

## Investigation of the effect of adding pozzolan and slag on the mechanical properties of self-compacting fiber cement composites

A. Bastami<sup>1</sup>, F. Omidinasab<sup>2\*</sup>, A. Dalvand<sup>3</sup>

1- M.Sc., Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran

2 -Associate Professor, Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran

3- Associate Professor, Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran

### ABSTRACT

Self-compacting composite concrete is known as a cement composite with high performance and adhesion. This composite has a lot of psychological capability and efficiency. Concrete failure depends on the formation of cracks and microcracks. As the load increases, the microcracks join together to form cracks. To solve this problem and also to create homogeneous conditions, in recent years, thin fibers of fiber in the entire volume of concrete are used. Fiber concrete is actually a type of cementitious composite that increases its tensile and compressive strength by using reinforcing fibers inside the concrete mix. In this study, the effect of adding materials (Microsilica Fume, Fly Ash, GGBFS) and sinusoidal steel fibers (corrugated) on the mechanical properties of self-compacting cement composite was investigated in 9 mixing designs. For this purpose, cement alternative additives in the amount of 10% by weight of cementitious materials and steel fibers in the amount of 1% of the volume of cement composite were used in the mixing design. In the compressive strength test, the sample with 1% steel fibers had a 4.5% increase in strength compared to the reference sample, which showed a very low effect of steel fibers on the compressive strength. Also, the use of microsilica by 10% by weight of cement substitute increased the amount of compressive strength by 6.6%, which due to the property of microsilica in increasing resistance, this result was not far from the eye. In general, the use of steel fibers had no effect on the results of compressive strength, capillarity, and water absorption, but the changes in other test results compared to the reference sample were quite noticeable and expected due to the use of steel fibers.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 11 July 2022

**Revise Date:** 25 October 2022

**Accept Date:** 14 November 2022

### Keywords:

Self-compacting cementitious composites

Wavy steel fibers

Microsilica Fume

Fly Ash

GGBFS

Mechanical properties

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.349712.2862>

\*Corresponding author: Fereydoon Omidinasab

Email address: [omidinasab.f@lu.ac.ir](mailto:omidinasab.f@lu.ac.ir)

## بررسی تاثیر افزودن پوزولان و سرباره بر خصوصیات مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی خودتراکم الیافی

عارف بسطامی<sup>۱</sup>، فریدون امیدى نسب<sup>۲\*</sup>، احمد دالوند<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران\_سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

۳- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

### چکیده

بتن کامپوزیتی خودتراکم به عنوان کامپوزیت سیمانی با کارایی و چسبندگی بالا شناخته می‌شود. این کامپوزیت دارای قابلیت روانی و کارایی زیادی می‌باشد. خرابی بتن به تشکیل ترک‌ها و ریز ترک‌ها بستگی دارد. با افزایش بارگذاری، ریز ترک‌ها به هم متصل شده و ترک‌ها را تشکیل می‌دهند. برای برطرف کردن این مشکل و همچنین ایجاد شرایط همگن، در سال‌های گذشته از رشته‌های نازک الیاف در تمام حجم بتن استفاده می‌شود. بتن الیافی در حقیقت نوعی کامپوزیت سیمانی است که با به کارگیری الیاف تقویت کننده داخل مخلوط بتن، مقاومت کششی و فشاری آن، افزایش پیدا می‌کند. در این پژوهش اثر اضافه کردن مواد (میکروسیلیس<sup>۱</sup>، خاکستر بادی<sup>۲</sup>، سرباره کوره آهن گدازی<sup>۳</sup>) و الیاف فولادی سینوسی (موجدار)<sup>۴</sup>، بر خصوصیات مکانیکی کامپوزیت سیمانی خودتراکم در ۹ طرح اختلاط مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور مواد افزودنی جایگزین سیمان به میزان ۱۰ درصد وزنی مواد سیمانی و الیاف فولادی به مقدار ۱ درصد حجم کامپوزیت سیمانی، در طرح اختلاطها استفاده گردید. در آزمایش مقاومت فشاری نمونه دارای ۱ درصد الیاف فولادی افزایش مقاومت به میزان ۴/۵ درصد نسبت به نمونه مرجع داشت که نشان دهنده تاثیر بسیار کم الیاف فولادی بر روی مقاومت فشاری بود. همچنین استفاده از میکروسیلیس به میزان ۱۰ درصد وزنی جایگزین سیمان، مقدار مقاومت فشاری را به میزان ۶/۶ درصد افزایش داد که با توجه به خاصیت میکروسیلیس در افزایش مقاومت، این نتیجه دور از انتظار نبود. به طور کلی استفاده از الیاف فولادی در نتایج مقاومت فشاری، موینگی و جذب آب نداشت ولی تغییرات سایر نتایج آزمایش‌ها نسبت به نمونه مرجع با توجه به استفاده از الیاف فولادی کاملاً محسوس و مورد انتظار بود.

کلمات کلیدی: کامپوزیت سیمانی خودتراکم، الیاف فولادی موجدار، میکروسیلیس، خاکستر بادی، سرباره، خصوصیات مکانیکی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2022.349712.2862">https://doi.org/10.22065/jsce.2022.349712.2862</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2022.349712.2862">10.22065/jsce.2022.349712.2862</a>	۱۴۰۲/۰۶/۳۱	۱۴۰۱/۰۸/۲۳	۱۴۰۱/۰۸/۲۳	۱۴۰۱/۰۸/۰۳	۱۴۰۱/۰۴/۲۰
فریدون امیدى نسب omidinasab.f@lu.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

<sup>1</sup> Microsilica

<sup>2</sup> Fly Ash

<sup>3</sup> Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS)

<sup>4</sup> Wavy steel fibers

## ۱- مقدمه

بتن کامپوزیتی خودتراکم به عنوان کامپوزیت سیمانی با کارایی و چسبندگی بالا شناخته می شود. این کامپوزیت دارای قابلیت روانی و کارایی زیادی می باشد به طوری که استفاده از این بتن علاوه بر کاهش زمان ساخت، به کاهش هزینه نیز می انجامد. کامپوزیت های خودتراکم بدون نیاز به ویبره در قالب جای می گیرند و از کوچکترین درزی عبور می کنند [۱]. بررسی ها نشان می دهند که مصریان قدیم از کاه برای مسلح کردن آجرهای گلی استفاده می کردند. همچنین الیاف پنبه نسوز برای مسلح کردن رس در ۵۰۰۰ سال پیش استفاده شده است. علاوه بر این از موی اسب نیز برای مسلح کردن استفاده شده است [۲].

اولین تلاش اصلی برای مسلح کردن بتن بوسیله جایگذاری الیاف های فولادی توسط باستن<sup>۵</sup> و راموالدی<sup>۶</sup> در اوایل دهه ۱۹۶۰ در کشور آمریکا صورت گرفت. بعد از آن، تحقیقات و کاربردهای صنعتی بسیار زیادی درباره بتن مسلح با الیاف فولادی انجام گرفته است [۳]. بتن های توانمند الیافی کامپوزیتی<sup>۷</sup> گونه جدیدی از کامپوزیت های سیمانی هستند که با استفاده از مصالح ریزدانه و الیاف ساخته می شوند. این نوع از کامپوزیت ها دارای رفتار سخت شدگی کرنشی تحت بارگذاری های کششی است.

در سال ۱۹۸۹، کرنچل و استانگ با کاربرد نوعی از الیاف به هم پیوسته به شکل پذیری کششی ۱۰۰ برابر نسبت به بتن معمولی دست یافتند [۴]. کامپوزیت های سیمانی مهندسی<sup>۸</sup> نیز نمونه های جدید از کامپوزیت های مهندسی است که به دلیل تشکیل ترک های چندگانه، دارای شکل پذیری بالایی هستند [۵-۶]. کامپوزیت های سیمانی مهندسی خودتراکم در سال ۲۰۰۷ طراحی شد [۷-۸]. مطالعات صورت گرفته روی بتن های کامپوزیتی توانمند بیشتر در خصوص ویژگی های مکانیکی این کامپوزیت ها است. مطالعات بسیار محدودی روی پارامترهای آماری، مانند مقاومت فشاری و خمشی صورت گرفته است. همچنین داده های آماری بسیار کمی روی مقاومت ضربه ای و جذب انرژی این کامپوزیت ها وجود دارد. چندین روش آزمایش به منظور تعیین مقاومت ضربه ای و شکنندگی بتن و مصالح مشابه وجود دارد [۹-۱۱].

در دهه های اخیر، کاربرد الیاف های مختلف به منظور بهبود رفتار بتن رواج پیدا کرده است [۱۲]. نتایج تحقیقات صحرایی مقدم و همکاران نشان داد حتی استفاده به میزان کم از الیاف، مقاومت ضربه ای و اختلاف بین مقاومت ضربه ای اولین ترک و مقاومت ضربه ای نهایی را نسبت به بتن معمولی افزایش می دهد. در مورد میزان افزایش مقاومت ضربه ای بتن الیافی نسبت به بتن معمولی اعداد مختلفی ذکر شده است، که تغییر در ترکیبات و مشخصات الیاف مورد استفاده را می توان از مهمترین دلایل این تفاوت دانست [۱۳]. افزودن الیاف به بتن می تواند باعث افزایش جذب انرژی و بهبود مقاومت ضربه ای بتن شود و از گسترش ترک ها جلوگیری بعمل آورد. همچنین الیاف های کوتاه و مجزا می تواند باعث به تاخیر افتادن توزیع ترک های ناشی از برخورد ضربه شود. این امر ناشی از این علت است که الیاف همانند یک پل بر روی ترک ها عمل کرده و از گسترش آن ها جلوگیری می کند [۱۴]. الیاف فولادی دارای مدول الاستیسیته و کرنش شکست بالایی بوده که با توجه به قابلیت شکل پذیری مناسب و مقاومت کششی بالا از مناسب ترین و اقتصادی ترین نوع الیاف به حساب می آید. این نوع الیاف به اشکال ظاهری گوناگون (مستقیم، انتهای قلاب دار، موج دار و ...) جهت بهبود رفتار بتن قابل ساخت است و همچنین اختلاط آن ها با دیگر مواد بتن به سهولت انجام پذیر است [۱۵]. حجم خمیر سیمانی بالا در کامپوزیت های سیمانی خودتراکم موجب جمع شدگی بیش از حد و کاهش شکل پذیری آن ها می شود به نحوی که پس از عبور از بار حداکثر، دچار شکست ترد و ناگهانی می شوند. این امر کاربرد ترکیبات خودتراکم در ساخت و ترمیم سازه ها بخصوص در مناطق زلزله خیز را دچار مشکل می کند [۱۶]. بتن الیافی به عنوان یک گام مؤثر در جلوگیری از انتشار ریزترک ها و ترک ها و جبران ضعف مقاومت کششی بتن محسوب می شود. پس از ترک خوردگی بتن، الیاف سبب پل زدن در ترک ها می شوند [۱۷]. بطور ذاتی بتن تحت بار کششی ترد و شکننده است بنابراین مشخصات مکانیکی بتن توسط الیاف های کوتاه که بصورت تصادفی پخش شده بهبود یافته و از تشکیل، پیشرفت و بهم پیوستن ترک خوردگی جلوگیری کرده و آن را تحت کنترل قرار می دهد [۱۸]. عملکرد و مشخصات بتن الیافی بر اساس ویژگی های بتن و الیاف تغییر می یابد. ویژگی های الیاف معمولاً متأثر از تمرکز، توزیع، هندسه و موقعیت می باشد. استفاده از یک نوع الیاف ممکن است مشخصات مکانیکی مخلوط های بتنی را تا اندازه ای بهبود بخشد.

<sup>5</sup> Baston<sup>6</sup> Ramualdi<sup>7</sup> High Performance Fiber Reinforced Cementitious Compositd (HPFRCC)<sup>8</sup> Engineered Cementitious Compositd (ECC)

ولی ترکیب دو نوع الیاف در مخلوط، می تواند بهبود بیشتر خواص مکانیکی را منجر شود [۱۹-۲۰]. تحقیقات گذشته نشان می دهد که افزودن الیاف فلزی در بتن امکان پذیر بوده و ویژگی های مکانیکی را بهبود می بخشد [۲۱-۲۲].

در حال حاضر محققان با کاربرد سرباره های معدنی بعنوان جایگزین سیمان پرتلند معمولی (OPC) به دنبال راه حلی برای رفع آلودگی ناشی از تولید سیمان می باشند [۲۳]. در بتن های با مقاومت زیاد، معمولاً میکروسیلیس جزء جدایی ناپذیر است و به عنوان جایگزین درصدی از سیمان استفاده می شود. این ماده یک پوزولان خیلی فعال است که خاصیت پرکنندگی مؤثری از خود نشان داده است. میکروسیلیس علاوه بر افزایش مقاومت خمیر، از طریق بهبود کیفیت اتصال بین خمیر و سنگدانه، باعث افزایش مقاومت بتن می شود. برخی محققان دریافته اند که میکروسیلیس مقاومت بتن در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روز را بهبود می بخشد و اثر عمده این ماده در مقاومت فشاری بتن، بین ۳ تا ۲۸ روز (در دمای عمل آوری معمول) اتفاق می افتد [۲۴-۲۵].

Ghric و همکاران دریافتند که استفاده وسیع از پوزولان طبیعی به عنوان جایگزین سیمان در کاربردهای مختلف، به دلیل صرفه اقتصادی، کاهش حرارت زایی بتن، کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت شیمیایی است. هر چند ممکن است کاهش مقاومت در سنین اولیه را در پی داشته باشد [۲۶]. در پژوهشی که کاراتاس و همکاران بر روی مقاومت فشاری ملات های خود متراکم حاوی درصد های مختلف خاکستر بادی انجام دادند مشاهده شد که افزایش مقدار خاکستر بادی باعث کاهش مقاومت فشاری می گردد اما مقاومت ملات در برابر حمله سولفات ها افزایش می یابد [۲۷-۲۸]. نتایج یک تحقیق نشان می دهد که مواد افزودنی معدنی مانند خاکستر بادی یا مواد افزودنی اضافی می تواند در بتن حاوی سیمان پرتلند استفاده شده و برای بهبود پایایی بتن مانند مقاومت در برابر سولفات مفید باشد [۲۹]. محصول جانبی فرآیند تولید فولاد (GGBFS)، ده ها سال است که در پروژه های مهندسی عمران مورد استفاده قرار می گیرد. GGBFS با سرد کردن سریع سرباره آهن در آب بدست می آید. از آنجا که این سرباره به علت میزان زیاد آهک دارای فعالیت پوزولانی می باشد، بطور موفقیت آمیزی در مخلوط های بتنی مورد استفاده قرار می گیرد [۳۰-۳۲]. مطالعات زیادی به منظور بررسی تاثیر GGBFS در مخلوط های بتنی انجام شده است.

در تحقیقی که توسط Bouikni و همکاران انجام شد نشان داد که بتن سرباره ای در مقایسه با بتن معمولی دارای خصوصیات مکانیکی مطلوب تری می باشد [۳۳]. از آنجایی که این افزودنی های معدنی بخشی از سیمان پرتلند را جایگزین می کند، هزینه بتن خودتراکم<sup>۹</sup> کاهش می یابد. به خوبی ثابت شده است که مواد افزودنی معدنی مانند خاکستر بادی و سرباره ممکن است کارایی، دوام و ویژگی های بلند مدت بتن را افزایش دهند [۳۴-۳۶]. در این پژوهش سعی بر آن شد که علاوه بر سرباره، از دو پوزولان (میکروسیلیس، خاکستر بادی) و الیاف فلزی نیز در طرح اختلاط ها استفاده و تاثیر افزودن این مواد بر خصوصیات مکانیکی کامپوزیت سیمانی، مورد بررسی قرار داده شد. نتایج آزمایش های این تحقیق می تواند در راستای توسعه هر چه بیشتر بتن های سازگار با محیط زیست موثر واقع شود.



شکل ۱: روند انجام پژوهش

## ۲- مواد مورد استفاده

سنگدانه های مورد استفاده از نوع ریز دانه طبیعی عبوری از الک نمره ۸ (قطر حفره ۲/۳۶ میلی متر) می باشد. سیمان مورد استفاده از نوع سیمان تیپ ۲ و آب مصرفی نیز آب قابل شرب می باشد. همچنین از خاکستر بادی (سری C)، میکروسیلیس و سرباره در طرح اختلاط های یک ترکیبی، دو ترکیبی و سه ترکیبی به عنوان جایگزین درصدی از سیمان در این تحقیق استفاده شد. همچنین از الیاف

<sup>۹</sup> Self-consolidating concrete (SCC)

فولادی موجدار (سینوسی) نیز استفاده شد. مشخصات الیاف مورد استفاده بر اساس کاتالوگ تولید کننده می باشد. برای ایجاد خاصیت خودتراکمی و کارایی لازم در کامپوزیت سیمانی مورد استفاده از یک نوع فوق روان کننده کربوکسیلاتی استفاده گردید. خصوصیات شیمیایی و تصویر مواد مصرفی در جدول ۱ و شکل ۲، شکل و خصوصیات فیزیکی الیاف مورد استفاده در شکل ۳ و جدول ۲ و همچنین نمودار دانه بندی در شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول ۱: خصوصیات شیمیایی مواد مصرفی

آنالیز شیمیایی	میکروسیلیس (%)	خاکستر بادی (%)	سرباره (%)	سیمان (%)
H <sub>2</sub> O	۰/۸	-	-	-
C	۰/۵	-	-	-
SiC	۰/۳	-	-	-
SiO <sub>2</sub>	۹۴/۶ - ۹۶/۴	۳۰/۸۴	۳۴/۴ - ۳۵/۷	۲۱/۱
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱/۳۲	۱۶/۲۱	۹/۵۳ - ۱۱/۰۲	۴/۳۷
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۸۷	۶/۰۹	۰/۶ - ۱/۲	۳/۸۸
CaO	۰/۴۹	۲۷/۷	۳۷ - ۳۵	۶۳/۳۳
MgO	۰/۹۷	۴/۸۵	۱۱ - ۹/۸	۱/۵۶
Na <sub>2</sub> O	۰/۳۱	۱/۳۸	۰/۶	۰/۳۹
K <sub>2</sub> O	۱/۰۱	۰/۳	۰/۶۸	۰/۵۲
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰/۱۶	-	-	-
SO <sub>3</sub>	۰/۱	۲/۱۳	-	-
Cl	۰/۰۴	-	۰/۰۰۲	-
L.O.I	۰/۹۴	-	-	-



د

ج

ب

الف

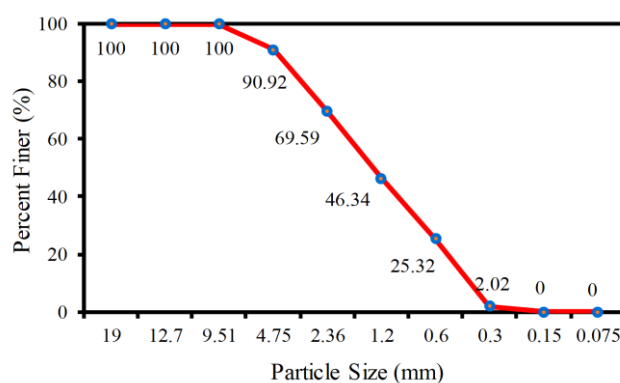
شکل ۲: تصویری از (الف) سیمان، (ب) خاکستر بادی، (ج) میکروسیلیس و (د) سرباره (مورد استفاده جایگزین سیمان)



شکل ۳: الیاف فولادی مورد استفاده

جدول ۲: مشخصات فیزیکی الیاف فولادی

چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )	مقاومت کششی (MPa)	L/D	قطر (mm)	طول (mm)
۲۰۰	۷۸۵۰	۶۲/۵	۰/۸	۵۰



شکل ۴: نمودار دانه بندی مصالح سنگی مورد استفاده

### ۳- شیوه ساخت نمونه‌ها

به منظور انجام مطالعه بر روی اثرات افزودن خاکستر بادی، سرباره، میکروسیلیس و الیاف فولادی، ۹ طرح اختلاط در جدول ۳ نشان داده شده است. مراحل ساخت بتن به گونه‌ای بود که ابتدا سنگدانه و مواد جایگزین سیمان بصورت خشک به مدت ۲ دقیقه در میکسر مخلوط شدند. سپس ۹۰ درصد آب مورد نیاز بصورت تدریجی به مخلوط اضافه شد. در ادامه آب باقیمانده و ماده فوق روان کننده به مخلوط اضافه شدند و در نهایت الیاف‌های فولادی برای جلوگیری از مشکل گلوله شدن به آرامی به مخلوط اضافه شد. پس از اختلاط مناسب مواد در میکسر نمونه‌ها درون قالب ریخته شدند. بعد از گذشت ۲۴ ساعت نمونه‌ها از درون قالب خارج و در نهایت نمونه‌های ساخته شده به منظور عمل آوری مناسب به مدت ۲۸ روز در آب قرار داده شدند. دمای عمل آوری نمونه بر اساس استاندارد [۳۷] ASTN C192 انجام گرفته شد. شرایط نگهداری و عمل آوری نمونه‌ها در آزمایشگاه سرپوشیده و در دمای  $20 \pm 2$  نگهداری شدند.

جدول ۳: طرح اختلاط مورد استفاده برای یک متر مکعب

شماره	عنوان طرح اختلاط	سیمان (Kg/m <sup>3</sup> )	سنگدانه ریز مصرفی (Kg/m <sup>3</sup> )	الیاف فولادی (Kg/m <sup>3</sup> )	سرپاره (Kg/m <sup>3</sup> )	خاکستر بادی (Kg/m <sup>3</sup> )	میکروسیلیس (Kg/m <sup>3</sup> )	فوق روان کننده (Lit/m <sup>3</sup> )
۱	G0FA0MS0 (Ref)	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۰	۰	۰	۰	۳/۶
۲	SF1G0FA0MS0	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۲۴	۰	۰	۰	۳/۶
۳	SF1G0FA0MS10	۱۰۸۰	۱۲۰۰	۲۴	۰	۰	۱۲۰	۴/۸
۴	SF1G0FA10MS0	۱۰۸۰	۱۲۰۰	۲۴	۰	۱۲۰	۰	۳/۶
۵	SF1G10FA0MS0	۱۰۸۰	۱۲۰۰	۲۴	۱۲۰	۰	۰	۳/۶
۶	SF1G0FA10MS10	۹۶۰	۱۲۰۰	۲۴	۰	۱۲۰	۱۲۰	۴/۸
۷	SF1G10FA0MS10	۹۶۰	۱۲۰۰	۲۴	۱۲۰	۰	۱۲۰	۴/۸
۸	SF1G10FA10MS0	۹۶۰	۱۲۰۰	۲۴	۱۲۰	۲۱۰	۰	۳/۶
۹	SF1G10FA10MS10	۸۴۰	۱۲۰۰	۲۴	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۴/۸

#### ۴- روش انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌های حلقه L<sup>۱۰</sup>، جعبه L<sup>۱۱</sup>، جعبه U<sup>۱۲</sup> و قیف V<sup>۱۳</sup> جهت اندازه گیری کارایی بتن تازه انجام شد. نتایج آزمایش‌های بتن تازه بر اساس استاندارد [۳۸] EFNARC می باشد. آزمایش مقاومت فشاری کامپوزیت‌های سیمانی با استفاده از جک فشاری ۲۰۰ تنی و بر اساس استاندارد [۳۹] ASTM C39 بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر، آزمایش کشش برزیلی (دو نیم شدن) بر اساس استاندارد [۴۰] ASTM C496 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متر انجام گرفت. مقاومت خمشی بر اساس آزمایش بار سه نقطه ای مرکزی [۴۱] ASTM C293-79 می‌باشد. به همین منظور مطابق با استاندارد ذکر شده، آزمایش خمش سه نقطه ای بر روی نمونه های خمشی دارای ابعاد ۳۲۰×۸۰×۶۰ میلی‌متر انجام شد. آزمایش جذب آب طبق استاندارد [۴۲] ASTM C642 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای ۵۰×۱۰۰ میلی‌متر، آزمایش موینگی طبق استاندارد [۴۳] ASTM C1585 و آزمایش امواج اولتراسونیک طبق استاندارد [۴۴] ASTM C597 بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر و همچنین آزمایش ضربه افتان مطابق با آیین نامه [۴۵] ACI 544 انجام شد. به منظور انجام آزمایش ضربه افتان نمونه‌های دیسکی ۶۵×۱۵۰ میلی‌متر ساخته شد. تمام آزمایش‌های صورت گرفته در آزمایشگاه سازه دانشگاه لرستان انجام شد.

#### ۵- نتایج آزمایش‌های انجام شده

##### ۵-۱- نتایج آزمایش‌های روانی بتن

##### ۵-۱-۱- تاثیر الیاف فولادی در طرح اختلاط یک ترکیبی

در جدول ۴ نتایج آزمایش صفحه J-Ring ارائه شده است. همچنین در شکل ۵ نحوه انجام آزمایش‌های روانی بر روی بتن تازه نشان داده شده است. اسلامپ روانی برای طرح اختلاط G0FA0MS0 که نمونه مرجع (بدون هیچ افزودنی پوزولان و سرپاره)، مقدار ۷۷۰ میلی‌متر به دست آمد. این مقدار نشان دهنده‌ی خودتراکم بودن بتن کامپوزیت سیمانی مورد استفاده می باشد [۴۶]. افزودن الیاف فولادی به نمونه مرجع (SF1G0FA0MS0)، باعث کاهش اسلامپ روانی به مقدار ۶۷۰ میلی‌متر شد که نسبت به نمونه مرجع ۱۳ درصد کاهش داشت. با افزودن الیاف فولادی و میکروسیلیس (SF1G0FA0MS10)، اسلامپ روانی به مقدار ۶۰۰ میلی‌متر کاهش پیدا کرد که نسبت به

<sup>10</sup> J-Ring

<sup>11</sup> L-box

<sup>12</sup> U-box

<sup>13</sup> V-funnel

نمونه (G0FA0MS0)، ۱۱/۸ درصد کمتر شد. این کاهش روانی بتن با توجه به خاصیت میکروسیلیس در جذب آب و استفاده از الیاف فولادی دور از ذهن نبود [۴۷]. افزودن الیاف فولادی و خاکستر بادی (SF1G0FA10MS0)، کاهش اسلامپ روانی به مقدار ۶۷۰ میلی متر را به همراه داشت که نسبت نمونه (G0FA0MS0)، ۱۰/۷ درصد کاهش یافت. ترکیب حاوی الیاف فولادی و سرباره (SF1G10FA0MS0)، اسلامپ روانی را به مقدار ۶۵۰ میلی متر کاهش داد که نسبت به نمونه (G0FA0MS0)، ۱۱ درصد کمتر شد.

## ۲-۱-۵- تاثیر الیاف فولادی در طرح اختلاط چند ترکیبی

با افزودن الیاف فولادی، میکروسیلیس و خاکستر بادی (SF1G0FA10MS10) اسلامپ روانی ۵۸۰ میلی متر شد که نسبت به نمونه‌های (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب ۲۴/۷ و ۱۳/۴ درصد کاهش پیدا کرد. این کاهش اسلامپ با توجه به وجود الیاف فولادی و میکروسیلیس که به خاصیت جذب آب آن قبلا اشاره گردید، نتیجه قابل قبولی بود. افزودن الیاف فولادی، میکروسیلیس و سرباره (SF1G10FA0MS10) باعث کاهش اسلامپ روانی به مقدار ۶۰۰ میلی متر شد که نسبت به نمونه (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب ۲۲/۱ و ۱۰/۴ درصد کاهش پیدا کرد. اسلامپ روانی با افزودن الیاف فولادی، خاکستر بادی و سرباره (SF1G10FA10MS0)، ۶۶۰ میلی متر شد که نسبت به نمونه (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب ۱۴/۳ و ۱/۵ درصد کاهش اسلامپ را شاهد بودیم. با افزودن الیاف فلزی، میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره (SF1G10FA10MS10)، اسلامپ روانی ۶۶۰ میلی - متر شد که نسبت نمونه (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب ۱۴/۳ و ۱/۵ درصد کمتر شد. با توجه به نتایج به دست آمده به طور کلی استفاده از الیاف فولادی در کاهش روانی بتن کاملا تاثیر گذار است. همچنین کاهش اسلامپ روانی در ترکیب‌های حاوی میکروسیلیس با توجه به خاصیت جذب بالای آب توسط این ماده، امری بدیهی بود.

جدول ۴: نتایج روانی بتن خودتراکم تازه

شماره	عنوان طرح اختلاط	حلقه J (mm)		قیف V (s)	جعبه L (H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> )	جعبه U (H <sub>1</sub> -H <sub>2</sub> ) (mm)
		میانگین قطر	میانگین ۴ نقطه			
۱	G0FA0MS0 (Ref)	۷۷۰	۲۰	۱/۷۹	۰/۹۶	۹۰
۲	SF1G0FA0MS0	۶۷۰	۶۰	۴/۵۹	۰/۸۳	۱۴۰
۳	SF1G0FA0MS10	۶۰۰	۷۰	۵/۸۸	۰/۷	۲۲۰
۴	SF1G0FA10MS0	۶۷۰	۶۰	۳/۱۶	۰/۸	۱۸۰
۵	SF1G10FA0MS0	۶۵۰	۶۰	۳/۶۵	۰/۷۸	۱۵۰
۶	SF1G0FA10MS10	۵۸۰	۸۰	۵/۱۷	۰/۷۳	۲۱۰
۷	SF1G10FA0MS10	۶۰۰	۶۰	۵/۰۳	۰/۸۴	۱۹۰
۸	SF1G10FA10MS0	۶۶۰	۶۰	۴/۶۶	۰/۸	۱۵۰
۹	SF1G10FA10MS10	۶۶۰	۷۰	۵/۹۵	۰/۷۲	۱۶۰





شکل ۵: آزمایش‌ها: (الف) جعبه U، (ب) جعبه L، (ج) قیف V، (د) حلقه J

## ۲-۵- نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری

### ۱-۲-۵- تاثیر الیاف فولادی در طرح اختلاط یک ترکیبی

نتایج آزمایش مقاومت فشاری در جدول ۵ نشان داده شده است. مقاومت فشاری برای طرح اختلاط نمونه مرجع (G0FA0MS0)، مقدار ۸۱/۴ مگاپاسکال به دست آمد که با توجه به نتیجه به دست آمده توسط صحرایی مقدم و همکاران [۴۸]، این مقدار کاملاً قابل قبول بود. با افزودن الیاف فولادی به نمونه مرجع (SF1G0FA0MS0) مقدار مقاومت فشاری ۸۵/۰۷ مگاپاسکال شد که نسبت به نمونه مرجع ۴/۵ درصد افزایش یافت. این افزایش مقاومت با توجه به اضافه کردن الیاف فولادی کاملاً قابل قبول بود. در طرح اختلاط دارای الیاف فولادی و میکروسیلیس (SF1G0FA0MS10)، مقاومت فشاری ۸۶/۷۷ مگاپاسکال به دست آمد که نسبت به نمونه مرجع، ۶/۶ درصد افزایش پیدا کرد که علاوه بر الیاف فولادی، استفاده از میکروسیلیس و خاصیت این ماده در افزایش مقاومت تاثیر مستقیم داشت. مقاومت فشاری طرح اختلاط حاوی الیاف فولادی و خاکستر بادی (SF1G0FA10MS0)، ۸۵/۱۷ مگاپاسکال شد که نسبت به نمونه مرجع، ۴/۶ درصد بیشتر شد. با توجه به مقایسه درصد افزایش مقاومت فشاری این طرح اختلاط با نمونه حاوی ۱ درصد الیاف فولادی می‌توان گفت که خاکستر بادی تاثیری بر روی افزایش مقاومت فشاری نداشته است. مقاومت فشاری طرح اختلاط دارای الیاف فولادی و سرباره (SF1G10FA0MS0)، ۷۷/۵۳ مگاپاسکال به دست آمد که نسبت به نمونه (G0FA0MS0)، ۴/۷ درصد کاهش پیدا کرد که نشان دهنده تاثیر منفی این ماده بر روی مقاومت فشاری بتن می‌باشد.

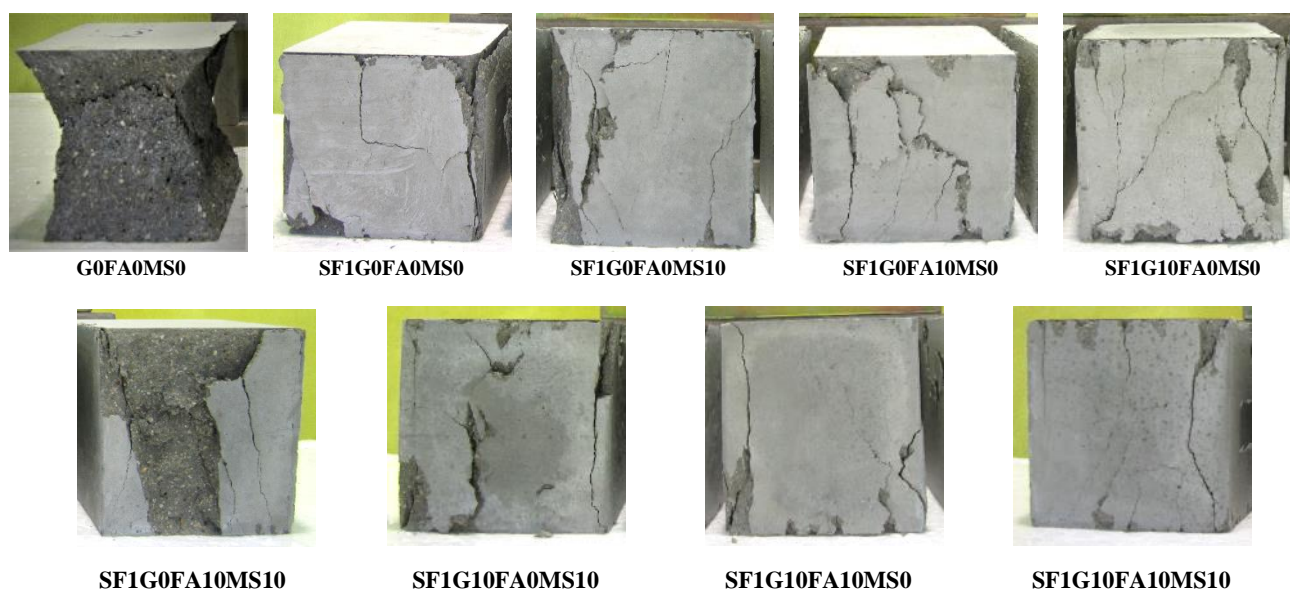
### ۲-۲-۵- تاثیر الیاف فولادی در طرح اختلاط چند ترکیبی

مقاومت فشاری در طرح اختلاط دارای الیاف فولادی، میکروسیلیس و خاکستر بادی (SF1G0FA10MS10)، ۸۰/۵۳ مگاپاسکال شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب ۱/۱ و ۵/۳ درصد کاهش یافت. با توجه به اینکه الیاف فولادی و میکروسیلیس باعث افزایش مقاومت می‌شوند ولی وجود خاکستر بادی تاثیر به مراتب بیشتر داشته و موجب کاهش مقاومت گردید. در طرح اختلاط دارای الیاف فولادی، میکروسیلیس و سرباره (SF1G10FA0MS10)، مقاومت فشاری ۸۵/۳ مگاپاسکال حاصل شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب ۴/۸ و ۰/۳ افزایش یافت. مقاومت فشاری طرح اختلاط دارای الیاف فولادی، خاکستر بادی و سرباره (SF1G10FA10MS0)، ۷۴/۷۷ مگاپاسکال شده که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب ۸/۱ و ۱۲/۱ درصد کاهش یافت. این کاهش مقاومت حتی با وجود الیاف فولادی، به دلیل تاثیر منفی خاکستر بادی و سرباره دور از انتظار نبود. برای طرح اختلاط دارای الیاف فولادی، میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره (SF1G10FA10MS10)، مقاومت فشاری ۸۰/۸ مگاپاسکال شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب

۰/۸ و ۵ درصد کاهش یافت. با توجه به نتایج طرح اختلاط‌های قبلی و تاثیر خاکستر بادی و سرباره در کاهش مقاومت، نتیجه این طرح اختلاط کاملاً قابل قبول بود.

نتایج آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های دارای الیاف فولادی نشان داد که این الیاف نمی‌تواند تاثیر قابل توجهی را بر افزایش مقاومت فشاری بتن‌های توانمند داشته باشد. استفاده ترکیبی از میکروسیلیس و الیاف فولادی به طور قابل توجهی استحکام خمشی و عملکرد شکست نمونه‌ها را بهبود بخشید که می‌توان آن را به توانایی پل زدن ترک نسبت داد [۴۹].

در شکل ۶ مشاهده می‌شود که نمونه‌های مقاومت فشاری تحت بار دچار تغییر شکل ظاهری نشدند که عدم این تغییر شکل نمونه‌ها وجود الیاف فولادی بوده است.



شکل ۶: مد انهدام نمونه‌های مکعبی مقاومت فشاری

جدول ۵: نتایج آزمایش مقاومت فشاری

شماره	عنوان طرح اختلاط	مقاومت فشاری (MPa)			انحراف معیار	
		نمونه				
		۱	۲	۳		
۱	G0FA0MS0 (Ref)	۸۱/۸	۸۲/۳	۸۰/۱	۸۱/۴	۱/۱۵
۲	SF1G0FA0MS0	۸۴/۸	۸۴/۶	۸۵/۸	۸۵/۰۷	۰/۶۴
۳	SF1G0FA0MS10	۸۶/۲	۸۶/۳	۸۷/۸	۸۶/۷۷	۰/۹
۴	SF1G0FA10MS0	۸۵/۹	۸۶/۲	۸۳/۴	۸۵/۱۷	۱/۵۴
۵	SF1G10FA0MS0	۷۶/۵	۷۷/۸	۷۸/۳	۷۷/۵۳	۰/۹۳
۶	SF1G0FA10MS10	۸۰/۳	۷۹/۷	۸۱/۶	۸۰/۵۳	۰/۹۷
۷	SF1G10FA0MS10	۸۹/۳	۷۹/۴	۸۷/۲	۸۵/۳	۵/۲۲
۸	SF1G10FA10MS0	۷۱/۸	۷۷/۸	۷۴/۷	۷۴/۷۷	۳
۹	SF1G10FA10MS10	۷۹	۸۰/۶	۸۲/۸	۸۰/۸	۱/۹۱

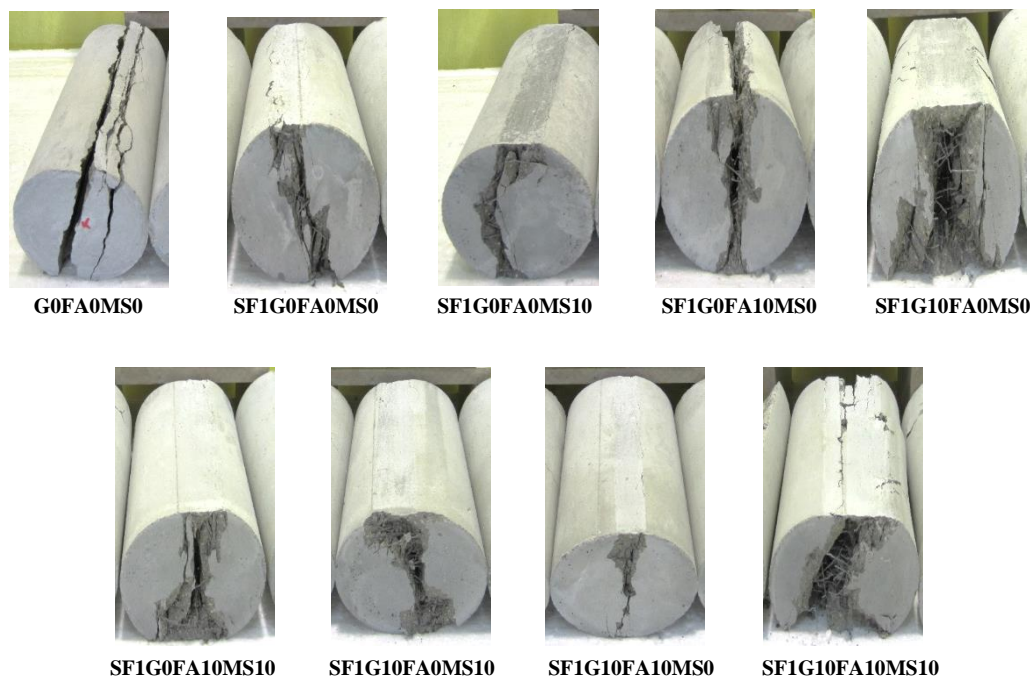
## ۳-۵- نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی

## ۳-۵-۱- تاثیر الیاف فولادی در طرح اختلاط یک ترکیبی

نتایج آزمایش کشش برزیلی (دو نیم شدن) در جدول ۶ نشان داده شده است. مشاهدات این آزمایش نشان داد که الیاف فولادی و میکروسیلیس بر روی مقاومت کششی تاثیر بسیار زیادی دارند. مقاومت کششی برای طرح اختلاط (G0FA0MS0) که نمونه مرجع است، ۴/۶۵ مگاپاسکال شد. برای طرح اختلاط دارای الیاف فولادی (SF1G0FA0MS0)، مقاومت کششی ۷/۱۵ مگاپاسکال به دست آمد که نسبت به نمونه مرجع ۵۳/۸ درصد افزایش یافت. این افزایش مقاومت نشان داد که الیاف فولادی بر خلاف نتایج آزمایش مقاومت فشاری، تاثیر به مراتب بیشتر بر افزایش مقاومت کششی داشتند زیرا حالت سینوسی این الیاف به دلیل درگیری بیشتر با بتن، موجب دوختگی بیشتر ترک‌ها شده و شکل پذیری نمونه را به شکل قابل توجهی افزایش داد [۵۰]. نتایج آزمایش نشان داد در طرح اختلاط دارای الیاف فولادی و میکروسیلیس (SF1G0FA0MS10)، مقاومت کششی ۸/۲۲ مگاپاسکال شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0)، ۷۶/۸ درصد افزایش یافت که علاوه بر الیاف فولادی، نمی‌توان از تاثیر مثبت میکروسیلیس در افزایش مقاومت کششی چشم پوشی کرد. مقاومت کششی طرح اختلاط دارای الیاف فولادی و خاکستر بادی (SF1G0FA10MS0)، ۸ مگاپاسکال به دست آمد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0)، ۷۲ درصد بیشتر شد. طرح اختلاط دارای الیاف فولادی و سرباره (SF1G10FA0MS0)، دارای مقاومت کششی ۱۰ مگاپاسکال شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0)، ۱۱۵ درصد افزایش یافت.

## ۳-۵-۲- تاثیر الیاف فولادی در طرح اختلاط چند ترکیبی

مقاومت کششی طرح اختلاط دارای الیاف فولادی، میکروسیلیس و خاکستر بادی (SF1G0FA10MS10)، ۷/۱ مگاپاسکال شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب ۵۲/۷ افزایش و ۰/۷ کاهش یافت. دلیل افزایش نسبت به نمونه مرجع را می‌توان وجود الیاف فولادی در نمونه دانست ولی وجود خاکستر بادی که موجب کم شدن مقاومت می‌شود، دلیل قابل قبول برای کاهش مقاومت کششی این نمونه نسبت به نمونه مرجع دارای الیاف بود. این آزمایش برای طرح اختلاط الیاف فولادی، میکروسیلیس و سرباره (SF1G10FA0MS10)، مقاومت کششی ۸/۹۵ مگاپاسکال را نشان داد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب ۹۲/۵ و ۲۵/۲ درصد بیشتر شد. مقاومت کششی طرح اختلاط دارای الیاف فولادی، خاکستر بادی و سرباره (SF1G10FA10MS0)، ۸/۳۶ مگاپاسکال گردید که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب ۷۹/۸ و ۱۶/۹ درصد افزایش یافت که با توجه به وجود الیاف فولادی، افزایش نسبت به نمونه مرجع دور از انتظار نبود ولی به دلیل تاثیر منفی خاکستر بادی بر روی مقاومت کششی، این نمونه نسبت به نمونه مرجع دارای الیاف افزایش مقاومت زیادی نداشت. نتیجه آزمایش برای مقاومت کششی طرح اختلاط حاوی الیاف فولادی، میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره (SF1G10FA10MS10)، ۷/۷۷ مگاپاسکال شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب ۶۷/۱ و ۸/۷ درصد افزایش یافت. با توجه به نتایج سایر نمونه‌های کششی و تاثیر الیاف فولادی و مواد جایگزین سیمان، نتایج مقایسه‌ای به دست آمده برای این طرح اختلاط کاملاً قابل قبول بود.



شکل ۷: مد انهدام نمونه‌های آزمایش مقاومت کشش برزیلی (دو نیم شدن)

جدول ۶: نتایج آزمایش مقاومت کششی

شماره	عنوان طرح اختلاط	نمونه ۱		نمونه ۲		نمونه ۳		میانگین	انحراف معیار
		(MPa)	(kg)	(MPa)	(kg)	(MPa)	(kg)		
۱	G0FA0MS0 (Ref)	۳/۶۳	۱۱/۴	۴/۱۴	۱۳	۶/۱۸	۱۹/۴	۴/۶۵	۱/۳۵
۲	SF1G0FA0MS0	۵/۸۶	۱۸/۴	۷/۹۹	۲۵/۱	۷/۶۱	۲۳/۹	۷/۱۵	۰/۹۳
۳	SF1G0FA0MS10	۶/۲۷	۱۹/۷	۱۰/۱۶	۳۱/۹	۸/۲۲	۲۵/۸	۸/۲۲	۱/۵۹
۴	SF1G0FA10MS0	۸/۳۸	۲۶/۳	۸/۴۱	۲۶/۴	۷/۲۳	۲۲/۷	۸	۰/۵۵
۵	SF1G10FA0MS0	۸/۱۵	۲۵/۶	۱۰/۹۲	۳۴/۳	۱۰/۹۲	۳۴/۳	۱۰	۱/۳۱
۶	SF1G0FA10MS10	۹/۱۴	۲۸/۷	۶/۶۲	۲۰/۸	۵/۵۴	۱۷/۴	۷/۱	۱/۵۱
۷	SF1G10FA0MS10	۸/۳۴	۲۶/۲	۷/۴۲	۲۳/۳	۱۱/۰۸	۳۴/۸	۸/۹۵	۱/۵۵
۸	SF1G10FA10MS0	۸/۷۹	۲۷/۶	۷/۲۶	۲۲/۸	۹/۰۴	۲۸/۴	۸/۳۶	۰/۷۹
۹	SF1G10FA10MS10	۷/۹۳	۲۴/۹	۹/۰۸	۲۸/۵	۶/۳۱	۱۹/۸	۷/۷۷	۱/۱۴

#### ۴-۵- نتایج آزمایش‌های مقاومت خمشی

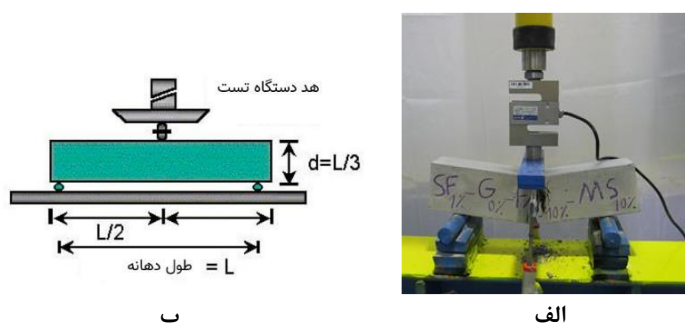
##### ۴-۵-۱- تاثیر الیاف فولادی در طرح اختلاط یک ترکیبی

نتایج این تحقیق نشان داد در کلیه نمونه‌های دارای الیاف فولادی مقدار مقاومت خمشی بیشتر از نمونه مرجع شد که دلیل این امر ایجاد بافت دوختگی توسط الیاف در بتن و همچنین تاثیر بسیار زیاد الیاف فولادی بر روی مقاومت خمشی است. مقاومت خمشی برای طرح اختلاط G0FA0MS0 که نمونه مرجع است، ۸/۶۴ مگاپاسکال به دست آمد. این مقاومت برای طرح اختلاط دارای الیاف فولادی (SF1G0FA0MS0)، مقدار ۱۶/۴۹ مگاپاسکال شد که نسبت به نمونه مرجع ۹۰/۸۶ درصد افزایش یافت. با توجه به استفاده از الیاف

فولادی در این نمونه، نتیجه مقایسه‌ای دور از انتظار نبود. نتایج آزمایش نشان داد در طرح اختلاط حاوی الیاف فولادی و میکروسیلیس (SF1G0FA0MS10)، مقاومت خمشی ۱۸/۱ مگاپاسکال به دست آمد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0)، ۱۰۹/۵ درصد افزایش پیدا کرد که این افزایش مقاومت با توجه به نتایج حاصل از الیاف فولادی و میکروسیلیس کاملاً قابل قبول بود. برای طرح اختلاط متشکل از الیاف فولادی و خاکستر بادی (SF1G0FA10MS0)، مقاومت خمشی ۱۷/۳۴ مگاپاسکال به دست آمد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0)، ۱۰۰/۶۹ درصد افزایش مقاومت را نشان داد. با توجه به اینکه خاکستر بادی موجب کاهش مقاومت می‌شود ولی این افزایش مقاومت بالا دلیلی جز تحمل این نیرو توسط الیاف فولادی نداشت. طرح اختلاط دارای الیاف فولادی و سرباره (SF1G10FA0MS0)، مقاومت خمشی ۱۶/۶۹ مگاپاسکال را نشان داد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0)، ۹۳/۲ درصد افزایش یافت.

## ۲-۴-۵- تاثیر الیاف فولادی در طرح اختلاط چند ترکیبی

نتیجه آزمایش برای طرح اختلاط الیاف فولادی، میکروسیلیس و خاکستر بادی (SF1G0FA10MS10)، مقاومت خمشی ۲۲ مگاپاسکال را نشان داد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب ۱۵۴/۶ و ۳۳/۴ درصد بیشتر شد. افزایش کم مقاومت خمشی این نمونه نسبت به نمونه مرجع دارای الیاف را می‌توان تاثیر منفی خاکستر بادی دانست. برای طرح اختلاط متشکل از الیاف فولادی، میکروسیلیس و سرباره (SF1G10FA0MS10)، مقاومت خمشی ۱۲/۸۸ مگاپاسکال به دست آمد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب ۴۹ درصد افزایش و ۲۲ درصد کاهش یافت که نشان داد سرباره همچون خاکستر بادی مقاومت خمشی را کاهش می‌دهد. مقاومت خمشی طرح اختلاط دارای الیاف فولادی، خاکستر بادی و سرباره (SF1G10FA10MS0)، ۱۵/۹۲ مگاپاسکال شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب ۸۴/۳ درصد افزایش و ۳/۵ درصد کاهش یافت. در طرح اختلاط الیاف فولادی، میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره (SF1G10FA10MS0)، مقاومت خمشی ۱۳/۷۳ مگاپاسکال شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب ۵۸/۹ درصد افزایش و ۱۶/۸ درصد کاهش یافت که با توجه به نتایج سایر طرح اختلاط‌ها می‌توان گفت الیاف فولادی و میکروسیلیس در افزایش و خاکستر بادی و سرباره در کاهش مقاومت تاثیرگذار هستند.



شکل ۸: شکل (الف) و (ب) نحوه انجام آزمایش مقاومت خمشی

جدول ۷: نتایج آزمایش مقاومت خمشی تیرها

شماره	عنوان طرح اختلاط	مقاومت خمشی		تغییر مکان نقطه تسلیم $\Delta_y$ (mm)	تغییر مکان نهایی $\Delta_u$ (mm)	شکل پذیری	انحراف معیار
		(MPa)	(kg)				
۱	G0FA0MS0 (Ref)	۸۵۵/۳۲	۸/۶۴	۰/۶۵	۰/۹۵	۱/۴۶	۲/۲۱
۲	SF1G0FA0MS0	۱۵۵۰/۸۶	۱۹/۴	۱/۷۳	۸/۷۱	۵/۰۳	۲/۵۱
۳	SF1G0FA0MS10	۱۶۲۵/۴۷	۲۰/۳	۰/۴	۹/۶۶	۲۴/۱۵	۲/۴۳
۴	SF1G0FA10MS0	۱۵۴۰/۵۳	۱۹/۳	۰/۶۸	۹/۷۸	۱۴/۳۸	۲/۶۵
۵	SF1G10FA0MS0	۱۳۶۲/۹۵	۱۷	۱/۱۲	۹/۸۵	۸/۷۹	۰/۴
۶	SF1G0FA10MS10	۲۲۷۰/۹۳	۲۸/۴	۱/۷۵	۱۷/۸۲	۱۰/۱۸	۶/۱۱
۷	SF1G10FA0MS10	۱۲۰۳/۱۶	۱۵	۱/۲۷	۱۱/۱۲	۸/۷۶	۳/۷۴
۸	SF1G10FA10MS0	۱۳۶۰/۵۵	۱۷	۱/۴۹	۱۵/۹۲	۱۰/۶۸	۱/۷۵
۹	SF1G10FA10MS10	۱۳۶۱/۹	۱۷	۱/۳۴	۱۱/۴۷	۸/۵۶	۴/۹۸

## ۵-۵- نتایج آزمایش جذب آب

### ۵-۵-۱- تاثیر الیاف فولادی در طرح اختلاط یک ترکیبی

نتایج این آزمایش در جدول ۸ نشان داده شده است. به طور کلی الیاف فولادی تاثیری در جذب آب ندارند و این خاصیت بیشتر متوجه مواد جایگزین سیمان است. مطابق این نتایج جذب آب برای نمونه مرجع (G0FA0MS0)، ۷/۴ درصد شد. با افزودن الیاف فولادی به نمونه مرجع (SF1G0FA0MS0)، میزان جذب آب ۶/۷۲ درصد به دست آمد که نسبت به نمونه مرجع ۹/۱۹ درصد کمتر شد. مقدار جذب آب برای طرح اختلاط دارای الیاف فولادی و میکروسیلیس (SF1G0FA0MS10)، ۸/۰۲ درصد شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0)، ۸/۳۸ درصد افزایش یافت که این افزایش با توجه به خاصیت میکروسیلیس در جذب آب امری قابل قبول بود. با در طرح اختلاط الیاف فولادی و خاکستر بادی (SF1G0FA10MS0)، جذب آب ۷/۰۵ درصد را نشان داد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0)، ۴/۷۳ درصد کاهش پیدا کرد. این کاهش جذب نشان داد که خاکستر بادی بر خلاف میکروسیلیس تمایلی به جذب آب ندارد. برای طرح اختلاط متشکل از الیاف فولادی و سرباره (SF1G10FA0MS0)، جذب آب ۶/۹۶ درصد مشاهده گردید که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0)، ۵/۹۵ درصد کاهش یافت. با توجه به این مورد می توان گفت سرباره همچون خاکستر بادی دارای خاصیت جذب آب نیستند.

### ۵-۵-۲- تاثیر الیاف فولادی در طرح اختلاط چند ترکیبی

مقدار جذب آب طرح اختلاط دارای الیاف فولادی، میکروسیلیس و خاکستر بادی (SF1G0FA10MS10)، ۶/۲۷ درصد به دست آمد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0)، به ترتیب ۱۵/۲۷ و ۶/۷ درصد کاهش در جذب آب را نشان داد که با توجه به خاصیت خاکستر بادی و تاثیر بیشتر آن نسبت به میکروسیلیس، این نتیجه قابل قبول بود. در طرح اختلاط الیاف فولادی، میکروسیلیس و سرباره (SF1G10FA0MS10)، میزان جذب آب ۵ درصد شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0)، به ترتیب ۳۲/۴۳ و ۲۵/۶ درصد کاهش پیدا کرد که این نتیجه نشان دهنده تاثیر بیشتر سرباره در کاهش جذب آب نسبت به میکروسیلیس بود که جذب کننده آب است. در طرح اختلاط متشکل از الیاف، خاکستر بادی و سرباره (SF1G10FA10MS0)، جذب آب ۶/۸۱ درصد شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0)، به ترتیب ۷/۹۷ و ۱/۳۴ درصد کاهش و افزایش یافتند. برای طرح اختلاط الیاف فولادی، میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره (SF1G10FA10MS10)، جذب آب ۵/۸۸ درصد شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب ۲۰/۵۴ و ۱۲/۵ درصد کاهش پیدا کردند.



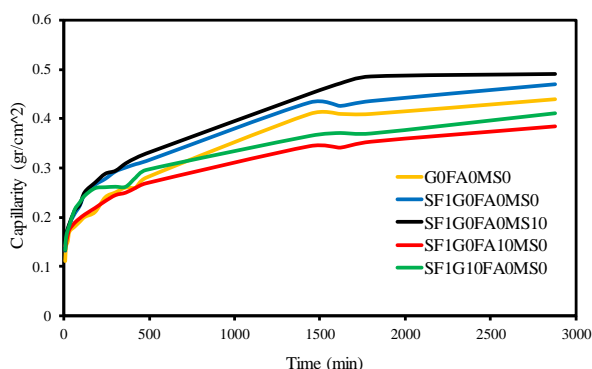
جدول ۸: نتایج آزمایش درصد جذب آب

شماره	عنوان طرح اختلاط	درصد جذب آب			میانگین	انحراف معیار
		۱	۲	۳		
۱	G0FA0MS0 (Ref)	۷/۴	۷/۲۸	۷/۵۱	۷/۴	۰/۱۲
۲	SF1G0FA0MS0	۶/۷۳	۶/۸۹	۶/۵۳	۶/۷۲	۰/۱۸
۳	SF1G0FA0MS10	۹/۰۲	۷/۲۶	۷/۷۶	۸/۰۲	۰/۹۱
۴	SF1G0FA10MS0	۷/۱۷	۷/۱۳	۶/۸۵	۷/۰۵	۰/۱۸
۵	SF1G10FA0MS0	۷/۰۳	۷/۱	۶/۷۷	۶/۹۶	۰/۱۷
۶	SF1G0FA10MS10	۵/۶۴	۷/۶۶	۵/۵۱	۶/۳۷	۱/۲
۷	SF1G10FA0MS10	۵/۱۲	۴/۹	۴/۹۷	۵	۰/۱۱
۸	SF1G10FA10MS0	۶/۹۶	۶/۶۹	۶/۷۸	۶/۸۱	۰/۱۴
۹	SF1G10FA10MS10	۵/۷۶	۵/۸۸	۶	۵/۸۸	۰/۱۲

## ۵-۶- نتایج آزمایش موینگی

## ۵-۶-۱- تاثیر الیاف فولادی در طرح اختلاط یک ترکیبی

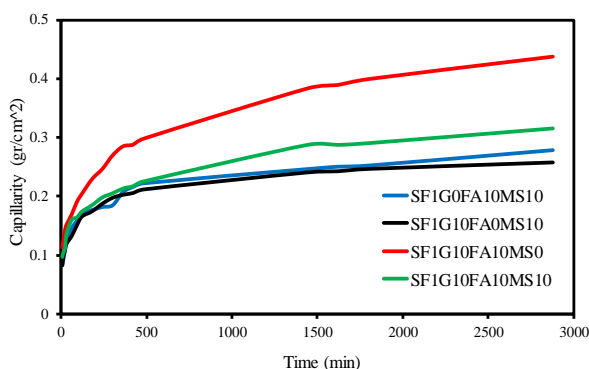
نتایج این آزمایش و جذب آب را می توان مرتبط با هم دانست. میانگین موینگی برای طرح اختلاط مرجع (G0FA0MS0)، ۰/۲۵ گرم بر سانتی متر مربع محاسبه گردید. با افزودن الیاف فولادی به طرح اختلاط نمونه مرجع (SF1G0FA0MS0)، میانگین موینگی ۰/۲۸ گرم بر سانتی متر مربع شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0)، ۱۲ درصد بیشتر شد. برای طرح اختلاط متشکل از الیاف فولادی و میکروسیلیس (SF1G0FA0MS10)، موینگی ۰/۳ گرم بر سانتی متر مربع به دست آمد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0)، ۲۰ درصد افزایش یافت که با توجه به خاصیت میکروسیلیس و نتایج آزمایش جذب آب، مقدار به دست آمده کاملاً قابل قبول بود. میانگین موینگی در طرح اختلاط دارای الیاف فولادی و خاکستر بادی (SF1G0FA10MS0)، ۰/۲۴ گرم بر سانتی متر مربع را نشان داد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0)، ۴ درصد کاهش را نشان داد که می توان وجود خاکستر بادی و تاثیر آن بر کاهش جذب آب را تایید کرد. در طرح اختلاط الیاف فولادی و سرباره (SF1G10FA0MS0)، میانگین موینگی ۰/۲۶ گرم بر سانتی متر مربع گردید که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0)، ۴ درصد افزایش یافت.



شکل ۹: نمودار موینگی طرح اختلاط های یک ترکیبی

## ۵-۶-۲- تاثیر الیاف فولادی در طرح اختلاط چند ترکیبی

در طرح اختلاط دارای الیاف فولادی، میکروسیلیس و خاکستر بادی (SF1G0FA10MS10) و میکروسیلیس و سرباره (SF1G10FA0MS10)، میانگین موینگی  $0/18$  گرم بر سانتی‌متر مربع شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب ۲۸ و  $35/7$  درصد کاهش پیدا کردند که با توجه به جذب کم آب توسط خاکستر بادی و سرباره و همچنین تاثیر بیشتر این دو ماده نسبت به میکروسیلیس، نتیجه به دست آمده قابل قبول بود. میانگین موینگی طرح اختلاط متشکل از الیاف فولادی، خاکستر بادی و سرباره (SF1G10FA10MS0)، میانگین موینگی  $0/25$  گرم بر سانتی‌متر مربع گردید که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) تغییری نکرد ولی نسبت به نمونه (SF1G0FA0MS0)،  $10/7$  درصد کاهش یافت. برای طرح اختلاط حاوی الیاف فولادی، میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره (SF1G10FA10MS10)، میانگین موینگی  $0/2$  گرم بر سانتی‌متر مربع شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب ۲۰ و  $28/57$  درصد کمتر شد.



شکل ۱۰: نمودار موینگی طرح اختلاط‌های چند ترکیبی

## ۷-۵- نتایج آزمایش امواج اولتراسونیک

### ۷-۵-۱- تاثیر الیاف فولادی در طرح اختلاط یک ترکیبی

نتایج آزمایش اولتراسونیک انجام شده بر روی ۹ طرح اختلاط در جدول ۹ ارائه شده است. این آزمایش به روش مستقیم انجام شد. مطابق با طبقه بندی ارائه شده توسط [۵۱] و ایته‌است<sup>۱۴</sup> کیفیت بتن بر مبنای سرعت امواج اولتراسونیک<sup>۱۵</sup> در محدوده‌ی کمتر از  $2 \text{ km/sec}$  خیلی ضعیف، بین  $2 \text{ km/sec}$  تا  $3 \text{ km/sec}$  ضعیف،  $3 \text{ km/sec}$  تا  $3/5 \text{ km/sec}$  مشکوک و  $3/5 \text{ km/sec}$  تا  $4/5 \text{ km/sec}$  خوب تلقی می‌شود. مطابق با این رده بندی، کیفیت بتن‌های آزمایش شده در این تحقیق در محدوده خوب قرار دارد.

سرعت امواج در طرح اختلاط نمونه مرجع (G0FA0MS0)،  $3/51$  کیلومتر بر ثانیه شد. برای طرح اختلاط الیاف فولادی اضافه شده به نمونه مرجع (SF1G0FA0MS0)، سرعت امواج  $4/42$  کیلومتر بر ثانیه گردید که نسبت به نمونه مرجع  $25/93$  درصد بیشتر شد. با توجه به نتیجه به دست آمده می‌توان گفت الیاف فولادی تاثیر مثبت در این افزایش سرعت امواج داشته است. طرح اختلاط متشکل از الیاف فولادی و میکروسیلیس (SF1G0FA0MS10)، سرعت امواج  $4/62$  کیلومتر بر ثانیه به دست آمد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0)،  $31/62$  درصد افزایش یافت. افزایش سرعت امواج نشان دهنده کاهش خلل و فرج نمونه است که با توجه به نتایج آزمایش مقاومت فشاری و تاثیر میکروسیلیس بر افزایش این پارامتر، نتیجه قابل قبول است. سرعت امواج برای طرح اختلاط دارای الیاف فولادی و خاکستر بادی (SF1G0FA10MS0)،  $4/51$  کیلومتر بر ثانیه شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0)،  $28/49$  درصد بیشتر شد. برای طرح اختلاط متشکل از الیاف فولادی و سرباره (SF1G10FA0MS0)، سرعت امواج  $4/48$  کیلومتر بر ثانیه شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0)،  $27/63$  درصد افزایش یافت. کاهش سرعت امواج در نمونه‌های دارای خاکستر بادی و سرباره و الیاف فولادی به دلیل وجود

<sup>14</sup> Whitehurst

<sup>15</sup> Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)



خلل و فرج با نتایج حاصل از مقاومت فشاری مرتبط است به این دلیل که هرچه خلل و فرج بیشتر باشد در نتیجه سرعت و مقاومت کاهش پیدا میکند.

### ۲-۷-۵- تاثیر الیاف فولادی در طرح اختلاط چند ترکیبی

سرعت امواج برای طرح اختلاط دارای الیاف فولادی، میکروسیلیس و خاکستر بادی (SF1G0FA10MS10)، ۴/۶۳ کیلومتر بر ثانیه شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب ۳۱/۹۱ و ۲۷/۳۸ درصد بیشتر شد که می توان به تاثیر میکروسیلیس و ایجاد تراکم خوب در نمونه اشاره کرد. برای طرح اختلاط متشکل از الیاف فولادی، میکروسیلیس و سرباره (SF1G10FA0MS10)، سرعت امواج ۴/۶۱ کیلومتر بر ثانیه مشاهده شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب ۳۱/۳۴ و ۴/۳ درصد افزایش یافت. این سرعت برای نمونه دارای الیاف فولادی، خاکستر بادی و سرباره (SF1G10FA10MS0)، ۴/۵۸ کیلومتر بر ثانیه گردید که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب ۳۰/۴۸ و ۳/۶۲ درصد افزایش پیدا کرد. در طرح اختلاط دارای الیاف فولادی، میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره (SF1G10FA10MS10)، سرعت امواج ۴/۶۸ کیلومتر بر ثانیه شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب ۳۳/۳۳ و ۵/۸۸ درصد افزایش یافت. در طرح اختلاط-های دارای خاکستر بادی و سرباره مشاهده می شود که سرعت امواج کاهش پیدا می کند دلیل این امر ایجاد حفره در طرح اختلاطها می-باید که با توجه به نتایج آزمایش مقاومت فشاری این دلیل کاملاً قابل قبول است.

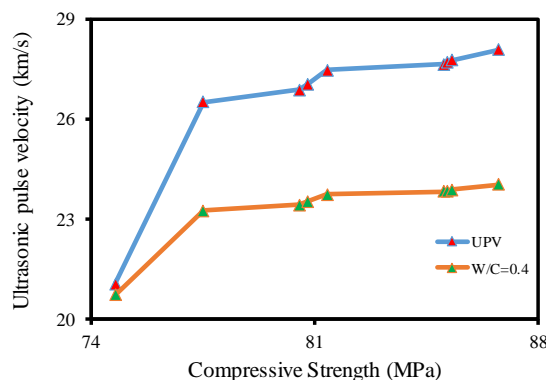
جدول ۹: نتایج تست امواج اولتراسونیک

شماره	عنوان طرح اختلاط	مقاومت فشاری (MPa)	سرعت امواج اولتراسونیک (km/s)	درصد افزایش نسبت به نمونه مرجع	$f_c / = 13.305e^{0.1264vp}$
۱	G0FA0MS0 (Ref)	۸۱/۴	۳/۵۱	۰	۲۰/۷۳
۲	SF1G0FA0MS0	۸۵/۰۷	۴/۴۲	۲۵/۹	۲۳/۲۶
۳	SF1G0FA0MS10	۸۶/۷۷	۴/۶۲	۳۱/۶	۲۳/۸۶
۴	SF1G0FA10MS0	۸۵/۱۷	۴/۵۱	۲۸/۵	۲۳/۵۳
۵	SF1G10FA0MS0	۷۷/۵۳	۴/۴۸	۲۷/۶	۲۳/۴۴
۶	SF1G0FA10MS10	۸۰/۵۳	۴/۶۳	۳۱/۹	۲۳/۸۹
۷	SF1G10FA0MS10	۸۵/۳	۴/۶۱	۳۱/۳	۲۳/۸۳
۸	SF1G10FA10MS0	۷۴/۷۷	۴/۵۸	۳۰/۵	۲۳/۷۴
۹	SF1G10FA10MS10	۸۰/۸	۴/۶۸	۳۳/۳	۲۴/۰۴

### ۳-۷-۵- رابطه ی سرعت امواج اولتراسونیک و مقاومت فشاری

از سال ۱۹۷۰ میلادی تاکنون روش های مختلفی به منظور تخمین مقاومت بتن ارائه شده است ولی هریک از این روش ها از محدودیت هایی برخوردار هستند. این محدودیت ها باعث شد از اوایل سال ۱۹۹۵ میلادی، با پیشرفت های بوجود آمده در تعیین سرعت موج مافوق صوت در اجسام، دانشمندان به این نتیجه رسیدند با استفاده از تعیین سرعت موج در بتن، رابطه ای میان مقاومت و دیگر مشخصه های بتن برقرار کنند [۵۲-۵۴]. به همین منظور رابطه مقاومت فشاری برای طرح اختلاطها و نسبت آب به سیمان مختلفی ارائه شد. با توجه به نسبت آب به سیمان ۰/۳۸ در این پژوهش، رابطه مقاومت فشاری بر اساس سرعت پالس اولتراسونیک با توجه به رابطه زیر حاصل شد [۵۵]. در این رابطه VP (سرعت پالس اولتراسونیک) بر حسب کیلومتر بر ثانیه است:

$$f_c' = 13.305e^{0.1264vp} \quad (1)$$



شکل ۱۱: نمودار مقایسه امواج پالس اولتراسونیک

## ۸-۵- نتایج آزمایش مقاومت ضربه‌ای

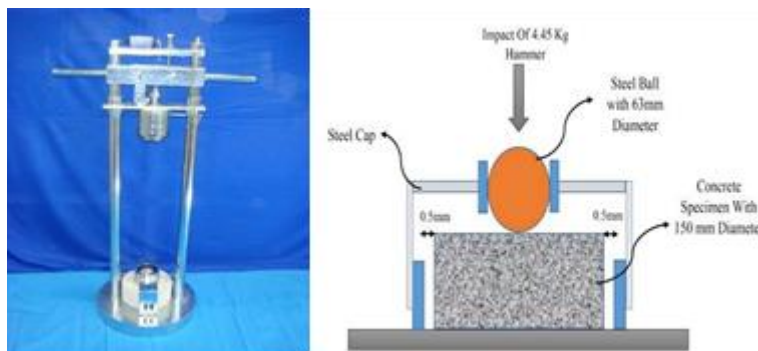
### ۸-۵-۱- تاثیر الیاف فولادی در طرح اختلاط یک ترکیبی

نتایج آزمایش وزنه افتان بر روی ۲۷ دیسک در ۹ طرح اختلاط در جدول ۱۰ نشان داده شده است. برای نمونه مرجع (G0FA0MS0)، متوسط مقاومت اولین ترک ۱۰ ضربه شد. با افزودن الیاف فولادی به نمونه مرجع (SF1G0FA0MS0)، مقاومت اولین ۴۵ ضربه به دست آمد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0)، ۳۵۰ درصد افزایش یافت. این افزایش مقاومت با توجه به استفاده از الیاف فولادی در طرح اختلاط دور از انتظار نبود. این مقاومت برای طرح اختلاط دارای الیاف فولادی و میکروسیلیس (SF1G0FA0MS10)، ۴۷ ضربه را نشان داد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0)، ۳۷۰ درصد افزایش یافت که با توجه به الیاف استفاده شده، می‌توان به تاثیر میکروسیلیس نیز اشاره کرد. طرح اختلاط متشکل از الیاف فولادی و خاکستر بادی (SF1G0FA10MS0)، مقاومت ضربه‌ای اولین ترک ۴۲ ضربه گردید که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0)، ۳۲۰ درصد افزایش یافت. برای نمونه دارای الیاف فولادی و سرباره (SF1G10FA0MS0)، مقاومت ضربه‌ای اولین ترک ۳۸ ضربه شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0)، ۲۸۰ درصد افزایش پیدا کرد. برای نمونه‌های تشکیل شده از خاکستر بادی و سرباره در صورت لحاظ نکردن الیاف فولادی، می‌توان گفت این دو افزودنی جایگزین سیمان موجب کاهش مقاومت ضربه‌ای شدند که با توجه به نتایج آزمایشات قبلی، این مورد کاملاً قابل پذیرش بود.

### ۸-۵-۲- تاثیر الیاف فولادی در طرح اختلاط چند ترکیبی

مقاومت ضربه‌ای اولین ترک برای طرح اختلاط دارای الیاف فولادی، میکروسیلیس و خاکستر بادی (SF1G0FA10MS10)، ۴۱ ضربه شد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب ۳۱۰ درصد افزایش و ۸/۸۹ درصد کاهش یافت. برای طرح اختلاط متشکل از الیاف فولادی، میکروسیلیس و سرباره (SF1G10FA0MS10)، مقاومت ضربه‌ای اولین ترک ۴۴ ضربه به دست آمد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب ۳۴۰ درصد افزایش و ۲/۲۲ درصد کاهش پیدا کرد که با توجه به استفاده از سرباره در این طرح اختلاط و تاثیر منفی آن در مقاومت بتن، نتیجه حاصل قابل قبول بود. در طرح اختلاط دارای الیاف فولادی، خاکستر بادی و سرباره (SF1G10FA10MS0)، مقاومت ضربه‌ای اولین ترک ۳۵ ضربه گردید که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب ۲۵۰ درصد بیشتر و ۲۲/۲۲ درصد کمتر شد. این کاهش مقاومت با توجه به استفاده از خاکستر بادی که باعث کم شدن مقاومت می‌شود مورد پذیرش بود. طرح اختلاط الیاف فولادی، میکروسیلیس، خاکستر بادی و سرباره

(SF1G10FA10MS10)، مقاومت ضربه‌ای اولین ترک ۳۹ ضربه را نشان داد که نسبت به نمونه مرجع (G0FA0MS0) و (SF1G0FA0MS0) به ترتیب ۲۹۰ درصد افزایش و ۱۳/۳۳ درصد کاهش یافت.



شکل ۱۲: نمای شماتیک و گرافیکی دستگاه تست ضربه افتان

انرژی جذب شده به وسیله دیسک بتنی برای مقاومت اولین ضربه و مقاومت انهدام و همچنین پارامتر PINPB نشان دهنده درصد افزایش ضربات بعد از رخ دادن اولین ترک در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۱۰: نتایج آزمایش تست ضربه افتان

شماره	عنوان طرح اختلاط	FC	UC	PINPB <sup>۱۶</sup>	جذب انرژی (J)
۱	G0FA0MS0 (Ref)	۱۰	۱۱	۱۰	۲۲۳/۸
۲	SF1G0FA0MS0	۴۵	۶۴	۴۲/۲	۱۳۰۲/۱
۳	SF1G0FA0MS10	۴۷	۶۸	۴۴/۷	۱۳۸۳/۵
۴	SF1G0FA10MS0	۴۲	۵۹	۴۰/۵	۱۲۰۰/۴
۵	SF1G10FA0MS0	۳۸	۵۳	۳۹/۵	۱۰۷۸/۳
۶	SF1G0FA10MS10	۴۱	۵۷	۳۹	۱۱۵۹/۷
۷	SF1G10FA0MS10	۴۴	۶۲	۴۰/۹	۱۲۶۱/۴
۸	SF1G10FA10MS0	۳۵	۴۶	۳۱/۴	۹۳۵/۹
۹	SF1G10FA10MS10	۳۹	۵۳	۳۵/۹	۱۰۷۸/۳



Increase in number of post-first-crack for failure strength for First-crack strength



G0FA0MS0



SF1G0FA10MS10

SF1G0FA0MS0



SF1G10FA0MS10

SF1G0FA0MS10



SF1G10FA10MS0

SF1G0FA10MS0



SF1G10FA10MS10

شکل ۱۳: مد انهدام نمونه‌های آزمایش ضربه افتان

## ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی بر روی کامپوزیت سیمانی خودتراکم انجام شد. همچنین آزمایشات مقاومت ضربه‌ای، جذب آب، موینگی و سرعت امواج اولتراسونیک جهت نتیجه گیری بهتر انجام گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده از تست‌های آزمایشگاهی، موارد زیر به عنوان بخشی از نتایج این تحقیق قابل بیان می‌باشد:

۱- مطابق با نتایج آزمایشات روانی کامپوزیت سیمانی خودتراکم ملاحظه گردید که استفاده از الیاف فولادی به دلیل درگیری و دوختگی با یگدیگر کارایی و روانی بتن خودتراکم را کاهش داد. میکروسلیس (به دلیل جذب آب) باعث کاهش روانی کامپوزیت سیمانی شد. در صورتی که خاکستر بادی و سرباره هرچند جاذب زیاد آب نیستند اما به دلیل استفاده از الیاف فولادی کارایی آن‌ها کاهش پیدا کرد همچنین خاصیت میکروسلیس در نتایج آزمایشات جذب آب و موینگی کاملاً مشهود بود.

۲- استفاده از الیاف فولادی تاثیر زیادی بر روی افزایش مقاومت فشاری نداشت به طوری که در نمونه دارای ۱ درصد الیاف فولادی، مقاومت فشاری ۴/۵ درصد بیشتر از نمونه مرجع شد. این مقاومت با وجود استفاده از میکروسلیس نیز افزایش چندانی پیدا نکرد ولی نمونه‌های دارای خاکستر بادی و سرباره حتی با وجود الیاف فولادی کاهش مقاومت داشتند که این موضوع نشان دهنده تاثیر منفی این دو ماده جایگزین سیمان بود.

۳- بر خلاف آزمایش مقاومت فشاری، نتایجی که از آزمایش مقاومت کششی به دست آمد نشان داد که استفاده از الیاف فولادی تاثیر بسیار زیاد بر افزایش مقاومت داشتند. می‌توان گفت که الیاف فولادی در حالت کشش بیشتر تاثیر گذار هستند و کارایی بهتری را نشان می‌دهند. تاثیرگذاری مواد جایگزین سیمان در این آزمایش به دلیل عملکرد مناسب الیاف فولادی مورد توجه نبود هرچند نمی‌توان از خاصیت هر کدام از این مواد در افزایش و کاهش مقاومت چشم پوشی کرد.

۴- نتایج آزمایش مقاومت خمشی نشان داد که استفاده از الیاف فولادی، همانند آزمایش کشش در تمام نمونه‌ها با افزایش مقاومت نسبت به نمونه مرجع به دلیل دوختگی بتن توسط الیاف همراه بود اما در مقایسه نمونه‌های چند ترکیبی با نمونه مرجع دارای الیاف فولادی مشاهده شد که در ترکیب‌های دارای خاکستر بادی و سرباره به دلیل تاثیر منفی این دو ماده، مقاومت خمشی با وجود الیاف فولادی کاهش پیدا کرد.

۵- استفاده از الیاف فولادی در آزمایش‌های جذب آب و موینگی تاثیر نداشت ولی مواد جایگزین سیمان کاملاً تاثیر گذار بودند. در طرح اختلاط‌های یک ترکیبی میزان جذب آب توسط میکروسلیس برای هر دو آزمایش متناسب بود که با توجه به خاصیت این ماده کاملاً مورد

قبول بود. استفاده از خاکستر بادی و سرباره خلاف نتایج میکروسلیس را نشان داد به طوری که در طرح اختلاط‌های چند ترکیبی تاثیر خاکستر بادی و سرباره در کاهش جذب آب و مویبگی بیشتر از خاکستر بادی بود و عملکرد این ماده را مورد تاثیر خود قرار میدادند.

۶- با توجه به نتیجه حاصل از آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک می‌توان گفت ریزدانه بودن مصالح سنگی به دلیل کم بودن فضای خالی بین مصالح و همچنین استفاده از الیاف فولادی با توجه به خاصی که دارد موجب افزایش سرعت امواج می‌شود. به طور کلی سرعت امواج در تمام نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع بیشتر بود که وجود الیاف فولادی مهمترین عامل این موضوع بود. مقایسه سرعت امواج نمونه‌های دارای الیاف فولادی با یکدیگر نشان داد در نمونه دارای میکروسلیس سرعت بیشتر شده است که با توجه به نتایج مقاومت کششی می‌توان گفت میکروسلیس باعث کاهش حفره در نتیجه افزایش مقاومت می‌شود چیزی که خاکستر بادی و سرباره خلاف این موضوع را نشان دادند.

۷- مقاومت ضربه‌ای نمونه‌های دارای الیاف فولادی نسبت به نمونه مرجع به دلیل دوختگی بتن توسط الیاف بیشتر و قابل انتظار بود. در مقایسه نمونه‌های دارای الیاف با یکدیگر، نتایج به دست آمده همچون آزمایش‌های مقاومت کششی و خمشی نشان داد میکروسلیس به تنهایی باعث افزایش مقاومت می‌شود ولی در صورت استفاده از خاکستر بادی و سرباره، مقاومت ضربه‌ای کاهش در نتیجه با تعداد ضربات کمتر نمونه تخریب می‌شود.

## مراجع

- [1] Bastami, A., Omidinasab, F., Dalvand, A. (2022). Experimental investigation of the effects of pozzolan and slag addition on mechanical properties of self-compacting cementitious composites. *Amirkabir J. Civil Eng*, 54 (10).
- [2] Sabir, B. (1998). The effects of curing temperature and water/binder ratio on the strength of metakaolin concrete. In: Sixth CANMET/ACI International Conference on Fly ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Supplementary volume. *Bangkok, Thailand*, 493-506.
- [3] Mehta, P.k. (1986). Concrete: structure, properties and materials. prentice-hall inc., *Englewood cliffs. New Jersey*.
- [4] Darwish, et al. (2008). Influence of fiber ratio in the size effect. *Proceedings. Int Conference Concrete: Constructions sustainable option. Dundee. UK*, 123-130.
- [5] Krenchel, H., Stang, H. (1989). Stable microcracking in cementitious materials, In *Brittle Matrix Composites 2*. A.M. Brandt and J.H. Marshall. Eds, 20-33.
- [6] Li, V.C. (1993). From Micromechanics to Structural Engineering. the design of cementitious composites for Civil Engineering applications. *JSCE J. of Struc. Mechanics and Earthquake Engineering*, 10 (2), 37- 48.
- [7] Fischer, G., Wang, S., Li, V.C. (2003). Design of engineered cementitious composites for processing and workability requirements, *Seventh International Symposium on Brittle Matrix Composites. Warsaw, Poland*, 29-36.
- [8] Kong, H.J., Bike, S., Li, V.C. (2003). Development of a self-compacting engineered cementitious composite employing electrosteric dispersion/stabilization. *Journal of Cement and Concrete Composites*, 25 (3), 301-309.
- [9] Lepech, M.D., Li, V.C. (2007). Large scale processing of engineered cementitious composites. *ACI Materials Journal*.
- [10] Kishi, N., Konno, H., Ikeda, K., Matsuoka, K.G. (2002). Prototype impact tests on ultimate impact resistance of PC rocksheds. *Int J Impact Eng*, 27 (9), 969-85.
- [11] Ong, KCG., Basheerkhan, M., Paramasivam, P. (1999). Resistance of fibre concrete slabs to low velocity projectile impact. *Cement Concr Compos*, 21 (5- 6), 391-401.
- [12] Mindess, S., Cheng, Y. (1993). Perforation of plain and fibre reinforced concretes subjected to low-velocity impact loading. *Cement Concr Res*, 23 (1), 83-92.
- [13] Ramakrishna, G., Sundararajan, T. (2005). Impact strength of a few natural fiber reinforced cement mortar slabs: a comparative study. *Cement & Concrete Composites*, 27, 547-553.
- [14] Sahraei Moghadam, A., Omidinasab, F. (2020). Assessment of hybrid FRSC cementitious composite with emphasis on flexural performance of functionally graded slabs. *Construction and Building Materials*, 250, 118904.

- [15] Sahraei Moghadam, A., Omidinasab, F. (2021) Effect of Purposive Distribution of Fibers to Prevent the Penetration of Bullet in Concrete Walls. *KSCE J Civ Eng*, 25, 843–853.
- [16] EFNARC. (2005). The European guidelines for self-compacting concrete. specification production and use.
- [17] Hammer, T.A., Wallevik, O., Nielsson, I. (2003). Cracking susceptibility due to volume changes of self-compacting concrete. Proceedings of third RILEM international symposium on self-compacting concrete. *Reykjavik, Iceland*.
- [18] Li, V.C. (1992). A simplified micromechanical model of compressive strength of fiber-reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 14 (2), 131-141.
- [19] Hannant, D.J. (1987). *Fiber Cements and Fiber Concrete*. Wiley, Chichester.
- [20] Bentur, A., Mindess, S. (1990). *Fiber Reinforced Cementitious Composites*. Elsevier, London.
- [21] Mobasher, B., Li, C.Y. (1996). Mechanical properties of hybrid cement-based composites. *ACI Mater. J*, 93 (3), 284-292.
- [22] Khayat, K.H., Roussel, Y. (1999). Testing and performance of fiber-reinforced, self-consolidating concrete. *Proceedings of the First RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete*, 509–521.
- [23] Grouth, P., Nemegeer, D. (1999). The use of steel fibres in self-compacting concrete. *Proceedings of the First RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete*, 497–507.
- [24] Khan, M.I., Siddique, R. (2011). Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties. *Resources, Conservation and Recycling*, 57, 30-35.
- [25] Detwiler, R.J., Bhatti, J.I., Bhattacharja, S. (1998). Supplementary Cementing Materials for Use in Blended Cements. *Portland Cement Association*, Research and development bulletin RD112T.
- [26] Kjellsen, K.O., Wallevik, O.H., Hallgren, M. (1999). On the compressive strength development of high performance concrete and paste - effect of silica fume. *Materials and Structures*, 32, 63-69.
- [27] Benli, A., Karatas, M., Gurses, E. (2017). Effect of sea water and MgSO<sub>4</sub> solution on the mechanical properties and durability of self-compacting mortars with fly ash/silica fume. *Construction and Building Materials*, 146, 464–474.
- [28] Oner, A., Akyuz, S., Yildiz, R. (2005). An Experimental Study on Strength Development of Concrete Containing Fly Ash and Optimum Usage of Fly Ash in Concrete. *Cement and Concrete Research*, 35, 1165– 1171.
- [29] Nie, Q., Zhou, C., Shu, X., He, O., Huang, B. (2014). Chemical, mechanical, and durability properties of concrete with local mineral admixtures under sulfate environment in Northwest China. *Materials*, 7 (5), 3772–3785.
- [30] ACI Committee 232.2R-03. (1993). Use of Fly Ash in Concrete. American Concrete Institute.
- [31] Sahraei Moghadam, A., Omidinasab, F., Moazami Goodarzi, S. (2021). Characterization of concrete containing RCA and GGBFS: Mechanical, microstructural and environmental properties. *Construction and Building Materials*, 289, 123-134.
- [32] Gholhaki, M., Pachideh, G.H., Rezayfar, O. (2017). Experimental Study on Mechanical Properties of Concrete Containing Steel Fibres, and Polypropylene in high temperatures. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 4 (3), 167-179.
- [33] Pachideh, G.H., Gholhaki, M. (2020). An experimental study on the performance of fine-grained concrete incorporating recycled steel spring exposed to acidic conditions. *Advances in Structural Engineering*, 23 (11), 2458-2470.
- [34] Bouikni, A., Swamy, R.N., Bali, A. (2009). Durability properties of concrete containing 50% and 65% slag. *Construction and Building Material*, 23, 2836-2845.
- [35] Oh, J.E., Jun, Y., Jeong, Y., Monteiro, P.J.M. (2014). The importance of the network-modifying element content in fly ash as a simple measure to predict its strength potential for alkali-activation. *Cement & Concrete Composites*. Volume 57, 44-54.
- [36] Gesoglu, M., Güneysi, E., Özbay, E. (2009). Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume. *Construction and Building Materials* 23, 1847–1854.
- [37] Carino, N.J., Lew, H.S. (1982). Re-examination of the relation between splitting tensile and compressive strength of normal weight concrete. *ACI Mater: J*, 79 (3), 214–219.
- [38] ASTM Standard C192/C192M. (2002). Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. ASTM International, West Conshohocken, PA, U.S.A.
- [39] EFNARC S. (2005). Guidelines for self-compacting concrete. EFNARC, UK: [www.efnarc.org].
- [40] ASTM C39. Compressive Strength of Concrete Cylinders.
- [41] ASTM C496. Compression Fixture Cylindrical Concrete.
- [42] ASTM C293. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading).
- [43] ASTM C642. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.

- [44] ASTM C1585. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic- Cement Concretes.
- [45] ASTM C597. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.
- [46] ACI Committee 544. Measurement of properties of fiber reinforced concrete.
- [47] CEB-FIB Model Code for Concrete Structures. (1991). Evaluation of the Time Dependent Behaviour of Concrete. Bulletin d'Information No. 199: Comite European du Beton / Federation Internationale de la Precontrainte, Lausanne, Page (201).
- [48] Eren Gülsan, M., Alzebaree, R., Rasheed, A.A., Nis, A., Emin Kurtoglu, M. (2019). Development of fly ash/slag based self-compacting geopolymer concrete using nano-silica and steel fiber. *Construction and Building Materials*, 211, 271–283.
- [49] Sahraei Moghadam, A., Omidinasab, F., Dalvand, A. (2019). Investigation of Mechanical and Impact Properties of High Performance Self-Compacting Composite Concrete. *Amirkabir J. Civil Eng*, 32 (3), 49-66.
- [50] Yu, R., Spiesz, P., Brouwers, H.J.H. (2015). Development of an eco-friendly Ultra- High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. *Cement and Concrete Composites*, 55, 383-394.
- [51] Whitehurst, E.A. (1951). Soniscope tests concrete structures. *Journal of the American Concrete Institute*, 443–444.
- [52] Ruiz, W.M. (1966). Effect of volume of aggregate on the elastic and inelastic properties of concrete. *M.S. thesis. Cornell University*.
- [53] Akbari, M., Khademi, F., Khademi, S.A. (2014). Aggregate size effect evaluation on ultrasonic pulse velocity and 28 Days compressive strength of concret. *National Conference of Concrete*, 6, 7-9.
- [54] Mastali, M., Kinnunen, P., Dalvand, A., Mohammadi Firouz, R., Illikaine, M. (2018). Drying shrinkage in alkali-activated binders – A critical review. *Construction and Building Materials*, 190, 533–550.
- [55] Mastali, M., Dalvand, A., Sattarifard, A. (2016). The impact resistance and mechanical properties of the reinforced self-compacting concrete incorporating recycled CFRP fiber with different lengths and dosages. *Composites Part B: Engineering*, 92, 360-376.