

A. A. Zamani

Department of Engineering,
Lorestan University,
Khorramabad, Iran.

e-mail:
z_amirarsalan@yahoo.com

M. Ahmadi

Department of Civil
Engineering, Ayatollah
Boroujerdi University,
Boroujerd, Iran.

e-mail:
masoud.ahmadi@abru.ac.ir

A. Dalvand*

Department of Engineering,
Lorestan University,
Khorramabad, Iran.

e-mail: dalvand.a@lu.ac.ir

Material Properties of High-Strength Self-Compacting Concrete Made With Fully Recycled Aggregate: An Experimental Study

In this study, the effect of single and hybrid fibers on mechanical properties and impact behavior of high-strength self-compacting concrete containing fully recycled aggregate has been investigated in three parts: mechanical properties, impact behavior, and durability properties. The used fibers are steel and polyvinyl alcohol fibers, which were added to the plain mixture. The various mix compositions were made to consider the effect of different fiber combinations, contents, and types. The sustainable high-strength concrete used in this study was composed of fully recycled fine aggregate, different contents of steel and polyvinyl alcohol fibers, and constant content of fly ash as a partial cement replacement. The properties of prepared concrete were determined using the water absorption, the ultrasonic pulse velocity, the repeated drop weight impact, the splitting tensile strength, the compressive strength, and the flexural strength tests. The results show that by adding fibers to concrete made of fully recycled aggregate, the mechanical properties are improved, and this effect is significantly dependent on the type, the percentage, and the selected form (single or blended) of fibers. On the other hand, by adding fibers to the control mixture, the adsorption capacity and energy dissipation of the samples tested in the drop weight test have been significantly increased.

Keywords: Waste Granite, Self-Compacting Concrete, Mechanical Properties, Steel Fiber, PVA.

* Corresponding author

بررسی آزمایشگاهی خصوصیات بتن خودتراکم الیافی مقاومت بالا ساخته شده از سنگدانه کاملاً بازیافتی

در این مطالعه، اثر استفاده منفرد و ترکیبی الیاف‌های پلی وینیل الکل و فولادی بر خصوصیات بتن خودتراکم الیافی مقاومت بالا ساخته شده از سنگدانه کاملاً بازیافتی در سه بخش خصوصیات مکانیکی، رفتار در برابر بارهای ضربه‌ای و خصوصیات دوام، مورد بررسی قرار گرفته است. برای ایجاد یک مطالعه جامع، از طرح‌های اختلاط متنوع استفاده شده است. بتن سازگار با محیط‌زیست مورد استفاده در این مطالعه، از ریزدانه بازیافتی گرانیتی، الیاف پلی‌وینیل الکل و فولادی با درصد‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد و نسبت ثابتی از خاکستر بادی کلاس F به عنوان جایگزینی از سیمان ساخته شده است. آزمایش‌های آلتراسونیک، ضربه (سقوط وزنه)، جذب آب، مقاومت کششی، مقاومت فشاری و رفتار خمشی برای ارزیابی خصوصیات بتن ساخته شده در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که با اضافه نمودن الیاف به بتن ساخته شده با مصالح ریزدانه کاملاً بازیافتی، خصوصیات مکانیکی بهبود یافته و این اثر به میزان محسوسی وابسته به نوع الیاف، درصد مورد استفاده و منفرد یا ترکیبی بودن الیافها است. از سوی دیگر با اضافه نمودن الیاف به طرح اختلاط پایه، ظرفیت جذب و اتلاف انرژی نمونه‌های مورد آزمایش در تست سقوط وزنه افزایش قابل‌ملاحظه‌ای داشته است.

واژگان کلیدی: سنگدانه بازیافتی، بتن خودتراکم، مقاومت در برابر ضربه، خصوصیات مکانیکی، الیاف فولادی، الیاف پلی وینیل الکل.

امیر ارسلان زمانی

کارشناس ارشد مهندسی عمران،
دانشگاه لرستان.

پست الکترونیک:

z_amirarsalan@yahoo.com

مسعود احمدی

استادیار، دانشکده فنی و
مهندسی، دانشگاه آیت‌ا...
بروجردی، بروجرد.

پست الکترونیک:

masoud.ahmadi@abru.ac.ir

احمد دالوند*

استادیار، دانشکده مهندسی،
دانشگاه لرستان.

پست الکترونیک:

dalvand.a@lu.ac.ir

۱- مقدمه

بیش از ۱۲۰ میلیون تن است [۴]. در حالی که مقادیر وسیعی از این مواد زائد هنوز برای هیچ محصولی مورد استفاده قرار نگرفته است [۳]. صنایع سنگی به طور مداوم مقادیر زیادی زباله جامد تولید می‌کنند که علاوه بر اینکه فضای قابل توجهی از زمین‌های اطراف کارخانه‌ها را اشغال می‌کنند، باعث آلودگی محیط‌زیست نیز می‌شوند [۵]. بررسی مقالات نشان می‌دهد که تولید سنگ تزئینی در سال ۲۰۱۵، بیش از ۸۰ میلیون تن بوده است و باید متذکر شد که تولید زباله جامد حاصل از مراحل استخراج، برش و جلای سنگ، بیش از ۷۰٪ میزان کل آن بوده است [۶]. استفاده مجدد از مواد زائد در صنعت نه تنها آلودگی موجود در محیط‌زیست را کاهش می‌دهد، بلکه از

به دلیل رشد جمعیت و توسعه صنایع، افزایش میزان تولید مواد زائد به یکی از اصلی‌ترین نگرانی‌های زیست‌محیطی تبدیل شده است [۱ و ۲]. برای مثال، به دلیل فعالیت‌های معدن‌کاری و صنعت ساخت‌وساز در اتحادیه اروپا، سالانه بیش از یک‌ونیم تریلیون تن مواد زائد تولید می‌شود [۳]. بررسی دقیق داده‌های آماری در سال ۲۰۱۲ نشان داده است که تولید جهانی سنگ‌های تزئینی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۰۲/۲۴، بازنگری ۱۴۰۰/۰۳/۰۳، پذیرش ۱۴۰۰/۰۳/۰۳.
DOI: 10.22091/cer.2021.6955.1251 شناسه دیجیتال

مناسب در برابر ضربه، به‌طور گسترده در اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است [۱۸-۲۰]. بررسی مقالات نشان داد که مزایای بالقوه استفاده از ضایعات گرانیت برای بهبود مشخصات مکانیکی و دوام، به ندرت گزارش شده است [۲۱-۲۳]. سادک^۴ و همکاران نسبت‌های جایگزینی مختلف پودر ضایعات (به عنوان مواد افزودنی معدنی) با سیمان مصرفی را مورد بررسی قرار دادند. آنها اظهار داشتند که جایگزینی نسبی پودر تا ۵۰٪ وزن سیمان، باعث بهبود ویژگی‌های مواد SCC در مقایسه با طرح اختلاط مرجع با همان مقدار سیمان می‌شود [۲۳]. جین^۵ و همکاران مصالح سیمانی را با جایگزینی درصدهای مختلف ضایعات گرانیتی به عنوان مصالح درشت‌دانه و جایگزینی خاکستر بادی با سیمان مصرفی ساختند. آنها گزارش نمودند که استفاده از ضایعات گرانیتی دارای اثر منفی بر وزن مخصوص خشک و خصوصیات بتن تازه است. همچنین ظرفیت خمشی نمونه‌ها تا نسبت جایگزینی گرانیت، ۴۰٪ افزایش یافته است [۲۱]. به‌طور مشخص اکثر مطالعات، جایگزینی جزئی ضایعات صنعت سنگ با مصالح ریزدانه در SCC را برای توسعه پایدار مورد توجه قرار داده‌اند. هدف اصلی مطالعه حاضر، بررسی خصوصیات مکانیکی و ضربه بتن خودتراکم الیافی مقاومت بالا حاوی ۱۰۰ درصد ریزدانه بازیافتی است. در این زمینه، یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی مشخصات مکانیکی این کامپوزیت‌های سیمانی خودتراکم و مقاومت بالا با در نظر گرفتن طرح‌های اختلاط متنوع انجام شده است. SCC‌های سازگار با محیط‌زیست از مصالح ریزدانه کاملاً بازیافتی، درصدهای مختلف الیاف پلی‌وینیل الکل (PVA) و الیاف فولادی دوسر قلاب و خاکستر بادی کلاس F، تولید می‌شوند. سپس خصوصیات دوام و مشخصات مکانیکی بتن تولید شده با نمونه مرجع مورد مقایسه قرار گرفته است.

مصرف منابع طبیعی و هزینه‌های دفع مواد زائد نیز می‌کاهد [۷ و ۸].

از سوی دیگر، افزایش استفاده از مصالح بتنی در بخش صنعت ساختمان، به دلیل استفاده قابل توجه از مصالح موجود در طبیعت برای تولید بتن، باعث افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی شده است [۹]. به منظور کاهش اثرات مضر مواد زائد صنعتی و کمبود بالقوه منابع طبیعی، تولید بتن با مواد زائد تولید شده در صنعت به عنوان راه‌حلی مناسب برای کاهش خطرات زیست‌محیطی در نظر گرفته می‌شود که مشخصه‌های مکانیکی و دوام بتن را نیز بهبود می‌بخشد [۱۰-۱۴]. بنسی^۱ و همکاران، چشم‌اندازهای استفاده از سرباره کوره بلند و ضایعات سنگ کارخانجات سنگبری در بتن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این مصالح به‌جای مصالح درشت‌دانه در بتن، مشخصه‌های دوام نمونه را افزایش می‌دهد [۱۰]. برخی محققان، افزودن ضایعات گرد گرانیت به بتن را مورد توجه قرار داده‌اند [۱۴ و ۱۵]. مطالعات زفر^۲ و همکاران نشان داد که نسبت جایگزینی ۲۰٪ مصالح ریزدانه با ضایعات گرد گرانیت باعث افزایش حداکثری مقاومت فشاری می‌شود [۱۵]. سوادکوهی و رئیس با بررسی نسبت‌های جایگزینی مختلف مصالح ریزدانه با ضایعات صنعت سنگ گرانیت گزارش نمودند که تا نسبت جایگزینی ۳۰٪ مصالح ریزدانه، مشخصات مکانیکی بتن پودری واکنش‌پذیر در مقایسه با طرح اختلاط مرجع، بهبود می‌یابد [۱۴].

بتن خود تراکم (SCC^۳) برای اولین بار در سال ۱۹۸۸ برای به‌دست آوردن یک ساختار بتن با دوام ساخته شد که بررسی‌های اولیه بر روی SCC در دانشگاه توکیو انجام شده است [۱۶ و ۱۷]. در سال‌های اخیر، SCC با عملکرد بالا به دلیل مقاومت خمشی بالا، نسبت بالای مقاومت به وزن، مقاومت فشاری بالا و مقاومت

^۴- Sadek

^۵- Jain

^۱- Binici

^۲- Zafar

^۳- Self-Compacting Concrete

۲- روند آزمایش

است که سیلیکات‌ها و آلومینات‌ها محتوی غالب آن هستند.

۲-۱- مصالح مورد استفاده

برای کاهش نسبت آب به سیمان و تسهیل کارایی مورد نیاز، فوق روان کننده بر پایه کربوکسیل به طرح‌های اختلاط اضافه شده است. در این مطالعه، حداکثر اندازه ۲/۳۶ میلی‌متر برای ریزدانه‌های بازیافتی از جنس گرانیت در نظر گرفته شده و از ضایعات برش سنگ برای بازیافت استفاده شده است. برای بدست آوردن مواد ریزدانه و خرد کردن تکه‌های گرانیتی، از یک سنگ‌شکن فکی و ماشین لس‌آنجلس استفاده شده است. ترکیب شیمیایی مصالح ریزدانه بازیافتی با استفاده از تجزیه و تحلیل پراش اشعه ایکس تعیین و نتایج در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج نشان داد که ضایعات سنگ‌های گرانیتی حاوی کانی‌های آلیت، کوارتز و موسکویت است.

برای بهبود خواص بتن سخت شده، الیاف‌های فولادی و پلی‌وینیل‌الکل (PVA) با مقادیر و ترکیبات مختلف در مخلوط‌ها استفاده شدند. مشخصات مکانیکی الیاف‌های PVA و فولادی در جدول ۲ ارائه شده است.

طرح‌های اختلاط تست شده در این مطالعه، حاوی سیمان پورتلند، ریزدانه بازیافتی از جنس گرانیت، آب، خاکستر بادی کلاس F و فوق روان کننده کربوکسیلاتی می‌باشند. در جدول ۱، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سیمان و خاکستر بادی ارائه شده است. لازم به ذکر است استفاده از خاکستر بادی برای کارایی SCC مناسب است. همچنین مصرف سیمان را کاهش می‌دهد و برای کاهش چقرمگی شکست ماتریس توصیه می‌شود [۲۲].

نتایج بررسی نویسندگان نشان می‌دهد که مجموع مقادیر اکسید آلومینیوم، اکسید آهن و اکسید سیلیکون بیش از ۷۰ است و بیش از حد مشخص شده در ASTM C618 می‌باشد [۲۴]. علاوه بر این، محدوده مقادیر تری‌اکسید سولفور (کمتر از ۵)، افت حرارتی (کمتر از ۶) و محتوای رطوبت (کمتر از ۳) بررسی شده است. همچنین، مشخصات شیمیایی خاکستر بادی نشان داده

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و ترکیب شیمیایی سیمان، خاکستر بادی و ریزدانه گرانیتی

ترکیبات	سیمان	خاکستر بادی	ریزدانه گرانیتی
SiO ₂	۲۱/۲	۷۲/۳	۶۷/۲۵
Fe ₂ O ₃	۳/۸۸	۱/۲۰	۲/۸۸
MgO	۱/۵۶	۰/۱۸	۱/۱۲
Al ₂ O ₃	۴/۳۷	۲۴/۷	۱۳/۵۲
Na ₂ O	۰/۳۹	۰/۱	۳/۸۹
K ₂ O	۰/۵۲	۰/۵۳	۳/۰۷
CaO	۶۳/۱	۰/۱۳	۴/۳۷
SO ₃	-	۰/۰۵	-
C ₃ S	۵۱	-	-
C ₂ S	۲۲/۷۲	-	-
C ₃ A	۵/۱۲	-	-
C ₄ AF	۱۲/۰۵	-	-
وزن مخصوص	۳/۱۱	۲/۳۰	۲/۶۱
سطح ویژه (cm ² /g)	۳۰۰۰	۳۴۳۰	-

جدول ۲- مشخصات الیاف‌های فولادی و PVA

نوع	طول (mm)	قطر (mm)	تنش کششی (MPa)	مدول الاستیک (GPa)	چگالی (kg/m ³)
فولاد	۵۰	۰/۸	۱۱۰۰	۲۰۰	۷۸۵۰
PVA	۱۲	۰/۰۴	۱۶۰۰	۳۲/۶	۱۲۹۰

۲-۲- طرح‌های اختلاط

۲۶]. جزییات طرح‌های اختلاط مورد استفاده در جدول ۳

ارائه شده است. همچنین جزییات نسبت‌های مخلوط، مطابق تجربه پیشین نویسندگان توصیه شده است.

طرح اختلاط‌های خودمتراکم این مطالعه، بر مبنای

مقاومت فشاری هدف، بیش از ۵۰ مگاپاسکال و حداقل قطر جریان اسلامپ ۶۰۰ میلی‌متر طراحی شده اند [۲۵ و

جدول ۳- مشخصات طرح‌های اختلاط (kg/m^3)

شماره	ID مخلوط	سیمان (kg)	خاکستر بادی (kg)	ریزدانه گرانیتی (kg)	الیاف (%)		آب (kg)	فوق روان کننده (kg)
					PVA	فولاد		
۱	مرجع	-	-	-	۰/۰۰	۰/۰۰	-	-
۲	S0.5	-	-	-	۰/۰۰	۰/۵۰	-	-
۳	S1.0	-	-	-	۰/۰۰	۱/۰۰	-	-
۴	S1.5	-	-	-	۰/۰۰	۱/۵۰	-	-
۵	S2.0	-	-	-	۰/۰۰	۲/۰۰	-	-
۶	P0.5	-	-	-	۰/۵۰	۰/۰۰	-	-
۷	P1.0	۸۴۰	۲۱۰	۱۳۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۳۴۷	۳/۸
۸	P1.5	-	-	-	۱/۵۰	۰/۰۰	-	-
۹	P2.0	-	-	-	۲/۰۰	۰/۰۰	-	-
۱۰	S0.25P0.25	-	-	-	۰/۲۵	۰/۲۵	-	-
۱۱	S0.5P0.5	-	-	-	۰/۵۰	۰/۵۰	-	-
۱۲	S0.75P0.75	-	-	-	۰/۷۵	۰/۷۵	-	-
۱۳	S1.0P1.0	-	-	-	۱/۰۰	۱/۰۰	-	-

سطح خشک اشباع (SSD^6) نگه داشته شده‌اند. در مخلوط‌های دارای یک نوع مشخص الیاف، درصد حجمی الیاف‌های فولادی و PVA از صفر تا ۰،۱/۵، ۱/۵ و ۲ درصد متغیر هستند. از سوی دیگر، در حالت استفاده از الیاف‌های ترکیبی، مجموع درصد‌های حجمی الیاف‌های فولادی و PVA برابر با ۰،۱/۵، ۱ و ۲ درصد می‌باشند. قابل ذکر است که در طرح‌های با الیاف ترکیبی، درصد الیاف‌های فولادی و PVA، برابر در نظر گرفته شده است. برای اختلاط و ایجاد بتن تازه، ابتدا اجزای خشک حاوی سیمان، خاکستر بادی و ریزدانه‌های گرانیتی در یک مخلوط‌کن، ترکیب و به مدت ۳ دقیقه مخلوط شدند. سپس نصف آب و فوق روان کننده اضافه شده و

ترکیبات مختلف الیاف‌های فولادی و PVA برای مشخص کردن اثر آنها بر خصوصیات بتن‌های دوست‌دار محیط‌زیست و مقاومت بالای حاوی مصالح ریزدانه کاملاً بازیافتی، مورد استفاده قرار گرفته است. در این مطالعه، میزان سیمان، خاکستر بادی، ریزدانه بازیافتی و نسبت آب ثابت نگه داشته شده، در حالی که درصد حجمی و نوع الیاف در طرح‌های اختلاط متغیر هستند. در کل، چهار نوع طرح اختلاط در نظر گرفته شده است. گروه اول، مخلوط مرجع حاوی سیمان پرتلند، خاکستر بادی و مصالح ریزدانه بازیافتی است. گروه‌های دوم، سوم و چهارم، طرح‌های حاوی الیاف فولادی منفرد، الیاف PVA منفرد و الیاف ترکیبی می‌باشند. برای همه طرح‌ها، قبل از مخلوط کردن بتن، سنگدانه‌های گرانیتی در وضعیت

⁶- Saturated Surface Dry

دستگاه تست فشاری به ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن مورد استفاده قرار گرفته است. مقادیر گزارش شده، میانگین سه نمونه تکراری هستند و برای محاسبه مقاومت کششی از معادله (۱) استفاده شده است:

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

که P نشان دهنده نیروی حداکثر به نیوتن، L طول نمونه استوانه‌ای (برابر ۲۰۰ میلیمتر) و D قطر نمونه استوانه‌ای (برابر ۱۰۰ میلیمتر) است.

۳-۳- رفتار خمشی

نمونه‌های منشوری (۳۲۰×۶۰×۸۰ میلیمترمکعب) برای هر مخلوط ساخته شده تا مقاومت خمشی تیرها براساس استاندارد ASTM C293 تعیین شود [۲۹]. در این آزمایش، یک لودسل به ظرفیت ۵۰ کیلونیوتن برای اندازه‌گیری بار در تیرهای منشوری استفاده شده و همه نمونه‌ها تحت بارگذاری یکنواخت به صورت حالت کنترل شده جابه‌جایی، قرار گرفته‌اند. مقاومت‌های خمشی نمونه‌ها به کمک معادله (۲) تعیین می‌شود:

$$f_r = \frac{1.5PL}{bd^2} \quad (2)$$

که P نشان دهنده نیروی حداکثر، d و b به ترتیب ارتفاع و عرض نمونه و L نشان دهنده طول نمونه است. مقادیر گزارش شده از میانگین نتایج برای سه تست تکرار شده به دست آمده است.

۳-۴- آزمایش UPV

برای بررسی اثرات حفرات هوا و الیافها بر یکپارچگی و کیفیت نمونه‌ها، آزمایش UPV انجام گرفته است. ابعاد نمونه مکعبی ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلیمتر است و تست مطابق ASTM C597 انجام شده است [۳۰]. اندازه‌گیری‌ها در سه نمونه که دارای سن ۲۸ روز هستند تکرار شده و میانگین نتایج سه نمونه، سرعت پالس در هر مخلوط را به دست می‌دهد. روش انتقال مستقیم برای

مخلوط‌کن به مدت ۲ دقیقه آنها را مخلوط کرد. سپس، آب باقیمانده، اضافه و ۲ دقیقه اختلاط ادامه یافته است. پس از اینکه مخلوط به روانی مناسب رسید، الیافها به آرامی به مخلوط‌کن اضافه شدند. پس از ورود الیافها، نرخ چرخش مخلوط‌کن افزایش یافت تا مخلوط یکنواخت شود. همچنین فرآیند مخلوط کردن نهایی، ۳ دقیقه بیشتر انجام شده است.

۳- آزمایش‌ها

برای بررسی اثر ریزدانه گرانیتهی و الیافها، آزمایش‌های سرعت پالس آلتراسونیک (UPV^y)، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، خمش سه نقطه‌ای، ضربه (سقوط وزنه) و جذب آب انجام شده است.

۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

برای تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها، ۳۹ نمونه مکعبی با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلیمترمکعب مطابق دستورالعمل‌های ASTM C39، قالب‌گیری، عمل‌آوری و تست شده است [۲۷]. تست فشار بر روی نمونه‌ها توسط یک دستگاه تست یونیورسال به ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن و تحت شرایط کنترل جابه‌جایی انجام شده است. همچنین نرخ بارگذاری تک محوره ۰/۳ مگاپاسکال بر ثانیه در نظر گرفته شده است. مقادیر ارائه شده برای مقاومت فشاری در بخش نتایج میانگینی از سه نمونه مکعبی در هر طرح اختلاط می‌باشند.

۳-۲- آزمایش مقاومت کششی

در این مطالعه برای محاسبه مقاومت کششی همه ترکیبات اختلاط، ۳۹ نمونه استوانه‌ای (قطر ۱۰۰ میلیمتر و طول ۲۰۰ میلیمتر) مطابق ASTM C496، قالب‌ریزی، عمل‌آوری و مورد بررسی قرار گرفته است [۲۸]. همچنین برای به دست آوردن مقاومت کششی، یک

⁷- Ultrasonic Pulse Velocity

آزمایش قرار گرفته‌اند [۳۲]. همچنین، برای به دست آوردن داده‌های مناسب از تست ضربه، هشت نمونه برای هر طرح اختلاط آزمایش شده است. در این آزمایش، یک گوی توپر (۴/۴۵ کیلوگرم) از ارتفاع مشخصی رها می‌شود و بر سطح مرکزی نمونه دیسکی برخورد می‌کند. برای محاسبه انرژی جذب شده نمونه‌ها، معادله (۵) مورد استفاده قرار گرفته است:

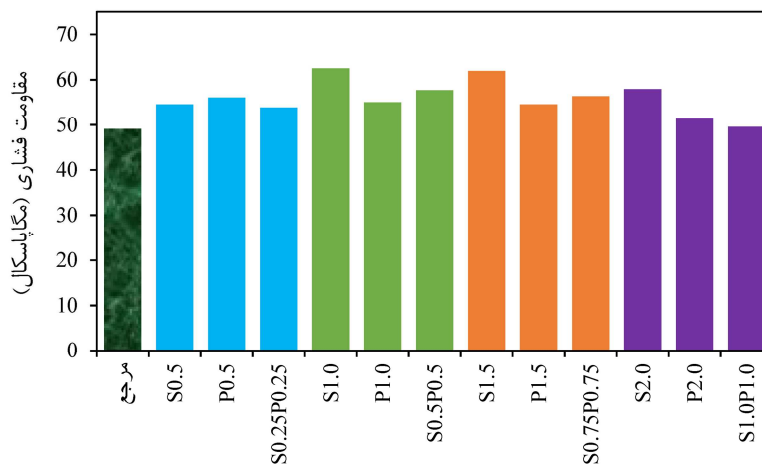
$$\text{Energy} = E = NB \times M \times h \times g \quad (5)$$

که h ، g و M به ترتیب نشان‌دهنده تعداد ضربه‌ها، ارتفاع سقوط، ثابت شتاب گرانشی و جرم گلوله توپر است.

۴- نتایج آزمایشگاهی

۴-۱- مقاومت فشاری

در شکل ۱، نتایج مقاومت فشاری همه نمونه‌ها ارائه شده است. بررسی مقالات در رابطه با استفاده از الیاف و اثر آن بر رفتار فشاری نشان داده است که افزودن الیاف می‌تواند ظرفیت فشاری نمونه‌های الیافی را افزایش یا کاهش دهد [۳۳-۳۶]. همچنین، انتظار می‌رود که افزودن حجم بالاتر الیاف، باعث افزایش منافذ خالی در مخلوط شده و از سوی دیگر، کمک می‌کند ترک‌ها به آرامی گسترش یابند.



شکل ۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

تعیین سرعت پالس مورد استفاده قرار گرفته است. سرعت پالس (V) را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$V = L/t \quad (3)$$

که L و t ، به ترتیب فاصله بین مبدل‌ها و زمان انتقال موج را نشان می‌دهند.

۳-۵- آزمایش جذب آب

تست جذب آب نمونه‌ها براساس استاندارد BS1015-18 انجام شده است [۳۱]. این تست بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد $50 \times 50 \times 50$ میلی‌متر مکعب و در سن ۲۸ روز انجام گرفته است. همه نمونه‌ها در یک کوره در دمای 105 درجه سانتی‌گراد تا زمانی که به وزن ثابت برسند (W خشک)، قرار داده شدند. پس از آن، نمونه‌ها برای ۲۴ ساعت در آب غوطه‌ور گردیدند. سپس، نمونه‌ها برای تعیین وزن اشباع شده آنها وزن شدند (W اشباع). در نهایت، جذب آب نمونه‌ها توسط رابطه زیر محاسبه گردید:

$$W_A = 100 \times \frac{W_{\text{sat}} - W_{\text{dry}}}{W_{\text{dry}}} \quad (4)$$

۳-۶- آزمایش ضربه

برای انجام تست ضربه بر روی نمونه‌ها، 104 نمونه دیسکی به قطر 105 و ارتفاع 65 میلی‌متر ساخته شده و مطابق دستورالعمل پیشنهادی در کمیته ACI 544 مورد

با لغزش، افزایش می‌یابد. بنابراین، انتقال بار در سطح مشترک توسط پیوند فیزیکی شیمیایی و سپس توسط اصطکاک در آن سطح انجام می‌شود. بخش غیرخطی منحنی در قبل از اوج (AB)، با شکل‌گیری ریزترک‌ها در منطقه انتقالی (ITZ) و آغاز فرآیند جداسازی در ارتباط است. پس از نقطه B، نیروی بیرون‌کشیدگی با افزایش لغزش، کاهش می‌یابد و گسیختگی کامل در نقطه C رخ خواهد داد. سپس بیرون‌کشیدگی الیاف احتمالاً زمانی رخ می‌دهد که تنش کششی بالاتر از مقاومت اصطکاکی آن باشد. همانطور که از شکل ۲-۲ ب قابل مشاهده است، منحنی بار لغزش الیاف فولادی دارای شکل متفاوتی از الیاف صاف است. دو بخش اولیه شاخه قبل از اوج (OA) و OB)، مشابه الیاف مستقیم با گسیختگی در امتداد سطح مشترک الیاف- ماتریس، ایجاد شده‌اند. تغییر شکل پلاستیک قلاب، قفل و بست مکانیکی، مکانیسم‌های اضافی الیاف فولادی در مقایسه با الیاف PVA هستند. قلاب الیاف فولادی، ایجادکننده یک سهم اضافی (بخش BC در شکل ۲-۲) برای مقاومت در برابر نیروی بیرون‌کشیدگی است. انحنای الیاف پس از نقطه اوج منحنی به طور تدریجی شروع به تغییر کرده و از این‌رو، نیروی بیرون‌کشیدگی شروع به کم شدن خواهد کرد (بخش CD). پس از آن به دلیل صاف شدن گوشه آخر، افزایش جزئی در نیروی بیرون‌کشیدگی رخ می‌دهد (انحنای ۲) [۴۱].

۴-۲- مقاومت کششی

در شکل ۳، تأثیر نوع و درصد الیاف‌ها بر عملکرد کششی ارائه شده است. به دلیل اثر پل‌زدگی^۸ در صفحه ترک ماتریس، مقاومت کششی نمونه تقویت شده در مقایسه با طرح مرجع، بهبود می‌یابد. می‌توان نتیجه گرفت که افزایش درصد الیاف، ظرفیت کششی نمونه‌های ساخته

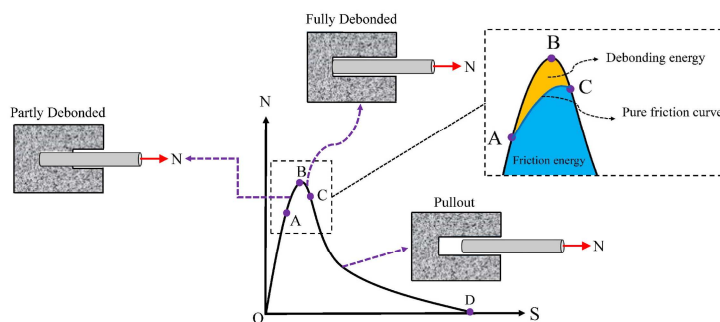
مطابق مقادیر به‌دست آمده، قابل مشاهده است که مقاومت نمونه مرجع در بین همه گروه‌ها، کمترین مقدار است. در طرح اختلاط‌های تقویت شده، نمونه S1.0 دارای بالاترین مقاومت فشاری و S1.0P1.0 کمترین مقاومت را به‌دست آورده‌اند. همانطور که از نتایج شکل ۱ قابل مشاهده است، الیاف فولادی دارای عملکرد بهتری نسبت به PVA و حالت ترکیبی است. نتیجه‌گیری کلی این است که تأثیر مثبت الیاف‌ها به مقدار و نوع الیاف مورد استفاده وابسته است. اثر برتر الیاف فولادی، نتیجه مهار مکانیکی و مدول الاستیسیته بالاتر در مقایسه با الیاف PVA است. علاوه بر این، استفاده از دو نوع الیاف در مخلوط‌هایی با طول‌ها و ویژگی‌های مکانیکی مختلف، توانایی آنها در برابر رفتار بیرون‌کشیدگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

به طور کلی، چسبندگی مکانیکی دارای عملکرد بهتری نسبت به چسبندگی شیمیایی در الیاف‌های فولادی است. بنابراین، الیاف‌های فولادی قلاب‌دار، تنش اصطکاکی و مهار مکانیکی قابل‌توجهی را فراهم می‌کنند [۳۷ و ۳۸]. از سوی دیگر، سطح صاف الیاف‌های PVA منجر به اندرکنش ضعیف بین ماتریس و الیاف می‌شود. بنابراین، می‌توان فرض کرد که اندرکنش، شامل اصطکاک فشاری و اصطکاک بینابینی وابسته به لغزش باشد [۲۶ و ۳۹]. رفتار پیوستگی لغزش را می‌توان به‌طور غیرمستقیم از منحنی بار- لغزش به‌دست آورد [۴۰]. بنابراین، رفتار بیرون‌کشیدگی را می‌توان با در نظر گرفتن اثر نوع الیاف بر منحنی‌های بار- لغزش همانند مدل نشان داده شده در شکل ۲، به‌دست آورد.

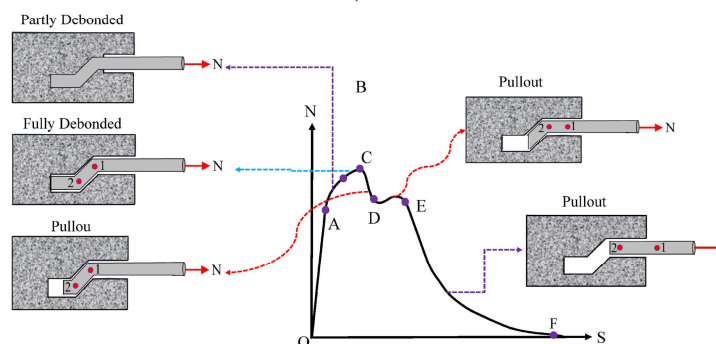
عملکرد بیرون‌کشیدگی الیاف‌های PVA شامل بیرون‌کشیدگی اصطکاکی و رفتار جداسازی است. در بخش پیش از اوج منحنی بار- لغزش PVA، منحنی به دو بخش تقسیم می‌شود (شکل ۲-الف). در مرحله اول از بخش پیش از قله الیاف صاف (OA)، نیرو به پیوند فیزیکی شیمیایی وابسته است و نیرو تقریباً به طور خطی

⁸- bridging effect

شده از مصالح ریزدانه کاملاً بازیافتی را افزایش می‌دهد. بنابراین منجر به افزایش ظرفیت و رفتار کششی الیافها می‌تواند گسترش ترک را به تأخیر بیاورد و کامپوزیت سیمانی مقاومت بالا شوند.

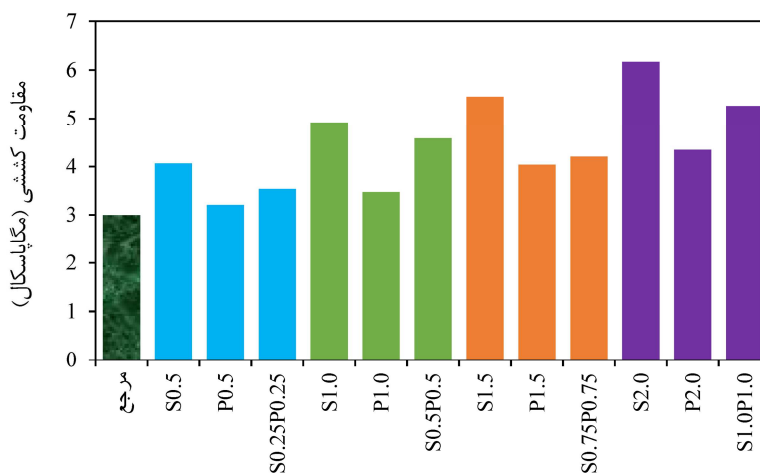


(الف)



(ب)

شکل ۲- منحنی نیرو- لغزش، (الف) الیاف مستقیم و (ب) الیاف قلاب‌دار [۴۰]



شکل ۳- نتایج آزمایش مقاومت کششی

با ۲٪ الیاف فولادی می‌باشد. علاوه بر این، اضافه کردن ۲ درصد الیاف PVA، ظرفیت کششی را حدود ۴۵ درصد افزایش می‌دهد. میانگین مقادیر مقاومت کششی برای نمونه‌های تقویت شده با الیاف فولادی، PVA و ترکیبی به ترتیب ۵/۱۵، ۳/۷۷ و ۴/۴ مگاپاسکال به دست آمده است. این مقادیر میانگین به ترتیب به میزان ۲۵/۹، ۷۲/۳ و ۴۷/۱ درصد بالاتر از نمونه مرجع می‌باشند. اثر ویژه

افزودن فقط الیاف فولادی و PVA، ظرفیت کششی مخلوط را به ترتیب ۳۵/۸۵ تا ۱۰۶ و ۷ تا ۴۵/۲۱ درصد در مقایسه با طرح اختلاط شاهد، افزایش می‌دهد. باید متذکر شد که اضافه نمودن الیاف فولادی، مقاومت کششی را بیشتر از ظرفیت فشاری افزایش می‌دهد. بیشترین افزایش ظرفیت کششی در نمونه‌های تقویت شده در مقایسه با دیگر نمونه‌های الیافی مربوط به نمونه

تغییر مکان و با استفاده از معادله (۲) محاسبه شده و نتایج مربوطه در شکل ۵ ارائه شده است. هرکدام از نتایج گزارش شده از میانگین سه تیر محاسبه شده است. از شکل ۴ می‌توان دریافت که نوع و درصد الیاف دارای نقش اساسی در مقاومت خمشی، حداکثر جابه‌جایی و رفتار در شاخه نزولی نمونه‌ها است.

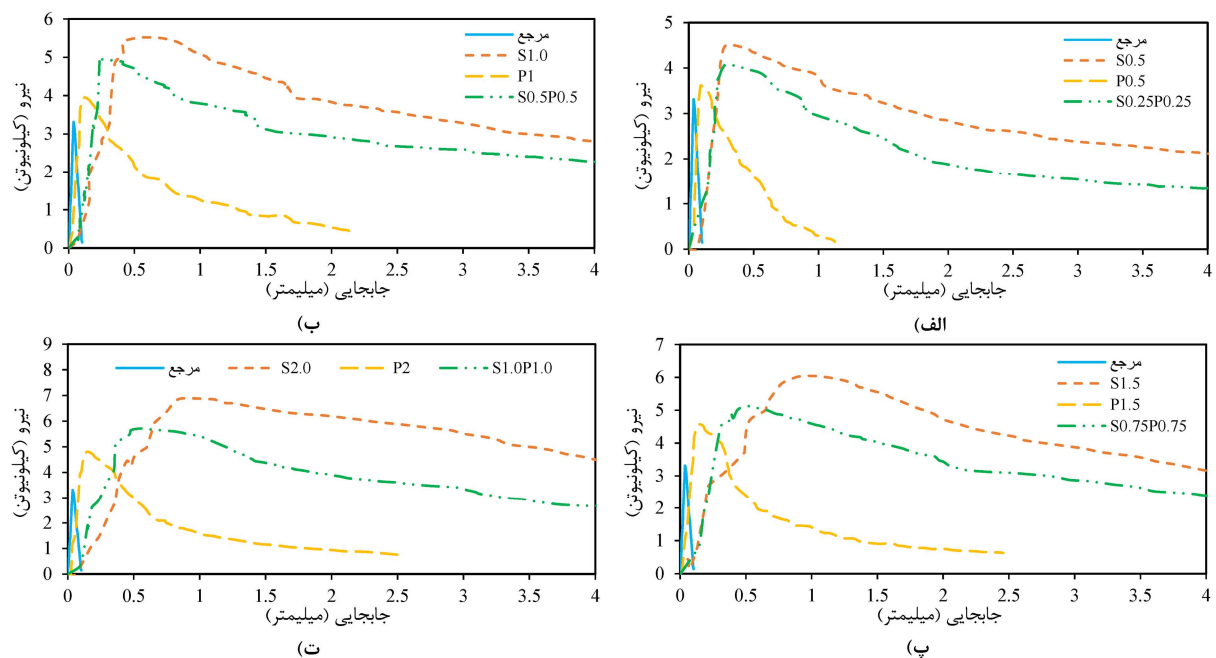
نمونه مرجع ساخته شده از مصالح ریزدانه کاملاً بازیافتی دارای کمترین ظرفیت خمشی (۳/۸۸ مگاپاسکال) است. قابل توجه است که اگرچه مقاومت خمشی به‌دست آمده برای نمونه‌های مسلح به الیاف PVA بیشتر از نمونه مرجع می‌باشد، اما این بهبود از اثرات استفاده از الیاف فولادی تنها و الیاف ترکیبی کمتر حاصل شده است.

الیاف فولادی ناشی از نیروی بیرون کشیدگی بالاتر، کندتر نمودن بهتر رشد ترک، اثر پل‌زدگی بهتر و مدول الاستیسیته بالاتر در مقایسه با الیاف PVA است.

در نمونه‌های با الیاف ترکیبی، افزایش درصد الیاف فولاد به دلیل ویژگی‌های برتر آن، منجر به بهبود قابل توجه می‌شود. برای مثال، افزایش‌ها در نمونه‌های $S0.25P0.25$ ، $S0.5P0.5$ ، $S0.75P0.75$ و $St1P1$ به ترتیب برابر با ۱۸/۲۶، ۵۳/۲۱، ۴۰/۵۴ و ۷۵/۷۲ درصد می‌باشد.

۴-۳- رفتار خمشی

آزمایش خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌ها در سن ۲۸ روز انجام و نتایج در شکل ۴ ترسیم شده است. همچنین، مقاومت خمشی هر نمونه براساس منحنی بار-



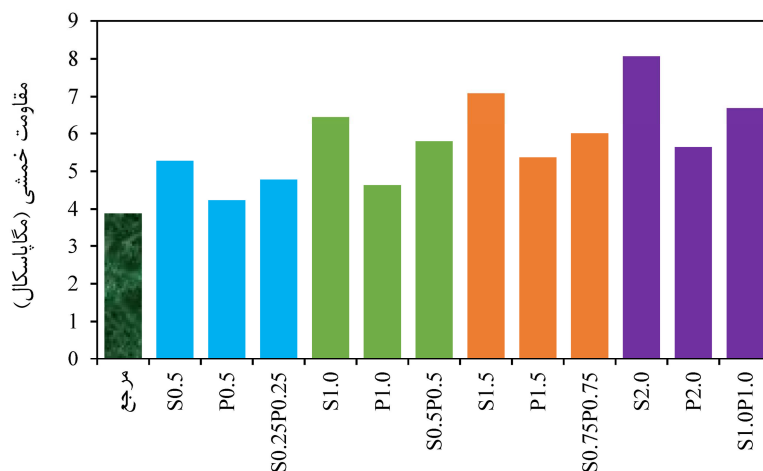
شکل ۴- نمودار بار- جابه‌جایی وسط دهانه در آزمایش خمشی، (الف) تقویت شده با ۰/۵ درصد الیاف، (ب) تقویت شده با ۱/۰ درصد الیاف، (پ) تقویت شده با ۱/۵ درصد الیاف و (ت) تقویت شده با ۲/۰ درصد الیاف

حاصل شده است. مشابه تست کششی، ظرفیت خمشی نمونه‌های با الیاف ترکیبی، بالاتر از نمونه‌های با درصد الیاف PVA مشابه است. برای مثال، مقادیر مقاومت خمشی در $S1.0P1.0$ و $S0.75P0.75$ به ترتیب ۱۱/۹۲ و ۱۸/۷۱ درصد بالاتر از $P2.0$ و $P1.5$ است. مقادیر

در مورد نمونه‌های با الیاف فولادی، افزودن ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد الیاف، افزایش ۳۵/۹۳، ۶۶/۳۸، ۸۲/۴۲ و ۱۰۷/۷۲ درصد در مقاومت خمشی را نشان می‌دهد، در حالی‌که، حدود ۹، ۱۲/۲۱، ۳۸/۱۶ و ۴۵/۲۸٪ افزایش در مقاومت خمشی نمونه‌های با درصد الیاف PVA مشابه

هستند به ترتیب ۶/۷۲، ۴/۹۷ و ۵/۸۲ مگاپاسکال می‌باشد.

میانگین کلی مقاومت خمشی برای نمونه‌هایی که فقط دارای الیاف فولادی، فقط الیاف PVA و الیاف ترکیبی



شکل ۵- مقاومت خمشی نمونه‌ها

انرژی دارد. همانطور که مورد انتظار بود، رفتار بیرون کشیدگی الیاف، بیشترین تأثیر را بر افزایش ظرفیت جذب انرژی کلی داشته است. در نتیجه، بیشترین افزایش ظرفیت جذب انرژی در تیرهای تقویت شده با الیاف فولادی به دست آمده است.

برای بررسی بیشتر تأثیر نوع و درصد الیافها بر رفتار خمشی متناظر با نقطه اولین ترک و رفتار پس از ترک، توصیه ASTM C1018 مورد استفاده قرار گرفته است [۴۲]. شاخص‌های سختی I_5 ، I_{10} و I_{20} مطابق مساحت ناحیه زیر منحنی خمش و براساس چهار تغییرمکان خاص، تعیین شده‌اند. سپس، اندیس‌های مقاومت باقی‌مانده $R_{5,10}$ و $R_{10,20}$ براساس این شاخص‌های سختی محاسبه شده و در جدول ۴ ارائه شده است. همانطور که مورد انتظار بود، تقویت تیرهای مرجع با فولاد یا PVA و الیاف‌های ترکیبی به میزان قابل توجهی فاکتورهای مقاومت باقی‌مانده ($R_{5,10}$ و $R_{10,20}$) و شاخص‌های سختی (I_5 ، I_{10} و I_{20}) را در مقایسه با تیر مرجع بهبود می‌دهد.

۴-۴- نتایج آزمایش UPV

در شکل ۶، نتایج آزمایش UPV برای همه گروه‌ها ارائه شده است. با استفاده از نتایج این تست، برخی از

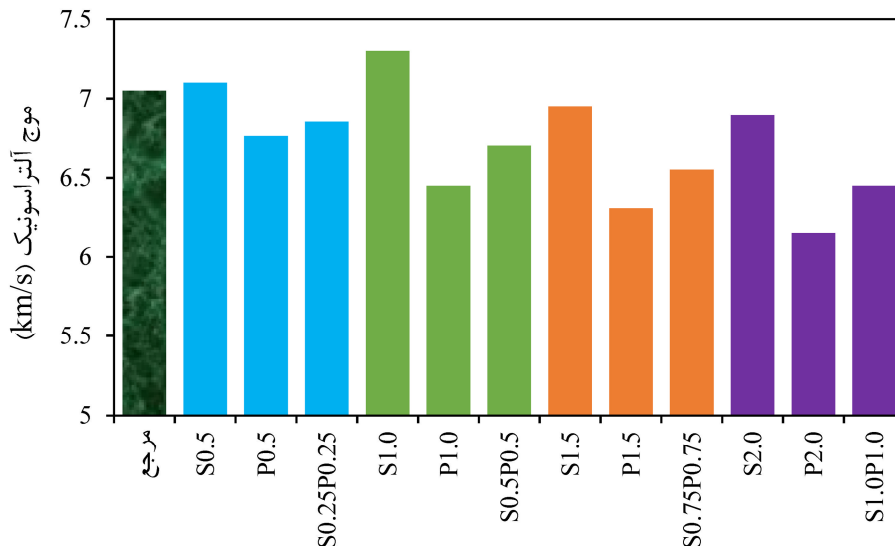
ارزیابی سختی خمشی نمونه‌های تقویت شده نشان داد که الیاف فولادی نسبت به الیاف PVA مؤثرتر است. حداکثر و حداقل سختی خمشی (EI) به ترتیب در نمونه‌های با ۲ درصد الیاف فولادی (S2.0) و ۰/۵ درصد الیاف PVA (P0.5) به دست آمده است.

علاوه بر این، انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها براساس روش پیشنهادی توسط مؤسسه بتن ژاپن، تعیین شده است. در این روش، جذب انرژی در $1/150$ دهانه (برابر ۳۰۰ میلی‌متر)، تحت تست خمشی سه نقطه‌ای تعیین و نتایج در جدول ۴ ارائه شده است. مقادیر به دست آمده نشان می‌دهد که ظرفیت‌های خمشی نمونه‌های دارای الیاف، بدون توجه به نوع الیاف در مقایسه با نمونه مرجع، افزایش می‌یابد. براساس نتایج به دست آمده، کمترین و بیشترین مقدار جذب انرژی مربوط به نمونه‌های تقویت شده به ترتیب برای طرح‌های اختلاطی که فقط دارای ۲ درصد الیاف فولادی و فقط ۰/۵ درصد الیاف PVA می‌باشند. ظرفیت جذب انرژی نمونه S2.0 به ترتیب $10/81$ و $1/65$ برابر بیشتر از مقادیر جذب انرژی نمونه‌هایی است که در آنها از ۲ درصد الیاف PVA و ۲ درصد الیاف ترکیبی استفاده شده است. به طور کلی، استفاده از الیاف PVA در مقایسه با نمونه‌های تقویت شده با الیاف‌های فولادی یا ترکیبی، اثر کمتری بر جذب

ویژگی‌های داخلی مصالح بتنی را می‌توان بدون هرگونه آسبایی به نمونه‌ها شناسایی نمود. همانطور که از شکل مشخص است، با افزودن ۰/۵ و ۱٪ الیاف فولادی به طرح اختلاط شاهد مقادیر UPV افزایش یافته، اما افزودن ۱/۵ و ۲٪ از آن اثر منفی بر UPV نمونه‌ها دارد.

جدول ۴- شاخص‌های طاقتم خمشی و انرژی جذب شده

جذب انرژی (kN.mm)	$R_{10,20}=10(I_{20}-I_{10})$	$R_{5,10}=20(I_{10}-I_5)$	I_{20}/I_{10}	I_{10}/I_5	I_{20}	I_{10}	I_5	مشخصه نمونه
۰/۱۷	صفر	صفر	۱	۱	۱	۱	۱	مرجع
۱۸/۳۰	۶۳/۲۲	۸۲/۴۳	۱/۶۹	۱/۸۱	۱۵/۵۵	۹/۲۲	۵/۱۰	S0.5
۲۶/۱۷	۴۲/۰۴	۶۰/۱۲	۱/۵۸	۱/۷۰	۱۱/۴۸	۷/۲۷	۴/۲۷	S1.0
۳۵/۴۹	۲۶/۸۱	۴۳/۳۵	۱/۴۶	۱/۵۹	۸/۵۳	۵/۸۵	۳/۶۹	S1.5
۴۸/۱۴	۳۴/۲۲	۵۸/۶۲	۱/۴۸	۱/۷۰	۱۰/۵۵	۷/۱۳	۴/۲۰	S2.0
۱/۵۸	۲۲/۳۹	۶۴/۶۹	۱/۲۷	۱/۶۳	۱۰/۶۱	۸/۳۷	۵/۱۴	P0.5
۳/۱۲	۳۷/۲۴	۶۰/۴۲	۱/۴۸	۱/۶۴	۱۱/۴۹	۷/۷۷	۴/۷۴	P1.0
۳/۷۴	۲۵/۹۵	۴۳/۵۰	۱/۴۰	۱/۵۰	۹/۰۹	۶/۴۹	۴/۳۲	P1.5
۴/۴۵	۲۷/۷۸	۴۵/۸۵	۱/۴۲	۱/۵۳	۹/۴۰	۶/۶۲	۴/۳۳	P2.0
۱۰/۹۷	۳۴/۵۹	۵۲/۵۳	۱/۵۲	۱/۶۵	۱۰/۱۵	۶/۶۹	۴/۰۶	S0.25P0.25
۲۰/۱۲	۴۹/۲۲	۶۱/۴۹	۱/۶۸	۱/۷۳	۱۲/۲۰	۷/۲۸	۴/۲۰	S0.5P0.5
۲۲/۱۵	۴۲/۱۵	۵۹/۱۲	۱/۵۹	۱/۷۰	۱۱/۳۸	۷/۱۶	۴/۲۰	S0.75P0.75
۲۹/۱۵	۳۷/۲۸	۵۴/۰۹	۱/۵۶	۱/۶۸	۱۰/۴۲	۶/۶۹	۳/۹۸	S1.0P1.0



شکل ۶- نتایج آزمایش UPV

که انتظار می‌رفت، به دلیل چگالی پایین‌تر الیاف PVA نسبت به الیاف فولادی، افزودن الیاف PVA به اختلاطها باعث کاهش قابل‌توجه در مقادیر UPV شده است. میانگین مقدار UPV نمونه‌های با الیاف تکی PVA تقریباً ۱۰٪ کمتر از نمونه‌های با الیاف فولادی تکی است.

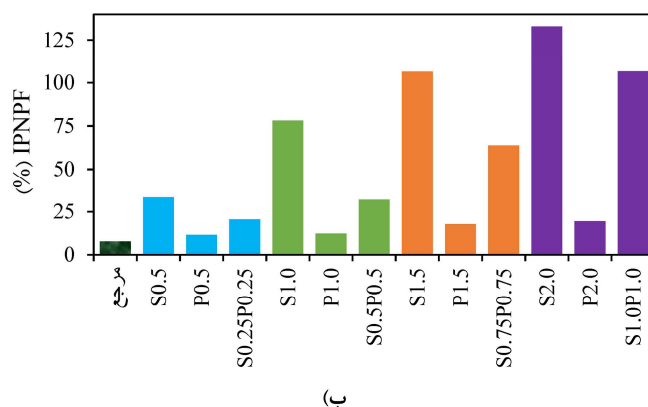
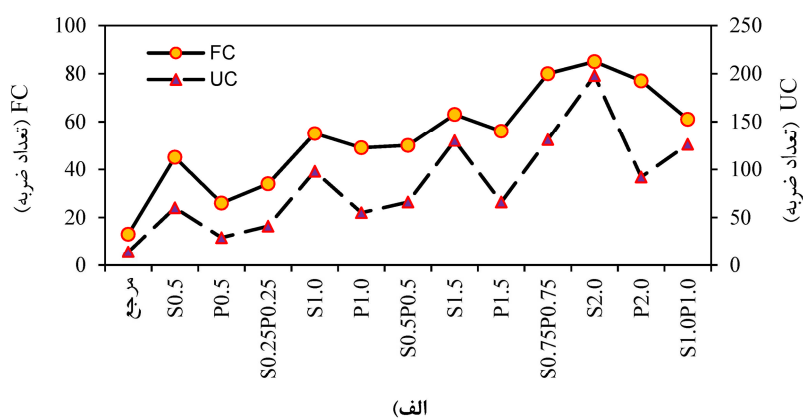
اثر کاهشی به دلیل کاهش چگالی مخلوطها با افزایش خلل‌و فرج در ماتریس است. UPV مربوط به S1.0 در بین سایرین، دارای بیشترین مقدار است که مقدار آن به ترتیب ۲/۸۲، ۵/۰۴ و ۵/۹۵ درصد بالاتر از نمونه‌های با الیاف فولادی ۰/۵، ۱/۵ و ۲٪ است. همانطور

این شکل مشخص است، حداکثر و حداقل مقادیر جذب آب متعلق به نمونه P2 (۱۰/۶۷ درصد) و S1.0P1.0 (۱۰/۳۷ درصد) است. مقادیر متوسط جذب آب برای نمونه‌های شامل الیاف‌های فولادی، PVA و ترکیبی به ترتیب برابر با ۸/۲، ۹/۲۶ و ۸/۸۹٪ است. علاوه بر این، همانطور که انتظار می‌رفت، استفاده از الیاف‌های PVA می‌تواند جذب آب را بیشتر از الیاف‌های فولادی افزایش دهد؛ بنابراین، گروه ترکیبی دارای جذب آب کمتر نسبت به نمونه‌های دارای فقط الیاف PVA است. به دلیل افزایش الیاف PVA در مخلوط، حفرات و منافذ گسترش یافته‌اند. این امر با شکل‌گیری مسیر برای رساندن آب از میان نمونه‌ها ایجاد شده است. الیاف‌های PVA دارای ساختار نفوذپذیرتری نسبت به الیاف‌های فولادی بوده و الیاف‌های فولادی دارای چگالی بالاتری نسبت به الیاف‌های PVA هستند؛ بنابراین، با افزایش میزان PVA در مخلوط‌ها، جذب آب افزایش یافته است.

UPV مخلوط‌های با الیاف‌های ترکیبی از ۱۲/۹۲ درصد برای نمونه S0.25P0.25 به ۹/۳ درصد برای نمونه S1.0P1.0 در مقایسه با نمونه مرجع کاهش یافته است. در نمونه‌های با الیاف PVA تکی، با افزایش درصد الیاف PVA از ۰/۵ تا ۲٪، کاهش ۸/۶۱ درصد ایجاد شده است. علاوه بر این، اختلاف بین حداکثر و حداقل UPV در نمونه فقط با الیاف PVA بیشتر از نمونه‌هایی است که فقط دارای الیاف فولادی و الیاف‌های ترکیبی هستند. در همه گروه‌ها، حداقل UPV در نمونه‌های با الیاف ۲ درصد گزارش شده است. بنابراین، با افزودن درصد بالای الیاف، UPV نمونه‌های تقویت شده می‌تواند به شدت کاهش یابد. این موضوع ممکن است به دلیل توزیع ناهمگن الیاف‌ها و افزایش تخلخل در خمیر سیمان باشد.

۴-۵- جذب آب

نتایج آزمایش جذب آب برای همه طرح‌های اختلاط در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که از



شکل ۷- نتایج آزمایش ضربه، (الف) مقاومت متناظر با اولین ترک و ظرفیت نهایی و (ب) شاخص INPB

۴-۶- نتایج آزمایش ضربه

ضربه‌های پس از اولسن ترک تا شکست ($IPNPF^{11}$) نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۷-ب، شاخص $IPNPF$ برای همه گروه‌ها ارائه شده است. مقایسه بین دو نوع الیاف نشان می‌دهد که الیاف فولادی دو سر قلاب، کارایی بالاتری نسبت به الیاف PVA در پدیده پل‌زدگی ایجاد شده در صفحه ترک دارند. با اضافه کردن ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲٪ الیاف فولادی به طرح اختلاط، مقدار افزایش در $IPNPF$ به ترتیب برابر با ۴/۳۳، ۱۰/۱۶، ۱۳/۸۲ و ۱۷/۲۸ برابر می‌باشد. بالاترین $IPNPF$ به میزان ۱۳۲/۹۴ درصد و مربوط به نمونه با ۲٪ الیاف فولادی می‌باشد که در مقایسه با نمونه حاوی ۲٪ الیاف PVA، رشدی در حدود ۷ برابر دارد. علاوه بر این، تأثیر الیاف‌ها بر مکانیسم جذب انرژی، حالت شکست و الگوهای ترک در شکل ۸-الف ارائه شده است. مطابق این شکل، با تعداد کمی ضربه بر نمونه‌های بدون الیاف، تمرکز تنش کششی بیش از ظرفیت کششی بتن شده و در نهایت منجر به شکست می‌شود. رفتار بیرون‌کشیدگی بهتر الیاف‌های فولادی (شکل ۸-ب) به دلیل تغییر شکل پلاستیک قلاب و درهم‌تنیدگی مکانیکی، منجر به ترک‌های یکنواخت‌تری می‌شود. همچنین افزایش درصد الیاف، تعداد ترک‌های ایجاد شده در سطح بالایی نمونه‌ها را افزایش داده است.

۵- نتیجه‌گیری

براساس مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در این مقاله، نتایج زیر قابل بیان است:

- استفاده از ضایعات برش گرانیت به عنوان جایگزین برای مصالح ریزدانه منجر به تولید بتن خودمترکم مقاومت بالا با خواص قابل قبول می‌شود که موجب کاهش آلودگی در محیط‌زیست و مصرف ذخایر طبیعی نیز می‌گردد.

براساس نتایج این آزمایش، تعداد ضربه‌های مورد نیاز برای ایجاد اولین ترک (FC^9) بر روی سطح نمونه‌های دیسکی و ظرفیت نهایی ترک‌خوردگی (UC^{10}) در شکل ۷-الف ارائه شده است. تأثیر الیاف‌های منفرد یا ترکیبی بر رفتار نمونه‌ها در برابر بارهای ضربه‌ای در این شکل مشخص است. به دلیل پدیده پل‌زدن الیاف‌ها، آنها خواص ضربه‌ای نمونه‌ها را افزایش می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های تقویت شده با الیاف‌های فولادی قلاب‌دار در مقایسه با نمونه مرجع، مقاومت FC و UC بهتری را نسبت به نمونه‌های تقویت شده با الیاف PVA نشان می‌دهند. همچنین نتایج نشان داده است که حالت شکست بیرون‌کشیدگی الیاف به‌طور چشمگیری تعداد ضربات در شکستگی نهایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به طور مشابه، در نمونه تقویت شده با الیاف ترکیبی، با افزایش درصد جایگزینی الیاف PVA با الیاف فولادی، در رفتار ضربه‌ای بهبود مناسب‌تری ایجاد می‌شود. با اضافه کردن الیاف فولادی به داخل مخلوط ساخته شده با مصالح ریزدانه کاملاً بازیافتی، مقدار UC برای نمونه‌های با درصد الیاف ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد، به ترتیب ۴/۲۹، ۷، ۹/۲۸ و ۱۴/۱۴ برابر افزایش می‌یابد. در نمونه‌های تقویت شده با الیاف PVA، این افزایش‌ها ۲/۰۷، ۳/۹۲، ۴/۷۱ و ۶/۵۷ برابر بیشتر از نمونه مرجع بوده است. در مخلوط‌های تقویت شده با الیاف ترکیبی، نمونه با ۰/۷۵ درصد الیاف فولادی به اضافه ۰/۷۵ درصد الیاف PVA، بیشترین تأثیر را بر ظرفیت ایجاد کرده است. می‌توان مشاهده کرد که نوع و شکل الیاف نقش قابل توجهی بر افزایش خواص عملکرد پدیده پل‌زدگی الیاف دارد.

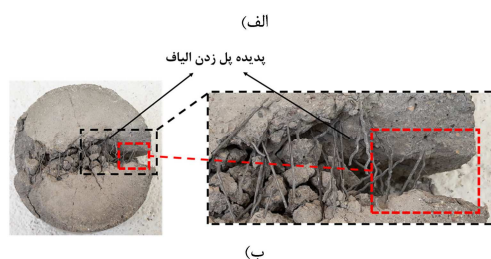
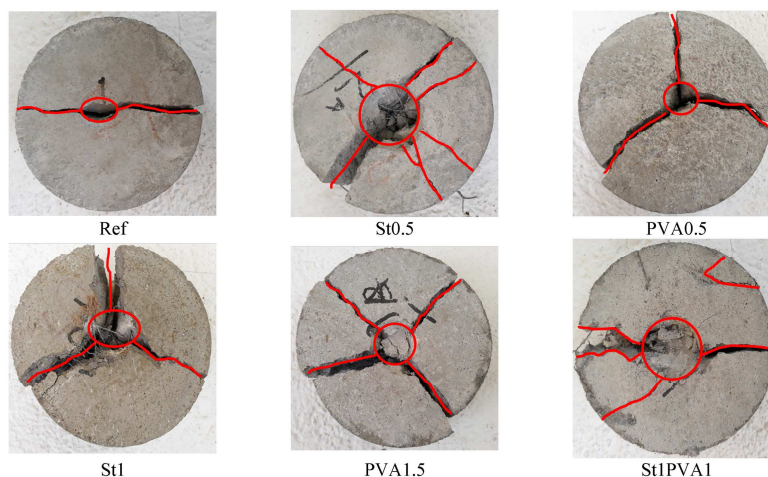
برای بررسی جزئی‌تر اثر و کارایی الیاف در بهبود عملکرد در برابر بارهای ضربه‌ای، درصد افزایش تعداد

¹¹- Increased Percentage in the Number of Post-first-crack blows to Failure

⁹- First Crack
¹⁰- Ultimate Crack

افزایش مقاومت فشاری، به ترتیب برای نمونه‌های تقویت شده با یک درصد الیاف فولادی و مخلوط تقویت شده با الیاف ترکیبی یک درصد فولاد به همراه یک درصد الیاف PVA است.

• اثر مثبت الیافها بر مقاومت فشاری، وابسته به کیفیت و نوع الیاف بوده و الیاف فولادی دارای عملکرد بهتری نسبت به الیاف PVA و الیافهای ترکیبی است. بالاترین و پایینترین نرخهای



شکل ۸- (الف) حالت شکست تحت بارگذاری ضربه‌ای و (ب) پدیده پل زدن الیاف

الیاف فولادی تا ۱٪ منجر به افزایش مقادیر UPV در مقایسه با نمونه مرجع می‌شود، اما افزودن الیاف بیشتر، اثر منفی بر UPV دارد. همچنین به دلیل تخلخل بالاتر مخلوط مربوطه نسبت به نمونه مرجع، افزودن الیاف PVA به طرح مرجع منجر به کاهش مقادیر UPV می‌شود.

• کمترین مقاومت خمشی در طرح‌های اختلاط مورد بررسی برای طرح مرجع ساخته شده از مصالح ریزدانه کاملاً بازیافتی به دست آمده است. افزودن الیاف فولادی ۰.۲٪، بهبود در مقاومت خمشی تقریباً ۱۰۷/۷۲ درصد را نشان می‌دهد، در حالی که حدود ۴۵/۲۸ درصد افزایش در نمونه با محتوای مشابه الیاف PVA مشاهده شده

• نتایج آزمایش‌ها نشان داد که نوع، درصد و حالت استفاده (منفرد یا ترکیبی) الیاف دارای تأثیر قابل توجهی بر رفتار بیرون کشیدگی، مکانیسم شکست و توانایی الیاف‌ها برای توقف گسترش ترک دارد. همبستگی عوامل اشاره شده به طور مستقیم خواص مکانیکی و رفتار ضربه‌ای بتن ساخته شده با مصالح بازیافتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اثر برتر الیاف فولادی بر عملکرد کششی، رفتار خمشی و نتایج مقاومت در برابر ضربه، ناشی از مهار مکانیکی بهتر و مدول الاستیسیته بالاتر در مقایسه با الیاف PVA است.

• مقادیر UPV به دست آمده برای نمونه‌ها نشان داد که روند یکسانی برای مقادیر مختلف و نوع الیاف قابل نتیجه‌گیری نیست. افزایش درصد

به نمونه‌های تقویت شده با الیاف PVA و الیاف ترکیبی نشان می‌دهند. بالاترین مقاومت در برابر ضربه، ۱۹۸ ضربه و برای نمونه با ۲٪ الیاف فولادی می‌باشد.

است. همچنین، مقاومت خمشی نمونه‌های با الیاف ترکیبی بالاتر از نمونه‌های با درصد مشابه الیاف PVA است.

• نمونه‌های تقویت شده با الیاف‌های فولادی قلابدار، مقاومت در برابر ضربه بهتری را نسبت

مراجع

- [1] Vishwakarma, V., & Ramachandran, D. (2018). "Green Concrete mix using solid waste and nanoparticles as alternatives—A review", *Construction and Building Materials*, 162, 96-103.
- [2] Jain, A., Gupta, R., & Chaudhary, S. (2019). "Performance of self-compacting concrete comprising granite cutting waste as fine aggregate", *Construction and Building Materials*, 221, 539-552.
- [3] Ostrowski, K., Stefaniuk, D., Sadowski, Ł., Krzywiński, K., Gicala, M., & Różańska, M. (2020). "Potential use of granite waste sourced from rock processing for the application as coarse aggregate in high-performance self-compacting concrete", *Construction and Building Materials*, 238, 117794.
- [4] Rana, A., Kalla, P., Verma, H. K., & Mohnot, J. K. (2016). "Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review", *Journal of cleaner production*, 135, 312-331.
- [5] Singh, S., Nagar, R., & Agrawal, V. (2016). "Performance of granite cutting waste concrete under adverse exposure conditions", *Journal of Cleaner Production*, 127, 172-182.
- [6] Montani, C. (2016). *XXVIII world marble and stones report 2017*. Aldus Casa di Edizioni in Carrara.
- [7] Aarthi, K., & Arunachalam, K. (2018). "Durability studies on fibre reinforced self compacting concrete with sustainable wastes", *Journal of Cleaner Production*, 174, 247-255.
- [8] Tam, V. W. Y., Soomro, M., & Evangelista, A. C. J. (2018). "A review of recycled aggregate in concrete applications (2000-2017)", *Construction and Building Materials*, 172, 272-292.
- [9] Oikonomou, N. D. (2005). "Recycled concrete aggregates", *Cement and concrete composites*, 27(2), 315-318.
- [10] Binici, H., Shah, T., Aksogan, O., & Kaplan, H. (2008). "Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates", *Journal of materials processing technology*, 208(1-3), 299-308.
- [11] Singh, S., Nagar, R., Agrawal, V., Rana, A., & Tiwari, A. (2016). "Sustainable utilization of granite cutting waste in high strength concrete", *Journal of Cleaner Production*, 116, 223-235.
- [12] Sharma, N. K., Kumar, P., Kumar, S., Thomas, B. S., & Gupta, R. C. (2017). "Properties of concrete containing polished granite waste as partial substitution of coarse aggregate", *Construction and Building Materials*, 151, 158-163.
- [13] Ghorbani, S., Taji, I., De Brito, J., Negahban, M., Ghorbani, S., Tavakkolizadeh, M., & Davoodi, A. (2019). "Mechanical and durability behaviour of concrete with granite waste dust as partial cement replacement under adverse exposure conditions", *Construction and Building Materials*, 194, 143-152.
- [14] Savadkoobi, M. S., & Reisi, M. (2020). "Environmental protection based sustainable development by utilization of granite waste in Reactive Powder Concrete", *Journal of Cleaner Production*, 266, 121973.
- [15] Zafar, M. S., Javed, U., Khushnood, R. A., Nawaz, A., & Zafar, T. (2020). "Sustainable incorporation of waste granite dust as partial replacement of sand in autoclave aerated concrete", *Construction and Building Materials*, 250, 118878.
- [16] Zhu, W., Gibbs, J. C., & Bartos, P. J. M. (2001). "Uniformity of in situ properties of self-compacting concrete in full-scale structural elements", *Cement and concrete composites*, 23(1), 57-64.
- [17] Shi, C., Wu, Z., Lv, K., & Wu, L. (2015). "A review on mixture design methods for self-compacting concrete", *Construction and Building Materials*, 84, 387-398.
- [18] Zhang, X., Luo, Y., Wang, L., Zhang, J., Wu, W., & Yang, C. (2018). "Flexural strengthening of damaged RC T-beams using self-compacting concrete jacketing under different sustaining load", *Construction and Building Materials*, 172, 185-195.
- [19] Moghadam, A. S., Omidinasab, F., & Dalvand, A. (2020). "Experimental investigation of (FRSC) cementitious composite functionally graded slabs under projectile and drop weight impacts", *Construction and Building Materials*, 237, 117522.
- [20] Dalvand, A., & Ahmadi, M. (2021). "Impact failure mechanism and mechanical characteristics of steel fiber reinforced self-compacting cementitious composites containing silica fume", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(3), 736-748.
- [21] Jain, A., Gupta, R., & Chaudhary, S. (2020). "Sustainable development of self-compacting concrete by

- using granite waste and fly ash”, *Construction and Building Materials*, 262, 120516.
- [22] Wang, S., & Li, V. C. (2007). “Engineered cementitious composites with high-volume fly ash”, *ACI Materials Journal*, 104(3), 233.
- [23] Sadek, D. M., El-Attar, M. M., & Ali, H. A. (2016). “Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development”, *Journal of Cleaner Production*, 121, 19-32.
- [24] ASTM International C618. (2015). *C618-08a: standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in Concrete*. American Society of Testing and Materials.
- [25] Mastali, M., Dalvand, A., & Sattarifard, A. (2017). “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*, 112, 74-92.
- [26] Mastali, M., Dalvand, A., & Fakharifard, M. (2016). “Statistical variations in the impact resistance and mechanical properties of polypropylene fiber reinforced self-compacting concrete”, *Comput. Concrete*, 18(1), 113-137.
- [27] ASTM C39/C39M-12. (2012). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [28] ASTM C496/C496M. (2011). *Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [29] ASTM C293. (2016). *Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with center-point loading)*. ASTM International West Conshohocken, PA.
- [30] ASTM C597. (2016). *Standard test method for pulse velocity through concrete*. ASTM International West Conshohocken, PA.
- [31] BS 1015-18. (2002). *Methods of test for mortar for masonry. Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*. British Standards Institution.
- [32] ACI Committee 544. (1988). “Measurement of properties of fiber reinforced concrete”, *ACI Materials Journal*, 85(6), 583-593.
- [33] Mastali, M., & Dalvand, A. (2016). “Use of silica fume and recycled steel fibers in self-compacting concrete (SCC)”, *Construction and Building Materials*, 125, 196-209.
- [34] Mastali, M., & Dalvand, A. (2017). “Fresh and hardened properties of self-compacting concrete reinforced with hybrid recycled steel-Polypropylene fiber”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(6), 4017012.
- [35] Aslani, F., & Nejadi, S. (2013). “Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers: Compressive and tensile strengths, moduli of elasticity and rupture, compressive stress-strain curve, and energy dissipated under compression”, *Composites Part B: Engineering*, 53, 121-133.
- [36] El-Dieb, A. S. (2009). “Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers”, *Materials & Design*, 30(10), 4286-4292.
- [37] Mastali, M., Dalvand, A., Sattarifard, A. R., Abdollahnejad, Z., & Illikainen, M. (2018). “Characterization and optimization of hardened properties of self-consolidating concrete incorporating recycled steel, industrial steel, polypropylene and hybrid fibers”, *Composites Part B: Engineering*, 151, 186-200.
- [38] Ahmadi, M., Kheyroddin, A., Dalvand, A., & Kioumars, M. (2020). “New empirical approach for determining nominal shear capacity of steel fiber reinforced concrete beams”, *Construction and Building Materials*, 234, 117293.
- [39] Ranjbar, N., Mehrali, M., Behnia, A., Javadi Pordsari, A., Mehrali, M., Alengaram, U. J., & Jumaat, M. Z. (2016). “A comprehensive study of the polypropylene fiber reinforced fly ash based geopolymer”, *PloS one*, 11(1), e0147546.
- [40] Cunha, V. M. C. F., Barros, J. A. O., & Sena-Cruz, J. (2007). *Pullout behaviour of hooked-end steel fibres in self-compacting concrete*. Universidade do Minho. Departamento de Engenharia Civil (DEC).
- [41] Abdallah, S., Fan, M., & Rees, D. W. A. (2018). “Bonding mechanisms and strength of steel fiber-reinforced cementitious composites: Overview”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(3), 4018001.
- [42] ASTM, C. (1998). *1018 Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete*. In American Society of Testing and Materials.