

# Experimental and Analytical Investigation on The Effect of Steel Fibers on The Mechanical Properties and Performance of Fibrous Self-Compacting Concretes

*Ali Ghorbani*

*Assistant Professor, Department of Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran*

## **Abstract**

*Using self-compacting concrete is increasing due to its advantages. Also, the high-performance concrete has attracted a lot of researcher attention because of its special characteristics. In this research, a comprehensive experimental investigation is performed on the mechanical and flowability of high-performance self-compacting concrete. In this article, nine mix compositions were cast and tested. In mechanical properties part, the compressive strength, splitting tensile strength and flexural strength were tested. In the durability and flowability part, J-Ring and ultra-sonic pulse velocity (UPV) tests were conducted on the specimens. According to the results, the effects of fiber on tensile and flexural strength were significantly more than the compressive strength. On the other hand, the addition of fibers had negative effects on the workability and UPV results. Finally, to calculate the tensile and flexural strength of specimens versus compressive strength, the relationships were proposed.*

**Keywords:** *Compressive Strength, Tensile Strength, Self-Compacting Concrete, Flowability*

---

*Ghorbani, A. Experimental and Analytical Investigation on The Effect of Steel Fibers on The Mechanical Properties and Performance of Fibrous Self-Compacting Concretes. Journal of Concrete Structures and Materials, 2021; 6(2): <http://doi.org/10.30478/jcsm.2022.321043.1244> 2538-5828/ © 2021 The Authors. Published by Iranian Concrete Society  
This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).*

# بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی تاثیر الیاف فولادی در خصوصیات مکانیکی و کارایی بتن های خودتراکم الیافی

دریافت مقاله: ۱۴۰۰-۱۰-۰۸

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰-۱۲-۱۵

علی قربانی

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

## چکیده

بتن های خود تراکم با توجه به مزایای آن ها روز به روز در حال توسعه می باشند. در این بین بتن های توانمند نیز به دلیل ویژگی های مناسب مورد توجه محققین قرار گرفته اند. در این مقاله با استفاده از یک تحقیق آزمایشگاهی، مطالعه جامعی بر روی خصوصیات مکانیکی و کارایی بتن توانمند الیافی خود تراکم صورت گرفته است. در قالب این مقاله ۹ طرح اختلاط ساخته شد. آزمایش های مقاومت فشاری، کششی، خمشی در بخش خصوصیات مکانیکی بر روی نمونه ها انجام شد. در بخش کارایی، آزمایش حلقه L انجام شد و همچنین آزمایش تعیین سرعت امواج آلتراسونیک به منظور بررسی کیفیت ساخت نمونه ها انجام شد. مطابق با نتایج به دست آمده تاثیر الیاف بر مقاومت کششی و خمشی به مراتب بیشتر از مقاومت فشاری بود. از طرفی افزودن الیاف تاثیرات منفی بر روی کارایی و سرعت امواج داشت. در نهایت نیز روابطی به منظور محاسبه مقاومت کششی و خمشی نمونه ها بر حسب مقاومت فشاری ارائه شد.

کلمات کلیدی: مقاومت فشاری، مقاومت کششی، بتن خود تراکم، کارایی

توسعه شهرها موجب توسعه روش های مختلف ساخت در نقاط مختلف جهان شده است. این روش های ساخت و ساز بسته به سطح تکنولوژی می تواند به منظور کاهش هزینه ها و افزایش دوام سازه های ساخته شده مورد استفاده قرار بگیرد [۱،۲]. از طرفی بتن به دلیل ارزانی و در دسترس بودن مواد تشکیل دهنده آن، یکی از پرکاربردترین مصالح در صنعت ساختمان می باشد. از این رو ضرورت توسعه این ماده به دلیلی گسترش روز افزون استفاده از آن، ضروری می باشد. با پیش رفت علم و افزایش پیچیدگی در صنعت ساختمان، نیاز به به کار گیری مصالح جدید تر با توانمندی های بیشتر ضروری می باشد [۳-۵]. بتن خود تراکم یکی از این محصولات می باشد که با توجه به خواص متفاوت آن، در دهه های اخیر مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته است. بتن خود تراکم یا SCC<sup>۱</sup> نوعی بتن خاصی است که با وزن خود در قالب جاری می شود. این نوع از بتن ها با توجه به اینکه به هیچ ویره ای برای قرار گیری در قالب نیاز ندارند، بتن خود تراکم نامیده می شوند. بتن های خود تراکم برای اولین بار در دهه ۱۹۸۰ در ژاپن ابداع شد و هدف آن کاهش هزینه بتن ریزی بود. این نوع از بتن ها در ادامه با توجه به مزایای زیاد آنها به سرعت در دیگر کشورها نیز استفاده شد [۶،۷]. در کشور ژاپن هر سال حدود ۵۰۰ هزار متر مکعب بتن خود تراکم در سازه های گوناگون مورد استفاده قرار می گیرد. این نوع از بتن ها نیز در سال های اخیر در ایران کاربرد گسترده ای یافته است. تحقیقات در خصوص عملکرد و رفتار بتن خود تراکم در سال های گذشته بخش مهمی از پژوهش های فناوری بتن را به خود اختصاص داده است. بتن خود تراکم که با نام بتن خود تراکم نیز شناخته می شود، نوعی بتن با روانی بالا و بدون جمع شدگی است که با ریخته شدن در محل، به خوبی تمامی فضاهای خالی را پر کرده و بدون نیاز به هیچ گونه فشار مکانیکی، به صورت خود به خود تراکم می شود [۸]. روانی و به تبع آن، اسلامپ بتن خود تراکم بسیار بالاست و طبق استانداردها بین ۴۵۵ تا ۸۱۰ میلی متر است که بنا به نیاز پروژه، در مورد اسلامپ آن تصمیم گیری می شود. ویسکوزیته ی بتن خود تراکم، یکی از ویژگی های منحصر به فرد این نوع بتن است که در بسیاری از پروژه های عمرانی از این ویژگی خاص استفاده می شود [۹،۱۰]. بتن ریزی در هنگامی که از بتن خود تراکم استفاده می شود، بسیار آسان تر است و نیازی به ویراسیون و فشرده کردن بتن وجود ندارد. این موضوع باعث می شود تا هزینه های بتن ریزی کاهش یابند. هم چنین بدون نیاز به هیچ گونه عملیات خاصی، سطوح خارجی این نوع بتن صاف و صیقلی می شود. روانی و کارایی بالای بتن خود تراکم باعث شده تا بتوان اشکال هندسی مختلف که ساخت آنها با بتن معمولی ممکن نیست را شکل داد. مشخص است که کارایی بالا، قابلیت پمپاژ بتن را نیز افزایش می دهد [۱۱-۱۳]. تحقیقات زیادی در خصوص استفاده از بتن های خود تراکم صورت گرفته است. برخی از مطالعات بر روی کاربرد الیاف در بتن های خود تراکم متمرکز شده است. بر اساس تحقیقات آن ها، استفاده از الیاف علاوه بر بهبود خصوصیات مکانیکی موجب افزایش چشمگیری در مقاومت ضربه ای نمونه ها شد [۱۴-۱۶]. محققین دیگر نیز نتایج مشابهی در این زمینه داشته اند. در این تحقیقات اثرات افزودن خاکستر های با ترکیب متفاوت، سنگدانه های سبک و همچنین اثرات افزودن الیاف متفاوت در بتن های خود تراکم بررسی شده است [۱۷-۲۲]. در بتن هایی که به روش های سنتی ساخته می شوند، تراکم آرماتور موجب به وجود آمدن حفرات زیادی در داخل بتن و به خصوص در نواحی حساسی مانند چشمه اتصال می شود. وجود حفرات متعدد در درون اعضای بتنی و نواحی حساس مانند چشمه اتصال، موجب می شود که در صورت

<sup>۱</sup> Self-compacting concrete

اعمال بار های لرزه ای ناگهانی، با توجه به ضعف سازه در این ناحیه، انهدام سازه در نواحی چشمه اتصال رخ دهد. این ضعف سیستم های بتنی تنها به نواحی چشمه اتصال محدود نمی شود و در نواحی دیگر که تراکم زیاد آرماتور ها وجود دارد نیز تکرار این پدیده دور از ذهن نمی باشد. افزایش کارایی بتن از طریق استفاده بتن خود تراکم در سازه های بتنی می تواند موجب بهبود عملکرد سازه ها در برابر بار های لرزه ای شود. این بهبود عملکرد سازه های بتنی که از بتن خود تراکم توانمند در ساخت آنها استفاده شده است در مقایسه با سازه های بتنی که با بتن معمولی ساخته شده اند، چشمگیر می باشد. عدم نیاز به ویبره، مقاومت مناسب، دوام بیشتر و بسیاری مزایای دیگر تنها گوشه ای از این ویژگی های منحصر به فرد بتن خود تراکم در مقایسه با بتن های معمولی می باشد [۱۳،۲۳-۲۵]. در قالب این مقاله یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی خصوصیات مکانیکی و کارایی بتن های خود تراکم الیافی توانمند صورت گرفته است. در این تحقیق در ابتدا نمونه های فشاری، استوانه ای و خمشی به منظور انجام آزمایشات خصوصیات مکانیکی ساخته شد. همچنین به منظور تعیین کارایی بتن ساخته شده، آزمایش حلقه J بر روی هر طرح اختلاط انجام شد. در ادامه داده های به دست آمده از آزمایش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با توجه به اینکه روابط آیین نامه ای موجود، اثرات افزودن الیاف در ترکیب را در نظر نمی گیرند.

## ۲- نیاز تحقیقاتی

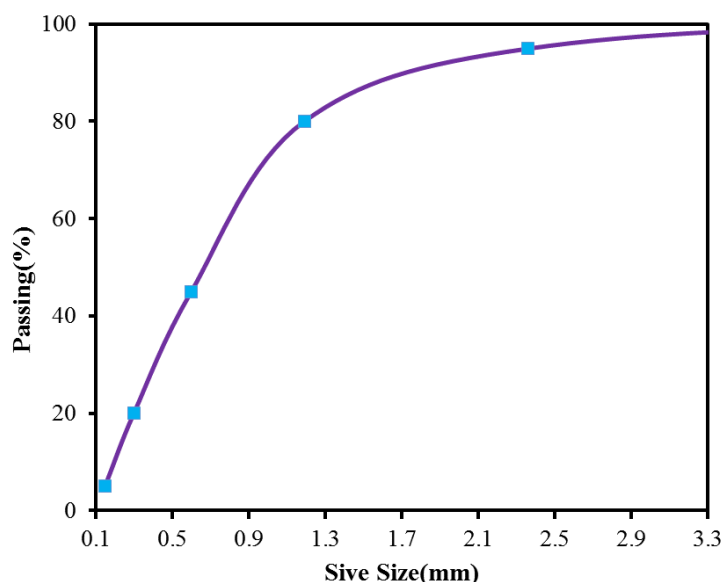
عدم وجود رابط مناسب به منظور ارزیابی خصوصیات مکانیکی و مخصوصاً مقاومت خمشی و کششی، یکی از نیاز های تحقیقاتی در زمینه بتن های خود تراکم الیافی می باشد. در واقع کمبود روابطی که اثرات الیاف فولادی را در مقاومت خمشی و کششی در نظر بگیرند، احساس می شود. انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه های بتنی، بسیار ساده تر از انجام تست های مقاومت خمشی و کششی می باشد. از این رو اجرای تست مقاومت فشاری از لحاظ امکان ساخت نمونه ها و اجرای آن بسیار ساده تر از انجام تست های مقاومت کششی و خمشی می باشد. وجود یک رابطه که با استفاده از آن بتوان مقاومت های کششی و خمشی را بر حسب مقاومت فشاری پیش بینی نمود، به عنوان یکی از اهداف این مقاله در نظر گرفته شد. در قالب روابط ارائه شده در این تحقیق، می توان یک پیش بینی با دقت مناسب در جهت محاسبه مقادیر مقاومت خمشی و کششی نمونه ها بر حسب مقاومت فشاری داشت.

## ۳- برنامه آزمایشگاهی

### ۳-۱- خصوصیات مصالح

در این پژوهش از مصالح سنگی ریزدانه استفاده شده است و تمام مصالح سنگی مورد استفاده عبوری از الک نمره ۸ می باشد. منحنی دانه بندی ماسه مصرفی در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین ماسه مصرفی به ترتیب دارای جذب آب حدود ۳ درصد و چگالی ۲/۶ بود. سیمان مورد استفاده در این تحقیق سیمان پرتلند تیپ II می باشد. خصوصیات سیمان مصرفی در جدول ۱ ارائه شده است. آب مورد استفاده در این آزمایش، آب آشامیدنی شهری می باشد. استفاده از آب به صورتی می باشد که ۹۰ درصد آب در ابتدا و ۱۰ درصد باقی مانده در انتهای فرآیند اختلاط به مخلوط اضافه شد. به منظور ساخت بتن خود تراکم از یک فوق روان کننده با نام تجاری Dezobuild D-10 استفاده گردید. این فوق روان کننده از نوع پلی کربوکسیلاتی می باشد. به منظور افزایش کارایی فوق روان کننده مورد استفاده، با آب مخلوط شده و به همراه آب به طرح اختلاط ها اضافه شد. با استفاده از این روش، یک ساختار همگن تری برای طرح اختلاط ها به دست می آید. در این تحقیق از الیاف فولادی استفاده شد. الیاف مورد استفاده دارای طول ۵۰ میلیمتر بودند. مقاومت کششی الیاف مورد استفاده ۱۱۰۰ مگاپاسکال، مدول یانگ ۲۰۰

گیگاپاسکال و نسبت طول به عرض برای الیاف مورد استفاده تقریباً ۶۲ بود. الیاف مورد استفاده به شکل دو سر قلاب بود که در شکل ۲ قابل مشاهده می باشند. استفاده از الیاف فولادی در این تحقیق به منظور افزایش مقاومت کششی و افزایش مقاومت خمشی صورت گرفت. از طرفی یه منظور به دست آوردن یک ترکیب همگن در مرحله ساخت، در ابتدا مصالح خشک، شامل خاکستر بادی، سیمان و سنگدانه ها با هم مخلوط شده و به مدت ۳ دقیقه در میکسر قرار داده شدند. پس از مخلوط شدن مناسب مصالح خشک، در مرحله دوم حدود ۹۰ درصد آب مخلوط شده با فوق روان کننده، به صورت تدریجی به مخلوط اضافه شد. در انتها الیاف فولادی به تدریج به مخلوط اضافه شدند. پس از اضافه نمودن الیاف فولادی به ترکیب، در انتها ۱۰ درصد باقی مانده آب طرح اختلاط به ترکیب اضافه شد. در نهایت از طریق کنترل چشمی، پخش شدگی یکنواخت الیاف در بتن مورد کنترل قرار گرفت.



شکل ۱- منحنی دانه بندی سنگدانه های مورد استفاده

جدول ۱- مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان مورد استفاده

خصوصیات شیمیایی	
SiO <sub>2</sub>	۲۱/۲
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴/۴۵
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۷۱
MgO	۱/۵۶
K <sub>2</sub> O	۰/۵۲
Na <sub>2</sub> O	۰/۳۹
CaO	۶۲/۲۲
C <sub>3</sub> S	۵۰/۲۱
C <sub>2</sub> S	۲۲/۷
C <sub>3</sub> A	۵/۳
C <sub>4</sub> AF	۱۲/۸
خصوصیات فیزیکی	
وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )	۳/۱۱
سطح مخصوص (gr/cm <sup>2</sup> )	۳۰۵۰

جدول ۲- آنالیز XRF خاکستر بادی

ترکیب	MgO	AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO
درصد	۰/۸۲	۲۸/۳	۶۲/۹	۳/۸	۰/۸



شکل ۲- الیاف مصرفی مورد استفاده

### ۲-۳- ساخت نمونه ها

در این تحقیق به منظور دستیابی به داده های آزمایشگاهی کافی جهت ارزیابی رفتار بتن ساخته شد، ۹ طرح اختلاط در نظر گرفته شد. مطابق با جدول ۳، متغیر های در نظر گرفته شده در انتخاب طرح اختلاط نمونه ها شامل مقدار خاکستر بادی مورد استفاده در هر متر مکعب بتن (شامل ۱۵، ۳۰ و ۶۰ کیلوگرم)، درصد الیاف فولادی مورد استفاده که به ترتیب صفر، ۰/۵ و ۱ درصد حجم بتن می باشد. این درصد الیاف به نحوی انتخاب شده است که اثرات افزودن الیاف در نمونه ها قابل بررسی باشد. نحوه نامگذاری نمونه ها هم به صورتی می باشد که عبارت FA نشان دهنده میزان خاکستر بادی استفاده در ترکیب بر حسب کیلوگرم می باشد. همچنین عبارت SF در نامگذاری نمونه ها، نشان دهنده درصد الیاف فولادی مورد استفاده می باشد.

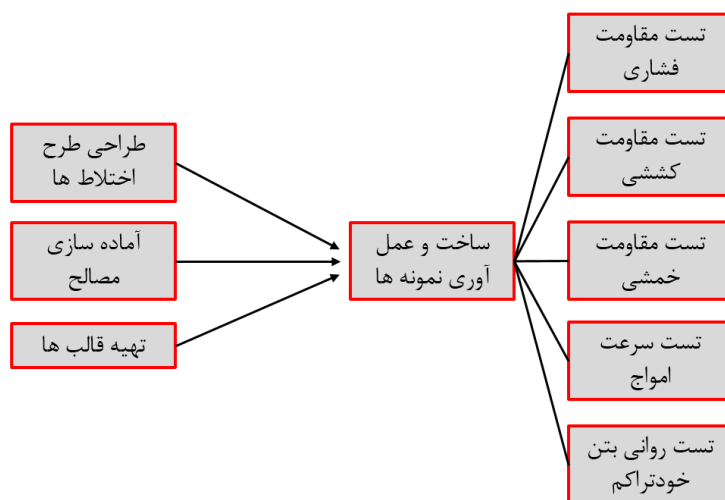
در ادامه به منظور تعیین مقاومت فشاری نمونه ها، از هر طرح اختلاط ۳ نمونه مکعب با اندازه ۱۰۰ میلیمتر ساخته شد. این نمونه ها به منظور تعیین مقاومت فشاری نمونه ها مطابق با استاندارد ASTM C39 ساخته شد. همچنین با توجه به اینکه بتن مورد استفاده از نوع خود تراکم می باشد، از هیچ ویبره ای به منظور ساخت این نمونه ها استفاده نشد. در ادامه با توجه به اینکه مقاومت کششی یکی از پارامتر های مهم به منظور ارزیابی کیفیت بتن ساخته و ارزیابی عملکرد الیاف می باشد، از هر طرح اختلاط ۳ نمونه استوانه به قطر ۱۰۰ و طول ۲۰۰ میلیمتر ساخته شد. از این استوانه ها به منظور تعیین مقاومت کششی مطابق با استاندارد ASTM C 496 استفاده شد. این نمونه ها در واقع به منظور ارزیابی مقاومت کششی طرح اختلاط ها ساخته شده، مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه ساخت نمونه ها جهت تعیین خصوصیات مکانیکی، نمونه های منشوری به طول ۳۲۰ و عرض و ارتفاع به ترتیب ۶۰ و ۸۰ میلیمتر ساخته شد. از این نمونه ها به منظور ارزیابی مقاومت خمشی طرح اختلاط ها استفاده شد. نمونه تیر های کوچک تحت آزمایش خمش چهار نقطه ای مطابق با استاندارد ASTM C78 قرار گرفتند. در این آزمایش تغییر مکان وسط نمونه ها به همراه بار وارده ثبت گردید. همچنین به منظور کنترل کیفیت ساخت نمونه ها، آزمایش تعیین سرعت امواج آلتراسونیک<sup>۱</sup> بر روی نمونه های مکعبی فشاری انجام شد. در واقع قبل از انجام آزمایش مقاومت

<sup>1</sup> Ultrasonic pulse velocity test

فشاری، سرعت امواج آلتراسونیک عبوری از نمونه های فشاری، تعیین شد. نمونه های ساخته شده به مدت ۲۴ ساعت درون قالب نگه داشته شده و در طول این مدت روی قالب ها با استفاده از رطوبت مرطوب نگه داشته شده بود. نمونه های ساخته شده به مدت ۲۸ روز در دمای اتاق عمل آوری شدند. با توجه به اینکه نمونه ها در سن ۲۸ روزه تست شده اند، لذا نتایج ارائه شده در قالب این مقاله مربوط به نمونه های با سن ۲۸ روز می باشند. همچنین در شکل ۳ فلوچارت روند انجام آزمایشات نشان داده شده است.

جدول ۳- طرح اختلاط های استفاده شده در ساخت یک متر مکعب کامپوزیت سیمانی

شماره	نام طرح اختلاط	آب (kg)	خاکستر بادی	سیمان (kg)	ماسه (kg)	درصد الیاف به طول ۵۰ میلی متر	فوق روان کننده (kg)
۱	FA15SF0	۲۲۸	۱۵	۵۸۵	۱۸۰۰	۰	۴/۸
۲	FA30SF0	۲۲۸	۳۰	۵۷۰	۱۸۰۰	۰	۴/۸
۳	FA60SF0	۲۲۸	۶۰	۵۴۰	۱۸۰۰	۰	۴/۸
۴	FA15SF0.5	۲۲۸	۱۵	۵۸۵	۱۸۰۰	۰/۵	۴/۸
۵	FA30SF0.5	۲۲۸	۳۰	۵۷۰	۱۸۰۰	۰/۵	۴/۸
۶	FA60SF0.5	۲۲۸	۶۰	۵۴۰	۱۸۰۰	۰/۵	۴/۸
۷	FA15SF1	۲۲۸	۱۵	۵۸۵	۱۸۰۰	۱	۴/۸
۸	FA30SF1	۲۲۸	۳۰	۵۷۰	۱۸۰۰	۱	۴/۸
۹	FA60SF1	۲۲۸	۶۰	۵۴۰	۱۸۰۰	۱	۴/۸



شکل ۳- نمودار فرایند های انجام شده در این تحقیق

#### ۴- نتایج آزمایش

##### ۴-۱- آزمایش J-Ring

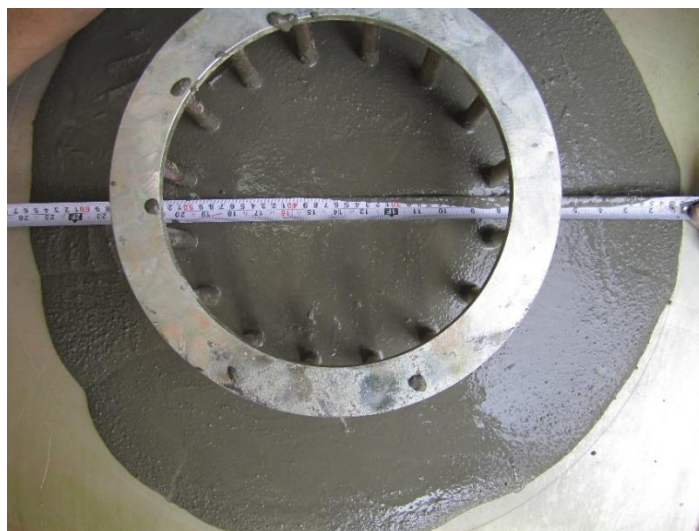
به منظور ارزیابی کیفیت بتن ساخته شده، آزمایش حلقه J بر روی بتن های تازه انجام شد. با استفاده از این آزمایش و تعیین قطر بتن تازه، می توان در مورد کیفیت بتن ساخته شده خود تراکم قضاوت نمود. در جدول ۴، نتایج آزمایش حلقه J نشان داده شده است. مطابق با این آزمایش هر چه که قطر نمونه بیشتر باشد، خاصیت خود تراکمی طرح اختلاط ساخته شده بیشتر می باشد. بازه تغییرات قطر نمونه برای گروه های مختلف بین ۶۷۵ تا ۵۶۵ میلیمتر می باشد. بیشترین قطر نمونه ها در نمونه های گروه اول که فاقد الیاف می باشند ملاحظه می شود. در



واقع در این گروه با افزایش مقادیر خاکستر بادی، قطر بتن تازه در آزمایش حلقه J افزایش یافته است. بیشترین قطر متعلق به نمونه های گروه FA60SF0 می باشد که تقریباً ۹ درصد بیشتر از قطر نمونه های گروه FA15SF0 می باشد. این افزایش قطر نشان دهنده تاثیر مثبت میزان خاکستر بادی در افزایش روانی بتن خود تراکم می باشد. در واقع خاکستر بادی به دلیل دارا بودن ذرات ریز کرووی، موجب افزایش روانی بتن خود تراکم می شود. همچنین مطابق با نتایج، مشخص می گردد که استفاده از الیاف فولادی موجب کاهش روانی بتن خود تراکم شده است. در گروه های دارای ۰/۵ و ۱ درصد الیاف فولادی، در مقایسه با نمونه های گروه فاقد الیاف، کارایی بتن خود تراکم کاهش یافته است. این کاهش می تواند به علت جذب درصدی از آب مخلوط توسط سطح الیاف فولادی باشد. در واقع استفاده از الیاف فولادی موجب می شود که مقداری از آب بتن، صرف خیس شدن سطح الیاف فولادی شود و در نتیجه روانی کاهش یابد. در واقع با افزایش درصد الیاف فولادی، میزان کارایی بتن خود تراکم به طور محسوسی کاهش یافت. متوسط قطر حلقه J در نمونه های گروه بدون الیاف، دارای الیاف فولادی ۰/۵ درصد و دارای الیاف فولادی ۱ درصد به ترتیب ۶۵۰، ۶۱۸ و ۵۹۲ میلیمتر می باشد. مقایسه این سه مقدار نشان می دهد که تقریباً افزودن الیاف فولادی به میزان ۰/۵ و ۱ درصد می تواند موجب کاهش قطر بتن خود تراکم به میزان ۵ و ۹ درصد شود. در این تحقیق، کاهش کارایی به صورتی می باشد که مسئله خود تراکمی را زیر سوال نمی برد، زیرا کمترین قطر مربوط به نمونه FA15SF1 می باشد که به هر حال بزرگتر از ۵۵۰ میلیمتر است.

جدول ۴- نتایج آزمایش حلقه J

شماره	نام طرح اختلاط	نتایج آزمایش حلقه J بر حسب میلیمتر		
		قطر $d_1$	قطر $d_2$	میانگین
۱	FA15SF0	۶۳۰	۶۱۰	۶۲۰
۲	FA30SF0	۶۵۰	۶۶۰	۶۵۵
۳	FA60SF0	۶۸۰	۶۷۰	۶۷۵
۴	FA15SF0.5	۵۹۰	۶۱۰	۶۰۰
۵	FA30SF0.5	۶۳۰	۶۱۰	۶۲۰
۶	FA60SF0.5	۶۵۰	۶۲۰	۶۳۵
۷	FA15SF1	۵۶۰	۵۷۰	۵۶۵
۸	FA30SF1	۶۰۰	۵۹۰	۵۹۵
۹	FA60SF1	۶۱۰	۶۲۰	۶۱۵

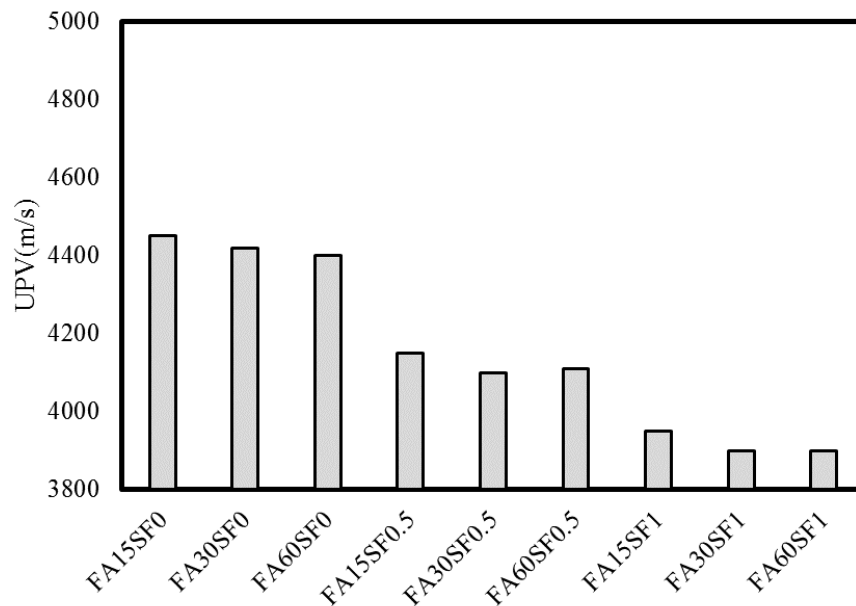


شکل ۴- نحوه اندازه گیری قطر در آزمایش حلقه J



## ۴-۲- آزمایش آلتراسونیک

در این مقاله آزمایش تعیین سرعت امواج آلتراسونیک مطابق با استاندارد ASTM C597 انجام شد. مطابق با این استاندارد، سرعت عبور امواج فراصوت از نمونه های بتنی اندازه گیری شد. نتایج حاصل از این آزمایش در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطوری که در شکل ملاحظه می شود، نمونه گروه FA15SF0 دارای بیشترین سرعت امواج در بین سایر نمونه ها می باشند. همچنین کمترین مقادیر سرعت امواج در بین گروه های مختلف، به گروه FA60SF1 تعلق دارد. بازه تغییرات سرعت امواج در بین نمونه ها بین ۳۹۰۰ تا ۴۴۵۰ متر بر ثانیه متغیر می باشد. همانطوری که ملاحظه می شود با افزایش مقادیر الیاف فولادی به نمونه ها، مقاومت سرعت امواج کاهش می یابد. این کاهش سرعت امواج با افزایش درصد الیاف فولادی، برای نمونه های الیافی با الیاف ۱٪ بیشتر مشهود می باشد. در واقع می توان گفت که با افزایش درصد الیاف در نمونه ها خلل و فرج و همچنین حفرات در نمونه ها افزایش می یابد. این افزایش حفرات موجب کاهش سرعت امواج شده است. در واقع با افزودن الیاف به نمونه های مکعبی، به دلیل افزایش خلل و فرج، حفراتی در اطراف الیاف به وجود آمده و این حفرات موجب شدند که نتایج آزمایش سرعت امواج آلتراسونیک در نمونه های الیافی کاهش یابد. میانگین سرعت امواج در گروه نمونه های بدون الیاف برابر با ۴۴۲۳ متر بر ثانیه می باشد که تقریباً حدود ۷ و ۱۳ درصد بیشتر از مقادیر محاسبه شده برای نمونه های دارای الیاف ۰/۵ و ۱ درصد می باشد. از طرفی استفاده از خاکستر بادی در ترکیب تا حدودی موجب مقداری کاهش جزئی در سرعت امواج آلتراسونیک در نمونه ها شد. همانطوری که در شکل ۳ ملاحظه می شود، روند تغییرات سرعت امواج و نتایج تست ها با افزایش درصد الیاف، یک روند نزولی می باشد. این روند مطابق با نتایج محققین دیگر می باشد که در واقع استفاده از درصد بالای الیاف را موجب کاهش مقادیر سرعت امواج می دانند. این پدیده به دلیل به وجود آمدن حفرات بیشتر با افزایش درصد الیاف در بتن می باشد.

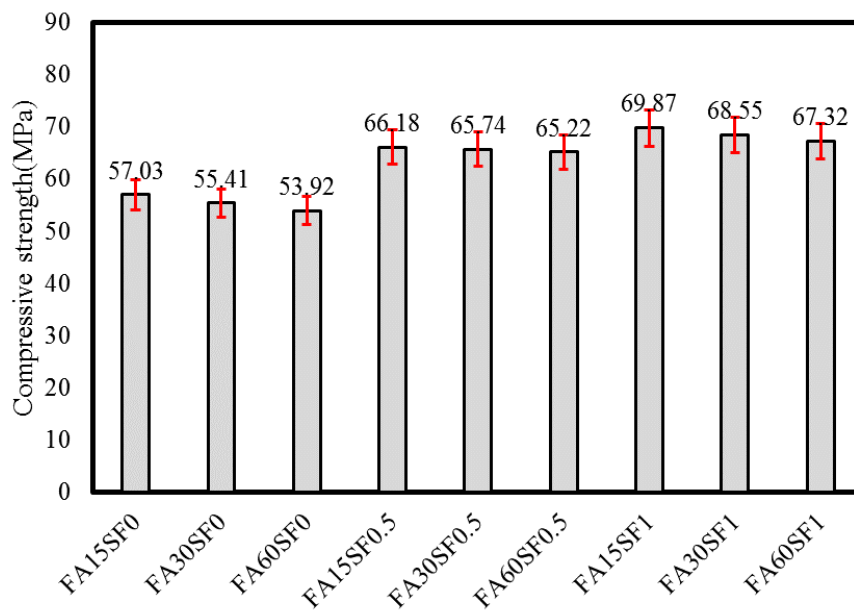


شکل ۵- نتایج آزمایش آلتراسونیک بر روی نمونه ها

## ۴-۳- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری نمونه های آزمایشگاهی در این تحقیق مطابق با استاندارد ASTM C59 انجام شد [۲۶]. این آزمایش بر روی نمونه های مکعبی به ابعاد ۱۰۰ میلیمتر صورت گرفت. به منظور انجام آزمایش تعیین مقاومت فشاری نمونه ها از یک دستگاه جک بتن شکن با ظرفیت ۳۰۰ تن استفاده شد. بارگذاری اعمالی به نمونه های مکعبی به آرامی و با نرخ بارگذاری در محدوده مشخص شده به وسیله استاندارد ASTM C59 صورت گرفت.

بارگذاری اعمالی تا مرحله ای ادامه یافت که نمونه های مکعبی دیگر قادر به تحمل بار بیشتری نبودند. این روند برای همه نمونه های مکعبی اجرا شد. همچنین از هر طرح اختلاط سه نمونه مکعبی آزمایش شد. در شکل ۶ نمودار ستونی نتایج مقاومت فشاری نمونه ها نشان داده شده است. همانطوری که در شکل ملاحظه می شود، نمونه های دارای الیاف ۱ درصد دارای بیشترین مقاومت فشاری در مقایسه با سایر نمونه ها هستند. این افزایش مقاومت نسبت به نمونه های فاقد الیاف تقریباً محسوس می باشد. از طرفی حداکثر و حداقل مقاومت فشاری در بین نمونه ها به ترتیب به نمونه های FA15SF1 و FA60SF0 تعلق دارد. در واقع کمترین و بیشترین مقادیر مقاومت فشاری به ترتیب به نمونه فاقد الیاف و نمونه با الیاف ۱ درصد تعلق دارد. مقایسه نمونه های دارای الیاف ۰/۵ و صفر درصد نشان می دهد که افزودن ۰/۵ درصد الیاف فولادی به ترکیب موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه ها می شود. در واقع افزودن الیاف به ترکیب موجب افزایش انسجام ترکیب شده و از طریق پل زدن الیاف نسبت به یکدیگر و نسبت به خمیر سیمان موجب افزایش مقاومت فشاری می شود. از طرفی، با افزودن الیاف به بتن، در واقع افزایش مسلح سازی بتن با استفاده از الیاف فولادی صورت می گیرد. این مسلح سازی موجب افزایش مقاومت کششی و تا حدودی مقاومت فشاری می شود [۶]. میانگین مقاومت فشاری برای نمونه های فاقد الیاف، دارای الیاف ۰/۵ درصد و دارای الیاف ۱ درصد به ترتیب ۵۵/۴۵، ۶۵/۷۱ و ۶۸/۵۸ مگاپاسکال می باشد. همانطوری که مقادیر متوسط مقاومت فشاری هر گروه نشان می دهد افزودن ۱ درصد الیاف فولادی به ترکیب موجب افزایش مقاومت فشاری به ترتیب به میزان ۲۴ و ۵ درصد نسبت به نمونه های فاقد الیاف و نمونه های دارای الیاف ۰/۵ درصد شد. همچنین در مورد افزایش میزان خاکستر بادی، می توان نتیجه گرفت که با افزایش مقدار خاکستر بادی، میزان مقاومت فشاری تا حدودی کاهش می یابد. در واقع افزودن خاکستر بادی در نتایج آزمایش اثر محسوسی ندارد.

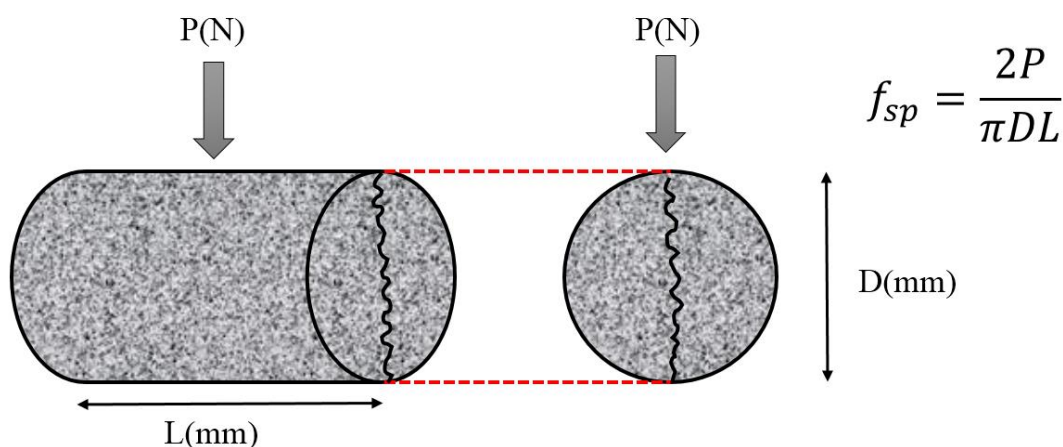


شکل ۶- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه ها

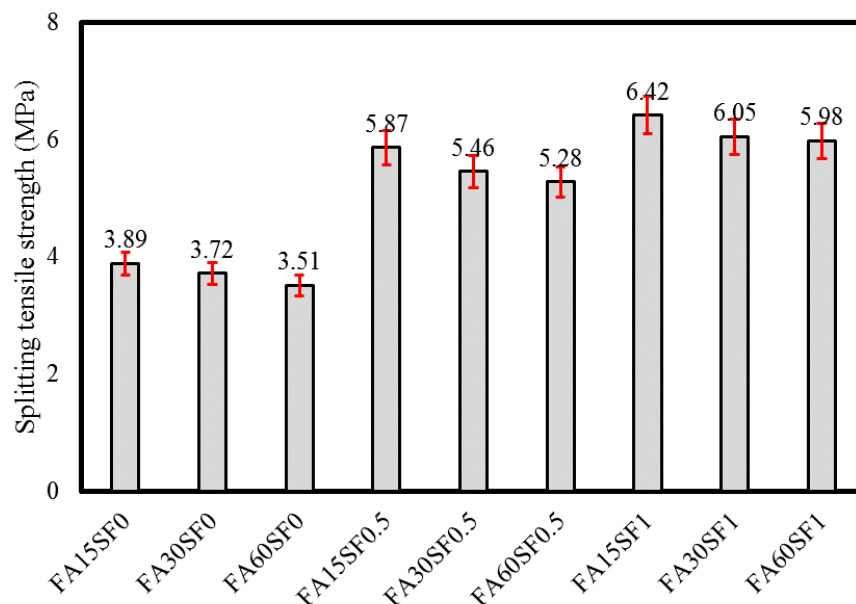
#### ۴-۴- مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه های استوانه ای به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلیمتر مطابق با استاندارد ASTM C 496 انجام شد [۲۷]. مطابق با این استاندارد نمونه ها می بایست به صورت کنترل شده تحت اثر نیروی فشاری قرار گیرند. به منظور انجام تست مقاومت کششی مطابق با استاندارد ASTM C496، از یک دستگاه جک

بتن شکن به ظرفیت ۳۰۰ تن استفاده شد. نرخ بارگذاری اعمالی به نمونه‌ها مطابق با استاندارد انتخاب شد. مطابق با شکل ۵، نیروی P به نمونه استوانه‌ای اعمال گردید، این نیرو با توجه به شکل ۷، موجب گسیختگی نمونه‌های استوانه‌ای شد. بارگذاری اعمالی تا گسیختگی کامل نمونه ادامه یافت. مقادیر مقاومت کششی نمونه‌های به طول L و قطر D طبق رابطه ارائه شده محاسبه گردید. در رابطه موجود در شکل فوق، L طول نمونه استوانه‌ای بر حسب میلی‌متر، D قطر نمونه بر حسب میلی‌متر و  $f_{sp}$  مقاومت کششی نمونه بر حسب مگاپاسکال می‌باشد. همچنین در شکل ۸ مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای نشان داده شده است. همانطوری که نتایج نشان می‌دهد، بازه تغییرات مقادیر مقاومت کششی نمونه‌ها برای گروه‌های مختلف از ۳/۵۱ تا ۶/۴۲ مگاپاسکال می‌باشد. کمترین و بیشترین مقاومت کششی به ترتیب در نمونه‌های گروه‌های FA15SF1 و FA60SF0 دیده می‌شود. در واقع تاثیر الیاف در افزایش مقاومت کششی نمونه‌ها کاملاً مشهود می‌باشد. این تاثیر به گونه‌ای می‌باشد که بین مقاومت کششی نمونه‌های بدون الیاف و نمونه‌های الیافی یک تفاوت زیاد وجود دارد. متوسط مقاومت کششی در نمونه‌های الیافی ۵/۸۴ می‌باشد که تقریباً ۵۸ درصد بیش از نمونه‌های فاقد الیاف می‌باشد. این افزایش مقاومت کششی به دلیل افزودن الیاف در ترکیب می‌باشد. اضافه نمودن الیاف در بتن موجب می‌شود تا پیوند بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها از طریق الیاف بهبود یابد. این بهبود باند بین سنگدانه‌ها و انتقال بخش زیادی از تحمل نیروی کششی به الیاف، در نهایت منجر به افزایش مقاومت کششی خواهد شد [۶، ۷، ۱۴]. متوسط مقاومت کششی در نمونه‌های الیافی دارای الیاف ۱ و ۵/۵۴ درصد به ترتیب ۶/۱۵ و ۵/۵۴ مگاپاسکال می‌باشد. این افزایش در مقاومت کششی نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف که دارای متوسط مقاومت کششی ۳/۷۱ می‌باشد، تقریباً زیاد می‌باشد. همچنین افزایش میزان خاکستر بادی در مقادیر مقاومت کششی، تقریباً منفی بوده. با افزایش میزان مقاومت کششی در نمونه‌ها، تا حدودی مقاومت کششی کاهش یافت. این کاهش عمدتاً به دلیل کاهش باند بین الیاف و خمیر سیمان به دلیل افزایش میزان خاکستر بادی می‌باشد. این کاهش ناچیز در مقابل افزایش خاصیت خود تراکمی قابل چشم پوشی می‌باشد. در واقع با توجه به نتایج آزمایش حلقه ل، افزایش مقادیر خاکستر بادی موجب افزایش خاصیت خود تراکمی نمونه‌ها شد، از طرفی موجب مقداری کاهش در مقادیر مقاومت کششی و فشاری شد. این افزایش خاصیت خود تراکمی در مقابل کاهش ناچیز مقاومت، به عنوان یک مزید، می‌تواند در نظر گرفته شود.



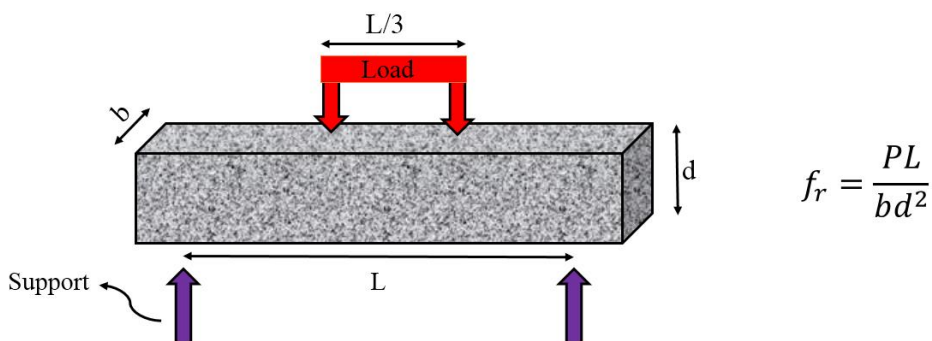
شکل ۷- محاسبه مقادیر تنش کششی



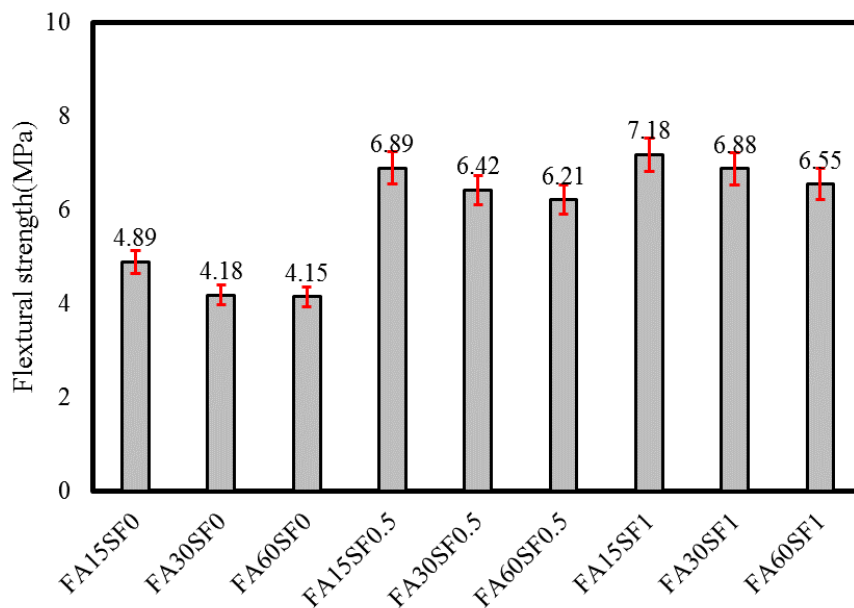
شکل ۸- مقاومت کششی نمونه های استوانه ای

#### ۴-۵- مقاومت خمشی

آزمایش مقاومت خمشی نمونه های خمشی به صورت اعمال بار چهار نقطه ای مطابق با استاندارد ASTM C78 انجام شد [۲۸]. شرایط بارگذاری اعمالی به صورتی بود، که شدت اعمال بار در بازه مشخص شده توسط استاندارد ASTM C78 قرار داشت. این شدت بار می بایست با کنترل نیروی دستگاه، اعمال شود. مقادیر مقاومت خمشی نمونه ها با استفاده از رابطه نشان داده شده در شکل ۹ محاسبه گردید. در این رابطه،  $L$  طول دهانه نمونه بر حسب میلیمتر،  $d$  ارتفاع نمونه،  $b$  عرض نمونه بر حسب میلیمتر و  $P$  بار اعمالی می باشد. مقاومت خمشی  $f_r$  بر حسب مگاپاسکال محاسبه می شود. این مقاومت برای کلیه نمونه ها محاسبه شده است. همچنین عرض نمونه های منشوری در این تحقیق ۶۰ میلیمتر، ارتفاع آنها ۸۰ میلیمتر و دهانه خالص بارگذاری ۲۴۰ میلیمتر می باشد. همچنین به منظور جلوگیری از سر خوردن نمونه ها و داشتن طول کافی، طول کلی نمونه ها ۳۲۰ میلیمتر در نظر گرفته شد. نتایج مقاومت خمشی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطوری که در شکل ملاحظه می شود، مطابق روند قبل، نمونه های دارای الیاف فولادی دارای حداکثر مقادیر مقاومت خمشی می باشد. این افزایش مقاومت خمشی در نمونه های الیافی تقریباً دارای روندی مشابه با مقاومت کششی می باشد. در واقع با توجه به ارتباط مستقیم مقادیر مقاومت کششی و مقاومت خمشی به میزان الیاف مورد استفاده در نمونه ها، این افزایش مقاومت خمشی قابل توجیه می باشد. حداکثر مقاومت خمشی در بین نمونه ها متعلق به گروه FA15SF1 می باشد. حداکثر مقاومت خمشی در گروه FA15SF1 تقریباً ۱/۷۳ برابر حداقل مقاومت خمشی در گروه FA60SF0 می باشد. مقاومت متوسط در کل نمونه های الیافی دارای الیاف ۰/۵ و ۱ درصد به طور میانگین برابر ۶/۶۹ مگاپاسکال می باشد که تقریباً ۱/۵۲ برابر بیش از متوسط مقاومت خمشی میانگین نمونه های الیافی می باشد. این افزایش مقاومت خمشی به دلیل افزودن و تاثیر مثبت الیاف در بتن خود تراکم می باشد. از طرفی مقاومت خمشی میانگین نمونه های دارای الیاف ۱ درصد تقریباً ۵ درصد بیش از نمونه های دارای الیاف فولادی ۰/۵ درصد می باشد. این تفاوت کم عمدتاً به دلیل کافی بودن الیاف فولادی ۰/۵ درصد در افزایش بیش از ۶۵ درصدی مقاومت خمشی نمونه ها می باشد. در واقع با افزایش درصد الیاف از ۰/۵ به ۱ درصد مقاومت خمشی نمونه ها به طور چشمگیری افزایش نمی یابد. همچنین روند کاهش مقاومت فشاری و کششی با افزایش مقادیر خاکستر بادی در نمونه های خمشی نیز تا حدودی ملاحظه می گردد. این کاهش در مقابل افزایش کارای ترکیب قابل صرف نظر کردن می باشد.



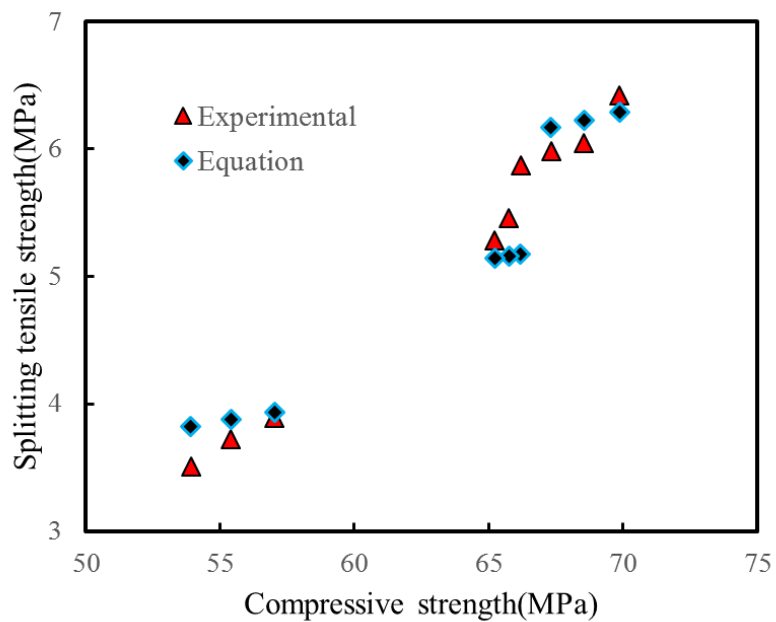
شکل ۹- مشخصات نمونه خمشی



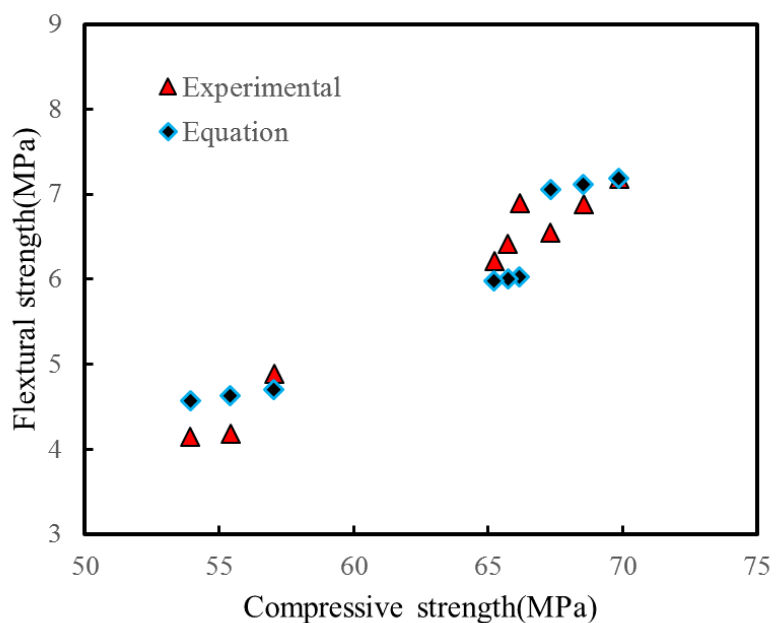
شکل ۱۰- مقاومت خمشی نمونه های منشوری

#### ۴-۶- تحلیل آماری داده ها

با توجه به ارتباط مقاومت فشاری با سایر خصوصیات مکانیکی نظیر مقاومت کششی و مقاومت خمشی، در این بخش از مقاله، خصوصیات مکانیکی مورد تحلیل قرار می گیرد. در شکل ۱۱-الف مقادیر مقاومت کششی در مقابل مقاومت فشاری نمونه ها نشان داده شده است. همانطوری که ملاحظه می شود، رابطه پیشنهادی در قالب رابطه ۱، دارای خطای کمی نسبت به مقادیر آزمایشگاهی می باشد. یکی از عیوب روابط آیین نامه ای در خصوص پیش بینی مقاومت کششی بر حسب مقاومت فشاری نمونه های ییافی، عدم در نظر نگرفتن تاثیر ییاف بر مقاومت کششی می باشد. در رابطه پیشنهادی، اثرات ییاف بر حسب درصد در نظر گرفته شده است. در واقع در رابطه ۱، SF درصد ییاف فولادی مورد استفاده در ترکیب می باشد. این رابطه طیف ییاف بین ۰ تا ۱ درصد را پوشش می دهد. همان طوری که در جدول ۵ ملاحظه می شود، حداکثر خطای این رابطه حدود ۱۱ درصد و کمترین میزان خطای رابطه پیشنهادی حدود ۱ درصد می باشد. همچنین متوسط خطای رابطه پیشنهادی جهت محاسبه مقاومت کششی، ۴/۷ درصد می باشد که تقریباً قابل قبول است. همچنین در شکل ۱۱-ب، مقایسه ای بین مقادیر مقاومت خمشی به دست آمده از آزمایش، با مقاومت خمشی محاسبه شده به وسیله رابطه پیشنهادی ۲، صورت گرفته است. همانطوری که در شکل نشان داده شده است، تقریباً انطباق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج محاسبه شده از طریق رابطه وجود دارد. حداکثر و حداقل اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی با رابطه ارائه شده به ترتیب حدود ۱۲ و ۰/۱ درصد می باشد.



الف) مقاومت کششی



ب) مقاومت خمشی

شکل ۱۱- مقایسه نتایج مقاومت کششی و خمشی آزمایشگاهی و پیش بینی شده

$$f_{sp} = (0.259 \times SF + 0.582) \times \sqrt{f'_c} \quad (1)$$

$$f_r = (0.27 \times SF + 0.69) \times \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

جدول ۵- مقایسه بین نتایج مقاومت کششی و خمشی آزمایشگاهی و پیش بینی شده

طرح اختلاط	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)			مقاومت خمشی (MPa)		
		آزمایشگاهی	پیش بینی شده	درصد خطا	آزمایشگاهی	پیش بینی شده	درصد خطا
FA15SF0	۵۷/۰۳	۳/۸۹	۳/۹۳	۱/۱	۴/۸۹	۴/۷	۳/۹
FA30SF0	۵۵/۴۱	۳/۷۲	۳/۸۸	۴/۲۲	۴/۱۸	۴/۶۳	۱۰/۷۵
FA60SF0	۵۳/۹۲	۳/۵۱	۳/۸۲	۸/۹۶	۴/۱۵	۴/۵۷	۱۰/۰۴
FA15SF0.5	۶۶/۱۸	۵/۸۷	۵/۱۸	۱۱/۸	۶/۸۹	۶/۰۳	۱۲/۵۳
FA30SF0.5	۶۵/۷۴	۵/۴۶	۵/۱۶	۵/۴۹	۶/۴۲	۶/۰۱	۶/۴۴
FA60SF0.5	۶۵/۲۲	۵/۲۸	۵/۱۴	۲/۶۶	۶/۲۱	۵/۹۸	۳/۶۵
FA15SF1	۶۹/۸۷	۶/۴۲	۶/۲۹	۲/۰۹	۷/۱۸	۷/۱۹	۰/۱
FA30SF1	۶۸/۵۵	۶/۰۵	۶/۲۳	۲/۹۲	۶/۸۸	۷/۱۲	۳/۴۷
FA60SF1	۶۷/۳۲	۵/۹۸	۶/۱۷	۳/۸	۶/۵۵	۷/۰۵	۷/۷

## ۵- نتیجه گیری

در قالب این مطالعه که به صورت آزمایشگاهی انجام گرفت، اثرات افزودن الیاف فولادی بر خصوصیات مکانیکی و روانی بتن های خود تراکم الیافی مورد بررسی قرار گرفت. در قالب این تحقیق آزمایشات حلقه ل، تعیین سرعت عبور امواج آلتراسونیک، مقاومت فشاری، مقاومت کششی دو نیم شدن و مقاومت خمشی بر روی نمونه مطابق استاندارد ASTM انجام شد. در ادامه نتایج به دست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و روابطی جهت تعیین مقاومت کششی و خمشی بتن های خود تراکم الیافی ارائه شد. برخی از نتایج کلی به دست آمده در قالب این تحقیق به شرح زیر می باشد:

۱- مطابق با نتایج به دست آمده از آزمایش حلقه ل، با افزایش درصد الیاف به ترکیب، روانی نمونه ها در حالت کلی کاهش یافت، این کاهش در نمونه های دارای الیاف فولادی ۱ درصد بیشتر از سایر نمونه بود. همچنین افزایش میزان خاکستر بادی در ترکیب، در نهایت منجر به افزایش روانی نمونه ها شد. در واقع خاکستر بادی موجب افزایش کارایی بتن خودتراکم شد.

۲- مقایسه نتایج مقاومت فشاری نمونه، نشان داد که اثرات افزودن خاکستر بادی بر مقاومت فشاری به صورت منفی می باشد. در واقع با افزایش درصد خاکستر بادی در ترکیب، مقاومت فشاری نمونه ها مقداری کاهش داشت.

۳- مقایسه داده های مربوط به مقاومت کششی نشان می دهد، که اثرات الیاف بیش از سایر پارامتر ها می باشد. متوسط مقاومت کششی نمونه های الیافی حدود ۵۸ درصد بیشتر از متوسط مقاومت کششی نمونه های فاقد الیاف بود. در واقع استفاده از الیاف موجب افزایش انسجام نمونه ها شد.

۴- نتایج آزمایش مقاومت خمشی نشان داد که، روند افزایش مقاومت کششی دو نیم شدن با افزودن الیاف، برای مقاومت خمشی نیز برقرار است. این رفتار مشابه به دلیل تاثیر مستقیم الیاف بر مقاومت کششی و خمشی می باشد. مقاومت خمشی حداکثر در نمونه های الیافی حدود ۷۳ درصد بیشتر از مقاومت خمشی نمونه بودن الیاف بود.

۵- مقایسه نتایج آزمایش تعیین سرعت امواج آلتراسونیک نشان داد که افزودن الیاف موجب کاهش سرعت امواج در نمونه ها شد. این کاهش سرعت امواج با افزودن الیاف، به دلیل افزایش حفرات تشکیل شده در نمونه های الیافی بود. حداکثر سرعت امواج التراسونیک در نمونه های بدون الیاف مشاهده شد که حدود ۱۵ درصد بیشتر از نمونه های الیافی بود.



۶- مطابق با تحلیل آماری صورت گرفته بر روی داده های آزمایشگاهی مشخص شد که، میانگین درصد خطای به وجد آمده در روابط پیش نهادهی زیر ۵ درصد می باشد که بسیار قابل قبول است. این خطای پایین می تواند نشان دهنده قابل اطمینان بودن نتایج باشد.

### تقدیر و قدردانی

این مقاله با استفاده از پشتیبانی فنی شرکت اندیشه سازان صنعت آینده انجام شده است. نویسنده بر خود لازم می داند مراتب تشکر صمیمانه خود را از کارکنان این شرکت اعلام کند.

### مراجع

- [1] Fakharifar M, Dalvand A, Arezoumandi M, Sharbatdar MK, Chen G, Kheyroddin A. Mechanical properties of high performance fiber reinforced cementitious composites. *Comput Chem Eng* 2014;71:510–20. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.068>.
- [2] Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers A Khaloo, EM Raisi, P Hosseini, H Tahsiri *Construction and building materials* 51, 179-186.
- [3] Sun Z, Lin X, Vollpracht A. Pervious concrete made of alkali activated slag and geopolymers. *Constr Build Mater* 2018;189:797–803. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.067>.
- [4] Alzeebaree R, Çevik A, Nematollahi B, Sanjayan J, Mohammedameen A, Gülşan ME. Mechanical properties and durability of unconfined and confined geopolymer concrete with fiber reinforced polymers exposed to sulfuric acid. *Constr Build Mater* 2019;215:1015–32. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.165>.
- [5] Lee WH, Wang JH, Ding YC, Cheng TW. A study on the characteristics and microstructures of GGBS/FA based geopolymer paste and concrete. *Constr Build Mater* 2019;211:807–13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.291>.
- [6] Mastali M, Dalvand A. Use of silica fume and recycled steel fibers in self-compacting concrete (SCC). *Constr Build Mater* 2016;125:196–209. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.046>.
- [7] Mastali M, Dalvand A. The impact resistance and mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with recycled CFRP pieces. *Compos Part B Eng* 2016;92:360–76. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.01.046>.
- [8] Mastali M, Abdollahnejad Z, Dalvand A, Sattarifard A, Illikainen M. Comparative effects of using recycled CFRP and GFRP fibers on fresh- and hardened-state properties of self-compacting concretes: a review. *New Mater. Civ. Eng., Elsevier*; 2020, p. 643–55. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818961-0.00019-3>.
- [9] Altalabani D, Bzeni DKH, Linsel S. Mechanical properties and load deflection relationship of polypropylene fiber reinforced self-compacting lightweight concrete. *Constr Build Mater* 2020;252:119084. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119084>.
- [10] Faraj RH, Hama Ali HF, Sherwani AFH, Hassan BR, Karim H. Use of recycled plastic in self-compacting concrete: A comprehensive review on fresh and mechanical properties. *J Build Eng* 2020;30:101283. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101283>.
- [11] Harihanandh M, Rajeshkumar V, Elango KS. Study on mechanical properties of fiber reinforced self compacting concrete. *Mater Today Proc* 2021;45:3124–31. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.214>.
- [12] Md Zain MR, Oh CL, Lee SW. Investigations on rheological and mechanical properties of self-compacting concrete (SCC) containing 0.6  $\mu\text{m}$  eggshell as partial replacement of cement. *Constr Build Mater* 2021;303:124539. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124539>.

- [13] Revilla-Cuesta V, Faleschini F, Zanini MA, Skaf M, Ortega-López V. Porosity-based models for estimating the mechanical properties of self-compacting concrete with coarse and fine recycled concrete aggregate. *J Build Eng* 2021;44:103425. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103425>.
- [14] Mastali M, Dalvand A, Sattarifard A. The impact resistance and mechanical properties of the reinforced self-compacting concrete incorporating recycled CFRP fiber with different lengths and dosages. *Compos Part B Eng* 2017;112:74–92. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.12.029>.
- [15] Mastali M, Dalvand A. Use of silica fume and recycled steel fibers in self-compacting concrete (SCC). *Constr Build Mater* 2016;125:196–209. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.046>.
- [16] Mastali M, Dalvand A. The impact resistance and mechanical properties of fiber reinforced self-compacting concrete (SCC) containing nano-SiO<sub>2</sub> and silica fume. *Eur J Environ Civ Eng* 2018;22:1–27. <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1177604>.
- [17] Anuradha V, Ch.Madhavi T. Behaviour of self compacting concrete hybrid fiber reinforced hollow beams. *Structures* 2022;35:990–1001. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.11.058>.
- [18] Ullah Khan S, Ayub T. Flexure and shear behaviour of self-compacting reinforced concrete beams with polyethylene terephthalate fibres and strips. *Structures* 2020;25:200–11. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.02.023>.
- [19] Perumal K, Kumar A, Lingeshwaran N, Susmitha S. Experimental studies on flexural behaviour of self compact concrete beam. *Mater Today Proc* 2020;33:129–35. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.319>.
- [20] Shatarat N, Mahmoud HM, Katkhuda H. Shear capacity investigation of self compacting concrete beams with rectangular spiral reinforcement. *Constr Build Mater* 2018;189:640–8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.046>.
- [21] Al-Shaar AAM, Göğüş MT. Flexural behavior of lightweight concrete and self-compacting concrete-filled steel tube beams. *J Constr Steel Res* 2018;149:153–64. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.07.027>.
- [22] Hossain KMA, Hossain MA, Manzur T. Structural performance of fiber reinforced lightweight self-compacting concrete beams subjected to accelerated corrosion. *J Build Eng* 2020;30:101291. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101291>.
- [23] Mahalingasharma SJ, Parasivamurthy P, Das VR, Arun BR. The combined effect of GGBS and low volume fibres on the low-velocity impact and mechanical properties of self-compacting concrete. *Mater Today Proc* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.339>.
- [24] Basser H, Shaghaghi TM, Afshin H, Ahari RS, Mirrezaei SS. An experimental investigation and response surface methodology-based modeling for predicting and optimizing the rheological and mechanical properties of self-compacting concrete containing steel fiber and PET. *Constr Build Mater* 2021;125370. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125370>.
- [25] Elango KS, Vivek D, Anandaraj S, Saravanakumar R, Sanfeer J, Saravanaganesh S. Experimental study on self compacting concrete using light weight aggregate. *Mater Today Proc* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.240>.
- [26] ASTM International. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens 1 This standard is for EDUCATIONAL USE ONLY . *Annu B ASTM Stand* 2010;i:1–7. <https://doi.org/10.1520/C0039>.
- [27] ASTM C 496. Standard Test Method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimen. *Annu B ASTM Stand Vol 0402* 2004:1–5.
- [28] Test CC, Drilled T, Concrete C. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete ( Using Simple Beam with Third-Point Loading ) 1. *Hand* 2010;C78-02:1–4. <https://doi.org/10.1520/C0078>.