

# Experimental Study on the Effects of Aggregate Content and Fibers on Mechanical Properties of One-Part Alkali-Activated Slag Concrete

Keyhan Rahmani<sup>1\*</sup>, Kouroush Nasrollahzadeh<sup>2</sup>, Majid Rostami<sup>3</sup>

1. Ph.D. Candidate, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. [k.rahmani@email.kntu.ac.ir](mailto:k.rahmani@email.kntu.ac.ir)

2. Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

3. Ph.D. Candidate, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

Received: 03 December 2023    Revised: 26 January 2024    Accepted: 14 February 2024

Research paper

## Abstract

Increased cracks caused by shrinkage are one of the problems associated with alkali-activated slag concrete as compared to ordinary Portland cement concrete, which can have destructive effects on the mechanical properties and durability of concrete. By adding fibers, the number of these cracks can be reduced, and their growth can be prevented. The purpose of this research is to investigate the effect of aggregate content and fibers on the mechanical properties (compressive strength, tensile strength, and flexural strength) of one-part alkali-activated slag concrete. To obtain the optimal aggregate ratio, three mixing designs with different aggregate ratios of 0.72, 0.75, and 0.78 were made and assessed. To investigate the effects of polypropylene (PP) and glass fibers on the mechanical properties of one-part alkali-activated slag concrete, PP fibers were used in three volume percentages of 0.15, 0.3, and 0.45 and glass fibers were used in two volume percentages of 0.15 and 0.30. The results showed that the aggregate ratio of 0.75 had the best performance among the other ratios. To make further samples containing fibers, the ratio of aggregate to the whole mixture was considered constant and equal to 0.75. Examining the results of the aforementioned tests showed that the high pH value in alkali-activated slag concrete can lead to a reduction in the tensile strength of glass fibers. Also, by increasing the concrete porosity due to the addition of glass fibers, the values of compressive strength, tensile strength, and flexural strength decrease. The bridging effect of PP fibers in concrete prevents the development and increase of crack width, which leads to the improvement of concrete performance in tensile and flexural strength. It should be noted that scanning electron microscope (SEM) images were prepared from samples containing PP fibers in order to investigate some results.

**Keywords:** One-Part Alkali-Activated Slag Concrete; Polypropylene Fiber; Glass Fiber; Mechanical Properties; Flexural Strength.

**\*Corresponding Author:** Keyhan Rahmani

Rahmani, K., Nasrollahzadeh, K., Rostami, M. Experimental study on the effects of aggregate content and fibers on mechanical properties of one-part alkali-activated slag concrete. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2023; 8(2): 1-23. <http://doi.org/10.30478/jcsm.2024.428576.1353>

2538-5828/ © 2024 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/>).

# مطالعه آزمایشگاهی تاثیر میزان سنگدانه و الیاف بر خصوصیات مکانیکی بتن قلیافعال سرباره‌ای تک جزئی

کیهان رحمانی<sup>۱\*</sup>، کورش نصراله زاده<sup>۲</sup> و مجید رستمی<sup>۱</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: k.rahmani@email.kntu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۲، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۰۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۵

نوع مقاله: پژوهشی

## چکیده

بیشتر شدن ترک‌های ناشی از انقباض، یکی از مشکلات بتن‌های قلیافعال سرباره‌ای نسبت به بتن سیمان پرتلندی می‌باشد که می‌تواند تأثیر مخربی بر خصوصیات مکانیکی و دوام بتن داشته باشد. با افزودن الیاف می‌توان میزان این ترک‌ها را کاهش داده و مانع از رشد آن‌ها شد. هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر نسبت سنگدانه و الیاف بر خواص مکانیکی (مقاومت فشاری، مقاومت کششی دونیم شدگی و مقاومت خمشی) بتن قلیافعال سرباره‌ای تک جزئی می‌باشد. به‌منظور بررسی نسبت سنگدانه بهینه، سه طرح مخلوط با نسبت‌های ۰/۷۲، ۰/۷۵ و ۰/۷۸ ساخته و مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه پژوهش به‌منظور بررسی اثر الیاف پلی‌پروپیلن (PP) و شیشه بر خواص مکانیکی بتن قلیافعال سرباره‌ای تک جزئی از الیاف پلی‌پروپیلن در سه درصد حجمی ۰/۱۵، ۰/۳۰ و ۰/۴۵ و الیاف شیشه مقاوم در محیط‌های قلیایی در دو درصد حجمی ۰/۱۵ و ۰/۳۰ استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که نسبت سنگدانه ۰/۷۵ بهترین عملکرد را در بین سایر نسبت‌ها داشته است. از این نسبت سنگدانه جهت ساخت نمونه‌های حاوی الیاف استفاده گردید. بررسی نتایج آزمایش‌های مذکور نشان می‌دهد که بالا بودن مقدار pH در بتن قلیافعال سرباره‌ای می‌تواند کاهش مقاومت کششی الیاف شیشه را به دنبال داشته باشد. همچنین، با افزایش تخلخل بتن به دنبال افزودن الیاف شیشه، کاهش در مقادیر مقاومتی بتن قلیافعال سرباره‌ای مشاهده شده است. اثر پل زدن الیاف PP در بتن سبب جلوگیری از توسعه و افزایش پهنای ترک شده که منجر به بهبود عملکرد بتن در مقاومت کششی و خمشی می‌شود. لازم به ذکر است که جهت بررسی برخی نتایج از نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تهیه شد.

**کلمات کلیدی:** بتن قلیافعال سرباره‌ای تک جزئی، الیاف پلی‌پروپیلن، الیاف شیشه، خواص مکانیکی، مقاومت خمشی.

تحقیقات گسترده‌ای به منظور توسعه مواد جایگزین سیمان نظیر مواد چسباننده قلیافعال<sup>۱</sup>، جهت کاهش تأثیرات زیان‌آور زیست‌محیطی صورت گرفته است. انتشار کربن دی‌اکسید ناشی از تولید چسبنده‌های قلیافعال، ۵۰ تا ۸۰ درصد کمتر از تولید سیمان پرتلندی معمولی می‌باشد [۲،۱]. بتن قلیافعال سرباره‌ای در مقایسه با بتن معمولی، از کسب مقاومت اولیه سریع‌تر، مقاومت فشاری بالاتر، مقاومت قابل‌توجه در برابر حملات شیمیایی و نفوذ یون کلر، مقاومت در برابر حمله اسیدها و سولفات‌ها، مقاومت در برابر چرخه‌های یخ زدن و آب شدن و مقاومت بهتر در برابر آتش و چسبندگی بهتر با میلگردهای فولادی برخوردار است [۳-۸].

امروزه چسباننده‌های قلیافعال و ژئوپلیمری به‌عنوان موضوعاتی جذاب در تحقیقات مهندسی شناخته می‌شوند، به‌گونه‌ای که یک‌دهم کل مقالات منتشرشده در ژورنال‌های معتبر سیمان و بتن به این چسباننده‌ها اختصاص یافته است [۹]. سیمان‌های قلیافعال به دو شکل تک جزئی و دوجزئی تولید می‌شوند. سیمان قلیافعال تک جزئی حاصل از واکنش آلومینوسیلیکات جامد<sup>۲</sup> با سیلیکات قلیایی جامد<sup>۳</sup> می‌باشد. این روش منجر به تولید مخلوطی خشک و چسبنده نظیر سیمان پرتلندی می‌شود. سیمان قلیافعال تک جزئی برخلاف محلول‌های قلیایی چسبناک که خطر بسیار در کار با دست ایجاد می‌کنند برای کاربردهای درجا و ساخت کارگاهی مناسب می‌باشد. از دیگر مزایای سیمان قلیافعال تک جزئی میتوان به شباهت آن با سیمان پرتلندی از نظر بسته‌بندی و نحوه استفاده اشاره نمود [۱۰، ۱۱]. با توجه به مزایای ذکر شده و مطالعات اندک صورت گرفته بر خواص مکانیکی بتن قلیافعال سرباره‌ای تک جزئی نسبت به دو جزئی، این پژوهش به بررسی خواص مکانیکی بتن قلیافعال سرباره‌ای تک جزئی اختصاص یافته است.

مطابق مطالعات انجام‌شده در گذشته، انقباض ناشی از خشک‌شدگی بتن قلیافعال سرباره‌ای بیش از بتن سیمان پرتلندی معمولی می‌باشد [۸، ۱۱-۱۴] که می‌تواند تا حدودی با اضافه نمودن الیاف به ماتریس بتن کاهش یابد [۱۴، ۱۶، ۱۷]. نوع و نسبت حجمی الیاف تأثیر قابل‌توجهی بر خواص مکانیکی و دوام بتن الیافی دارند. الیاف با توجه به نسبت حجمی به کار رفته در بتن می‌تواند کارکردهای متفاوتی داشته باشد. در این پژوهش به‌منظور کاهش ترک‌های ناشی از انقباض، نسبت حجمی الیاف کمتر از ۱ درصد در نظر گرفته شد.

مطابق پژوهش ناتالی و همکاران<sup>۴</sup>، علی‌رغم خواص مطلوب بتن‌های قلیافعال سرباره‌ای، این نوع بتن رفتاری ترد از خود نشان داده است. این موضوع سبب کاهش مقاومت کششی و خمشی بتن شده و گسیختگی ترد بتن را به همراه دارد [۱۸]. همچنین در پژوهش صورت گرفته توسط توماس و پیتامپاران<sup>۵</sup> بتن قلیافعال سرباره‌ای نسبت به بتن سیمان پرتلندی رفتاری به‌مراتب تردتر از خود نشان داده است [۱۹]. برخی از محققین به‌منظور غلبه بر رفتار ترد و بهبود خواص مکانیکی و شکست بتن قلیافعال اقدام به‌اضافه نمودن الیاف به ماتریس بتن نموده‌اند [۲۰-۲۷]. بتن‌های قلیافعال حاوی الیاف در سازه‌های دریایی، حمل‌ونقل زمینی و صنعت خودروسازی نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲۸].

در مطالعه صورت گرفته توسط ژو و همکاران<sup>۶</sup> خواص مکانیکی بتن قلیافعال سرباره‌ای مسلح به الیاف PP مورد بررسی قرار گرفته است.

<sup>1</sup> Alkali-activated binders

<sup>2</sup> Solid alkali aluminosilicate

<sup>3</sup> Solid alkali silicate

<sup>4</sup> Natali et al.

<sup>5</sup> Thomas and Peethamparan

<sup>6</sup> Zhou et al.

در این پژوهش تأثیر طول (6mm، 12mm و 18mm) و درصد حجمی استفاده از این الیاف (0/3، 0/6 و 0/9) بر مقاومت فشاری، کششی دونیم شدگی و خمشی مورد ارزیابی قرار گرفته است. بنا به نتایج حاصل شده، با افزایش طول و درصد حجمی الیاف، مقاومت فشاری و کششی دونیم شدگی ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است، همچنین استفاده از الیاف PP تأثیر چندانی بر مقاومت خمشی بتن نداشته است [29].

در پژوهش صورت گرفته توسط برنال و همکاران<sup>7</sup>، خواص مکانیکی از قبیل مقاومت فشاری، مقاومت کششی دونیم شدگی و خمشی و نفوذپذیری بتن قلیافعال سرباره‌ای مسلح به الیاف فولادی ( $0 \text{ kg/m}^3$ ،  $40 \text{ kg/m}^3$  و  $120 \text{ kg/m}^3$ ) در سنین اولیه (7، 14 و 28 روز) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از کاهش مقاومت فشاری با افزایش مقادیر الیاف و افزایش قابل توجه مقاومت کششی دونیم شدگی و خمشی (مدول گسیختگی و طاقت شکست) با افزایش الیاف بوده است. همچنین خواص وابسته به دوام از قبیل جذب آب، مویبندی<sup>8</sup> و مقاومت در برابر نفوذ آب با اضافه شدن الیاف فولادی بهبود یافته‌اند [6].

معمولاً سنگدانه‌ها 70 تا 80 درصد حجم بتن را اشغال می‌کنند و در نتیجه تأثیر مهمی بر خواص مقاومتی و فیزیکی بتن خواهند داشت. در ابتدای این پژوهش به منظور بررسی اثر نسبت سنگدانه بر خواص مکانیکی بتن قلیافعال سرباره‌ای تک جزئی، تأثیر مقادیر مختلف سنگدانه (0/72، 0/75 و 0/78) بر مقاومت فشاری، مقاومت کششی دونیم شدگی و مقاومت خمشی مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از حصول نسبت سنگدانه بهینه و ثابت در نظر گرفتن آن، خواص مکانیکی بتن قلیافعال سرباره‌ای حاوی 0/15٪، 0/30٪ و 0/45٪ حجمی الیاف پلی‌پروپیلن و 0/15٪ و 0/30٪ حجمی الیاف شیشه بررسی شد.

## 2. مطالعات آزمایشگاهی

### 2.1. مصالح مورد استفاده

در این پژوهش از سرباره (به شکل گرانوله) کوره بلند کارخانه ذوب‌آهن اصفهان که به صورت آسیاب شده از کارخانه سیمان سپاهان اصفهان تهیه شده است، استفاده گردید. چگالی سرباره مصرفی  $2/75 \text{ g/m}^3$ ، بلین  $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$  و مدول هیدراسیون<sup>9</sup>  $(\text{HM}=(\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Al}_2\text{O}_3)/\text{SiO}_2)$  آن برابر 1/74 می‌باشد. نتیجه آنالیز شیمیایی سرباره که از طریق آزمایش فلورسانس اشعه X<sup>10</sup> انجام گرفته، در جدول 1 آورده شده است. از متاسیلیکات سدیم بی‌آب<sup>11</sup> با مشخصات ذکر شده در جدول 2، به عنوان ماده قلیایی جهت فعال سازی سرباره استفاده شده است.

جدول 1- ترکیبات شیمیایی سرباره

ماده	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	L.O.I
سرباره	0/6	0/6	0/4	7/2	43/5	0/6	1/9	34/2	0

<sup>7</sup> Bernal et al.

<sup>8</sup> Capillarity

<sup>9</sup> Hydration modulus

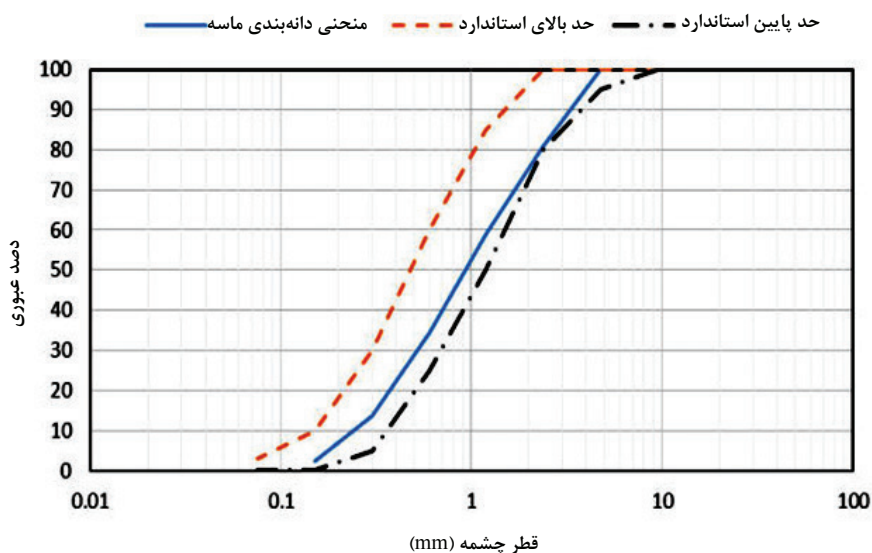
<sup>10</sup> X-ray fluorescence (XRF)

<sup>11</sup> Sodium metasilicate anhydrous

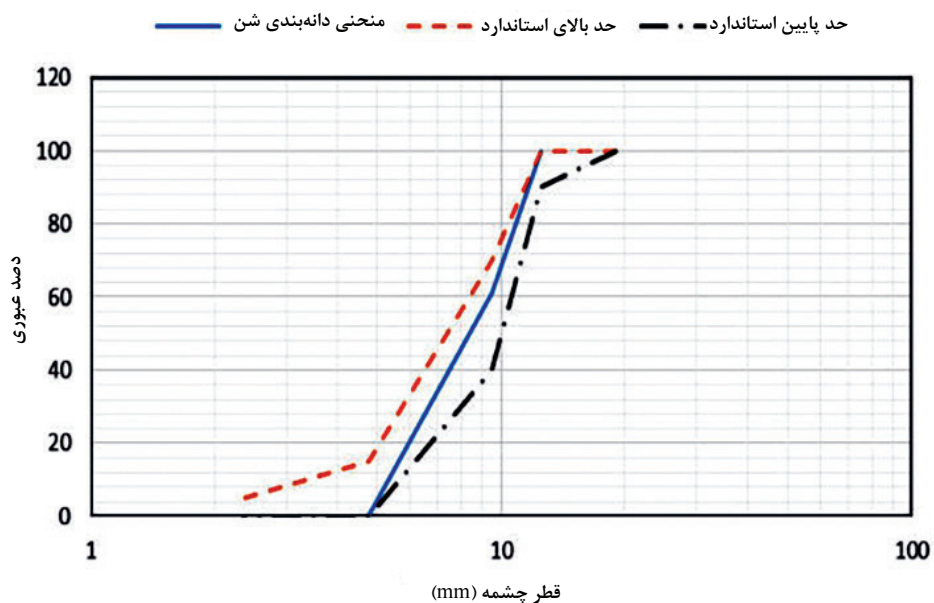
جدول ۲- مشخصات متاسیلیکات سدیم بی آب

۵۰/۷۸	مقدار سدیم اکسید بر حسب درصد (Na <sub>2</sub> O%)
۴۶/۲۱	مقدار سیلیس بر حسب درصد (SiO <sub>2</sub> %)
۷۴	آهن (ppm)
۰/۱۲	درصد نامحلول در آب
۱/۲۰	جرم حجمی (g/cm <sup>3</sup> )
۹۸/۴۸	اندازه ذرات (چشمه ۱۸-۶۰) بر حسب درصد
۹۴/۵	خلوص (%)
۱۲/۸۲	pH یک درصد محلول
سفید، یکنواخت، دانه‌ای	ظاهر

مدول نرمی ماسه برابر ۳/۰۹ می‌باشد که در محدوده مجاز استاندارد ASTM C33 [۳۰] قرار دارد. همچنین چگالی نسبی و درصد رطوبت در حالت اشباع با سطح خشک به ترتیب برابر ۲/۵۹ و ۲/۶۵ و وزن مخصوص خشک و میله خورده ماسه برابر ۱۸۸۶/۷۳ مطابق با استاندارد ASTM C128 می‌باشد [۳۱]. جنس سنگ‌دانه‌ها از نوع آهکی، حداکثر قطر سنگ‌دانه برابر ۱۲/۵ mm، درصد جذب آب شن برابر ۳/۱۱ درصد، چگالی نسبی در حالت خشک برابر ۲/۷۰۷ و چگالی در حالت اشباع با سطح خشک برابر ۲/۷۰۷ kg/m<sup>3</sup> مطابق با استاندارد ASTM C127 [۳۲] می‌باشد. منحنی دانه‌بندی ماسه و شن به ترتیب در اشکال ۱ و ۲ آورده شده است. همچنین در شکل ۳ الیاف مورد استفاده به‌منظور تولید بتن قلیافعال سرباره‌ای تک جزئی و در جدول ۳ مشخصات آن‌ها آورده شده است.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی ماسه و مقایسه با مقادیر استاندارد ASTM C33



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی شن و مقایسه با مقادیر استاندارد ASTM C33

پلی پروپیلن

شیشه ای مقاوم در برابر قلیا



شکل ۳- انواع الیاف استفاده شده در پژوهش

جدول ۳- مشخصات الیاف پلی پروپیلن و شیشه

نوع الیاف	طول (mm)	قطر (μm)	سطح	وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (MPa)
Polypropylene	۱۲	۲۳	صاف	۹۱۰	۳۴۵	۵۰۰۰
Glass-AR	۱۸	۲۱/۵	صاف	۲۷۰۰	۱۷۰۰	۷۲۰۰۰

## ۲.۲. طرح مخلوط، ساخت نمونه‌ها و عمل آوری

در این پژوهش به منظور بدست آوردن مقدار سنگدانه بهینه، نمونه‌هایی با مقادیر مختلف سنگدانه (نسبت‌های ۰/۷۵، ۰/۷۲ و ۰/۷۸) ساخته شده است. در ادامه جهت بررسی خواص مکانیکی بتن قلیافعال سرباره‌ای تک جزئی حاوی الیاف، سه طرح مخلوط حاوی ۰/۱۵، ۰/۳۰ و ۰/۴۵ درصد حجمی الیاف پلی‌پروپیلن، دو طرح مخلوط حاوی ۰/۱۵ و ۰/۳۰ درصد حجمی الیاف شیشه در نظر گرفته شد. طرح مخلوط‌های مورد استفاده در جدول ۴ گردآوری شده است. در تمامی طرح‌ها نسبت آب به مواد چسباننده ۰/۴۶ و در طرح‌های حاوی الیاف نسبت سنگدانه به کل مخلوط برابر با ۰/۷۵ (مقدار بهینه حاصل شده) در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که وزن مخصوص بتن قلیافعال سرباره‌ای برابر با  $2343 \text{ kg/m}^3$  می‌باشد. نام‌گذاری طرح‌ها بدین صورت است که A نشان‌دهنده بتن قلیافعال سرباره‌ای و عدد پس از آن بیانگر نسبت سنگدانه می‌باشد. به طور مثال A-0/72 به معنی بتن قلیافعال سرباره‌ای با نسبت سنگدانه ۰/۷۲ می‌باشد. در نمونه‌های حاوی الیاف، G-AR بیانگر بتن قلیافعال سرباره‌ای حاوی الیاف شیشه و PP بیانگر بتن قلیافعال سرباره‌ای حاوی الیاف پلی‌پروپیلن می‌باشد. اعداد ذکر شده پس از حروف بیانگر درصد مصرفی الیاف ضربدر صد می‌باشد. به طور مثال G-AR-30 به معنی بتن قلیافعال سرباره‌ای حاوی ۰/۳۰ درصد حجمی الیاف G-AR است.

جدول ۴- طرح‌های مخلوط

چسباننده		فعال کننده		الیاف		سنگدانه		طرح
[kg/m <sup>3</sup> ]	نوع	[kg/m <sup>3</sup> ]	نوع	وزن		نوع	مسه (kg/m <sup>3</sup> )	
				[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]			
۴۱۱	سرباره	۳۸	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	۰	۰	-	۹۲۸	A-0.72
۳۶۷	سرباره	۳۶	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	۰	۰	-	۹۶۶	A-0.75
۳۲۴	سرباره	۲۹	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	۰	۰	-	۱۰۰۵	A-0.78
۳۶۷	سرباره	۳۶	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	۱/۳۷	۰/۱۵	Polypropylene	۹۶۶	PP-15
۳۶۷	سرباره	۳۶	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	۲/۷۳	۰/۳۰	Polypropylene	۹۶۶	PP-30
۳۶۷	سرباره	۳۶	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	۴/۱۰	۰/۴۵	Polypropylene	۹۶۶	PP-45
۳۶۷	سرباره	۳۶	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	۴/۰۵	۰/۱۵	Glass-AR	۹۶۶	G-AR-15
۳۶۷	سرباره	۳۶	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	۸/۱۰	۰/۳۰	Glass-AR	۹۶۶	G-AR-30

جهت تهیه نمونه‌های فشاری از قالب‌های مکعبی با ابعاد  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ، نمونه‌های کششی دونیم شدگی از قالب‌های استوانه‌ای با ارتفاع  $200 \text{ mm}$  و قطر قاعده  $100 \text{ mm}$  و نمونه‌های خمشی چهار نقطه‌ای<sup>۱۲</sup> از قالب‌های منشوری به ابعاد  $100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  استفاده شده است. نمونه‌های آزمایش به مدت ۴۸ ساعت (به دلیل تأخیر در گیرش اولیه و کندی فرآیند پلیمریزاسیون) تحت پوشش پلاستیکی در محیط آزمایشگاه (دمای  $23 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد) قرار گرفتند و سپس نمونه‌ها از قالب خارج و تا زمان آزمایش در حوضچه آب قرار داده شدند. شکل ۴ نمونه‌های بتن قلیافعال خارج شده از قالب به منظور انجام آزمایش را نشان می‌دهد.

<sup>12</sup> 4-Point bending samples (4PB)



شکل ۴- نمونه‌های آزمایش

لازم به ذکر است که آزمایش‌های مقاومت فشاری و کشش دونیم شدگی در آزمایشگاه تکنولوژی بتن و مصالح ساختمانی و آزمایش خمش چهار نقطه‌ای در آزمایشگاه سازه دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی انجام گرفته‌اند.

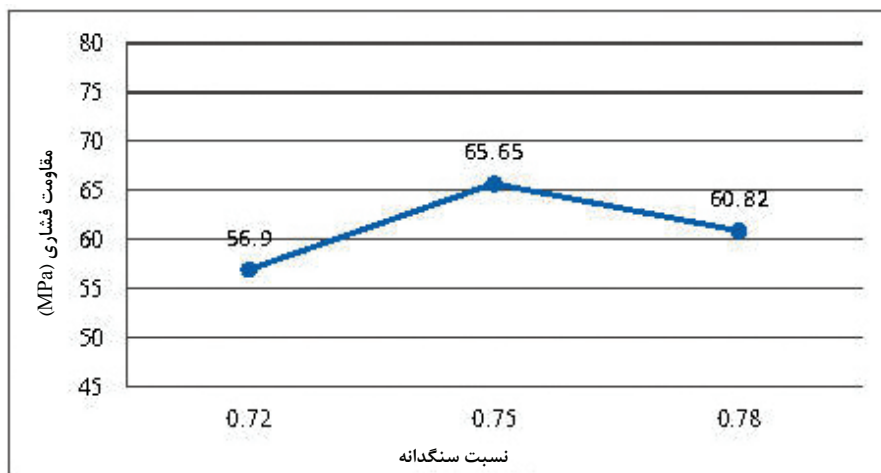
### ۳. مطالعات آزمایشگاهی

#### ۱.۳. مقاومت فشاری

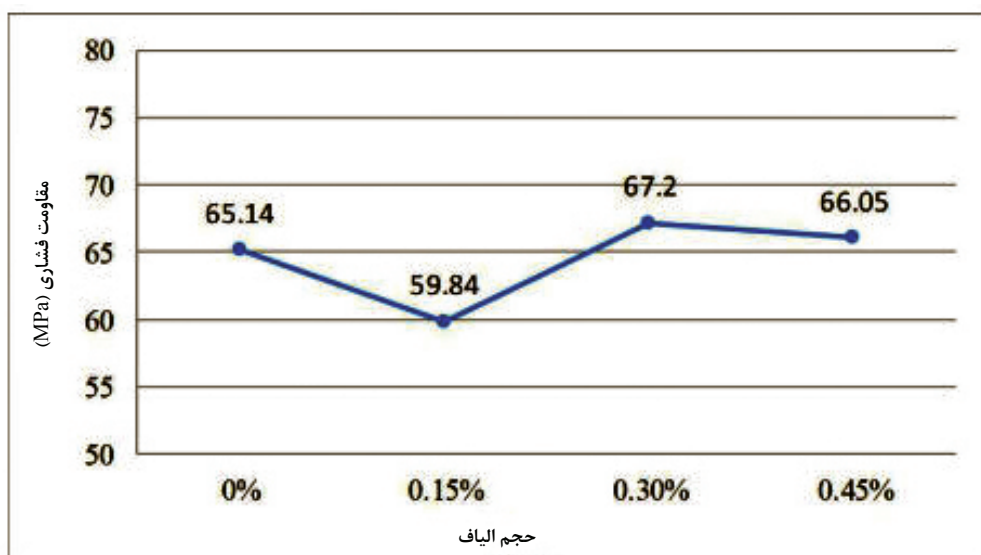
آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بتنی طبق استاندارد EN-12390-3 انجام شد [۳۳]. جهت محاسبه مقادیر مقاومت فشاری از رابطه شماره ۱ استفاده گردیده است؛ که در آن  $R_c$  مقاومت فشاری برحسب MPa،  $F$  حداکثر نیروی اعمال شده برحسب N و  $A$  سطح مقطع نمونه مکعبی برحسب  $mm^2$  می‌باشد. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ آورده شده است.

(۱)

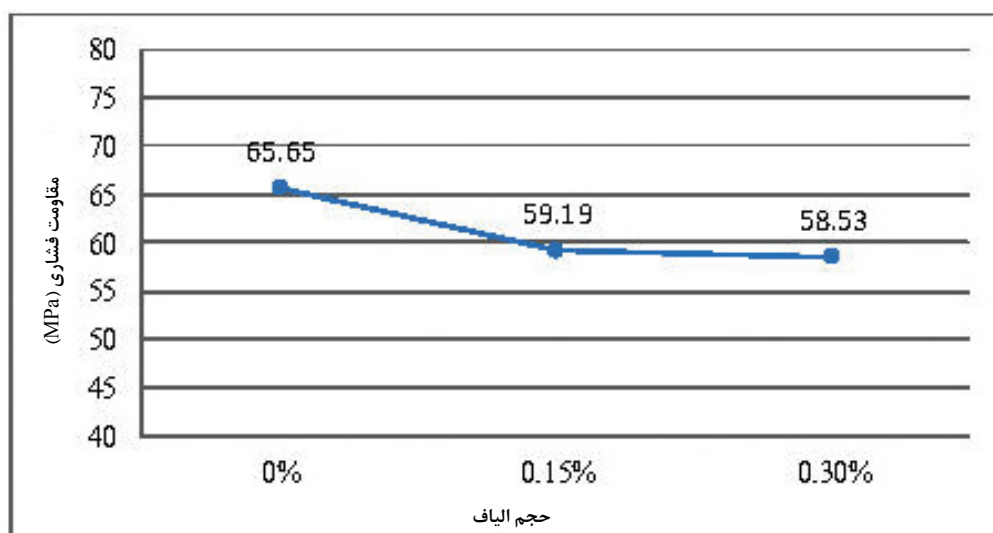
$$R_c = \frac{F}{A}$$



شکل ۵- تاثیر نسبت سنگدانه بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های فاقد الیاف



شکل ۶- تاثیر الیاف پلی پروپیلن بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه

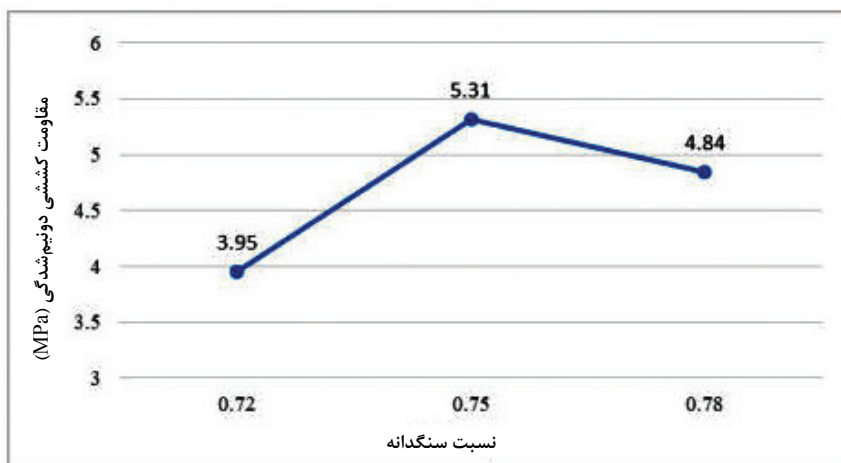


شکل ۷- تاثیر الیاف شیشه بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه

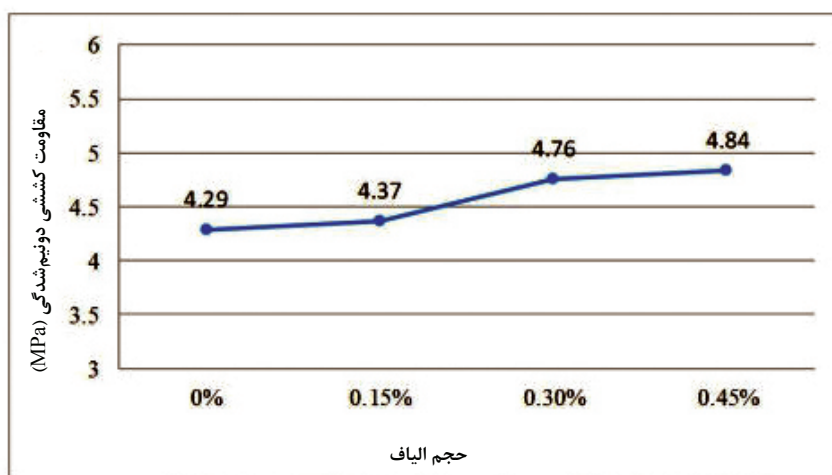
### ۲.۳. مقاومت کششی دونیم شدگی

جهت انجام آزمایش مقاومت کششی دونیم شدگی از استاندارد ASTM C496 استفاده گردید [۳۴]. جهت محاسبه مقادیر مقاومت کششی دونیم شدگی از رابطه شماره ۲ استفاده شده است؛ که در آن  $T$  مقاومت کششی دونیم شدگی بر حسب  $MPa$ ،  $P$  حداکثر نیروی اعمال شده بر حسب  $N$ ،  $l$  طول نمونه بر حسب  $mm$  و  $d$  قطر نمونه بر حسب  $mm$  می باشد. نتایج آزمایش های مقاومت کششی دونیم شدگی در شکل های ۸، ۹ و ۱۰ آورده شده است.

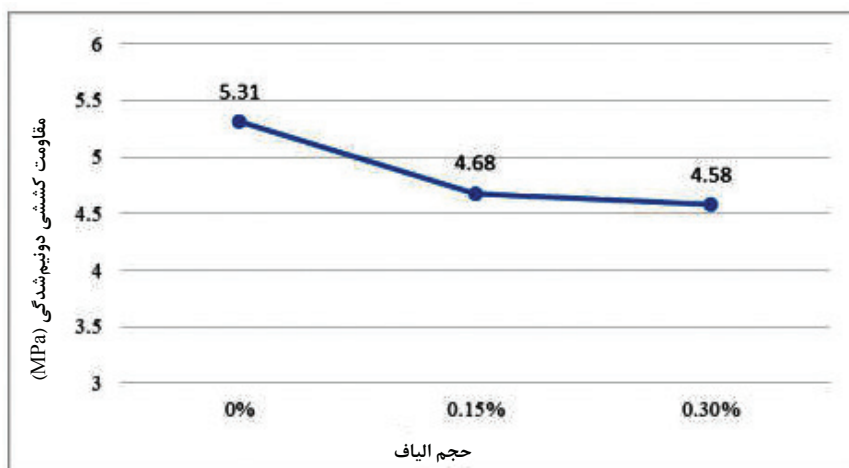
$$T = \frac{2p}{\pi ld} \quad (۲)$$



شکل ۸- تاثیر نسبت سنگدانه بر مقاومت کششی دونیم شدگی ۲۸ روزه نمونه‌های فاقد الیاف



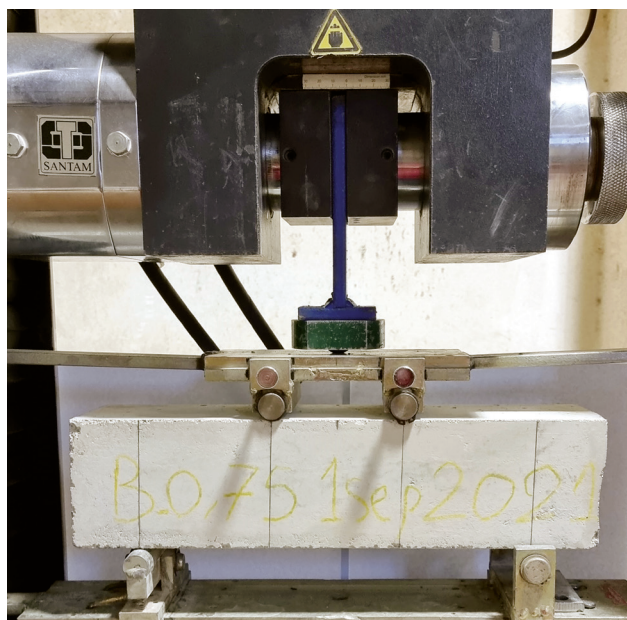
شکل ۹- تاثیر الیاف پلی پروپیلن بر مقاومت کششی دونیم شدگی ۲۸ روزه



شکل ۱۰- تاثیر الیاف شیشه بر مقاومت کششی دونیم شدگی ۲۸ روزه

### ۳.۳. مقاومت خمشی

در این قسمت از پژوهش نمونه‌های منشوری<sup>۱۳</sup> به صورت تغییر مکان کنترل<sup>۱۴</sup> با نرخ بارگذاری ثابت ۰/۱۴ mm/min با استفاده از دستگاه سنتام (STM-400) با ظرفیت ۴۰۰kN تحت بارگذاری قرار گرفتند. بار و مقادیر جابجایی خطی بار<sup>۱۵</sup> توسط دیتالاگر دستگاه در تمامی طول آزمایش ثبت و فاصله‌ی بین تکیه‌گاه‌ها برابر ۳۰۰ mm در نظر گرفته شد. شکل ۱۱ دستگاه آزمایش خمش چهار نقطه‌ای استفاده شده در این پژوهش را مطابق با ASTM C78 نشان می‌دهد [۳۵].



شکل ۱۱- دستگاه آزمایش خمش چهار نقطه‌ای

به دلیل شروع شکست از سطح کششی در یک سوم میانی دهانه در تمامی نمونه‌ها، مقادیر مدول گسیختگی مطابق فرمول زیر محاسبه گردید [۳۵]:

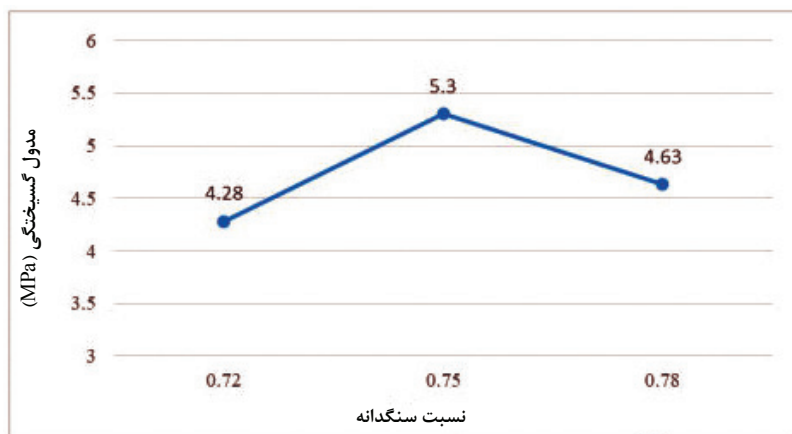
$$R = \frac{Pl}{bd^2} \quad (۳)$$

که در آن R مدول گسیختگی برحسب MPa، P حداکثر بار اعمال شده توسط دستگاه یونیورسال برحسب N، l طول دهانه برحسب mm، b پهنای متوسط نمونه در محل شکستگی برحسب mm و d عمق متوسط نمونه در محل شکستگی برحسب mm می‌باشد. نتایج آزمایش خمش نمونه‌های منشوری در شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ آورده شده است.

<sup>13</sup> Prismatic beams

<sup>14</sup> Displacement Control

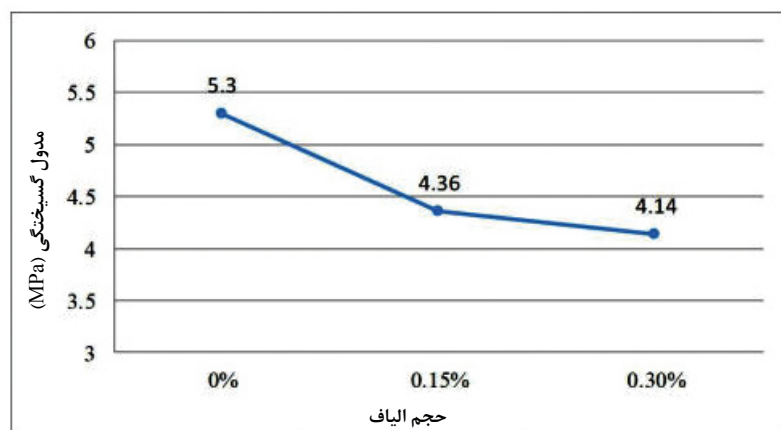
<sup>15</sup> Load line displacement



شکل ۱۲- تاثیر نسبت سنگدانه بر مدول گسیختگی نمونه‌های فاقد الیاف



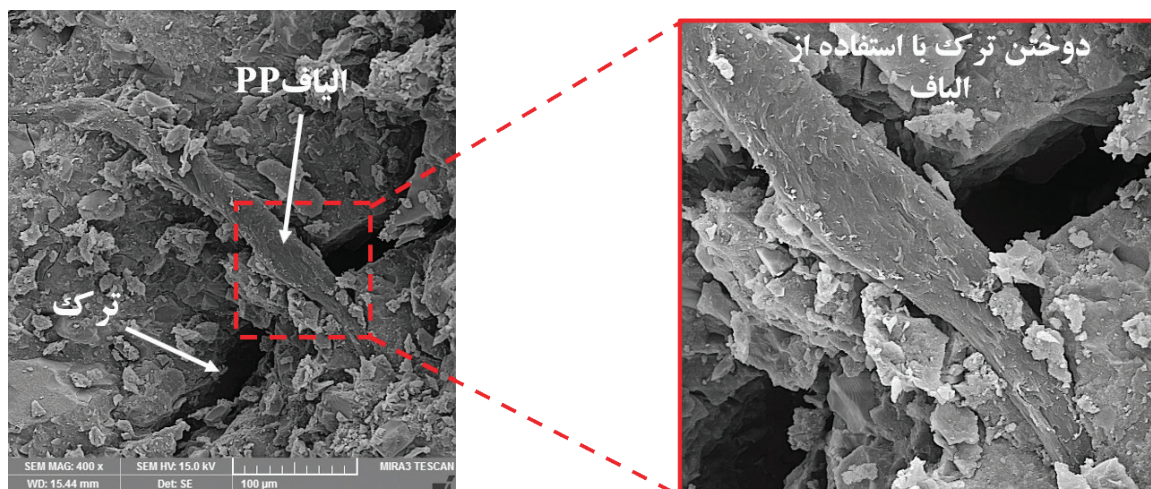
شکل ۱۳- تاثیر الیاف پلی پروپیلن بر مدول گسیختگی



شکل ۱۴- تاثیر الیاف شیشه بر مدول گسیختگی

### ۴,۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

جهت تحلیل ساختار میکروسکوپی، از نمونه بتن قلیافعال سرباره‌ای حاوی ۳٪ الیاف PP تصاویر SEM تهیه شده است. همان‌گونه که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، الیاف PP با پخش شدن مناسب در ماتریس بتن باعث مهار و دوختن ترک‌ها شده و در ناپیوستگی‌ها نقش پل را بازی کرده و مانع از افزایش و رشد آن‌ها می‌شوند که تمام این موارد از تأثیرات مثبت الیاف PP می‌باشد.



شکل ۱۵- تصاویر SEM بیانگر ایفای نقش پل بین ترک‌ها توسط الیاف پلی‌پروپیلن می‌باشد.

### ۴. بررسی و تحلیل نتایج

در این قسمت از پژوهش به بررسی و تحلیل نتایج پرداخته شده است. در این تحقیق برای هر طرح مخلوط آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی دونیم شدگی و مقاومت خمشی چهارنقطه‌ای مورد بررسی قرار گرفته و به‌منظور دقیق‌تر شدن نتایج برای هر نمونه سه تکرار در نظر گرفته شده است.

با توجه به شکل‌های ۵، ۸ و ۱۲ بهترین عملکرد در بین سنگدانه‌های ۰/۷۲، ۰/۷۵ و ۰/۷۸ در مقاومت فشاری، مقاومت کششی دونیم شدگی و مقاومت خمشی به نمونه‌های حاوی ۰/۷۵ سنگدانه اختصاص یافته است. مقادیر مقاومتی بهتر حاصل شده در نمونه‌های حاوی ۰/۷۵ سنگدانه حاکی از تراکم بهتر در این نمونه‌ها می‌باشد. از دلایل این موضوع می‌توان به حجم بیشتر اشغال شده توسط دانه‌ها در نسبت ۰/۷۵ سنگدانه و قرارگیری دانه‌های کوچک‌تر در بین دانه‌های درشت‌تر و در نتیجه کاهش فضای خالی بین دانه‌ها اشاره نمود.

نفوذ مواد هیدراته در نواحی اتصال الیاف شیشه به یکدیگر سبب پر شدن فضای خالی بین رشته‌های الیاف شده و افزایش چسبندگی بین الیاف را به دنبال دارد. پیوستگی بهبودیافته بین الیاف و ماتریس بتن، سبب کاهش بیرون کشیدگی الیاف شده و در نتیجه سبب بروز رفتار ترد در بتن می‌گردد [۳۶]. در تمامی آزمایش‌های انجام گرفته در این پژوهش شاهد شکست ترد در تمامی نمونه‌های حاوی الیاف شیشه بوده‌ایم و هیچ‌گونه شکل‌پذیری در رفتار این نمونه‌ها مشاهده نشده است.

مقایسه نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های الیافی با یکدیگر در شکل‌های ۶ و ۷ آورده شده است. با توجه به نتایج، استفاده از الیاف شیشه سبب کاهش مقاومت فشاری شده، به گونه‌ای که با اضافه شدن ۰/۱۵ درصد حجمی الیاف مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های

فاقد الیاف ۱۰ درصد و با افزودن ۰/۳۰ درصد حجمی الیاف ۱۱ درصد افت نموده است. همان گونه که در شکل ۷ مشاهده شد، افزایش درصد حجمی الیاف از ۰/۱۵ به ۰/۳۰ تفاوت چندانی در مقاومت فشاری ایجاد نکرده است. افزودن الیاف به مخلوط تازه سبب کاهش کارایی و شرایط تراکم سخت تر در مقایسه با مخلوطهای فاقد الیاف می گردد که این شرایط افزایش تخلخل بتن را به دنبال دارد؛ از دیگر دلایل افزایش تخلخل در بتن حاوی الیاف می توان به محبوس شدن هوا در هنگام اضافه نمودن الیاف در زمان اختلاط اشاره نمود. افزایش تخلخل در بتن حاوی الیاف نسبت به نمونه های فاقد الیاف، کاهش میزان چسباننده در بتن را به دنبال دارد که این عامل سبب کاهش مقاومت فشاری در نمونه های حاوی الیاف شیشه می شود.

با توجه به نتایج نمونه های حاوی الیاف پلی پروپیلن، افت مقاومت فشاری هنگام استفاده از الیاف در نمونه ها مشاهده شده است؛ به گونه ای که با اضافه شدن ۰/۱۵ درصد حجمی الیاف مقاومت فشاری نسبت به نمونه های فاقد الیاف ۸ درصد افت کرده است. با اضافه شدن درصد حجمی الیاف نرخ توسعه ترک ها کند شده و از افزایش پهنای ترک جلوگیری به عمل می آید. این موضوع می تواند یکی از دلایل بهبود مقاومت فشاری در نمونه های حاوی ۰/۳۰ و ۰/۴۵ درصد حجمی الیاف باشد.

اثر پل زدن الیاف در بتن های الیافی سبب جلوگیری از توسعه و افزایش پهنای ترک می شود که نتیجه آن بهبود عملکرد بتن در مقاومت کششی دونیم شدگی است. با توجه به شکل ۹ در نمونه های حاوی الیاف PP با افزایش درصد الیاف شاهد افزایش مقاومت کششی در نمونه ها بوده ایم؛ به گونه ای که در نمونه های حاوی ۰/۱۵ درصد حجمی الیاف شاهد ۲ درصد، در نمونه های حاوی ۰/۳۰ درصد حجمی الیاف شاهد ۱۱ درصد و در نمونه های حاوی ۰/۴۵ درصد حجمی الیاف شاهد ۱۳ درصد افزایش مقاومت کششی دونیم شدگی نسبت به نمونه های فاقد الیاف هستیم.

با توجه به شکل ۱۰، افزودن الیاف شیشه سبب کاهش مقاومت کششی شده است؛ به گونه ای که مقاومت کششی در نمونه های حاوی ۰/۱۵ درصد حجمی الیاف ۱۲ درصد و در نمونه های حاوی ۰/۳۰ درصد حجمی الیاف ۱۴ درصد نسبت به نمونه های فاقد الیاف کاهش یافته است. مطابق مطالعات دنیل و شولتز<sup>۱۶</sup>، حمله قلیاها به سطح الیاف شیشه سبب کاهش مقاومت کششی الیاف می گردد [۳۷]. با توجه به pH<sup>۱۷</sup> بالای بتن قلیا فعال سرباره ای تک جزئی، از دلایل کاهش مقاومت کششی دونیم شدگی در نمونه های حاوی الیاف شیشه می توان به این موضوع اشاره نمود.

همان گونه که در شکل ۱۳ مشاهده شده است با استفاده از الیاف PP به میزان ۰/۱۵ درصد حجمی، مدول گسیختگی بتن قلیا فعال سرباره ای ۳۳ درصد افزایش یافته است. با این حال با افزایش مقادیر الیاف به میزان ۰/۳۰ و ۰/۴۵ درصد، تغییر چندانی نسبت به نمونه های حاوی ۰/۱۵ درصد در مدول گسیختگی مشاهده نشده است. از دلایل حصول این نتایج می توان به ایجاد تخلخل بیشتر در بتن به هنگام استفاده از مقادیر بیشتر الیاف و در نتیجه کاهش میزان چسباننده در بتن و همچنین گلوله ای شدن الیاف<sup>۱۸</sup> در نمونه ها اشاره نمود.

مطابق نتایج شکل ۱۴، در هنگام استفاده از الیاف شیشه به میزان ۰/۱۵ و ۰/۳۰ درصد حجمی، مدول گسیختگی بتن قلیا فعال سرباره ای به ترتیب ۱۸ و ۲۲ درصد کاهش یافته است. افزایش تخلخل در اثر افزودن الیاف به بتن و رفتار ترد الیاف شیشه و کاهش مقاومت کششی آن در محیط های قلیایی را می توان از دلایل حصول این نتایج بیان کرد. یکی دیگر از دلایل عملکرد ضعیف بتن حاوی الیاف شیشه را می توان، بالا بودن نسبت جناحی این الیاف دانست که پیش از لغزش، شکست ترد الیاف را به دنبال دارد [۳۸].

<sup>16</sup> Daniel and Schultz

<sup>17</sup> Power of hydrojen

<sup>18</sup> Balling

## ۵. نتیجه‌گیری

- بهترین عملکرد در بهبود مقاومت فشاری، مقاومت کششی دونیم شدگی و مقاومت خمشی به بتن حاوی نسبت ۰/۷۵ سنگدانه اختصاص یافته است. نمونه‌های حاوی ۰/۷۸ سنگدانه عملکرد مقاومتی بهتری نسبت به ۰/۷۲ از خود نشان داده‌اند.
- با توجه به نتایج حاصل شده از این پژوهش می‌توان اذعان داشت که افزودن الیاف شیشه به بتن قلیافعال سرباره‌ای تک جزئی سبب کاهش مقاومت فشاری، مقاومت کششی دونیم‌شدگی و مقاومت خمشی نسبت به نمونه فاقد الیاف می‌گردد. با افزایش مقادیر الیاف کاهش بیشتری در مقادیر مقاومتی مشاهده شده است.
- افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به بتن قلیافعال سرباره‌ای تک جزئی سبب بهبود مقاومت کششی دونیم‌شدگی و خمشی نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف گردیده است.
- شکست ترد در تمامی نمونه‌ها، اعم از حاوی یا فاقد الیاف مشاهده شده است و اضافه نمودن الیاف شیشه، تاثیری در شکل‌پذیری بتن نداشته است.
- بهترین عملکرد را در بهبود مقاومت فشاری، نمونه‌های حاوی ۰/۳۰ درصد حجمی الیاف PP با ۳ درصد افزایش؛ بهترین عملکرد را در بهبود مقاومت کششی دونیم‌شدگی، نمونه‌های حاوی ۰/۴۵ درصد حجمی الیاف PP با ۱۳ درصد افزایش و در انتها بهترین عملکرد در بهبود مقاومت خمشی مربوط به نمونه‌های حاوی ۰/۴۵ درصد حجمی الیاف PP با ۳۳ درصد افزایش نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف می‌باشد.
- همان‌گونه که در تصاویر SEM مشاهده شده است، الیاف PP با پخش شدن مناسب در ماتریس بتن باعث مهار و دوختن ترک‌ها شده و در ناپیوستگی‌ها نقش پل را بازی کرده و مانع از افزایش و رشد آن‌ها می‌شود.

## ۶. قدردانی

در انتها لازم است از سرپرست، جناب آقای دکتر علیرضا باقری، پرسنل آزمایشگاه‌های تکنولوژی بتن و مصالح ساختمانی و آزمایشگاه سازه دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، که امکان استفاده از تجهیزات آزمایشگاه را فراهم نمودند تشکر و قدردانی نمایم.

## مراجع

- [1] Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., van Deventer, J.S.J. (2007). "The role of inorganic polymer technology in the development of green concrete". *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, 1590-1597.
- [2] Provis, J.L., Van Deventer, J.S.J. (2009). "Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications", Elsevier.
- [3] Rostami, M., Behfarnia, K. (2017). "The effect of silica fume on durability of alkali activated slag concrete". *Construction and Building Materials*, Vol. 134, 262-268.
- [4] Behfarnia, K., Rostami, M. (2017). "An assessment on parameters affecting the carbonation of alkali-activated slag concrete". *Journal of Cleaner Production*, Vol. 157, 1-9.
- [5] Türkmen, İ., Karakoç, M.B., Kantarcı, F., Maraş, M.M., Demirboğa, R. (2016). "Fire resistance of geopolymer concrete produced from Elazığ ferrochrome slag". *Fire and Materials*, Vol. 40, 836-847.
- [6] Bernal, S., De Gutierrez, R., Delvaşto, S., Rodriguez, E. (2010). "Performance of an alkali-activated slag concrete reinforced with steel fibers". *Construction and Building Materials*, Vol. 24, 208-214.

- [7] Ding, Y., Dai, J-G., Shi, C-J. (2016). "Mechanical properties of alkali-activated concrete: A state-of-the-art review". *Construction and Building Materials*, Vol. 127, 68–79.
- [8] Shi, C., Krivenko, P V., Roy, D. (2006). "Alkali-Activated Cements and Concretes". CRC Press.
- [9] Herrmann, A., Koenig, A., Dehn, F. (2018). "Structural concrete based on alkali-activated binders: Terminology, reaction mechanisms, mix designs and performance". *Structural Concrete*, Vol. 19, 918–929.
- [10] Provis, J.L. (2018). "Alkali-activated materials". *Cement and Concrete Research*, Vol. 114, 40–48.
- [11] Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniem, i J., Kinnunen, P., Illikainen, M. (2018). "One-part alkali-activated materials: A review". *Cement and Concrete Research*, Vol. 103, 21–34.
- [12] Palacios, M., Puertas, F. (2005). "Effect of superplasticizer and shrinkage-reducing admixtures on alkali-activated slag pastes and mortars". *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, 1358–1367.
- [13] Palacios, M., Puertas, F. (2007). "Effect of shrinkage-reducing admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars and pastes". *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, 691–702.
- [14] Aydın, S., Baradan, B. (2013). "The effect of fiber properties on high performance alkali-activated slag/silica fume mortars". *Composites Part B: Engineering*, Vol. 45, 63–9.
- [15] Duran Atiş, C., Bilim, C., Çelik, Ö., Karahan, O. (2009). "Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar". *Construction and Building Materials*, Vol. 23, 548–555.
- [16] Puertas, F., Amat, T., Fernández-Jiménez, A., Vázquez, T. (2003). "Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres". *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, 2031–2036.
- [17] Vilaplana, J.L., Baeza, F.J., Galao, O., Alcocel, E.G., Zornoza, E., Garcés, P. (2016). "Mechanical properties of alkali activated blast furnace slag pastes reinforced with carbon fibers". *Construction and Building Materials*, Vol. 116, 63–71.
- [18] Natali, A., Manzi, S., Bignozzi, M.C. (2011). "Novel fiber-reinforced composite materials based on sustainable geopolymer matrix". *Procedia Engineering*, Vol. 21, 1124–1131.
- [19] Thomas, R.J., Peethamparan, S. (2015). "Alkali-activated concrete: Engineering properties and stress-strain behavior". *Construction and Building Materials*, Vol. 93, 49–56.
- [20] El-Hassan, H., Elkholy, S. (2021). "Enhancing the performance of Alkali-Activated Slag-Fly ash blended concrete through hybrid steel fiber reinforcement". *Construction and Building Materials*, Vol. 311, 125313.
- [21] Hammad, N., ElNemr, A.M., Hassan, H.E-D. (2022). "Flexural performance of reinforced Alkali-activated concrete beams incorporating steel and structural Macro synthetic polypropylene fiber". *Construction and Building Materials*, Vol. 324, 126634.
- [22] Abdollahnejad, Z., Mas'ali, M., Woof, B., Illikainen, M. (2020). "High strength fiber reinforced one-part alkali activated slag/fly ash binders with ceramic aggregates: Microscopic analysis, mechanical properties, drying shrinkage, and freeze-thaw resistance". *Construction and Building Materials*, Vol. 241, 118129.
- [23] Kuranlı, Ö.F., Uysal, M., Abbas, M.T., Cosgun, T., Niş, A., Aygörmez, Y., et al. (2022). "Evaluation of slag/fly ash based geopolymer concrete with steel, polypropylene and polyamide fibers". *Construction and Building Materials*, Vol. 325, 126747.
- [24] Moradikhoh, A.B., Esparham, A., Jamshidi Avanaki, M. (2020). "Physical & mechanical properties of fiber reinforced metakaolin-based geopolymer concrete". *Construction and Building Materials*, Vol. 251, 118965.
- [25] Noushini, A., Hastings, M., Castel, A., Aslani, F. (2018). "Mechanical and flexural performance of synthetic fibre reinforced geopolymer concrete". *Construction and Building Materials*, Vol. 186, 454–475.
- [26] Islam, A., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z., Ghazali, N.B., Yusoff, S., Bashar, H. (2017). "Influence of steel fibers

on the mechanical properties and impact resistance of lightweight geopolymer concrete”. *Construction and Building Materials*, Vol. 152, 964–977.

[27] Charkhtab Moghaddam, S., Madandoust, R., Jamshidi, M., Nikbin, IM. (2021). “Mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with crumb rubber and steel fiber under ambient and sulfuric acid conditions”. *Construction and Building Materials*, Vol. 281, 122571.

[28] Amran, M., Fediuk, R., Abdelgader, HS., Murali, G., Ozbakkaloglu, T., Lee, YH., et al. (2022). “Fiber-reinforced alkali-activated concrete: A review”. *Journal of Building Engineering*, Vol. 45, 103638.

[29] Zhou, X., Zeng, Y., Chen, P., Jiao, Z., Zheng, W. (2021). “Mechanical properties of basalt and polypropylene fibre-reinforced alkali-activated slag concrete”. *Construction and Building Materials*, Vol. 269, 121284.

[30] ASTM C33/C33M-18. (2018). “Standard Specification for Concrete Aggregates”. *American Society for Testing and Materials*.

[31] ASTM C128-22. (2022). “Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate”. *American Society for Testing and Materials*.

[32] ASTM C127-15. (2015). “Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate”. *American Society for Testing and Materials*.

[33] BS EN 12390-3. (2019). “Testing hardened concrete, Part 3: Compressive strength of test specimens”. *BRITISH STANDARD*.

[34] ASTM C496/C496M-17. (2017). “Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens”. *American Society for Testing and Materials*.

[35] ASTM C78/C78M-22. (2022). “Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)”. *American Society for Testing and Materials*.

[36] Bentur, A. (1985). “Mechanism of Potential Embrittlement and Strength Loss of Glass Fiber Reinforced Cement Composites”. editor: Diamond, S. *Proceedings-Durability of Glass Fiber Reinforced Concrete Symposium, Chicago, Illinois, Prestressed Concrete Institute*, 109–123.

[37] Daniel, JI., Schultz, DM. (1985). “Durability of Glass Fiber Reinforced Concrete System”. editor: Diamond, S. *Proceedings-Durability of Glass Fiber Reinforced Concrete Symposium, Chicago, Illinois, Prestressed Concrete Institute*, 174–198.

[38] Noushini, A., Hastings, M., Castel, A., Aslani, F. (2018). “Mechanical and flexural performance of synthetic fibre reinforced geopolymer concrete”. *Construction and Building Materials*, Vol. 186, 454-457.