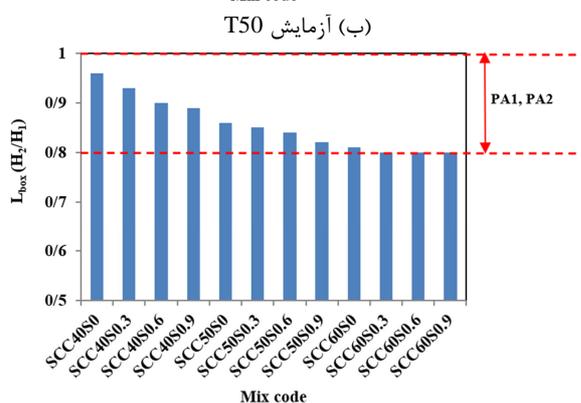
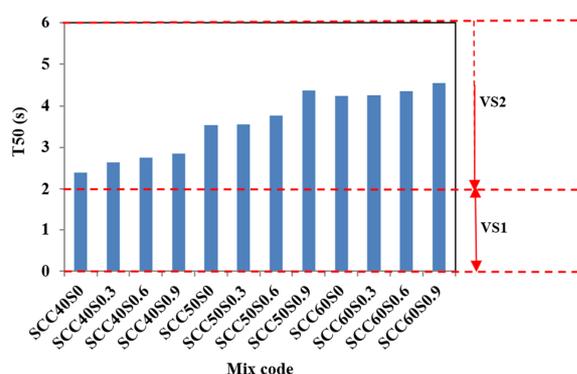
جدول ۶- معیارهای کنترل بتن خودتراکم تازه [۱۸]

آزمایش‌های بتن تازه				الیاف فولادی (%)	نام طرح	شماره طرح
$H_2/H_1$	زمان تخلیه از قیف V شکل (s)	زمان رسیدن به قطر ۵۰ سانتیمتر $T_{50}$ (s)	جریان اسلامپ (mm)			
۰/۸ تا ۱	۶ تا ۱۲	۲ تا ۵	۸۵۰ تا ۵۵۰			
۰/۹۶	۶/۴	۲/۴۰	۷۹۹	صفر	SCC40S0	۱۳
۰/۹۳	۶/۵	۲/۶۵	۷۷۲	۰/۳۰	SCC40S0.3	۱۴
۰/۹۰	۷/۱	۲/۷۶	۷۲۵	۰/۶۰	SCC40S0.6	۱۵
۰/۸۹	۷/۵	۲/۸۶	۷۱۸	۰/۹۰	SCC40S0.9	۱۶
۰/۸۶	۷/۸	۳/۵۳	۷۰۳	صفر	SCC50S0	۱۷
۰/۸۵	۸/۴	۳/۵۵	۶۶۱	۰/۳۰	SCC50S0.3	۱۸
۰/۸۴	۹/۲۱	۳/۷۶	۷۰۱	۰/۶۰	SCC50S0.6	۱۹
۰/۸۲	۹/۷۴	۴/۳۷	۶۸۹	۰/۹۰	SCC50S0.9	۲۰
۰/۸۱	۱۰/۴۶	۴/۲۳	۶۷۱	صفر	SCC60S0	۲۱
۰/۸	۱۰/۵۴	۴/۲۵	۶۶۸	۰/۳۰	SCC60S0.3	۲۲
۰/۷۹	۱۱/۲۳	۴/۳۵	۶۶۳	۰/۶۰	SCC60S0.6	۲۳
۰/۷۸	۱۱/۸۲	۴/۵۴	۶۵۹	۰/۹۰	SCC60S0.9	۲۴

در شکل ۵- پ نتایج آزمایش قیف V شکل برای آزمون‌های بتنی خود تراکم ارائه شده است. این آزمایش معرف قابلیت پرکنندگی و لزجت خمیری بتن است. با توجه به شکل ۷ تمامی آزمون‌های مورد بررسی در محدوده مجاز EFNARC قرار دارند. از سوی دیگر افزودن الیاف فولادی زمان تخلیه بتن از قیف V شکل را افزایش داده است. بطوریکه در هر سه رده مورد بررسی بیشترین افزایش زمان تخلیه از قیف V شکل در آزمون‌های حاوی ۰/۹ درصد ایجاد شده است. بنابراین می‌توان

در شکل ۵- ب نتایج آزمایش زمان رسیدن به قطر ۵۰ سانتیمتر ( $T_{50}$ ) برای آزمون‌های بتن خودتراکم حاوی و فاقد الیاف فولادی ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد استفاده از الیاف فولادی در تمامی آزمون‌های بتنی، زمان  $T_{50}$  را افزایش داده است. به‌طوری که در آزمون‌های با رده ۴۰، ۵۰ و ۶۰ مگاپاسکال بیشترین افزایش  $T_{50}$  نسبت به آزمون شاهد به ترتیب برابر ۱۹، ۲۴ و ۷ درصد شده است.

پدیده انسداد ناشی از حضور میلگردها در بتن باشد. با توجه به شکل ۸ تمامی آزمون‌های مورد بررسی از جنبه نسبت انسداد ( $H_2/H_1$ ) در محدوده مجاز EFNARC قرار دارند. همچنین نتایج حاصل نشان می‌دهد که افزودن الیاف فولادی مقدار  $H_2/H_1$  را افزایش داده است.

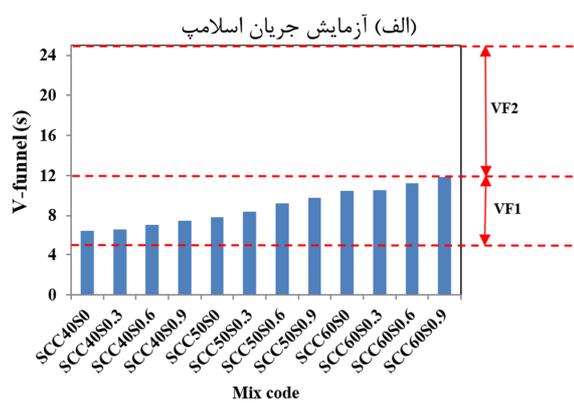
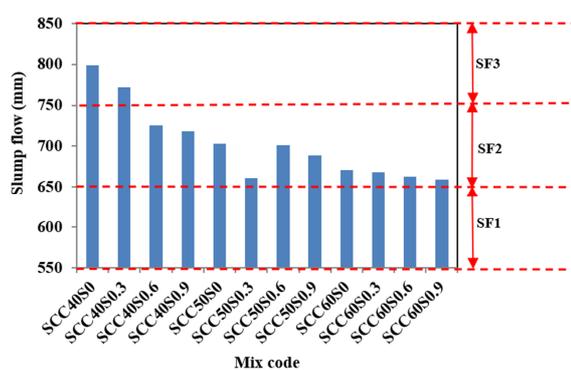


شکل ۵- نتایج آزمایش‌های مختلف برای بتن خودتراکم

فشاری را به ترتیب به مقدار ۷، ۹ و ۱۶ درصد افزایش داده است. از سوی دیگر، در آزمون‌های بتنی معمولی با رده C40، C50 و C60 افزودن ۰/۹ درصد الیاف فولادی سبب افزایش مقاومت فشاری به ترتیب به مقدار ۱۶، ۱۱ و ۱۳ درصد شده است. بنابراین و با توجه به مقادیر به دست آمده ملاحظه می‌گردد که افزودن الیاف فولادی به آزمون‌های بتنی معمولی، بسته به مقدار الیاف و رده بتن می‌تواند مقاومت فشاری آزمون‌های بتنی را از ۳ تا ۱۶ درصد افزایش دهد. در آزمون‌های بتنی معمولی حاوی ۰/۳ و ۰/۶ درصد الیاف فولادی، با افزایش رده بتن، رشد مقاومت فشاری بتن همواره به صورت صعودی است؛ اما در

به این نتیجه دست یافت که حضور الیاف فولادی در بتن، مدت زمان خروج بتن از قیف را افزایش می‌دهد و بدین ترتیب خاصیت لزجت خمیری بتن را کاهش می‌دهد.

در شکل ۵-ت، نتایج آزمایش جعبه L شکل برای آزمون‌های بتنی خود تراکم ارائه شده است. این آزمایش می‌تواند معیاری جهت بررسی قابلیت جریان بتن تازه و



شکل ۵- نتایج آزمایش‌های مختلف برای بتن خودتراکم

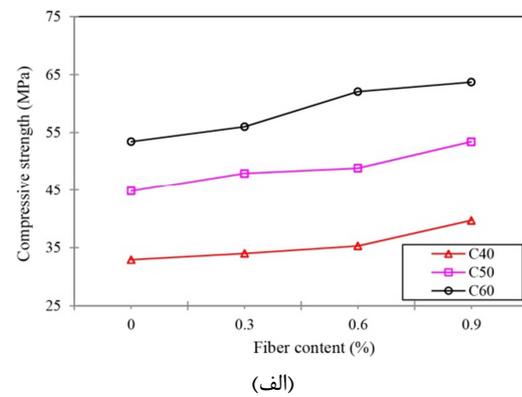
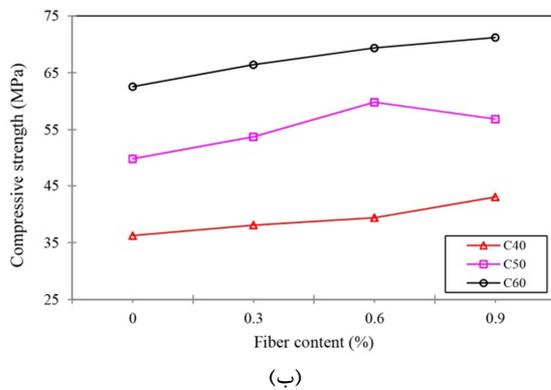
### ۲-۳- آزمایش مقاومت فشاری

شکل ۶، آزمایش مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. در شکل ۷- الف، مقاومت فشاری ۲۸ روزه آزمون‌های بتنی معمولی برحسب مگاپاسکال ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد در تمامی حالت‌ها افزودن الیاف فولادی مقاومت فشاری بتن را افزایش داده است. به طوری که در آزمون‌های بتنی معمولی با رده C40، C50 و C60 افزودن ۰/۳ درصد الیاف فولادی مقاومت فشاری را به ترتیب به مقدار ۳، ۵ و ۷ درصد افزایش داده است. همچنین در آزمون‌های بتنی معمولی با رده C40، C50 و C60 افزودن ۰/۶ درصد الیاف فولادی مقاومت

مقدار ۵، ۸ و ۱۳ درصد افزایش داده است. همچنین در آزمون‌های بتنی خودتراکم با رده C50 افزودن ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد الیاف فولادی، مقاومت فشاری را به ترتیب به مقدار ۷، ۱۹ و ۶ درصد افزایش داده است. از سوی دیگر، در آزمون‌های بتنی خودتراکم با رده C60 افزودن ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد الیاف فولادی، موجب افزایش مقاومت فشاری به ترتیب به مقدار ۶، ۱۱ و ۷ درصد شده است. همچنین با افزایش رده بتن خودتراکم از C50 به C60 رشد مقاومت فشاری کاهش می‌یابد.



شکل ۶- آزمایش مقاومت فشاری



شکل ۷- مقایسه مقاومت فشاری آزمون‌های بتنی (الف) معمولی و (ب) خودتراکم و فاقد الیاف فولادی

مقادیر متناظر با آزمون‌های بتنی معمولی بیشتر شده است.

### ۳-۳- آزمایش مقاومت کششی

نحوه انجام آزمایش مقاومت کششی در شکل ۹ نشان داده شده است. در شکل ۱۰- الف به مقایسه مقاومت کششی (مقاومت کششی شکافت) آزمون‌های

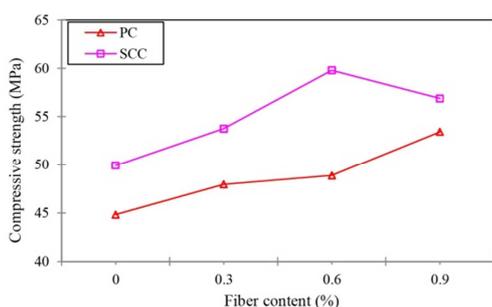
آزمون‌های بتنی حاوی ۰/۹ درصد الیاف فولادی با افزایش رده بتن رشد مقاومت فشاری در ابتدا به صورت افزایشی و پس از آن به صورت کاهش می‌باشد.

در شکل ۷- ب مقاومت فشاری ۲۸ روزه آزمون‌های بتنی خودتراکم در ۱۲ حالت با یکدیگر مقایسه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد در آزمون‌های بتنی خودتراکم نیز افزودن الیاف فولادی اثر مثبت داشته و مقاومت فشاری بتن را افزایش می‌دهد. به طوری که در آزمون‌های بتنی خودتراکم با رده C40 افزودن ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد الیاف فولادی مقاومت فشاری را به ترتیب به

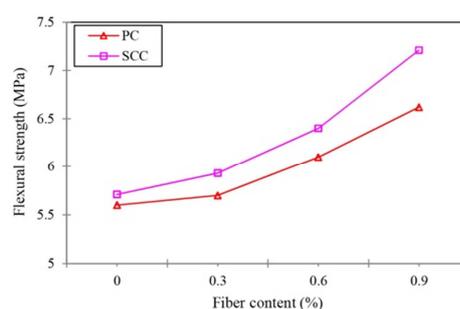
در شکل ۸، مقاومت فشاری آزمون‌های بتنی معمولی و خودتراکم برای رده‌های بتنی C50، C40 و C60 نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در تمامی رده‌های مورد بررسی، مقاومت فشاری آزمون‌های بتنی خودتراکم از مقادیر متناظر با آزمون‌های بتنی معمولی بیشتر شده است؛ به طوری که بسته به مقدار الیاف فولادی و رده بتن مصرفی مقاومت فشاری آزمون‌های بتنی خودتراکم به مقدار ۶ تا ۲۲ درصد از

C40، C50 و C60 پرداخته شده است.

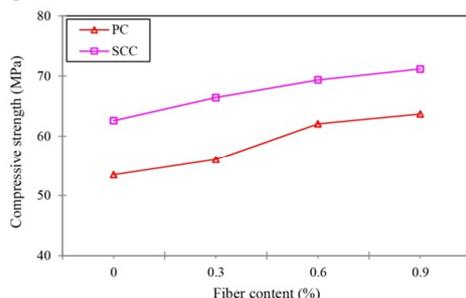
بتنی معمولی حاوی و فاقد الیاف فولادی برای سه رده



(ب) رده بتن C50



(الف) رده بتن C40



(پ) رده بتن C60

شکل ۸- مقایسه مقاومت فشاری آزمونه‌های بتنی معمولی و خودتراکم در رده‌های مختلف بتن

در شکل ۱۰- ب، به مقایسه مقاومت کششی آزمونه‌های بتنی خودتراکم حاوی و فاقد الیاف فولادی برای سه رده C40، C50 و C60 پرداخته شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، افزودن ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد الیاف فولادی در آزمونه‌های بتن معمولی با رده C40 موجب افزایش مقاومت کششی بتن به ترتیب به مقدار ۱۹، ۵۴ و ۵۳ درصد شده است. همچنین افزودن ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد الیاف فولادی در آزمونه‌های بتن معمولی با رده C50 مقاومت کششی بتن را به ترتیب به مقدار ۱۸، ۱۸ و ۲۸ درصد افزایش داده است. از سوی دیگر، افزودن ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد الیاف فولادی در آزمونه‌های بتن معمولی با رده C60 مقاومت کششی بتن را به ترتیب به مقدار ۵، ۱۳ و ۲۸ درصد افزایش داده است. روابط میان مقاومت فشاری و کششی آزمونه‌های مورد مطالعه و چندین منحنی تجربی که توسط آیین‌نامه ارائه شده است، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. روابط تجربی مربوط به منحنی در جدول ۷ ارائه شده است. از شکل ۱۱ می‌توان مشاهده کرد که مقاومت آزمونه‌های

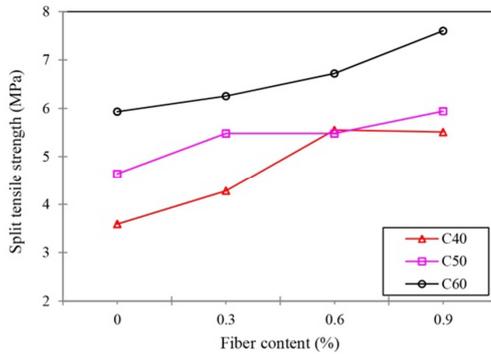


شکل ۹- آزمایش مقاومت کششی

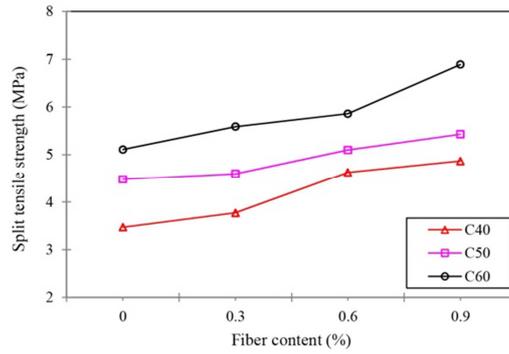
همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، افزودن ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد الیاف فولادی در آزمونه‌های بتن معمولی با رده C40 مقاومت کششی بتن را به ترتیب به مقدار ۹، ۳۳ و ۴۰ درصد افزایش داده است. همچنین افزودن ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد الیاف فولادی در آزمونه‌های بتن معمولی با رده C50 مقاومت کششی بتن را به ترتیب به مقدار ۳، ۱۳ و ۲۱ درصد افزایش داده است. از سوی دیگر، با افزودن ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد الیاف فولادی در آزمونه‌های بتن معمولی با رده C60 مقاومت کششی بتن به ترتیب به مقدار ۹، ۱۵ و ۳۵ درصد افزایش یافته است.

مورد مطالعه بسیار نزدیک به نتایج مطالعات مراجع [۲۱] و

[۲۲] می‌باشد.



(ب)



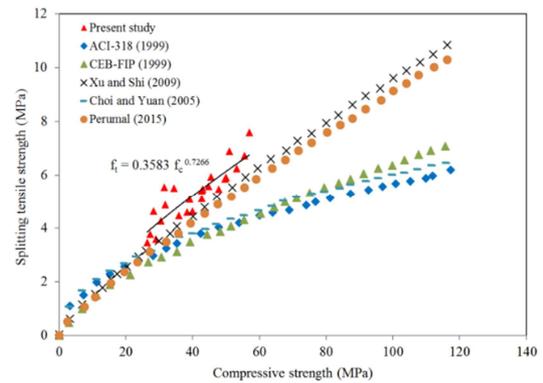
(الف)

شکل ۱۰- مقایسه مقاومت کششی آزمون‌های (الف) بتنی معمولی و (ب) بتنی خودتراکم حاوی و فاقد الیاف فولادی

مقایسه مقاومت خمشی آزمون‌های بتنی معمولی حاوی و فاقد الیاف فولادی پرداخته شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد با افزایش الیاف فولادی در آزمون‌های بتنی معمولی، مقاومت خمشی در هر سه رده مورد بررسی افزایش یافته است؛ به طوری که مقاومت خمشی آزمون‌های حاوی ۰/۹ درصد الیاف فولادی برای رده‌های C40، C50 و C60 به ترتیب به مقدار ۱/۹۱، ۳/۸۶ و ۵/۱۴ برابر نسبت به آزمون شاهد بیشتر شده است. در شکل ۱۳- ب نیز به مقایسه مقاومت خمشی آزمون‌های بتنی خودتراکم حاوی و فاقد الیاف فولادی پرداخته شده است.

در شکل ۱۴، مقاومت خمشی آزمون‌های بتنی معمولی و خودتراکم برای رده‌های بتنی C40، C50 و C60 نشان داده شده است.

رابطه بین مقاومت فشاری و کششی در مقاومت‌های پایین‌تر نیز به روابط ارائه شده توسط CEB-FIP و چپو و یوان نزدیک است [۲۶-۲۸]. با توجه به مقادیر به دست آمده براساس شکل ۱۱، جدول ۷ ارائه شده است.



شکل ۱۱- روابط بین مقاومت‌های فشاری و کششی

### ۳-۴- آزمایش مقاومت خمشی

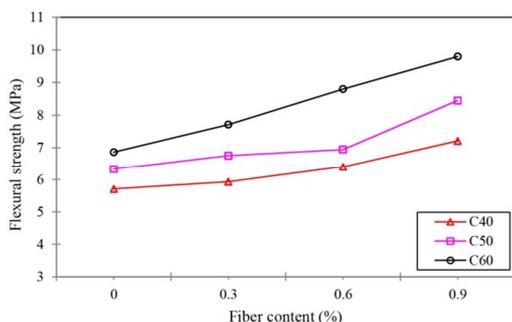
در شکل ۱۲، اتصال بین الیاف فولادی و بتن در آزمایش خمشی مشاهده می‌شود. در شکل ۱۳- الف به

جدول ۷- روابط بین مقاومت‌های فشاری و کششی

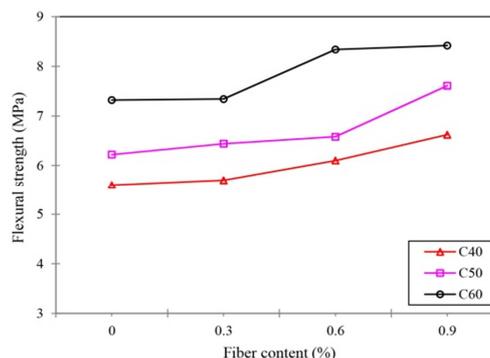
معادله	روابط
$f_t = 0.56 f_c^{0.5}$	ACI-318 [26]
$f_t = 0.188 f_c^{0.84}$	Perumal (2015) [30]
$f_t = 0.6 f_c^{0.5}$	Choi and Yuan (2005) [28]
$f_t = 0.21 f_c^{0.83}$	Xu and Shi (2009) [29]
$f_t = 0.3 f_c^{0.67}$	CEB-FIP (1999) [27]
$f_t = 0.3583 f_c^{0.7266}$	مطالعه حاضر



شکل ۱۲- آزمایش مقاومت خمشی

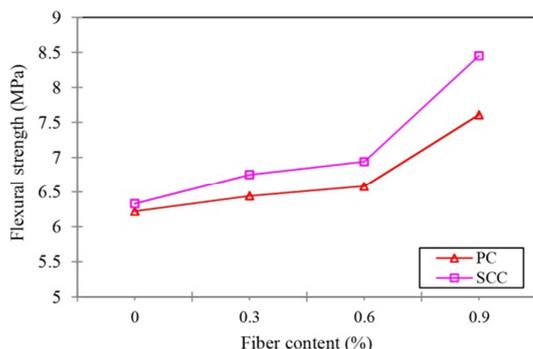


(ب)

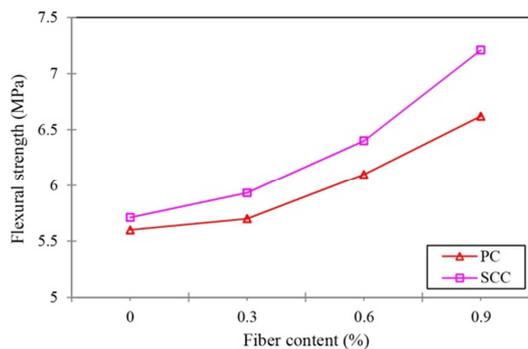


(الف)

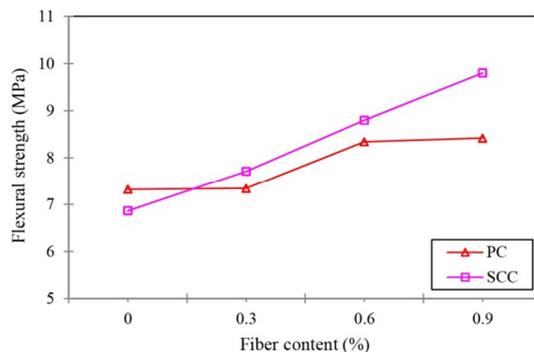
شکل ۱۳- مقایسه مقاومت خمشی آزمون‌های (الف) بتنی معمولی و (ب) بتنی خودتراکم حاوی و فاقد الیاف فولادی



(ب) رده بتن C50



(الف) رده بتن C40



(پ) رده بتن C60

شکل ۱۴- مقایسه مقاومت خمشی آزمون‌های بتنی معمولی و خودتراکم

#### ۴- نتیجه‌گیری

- افزودن الیاف فولادی به آزمون‌های بتنی، روانی بتن را کاهش می‌دهد، که در مطالعه حاضر، با توجه به مقدار الیاف فولادی (۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹

آزمونه‌های بتنی معمولی بیشتر شده است؛ به طوری که بسته به مقدار الیاف فولادی و رده بتن مصرفی مقاومت خمشی آزمونه‌های بتنی خودتراکم به مقدار ۳ تا ۴۲ درصد از مقادیر متناظر با آزمونه‌های بتنی معمولی بیشتر شده است.

۶- با افزایش الیاف فولادی در آزمونه‌های بتنی خود تراکم، مقاومت خمشی در هر سه رده مورد بررسی افزایش یافته است؛ بطوریکه مقاومت خمشی آزمونه‌های حاوی ۰/۹ درصد الیاف فولادی برای رده‌های C40، C50 و C60 به ترتیب به مقدار ۱۸/۲۱، ۲۲/۳۵ و ۱۵/۰۳ درصد نسبت به آزمونه شاهد بیشتر شده است.

۷- مطابق با شکل ۱۱، مقاومت خمشی آزمونه‌های بتنی خودتراکم حاوی ۰/۳ درصد الیاف فولادی برای رده‌های C40، C50 و C60 به ترتیب به مقدار ۳/۸، ۶/۶ و ۱۲/۴ درصد نسبت به آزمونه شاهد بیشتر شده است. مقاومت خمشی آزمونه‌های بتنی خودتراکم حاوی ۰/۶ درصد الیاف فولادی برای رده‌های C40، C50 و C60 به ترتیب به مقدار ۱۲/۰۸، ۹/۶۴ و ۲۸/۲۸ نسبت به آزمونه شاهد بیشتر شده است. در آزمونه‌های بتنی خودتراکم حاوی ۰/۹ درصد الیاف فولادی مقاومت خمشی برای رده‌های C40، C50 و C60 به ترتیب به مقدار ۲۶/۲۷، ۳۳/۴۹ و ۴۲/۸۶ نسبت به آزمونه شاهد بیشتر شده است.

درصد) و رده بتن مصرفی (۰/۴، ۵۰ و ۶۰ مگاپاسکال) درصد کاهش اسلامپ در محدوده ۴ تا ۱۹ درصد است.

۲- جریان اسلامپ آزمونه‌های بتنی خودتراکم با رده ۴۰ مگاپاسکال حاوی ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد الیاف فولادی به ترتیب به مقدار ۳، ۹ و ۱۰ درصد نسبت به آزمونه شاهد (صفر درصد الیاف) کاهش یافته است. از سوی دیگر، افزودن ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ درصد الیاف فولادی به آزمونه‌های بتنی خودتراکم با رده ۵۰ مگاپاسکال جریان اسلامپ بتن را به ترتیب به مقدار ۶، ۰/۳ و ۲ درصد کاهش داده است.

۳- از بین آزمونه‌های بتنی معمولی مسلح به الیاف فولادی، بهینه‌ترین طرح اختلاط متعلق به آزمونه‌ای است که در آن از ۰/۹ درصد الیاف فولادی استفاده شده است؛ به طوری که مقاومت فشاری متناظر با آن برابر ۶۳/۷ مگاپاسکال شده است.

۴- از بین آزمونه‌های بتنی خودتراکم مسلح به الیاف فولادی، بهینه‌ترین طرح اختلاط متعلق به آزمونه‌ای است که در آن از ۰/۹ درصد الیاف فولادی استفاده شده است؛ به طوری که مقاومت فشاری متناظر با آن برابر ۷۱/۱۹ مگاپاسکال شده است.

۵- مقاومت خمشی آزمونه‌های بتنی خودتراکم مسلح به الیاف فولادی از مقادیر متناظر با

## مراجع

- [1] López Carreño, R. D., Piliarissi Cavalaro, S. H., Pujadas Álvarez, P., Galobardes Reyes, I., Torrents Dolz, J. M., Aguado de Cea, A., & Domingues de Figueiredo, A. (2015). "Assessment of Fibre Content and Orientation in SFRC with the Inductive Method. Part 1: Theoretical Basis of the Method and Study of the Influence of the Type of Coil and Temperature on its Accuracy", In *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDTCE 2015), 15-17 Sep 2015, Berlin, Germany*, 1-10.
- [2] Marcos-Meson, V., Michel, A., Solgaard, A., Fischer, G., Edvardsen, C., & Skovhus, T. L. (2018). "Corrosion resistance of steel fibre reinforced concrete-A literature review", *Cement and Concrete Research*, 103, 1-20.

- [3] Wilson, E., & Philip, N. (2015). "The Influence of Fibres in Concrete: A Review", *International Journal of Civil Engineering (IJCE)*, 4(6), 1-10.
- [4] Ruano, G., Isla, F., Sfer, D., & Luccioni, B. (2015). "Numerical modeling of reinforced concrete beams repaired and strengthened with SFRC", *Engineering Structures*, 86, 168-181.
- [5] Muda, Z. C., Kamal, N. L. M., Syamsir, A., Yang, C. S., Beddu, S., Mustapha, K. N., ... & Zaroog, O. S. (2016). "Effect of steel fibres distribution on impact resistance performance of Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC)", In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 32(1), 012028.
- [6] Ahmad, H., Hashim, M. H. M., Hamzah, S. H., & Bakar, A. A. (2016). "Steel fibre reinforced self-compacting concrete (SFRSC) performance in slab application: a review", In *AIP Conference Proceedings*, 1774(1), 030024.
- [7] Soroushian, P., & Lee, C. D. (1990). "Distribution and orientation of fibers in steel fiber reinforced concrete", *Materials journal*, 87(5), 433-439.
- [8] Zandi, Y., Husem, M., & Pul, S. (2011). "Effect of distribution and orientation of steel fiber reinforced concrete", In *Proceedings of the 4th WSEAS international conference on Energy and development-environment-biomedicine*, 260-264.
- [9] Gettu, R., Gardner, D. R., Saldívar, H., & Barragán, B. E. (2005). "Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens", *Materials and Structures*, 38(1), 31-37.
- [10] Gencoglu, M. (2007). "The effects of stirrups and the extents of regions used SFRC in exterior beam-column joints", *Structural Engineering and Mechanics*, 27(2), 223-242.
- [11] Islam, M. M., Chowdhury, M. A., Amin, S., Mitu, S. M., Bala, M., Islam, Z., ... & Siddique, A. (2014). "Finite Element modeling and analysis of RC beams made of steel fiber reinforced concrete (SFRC): Critical investigation of the flexural and shear capacity enhancements", In *Proceedings of the 2nd International Conference on Civil Engineering for Sustainable Development (ICCESD-2014)*, 14-16.
- [12] Tahenni, T., Chemrouk, M., & Lecomte, T. (2016). "Effect of steel fibers on the shear behavior of high strength concrete beams", *Construction and Building Materials*, 105, 14-28.
- [13] Biolzi, L., & Cattaneo, S. (2017). "Response of steel fiber reinforced high strength concrete beams: Experiments and code predictions", *Cement and Concrete Composites*, 77, 1-13.
- [14] Escrig, C., Gil, L., & Bernat-Maso, E. (2017). "Experimental comparison of reinforced concrete beams strengthened against bending with different types of cementitious-matrix composite materials", *Construction and Building Materials*, 137, 317-329.
- [15] Poveda, E., Ruiz, G., Cifuentes, H., Rena, C. Y., & Zhang, X. (2017). "Influence of the fiber content on the compressive low-cycle fatigue behavior of self-compacting SFRC", *International Journal of Fatigue*, 101, 9-17.
- [16] Al-Rousan, R. Z., & Shannag, M. J. (2018). "Shear repairing and strengthening of reinforced concrete beams using SIFCON", In *Structures*, 14, 389-399.
- [17] Abbasgholiha, H., & Zahkar, F. (2017) "Reinforcement of reinforced concrete columns using self-compacting jackets", *The Third International Conference on Civil Architecture and Urban Planning at the Beginning of the Third Millennium*. <https://civilica.com/doc/711854>
- [18] Gao, D., Gu, Z., Wei, C., Wu, C., & Pang, Y. (2021). "Effects of fiber clustering on fatigue behavior of steel fiber reinforced concrete beams", *Construction and Building Materials*, 301, 124070.
- [19] Aydın, E., Boru, E., & Aydın, F. (2021). "Effects of FRP bar type and fiber reinforced concrete on the flexural behavior of hybrid beams", *Construction and Building Materials*, 279, 122407.
- [20] Sabetipour Kermani, M., Nazari, M., Daliri, R., & Tarshizi, M. (2019). "Investigation of reinforced concrete beams using FRP fibers compared to other reinforcement methods", *The second conference on the strategy of architecture, urban planning, civil engineering and geography in sustainable development*.
- [21] Parashar, A. K., & Gupta, A. (2021). "Investigation of the effect of bagasse ash, hooked steel fibers and glass fibers on the mechanical properties of concrete", *Materials Today: Proceedings*, 44, 801-807.
- [22] Choudhary, S., Jain, A., Bhavsar, H., Chaudhary, S., & Choudhary, R. (2021). "Analysis of steel fiber reinforced concrete wall panels under compression, flexural and impact loading", *Materials Today: Proceedings*, 38, 2471-2475.
- [23] Benedetty, C. A., Krahl, P. A., Almeida, L. C., Trautwein, L. M., Siqueira, G. H., & de Andrade Silva, F. (2021). "Interfacial mechanics of steel fibers in a High-Strength Fiber-Reinforced Self Compacting Concrete", *Construction and Building Materials*, 301, 124344.
- [24] ACI 211.1-91 (2002). *Standard practice for selecting properties for normal, heavy weight, and mass concrete*, American concrete institute.
- [25] EFNARC. (2005). *Specifications and guidelines for self-compacting concrete*, <http://www.efnarc.org>.
- [26] ACI 318. (1999). *ACI 318-14 Building Code Requirements for Structural Concrete*, American concrete institute.
- [27] CEB-FIP. (1999). *Evaluation of the time dependent behavior of concrete*, model code for concrete structures, Bulletin information No 199, Lausanne: Committee Europe du Beton/Federation Internationale de Precontrainte.

- [28] Choi, Y., & Yuan, R. L. (2005). "Experimental relationship between splitting tensile strength and compressive strength of GFRC and PFRC", *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1587-1591.
- [29] Xu, B. W., & Shi, H. S. (2009). "Correlations among mechanical properties of steel fiber reinforced concrete", *Construction and building materials*, 23(12), 3468-3474.
- [30] Perumal, A., Faber, H., Yaacobi-Gross, N., Pattanasattayavong, P., Burgess, C., Jha, S., ... & Bradley, D. D. (2015). "High-efficiency, solution-processed, multilayer phosphorescent organic light-emitting diodes with a copper thiocyanate hole-injection/hole-transport layer", *Advanced Materials*, 27(1), 93-100.