

Effect of using dimensional stone waste sourced from Lorestan Province on the performance of high-strength self-compacting concrete

Mostafa Nazari Farokhi¹, Masoud Ahmadi^{2*}, Ahmad Dalvand³

1- Master of Science, Department of Civil Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran

2 -Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran

3 -Associate Professor, Department of Civil Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran

ABSTRACT

Producing enormous quantities and continuous stockpiling of granite industrial by-product enforced researchers to utilize this waste in a sustainable state in concrete to diminish its adverse impacts on the ecosystem. This study aims to experimentally investigate the possibilities of reusing granite waste sourced from Lorestan Province in fiber-reinforced self-compacting cementitious composite using hooked-end steel fibers. The L-box and U-box tests were performed to assess the fresh properties of mixes, whereas compressive strength, flexural strength, ductility, flexural toughness, and tensile strength tests were conducted for measuring the hardened properties of self-compacting concrete mixes. Results of the fresh properties tests for all of the steel fiber reinforced-recycled aggregate mixtures were found within the satisfactory limit of standard. In other words, the incorporation of granite waste in self-compacting concrete augmented the hardened properties. It should be noted that the effects of simultaneous use of granite waste and steel fiber in improving the tensile strength, flexural performance, ductility, and bending toughness of the specimens are higher than the compressive strength. In specimens without steel fiber, brittle failure occurred immediately after the formation of the first crack. With the increasing percentage of steel fibers in the samples, the ductility increased, and the ductile failure occurred in samples.

ARTICLE INFO

Receive Date: 29 March 2021

Revise Date: 18 May 2021

Accept Date: 17 June 2021

Keywords:

Self-compacting concrete

Granite waste

Steel fiber

Mechanical properties

Fresh properties

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.278762.2402>

*Corresponding author: Masoud Ahmadi.
Email address: masoud.ahmadi@abru.ac.ir

بررسی اثر استفاده از ضایعات صنعت سنگ استان لرستان بر عملکرد

بتن خودتراکم مقاومت بالا

مصطفی نظری فرخی^۱، مسعود احمدی^{۲*}، احمد دالوند^۳

۱- کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آیت الله بروجردی، بروجرد، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

چکیده

تولید و انباشت روزافزون ضایعات صنعت سنگ در استان لرستان سبب ترغیب محققان این استان به استفاده از آنها در تولید بتن‌های سازگار با محیط زیست جهت کاهش اثرات زیست محیطی گردیده است. در این مطالعه به بررسی آزمایشگاهی استفاده از ضایعات کارخانه های سنگبری موجود در استان لرستان در بتن خودتراکم مسلح به الیاف فولادی پرداخته شده است. برای ارزیابی خواص بتن تازه و سخت شده از آزمایش های جعبه L-شکل، جعبه U-شکل، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، شکلپذیری، طاقت خمشی و مقاومت کششی استفاده شده است. نتایج آزمایش‌ها بر روی بتن تازه نشان داده است که بتن خودتراکم الیافی ساخته شده قابلیت عبور و کارایی مطلوبی داشته و تمامی طرح های اختلاط در محدوده قابل قبول قرار گرفته اند. از سوی دیگر استفاده از ضایعات گرانیات سبب بهبود خصوصیات بتن سخت شده نیز شده است. استفاده همزمان از سنگدانه‌های گرانیتی و الیاف فولادی سبب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است. این افزایش برای درصد‌های جایگزینی ۲۰ و ۴۰ درصد به ترتیب برابر با ۲۰/۸۸ و ۲۶/۵۲ درصد می باشد. قابل ذکر است که اثرات استفاده همزمان در بهبود مقاومت کششی، عملکرد خمشی و طاقت خمشی نمونه ها نسبت به مقاومت فشاری قابل توجه تر بوده است. نتایج نمونه‌های بدون الیاف نشان داده است که اضافه نمودن ۲۰ و ۴۰ درصد سنگدانه گرانیتی بجای ریزدانه سبب افزایش ۱۵/۵۸ و ۸/۵۴ درصدی در مقاومت کششی شده است. در تیرهای بدون الیاف فولادی، بلافاصله پس از رخ دادن اولین ترک شکست ترد اتفاق افتاده است اما با افزایش درصد الیاف فولادی مورد استفاده در نمونه ها شکل پذیری افزایش یافته و نوع شکست بصورت خمشی شکل پذیر رخ داده است.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، ضایعات گرانیات، الیاف فولادی، خصوصیات مکانیکی، خواص بتن تازه

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.278762.2402	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.278762.2402	۱۴۰۰/۱۲/۲۹	۱۴۰۰/۰۳/۲۷	۱۴۰۰/۰۳/۲۷	۱۴۰۰/۰۲/۲۸	۱۴۰۰/۰۱/۰۹
مسعود احمدی masoud.ahmadi@abru.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

در دهه های گذشته محققان به طور مداوم تلاش برای تولید انواع مختلف بتن داشته اند. با گذشت زمان و رشد در صنعت ساخت و ساز انواع مختلفی از بتن (به عنوان مثال: بتن با مقاومت بالا، بتن خود ترمیم شونده، بتن با عملکرد بالا و بتن خود متراکم) ساخته شده است. در سال ۱۹۸۸، محققان ژاپنی بتن خود متراکم (SCC^۱) را برای ساخت سازه های با دوام تولید کردند که انقلابی بزرگ در صنعت ساخت و ساز ایجاد نمود [۱]. بتن خودتراکم بتنی است که تحت اثر وزن خود جریان می یابد و بدون نیاز به ویبره قالب را پر می کند، این درحالی است که ساختار بتن طی این جابجایی تغییر نکرده و جدایی سنگدانه ها را شاهد نمی باشیم. بتن خودتراکم قادر خواهد بود از فضای بین آماتورها عبور کرده و قالب را پر کند. مشخصه روانی مهمترین و موثرترین پارامتر در ارزیابی بتن تازه خودتراکم است [۲]. با پیشرفت در صنعت ساخت و ساز، استفاده از SCC به سرعت در حال افزایش بوده که به دنبال آن به مقدار بیشتر مصالحی همچون سیمان و سنگدانه های ریزدانه نیاز است [۳-۴]. استفاده بیشتر از مواد مرسوم در تولید بتن خودتراکم بر مساله توسعه پایدار تأثیر منفی می گذارد [۵]. بنابراین، برای کاهش استفاده صنعت ساخت و ساز به این مصالح، گزینه های جایگزین برای این مواد مرسوم مورد نیاز است.

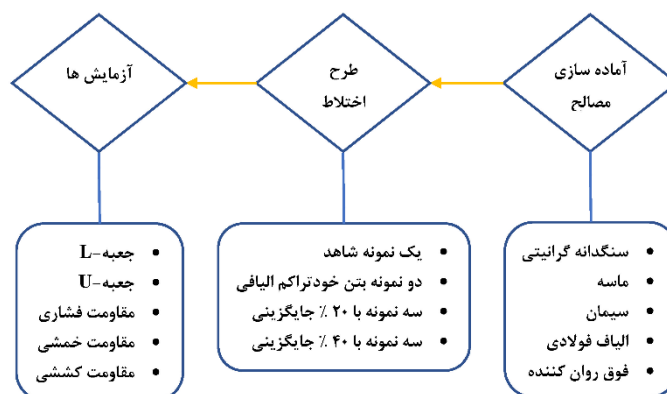
صنایع مرتبط با سنگ به طور مداوم مقادیر زیادی ضایعات جامد تولید می کنند و این ضایعات علاوه بر اینکه فضای قابل ملاحظه ای از زمین های اطراف کارخانه را اشغال می کنند، موجب آلودگی محیط زیست نیز می شوند. از آنجائیکه وجود این ضایعات در اطراف کارخانه های سنگ و محیط شهری سبب آلودگی زمین های اطراف می شوند و برای انسان نیز خطر آفرین می باشند، کارخانه ها موظف به دور نمودن این ضایعات از اطراف کارخانه و محیط شهری می باشند که این امر مستلزم صرف هزینه است [۶]. استفاده از ضایعات در صنعت نه تنها سبب کاهش آلودگی در محیط زیست می شود، بلکه موجب کاهش مصرف منابع طبیعی، هزینه های دفع ضایعات و تولیدات صنعتی نیز می گردد. از طرفی دفع و بکارگیری صحیح ضایعات، به حفظ سلامت اجتماعی و انسانی نیز کمک می کند [۷]. استفاده از سنگ به عنوان یک مصالح ساختمانی در حال رشد بوده که در طی مراحل برش و پرداخت آن مقدار قابل توجهی ضایعات تولید می شود [۸]. بررسی ها نشان داده است که میزان ضایعات تولید شده در حین فرآوری سنگ گرانیت، ۵۰ درصد از حجم محصول گرانیت تمام شده می باشد [۹-۱۰]. در دهه گذشته، متوسط رشد صنعت معدن و فرآوری گرانیت تقریباً ۶ درصد از تولید جهانی در سال بوده است که این امر آن را به مهمترین حوزه تجارت معادن تبدیل کرده است [۱۱]. Montani [۱۲] گزارش داده است که تولید سنگ ساختمانی در سال ۲۰۱۵ معادل ۸۲/۶ میلیون تن بوده و قابل توجه است که پسماند حاصل از فرآوری و استخراج آن حدود ۷۰٪ از مقدار کل آن بوده است. Karmegam و همکاران [۱۳] اظهار داشتند که ذرات گرانیت مقاومت بهتری در برابر سرما، گرما، رطوبت، ترک ها و سائیدگی سطح دارند. محققانی [۱۴-۱۶] از ضایعات پودر گرانیت در بتن معمولی به عنوان جایگزینی برای ریزدانه ها استفاده کرده و گزارش دادند که با در نظر گرفتن ضایعات پودر گرانیت، کارایی بتن کاهش می یابد. با این حال، بهبود ویژگی های مقاومتی توسط بسیاری از محققان دیگر گزارش شده است [۱۴-۱۹]. Ghannam و همکاران [۱۵] پودر گرانیت را تا ماکزیمم مقدار ۲۰ درصد وزنی جایگزین ماسه در بتن معمولی مورد استفاده قرار داده و نتایج بررسی آنها نشان داد که بالاترین مقادیر مقاومت فشاری و ظرفیت خمشی بتن با ضایعات گرانیتی در حدود ۱۰ درصد بدست می آید. Singh و همکاران [۱۴] با جایگزینی ضایعات برشکاری گرانیت با ماسه در درصد های مختلف (تا ماکزیمم مقدار ۵۰ درصد)، بتن معمولی تولید کرده و گزارش دادند که با افزایش درصد گرانیت، مقاومت فشاری و خمشی افزایش پیدا می کند. محققان دیگر [۲۰-۲۱] همچنین مزایای قابل توجهی را در رابطه با بهبود خواص مکانیکی و دوام در بتن های خودتراکم ساخته شده از ضایعات گرانیت گزارش داده اند. Elyamany و همکاران [۲۰] از انواع مختلف پرکننده ها برای تولید بتن های خودتراکم استفاده کردند و گزارش دادند که مقدار مواد افزودنی با افزایش پودر گرانیت افزایش می یابد. آنها همچنین نتیجه گرفتند که با افزودن پودر گرانیت مقاومت فشاری افزایش می یابد. Sadek و همکاران [۲۱]، بتن خود تراکم را با استفاده از پودر گرانیت به عنوان یک ماده افزودنی معدنی تولید کرده و گزارش دادند که با ترکیب ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد پودر گرانیت در مصالح اصلی بتن خودتراکم، مقاومت فشاری به ترتیب ۲۳/۱، ۷/۸ و ۳۹/۳ درصد

¹ Self-Compacting Concrete

نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است. با توجه به تحقیقات انجام شده، در این مطالعه به بررسی اثر جایگزینی درصد‌های مختلف ضایعات گرانیت با ماسه بر رفتار بتن های خود تراکم مقاومت بالا پرداخته شده است.

۲- ضرورت تحقیق

بررسی آمارهای منتشر شده نشان داده است که استان لرستان حدود ۲۷ درصد تولیدات صنعت سنگ را در ایران و سه درصد تولیدات صنعت سنگ دنیا را راهی بازارهای داخلی و خارجی می کند [۲۲]. در حال حاضر بیش از ۴۵۰ واحد سنگبری در استان لرستان در حال فعالیت هستند. بیشتر معادن استان لرستان به سنگ های نما و تزئینی اختصاص دارد به طوری که با داشتن حدود یک چهارم ذخایر سنگ های تزئینی کشور حائز رتبه اول در این زمینه است [۲۳]. آمارهای منتشر شده از سوی محیط زیست استان لرستان نشان داده است که ۶۰ درصد فعالیت سنگبری های استان تبدیل به ضایعاتی می شود که برای محیط زیست مشکلاتی را ایجاد می کند. در این میان باید از دو دیدگاه به چالش ضایعات در صنعت سنگ پرداخت. از یک سو سرمایه ای که به راحتی از پیکره این صنعت در استان لرستان جدا شده و در قالب ضایعات دور ریخته می شود و از سوی دیگر اثرات جبران ناپذیری که این ضایعات بر پیکره محیط زیست وارد می کنند. استفاده از ضایعات حاصل از استخراج سنگ در تولید بتن ساختمانی توجیه پذیر است. با این حال قبل از استفاده از آن در بخش ساخت و ساز لازم است که از کیفیت بتن ساخته شده با ضایعات حاصل از صنعت سنگ اطمینان حاصل گردد. از اینرو در این مطالعه به بررسی اثر جایگزینی درصد‌های مختلف ضایعات سنگ گرانیت با ماسه بر مشخصات مکانیکی و دوام بتن های خود تراکم مقاومت بالا پرداخته شده است. قابل ذکر است که سنگدانه های بازیافتی گرانیتی که با درصد‌های مختلف جایگزین ماسه شده‌اند، عبوری از الک $\frac{3}{4}$ اینچ و مانده روی الک شماره ۴ هستند. قابل ذکر است که عموماً در بتن های خودتراکم از ریز دانه استفاده می گردد. نویسندگان در این مطالعه سعی بر آن داشته اند که برای کاهش هزینه تولید بتن، از سنگدانه های خارج از محدوده ریز دانه برای تولید بتن خود تراکم استفاده کنند. از اینرو، یکی دیگر از نوآوری این مطالعه، استفاده از سنگدانه های مانده روی الک شماره ۴ و جایگزینی آنها با ماسه می باشد. فلوجارت روند پژوهش در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱: فلوجارت روند پژوهش.

۳- برنامه آزمایشگاهی

در این بخش به بیان جزئیات مصالح مصرفی، طرح های اختلاط و آزمایش های انجام شده پرداخته شده است.

۳-۱- مواد و مصالح مصرفی

در ساخت نمونه های بتنی در این پژوهش، از ریزدانه، سنگدانه گرانیتی بازیافتی، سیمان، الیاف فولادی و فوق روان کننده استفاده شده است. مصالح سنگی ریزدانه، همگی از الک شماره ۴ با قطر چشمه ی $\frac{4}{75}$ میلی متر عبور داده شده‌اند. لازم به ذکر است که ماسه مصرفی از کارخانه های اطراف شهرستان خرم آباد تهیه شده است. همچنین سنگدانه های بازیافتی گرانیتی که با درصد های ۲۰ و ۴۰ درصد

جایگزین ماسه شده‌اند، از الک ۳/۴ اینچ عبور داده شده‌اند و مانده روی الک شماره ۴ هستند. شایان ذکر است که سنگدانه‌های مصرفی به صورت کاملاً اشباع با سطح خشک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. سنگدانه‌های مورد استفاده در این مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است.

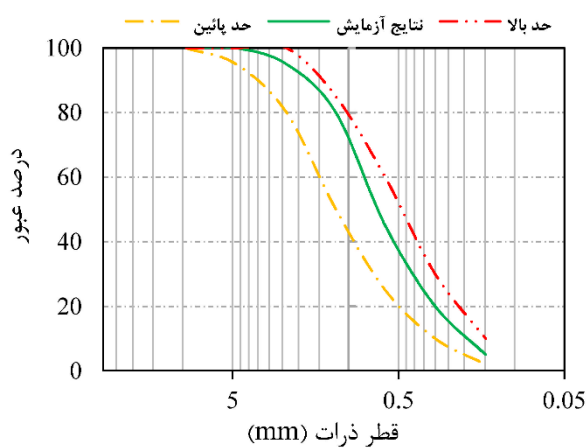


(ب) ریز دانه



(الف) سنگدانه های گرانیتی

شکل ۲: سنگدانه‌های استفاده شده در ساخت بتن SCC.



شکل ۳: نمودار دانه بندی ماسه.

جدول ۱: خصوصیات شیمیایی سیمان مورد استفاده.

ردیف	مشخصه شیمیایی	درصد موجود	استاندارد ۳۸۹ ملی ایران
۱	SiO ₂	۲۱/۱۰	حداقل ۲۰
۲	Al ₂ O ₃	۴/۳۷	حداکثر ۶
۳	Fe ₂ O ₃	۳/۸۸	حداکثر ۶
۴	CaO	۶۳/۴۳	-
۵	MgO	۱/۵۶	حداکثر ۵
۶	SO ₃	۲/۷۸	حداکثر ۳
۷	K ₂ O	۰/۵۲	-
۸	Na ₂ O	۰/۳۹	-
۹	L.O.I	۲/۲۲	حداکثر ۳
۱۰	I.R	۰/۴۵	حداکثر ۰/۷۵
۱۱	F.CaO	۱/۱۲	-
۱۲	LSF	۹۲/۳	-
۱۳	SIM	۲/۵۶	-
۱۴	ALM	۱/۱۳	-
۱۵	C ₃ S	۵۱/۰	-
۱۶	C ₂ S	۲۲/۷	-
۱۷	C ₃ A	۵/۱	حداکثر ۸
۱۸	C ₄ AF	۱۱/۹	-

برای بررسی کیفیت سنگدانه های گرانیته، آزمایش مقاومت فشاری بر روی ۶ نمونه معکبی به ابعاد ۵ سانتی متر انجام گرفته است. نمونه های معکبی گرانیته از تکه سنگ همگن گرانیته تهیه شده از کارخانه های تولید سنگ های تزیینی، با برش دادن تهیه شده اند. نمونه ها از تکه سنگ های مختلف برداشت شده و در هر برداشت دو آزمون تهیه شده است. بر اساس این آزمایش، میانگین مقاومت فشاری نمونه های گرانیته به ترتیب برای نمونه های شماره ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر با ۱۶۹/۷، ۱۵۰/۴ و ۱۵۶/۹ مگاپاسگال بدست آمده است. آزمایش دانه بندی ماسه بر اساس استاندارد ASTM C136 انجام گرفته است. نتایج آزمایش دانه بندی ماسه در شکل ۳ نشان داده شده است. از سیمان پرتلند تیپ دو تولید شده در کارخانه سیمان شهر دورد در ساخت نمونه ها استفاده شده است. چگالی این نوع سیمان 3100 kg/m^3 بوده و در طول مدت زمان ساخت نمونه ها، کیسه های سیمان به صورت مرتب و با فاصله مناسب از سطح زمین و به دور از هرگونه رطوبت نگهداری شدند. خصوصیات شیمیایی و فیزیکی سیمان مصرف شده، در جداول ۱ و ۲ بیان شده است.

الیاف مصرفی در این مطالعه از نوع الیاف فولادی دو سر قلاب با طول ۵ سانتی متر و قطر ۰/۸ میلی متر می باشد. نسبت طول به قطر این نوع الیاف ۶۲/۵ می باشد. برای اختلاط مناسب الیاف با بتن و ترکیب شدن با مخلوط بتن، با در نظر گرفتن زمان مناسبی اجازه ترکیب بهتر با الیاف فولادی بدون ایجاد مشکل گلوله شدن و یا توزیع غیریکنواخت الیاف در مخلوط داده شده است. این کار با تلاش بسیار و دقت بالایی انجام گرفته است. الیاف مورد استفاده و خصوصیات آن به ترتیب در شکل ۴ و جدول ۳ نشان داده شده است.

برای رسیدن به روانی و کارایی لازم در بتن خودتراکم، استفاده از فوق روان کننده الزامی است. در این مطالعه برای رسیدن به روانی و کارایی لازم از فوق روان کننده با پایه شیمیایی پلی کربوکسیالت و نام تجاری REONET استفاده شده است. از ویژگی های این فوق روان کننده می توان به مواردی همچون کاهش قابل ملاحظه نسبت آب به سیمان (امکان ساخت بتن خودتراکم با نسبت آب به سیمان ۰/۳ تا ۰/۴)، کاهش آب انداختگی و جداسازی سنگدانه ها، بهبود خروج حباب های محبوس از بتن، افزایش انسجام بتن و سازگار با انواع سیمان های پرتلند اشاره نمود. نحوه اضافه کردن فوق روان کننده به مخلوط بتن بدین صورت انجام شده است که بعد از مخلوط کردن ماسه، سنگدانه گرانیته و سیمان با ۹۰ درصد میزان آب، مقدار فوق روان کننده با ۱۰ درصد باقی مانده میزان آب ترکیب شده و سپس به مخلوط اضافه گردیده است.

جدول ۲: خصوصیات فیزیکی سیمان مورد استفاده.

ردیف	مشخصه شیمیایی	میانگین	استاندارد ۳۸۹ ملی ایران
۱	نرمی (بلین) (cm^2/gr)	۳۱۴۱	حداقل ۲۸۰۰
۲	انبساط (%)	۰/۰۳	حداکثر ۰/۸
۳	زمان گیرش اولیه (دقیقه)	۱۴۰	حداقل ۴۵
۴	زمان گیرش نهایی (ساعت)	۳:۱۵	حداکثر ۶
۵	مقاومت فشاری ۳ روزه (MPa)	۲۱/۲	حداقل ۱۰۰
۶	مقاومت فشاری ۷ روزه (MPa)	۳۴/۴	حداقل ۱۷۵
۷	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	۴۵/۵	حداقل ۳۱۵



شکل ۴: الیاف مورد استفاده در ساخت نمونه ها.

جدول ۳: خصوصیات الیاف فولادی دو سر قلاب.

طول (cm)	نسبت ابعادی	وزن مخصوص (kg/m^3)	مدول یانگ (GPa)	مقاومت کششی (Mpa)
۵	۶۲/۵	۷۸۵۰	۲۰۰	۱۱۰۰

۳-۲- مشخصات طرح اختلاط

مشخصات طرح اختلاط برای بتن SCC در جدول ۴ نشان داده شده است. در مجموع نه طرح تهیه شده که در آن یک طرح اختلاط بدون سنگدانه های گرانیتهی و الیاف فولادی به عنوان طرح شاهد تهیه شده است. هشت طرح اختلاط باقی مانده برای درصدهای مختلف سنگدانه های گرانیتهی یا الیاف در نظر گرفته شده اند. سطح ۲۰ و ۴۰ درصد وزن ریز دانه برای جایگزینی سنگدانه های گرانیتهی با ریزدانه در نظر گرفته شده است. در همه طرح های اختلاط نسبت آب به سیمان بصورت ثابت و برابر با ۰/۳۲ در نظر گرفته شده است. در نام طرح های در نظر گرفته شده عدد بعد از S نشان دهنده درصد ریزدانه مورد استفاده، عدد بعد از G نشان دهنده درصد گرانیتهی جایگزین شده و عدد بعد از SF نشان دهنده درصد حجمی الیاف فولادی می باشد.

جدول ۴: جزئیات طرح های اختلاط.

شماره طرح	نام طرح	نسبت سیمان به سنگدانه	سنگدانه		الیاف فولادی (%)	نسبت آب به سیمان	فوق روان کننده (gr/m^3)
			ماسه (%)	گرانیت (شن) (%)			
۱	S100-G0-SF0	۰/۴	۱۰۰	۰	۰	۰/۳۲	۹۶۰
۲	S100-G0-SF0.5	۰/۴	۱۰۰	۰	۰/۵	۰/۳۲	۹۶۰
۳	S100-G0-SF1.0	۰/۴	۱۰۰	۰	۱/۰	۰/۳۲	۹۶۰
۴	S80-G20-SF0	۰/۴	۸۰	۲۰	۰	۰/۳۲	۹۶۰
۵	S80-G20-SF0.5	۰/۴	۸۰	۲۰	۰/۵	۰/۳۲	۹۶۰
۶	S80-G20-SF1.0	۰/۴	۸۰	۲۰	۱/۰	۰/۳۲	۹۶۰
۷	S60-G40-SF0	۰/۴	۶۰	۴۰	۰	۰/۳۲	۹۶۰
۸	S60-G40-SF0.5	۰/۴	۶۰	۴۰	۰/۵	۰/۳۲	۹۶۰
۹	S60-G40-SF1.0	۰/۴	۶۰	۴۰	۱/۰	۰/۳۲	۹۶۰

۳-۳- آزمایش های انجام شده

در این بخش جزئیات مربوط به آزمایش های انجام شده ارائه شده است. آزمایش های بتن تازه در برگیرنده آزمایش های جعبه- L و جعبه- U و آزمایش های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، شکل پذیری، طاقت خمشی و مقاومت کششی برای ارزیابی عملکرد بتن سخت شده انجام گرفته است.

۳-۳-۱- آزمایش جعبه- L

هدف از انجام این آزمایش ارزیابی روانی بتن و بررسی وقوع پدیده انسداد در حال عبور از میلگردها است. در فصل مشترک قسمت افقی و قائم جعبه، تعدادی آرماتور تعبیه شده که بتن پس از باز شدن دریچه متحرک، تحت اثر وزن خود جریان یافته و با عبور از شبکه آرماتور وارد قسمت افقی جعبه می شود (شکل ۵). با توقف جریان بتن، با محاسبه ارتفاع بتن در قسمت افقی جعبه و همچنین در قسمت قائم بتن و تقسیم این دو عدد بر همدیگر، شیب بتن در حالت سکون بدست می آید. شیب بتن در حالت سکون، قابلیت جریان عبور بتن از میلگردها را به دست می دهد. براساس استاندارد EN 12350-10 [۲۴]، حدود ۱۴ لیتر بتن را در جعبه L- شکل ریخته و بعد از گذشت یک دقیقه با باز کردن دریچه و شروع زمان گیری با کرنومتر، بتن از میلگردها عبور کرده و وارد قسمت افقی جعبه می گردد. در فواصل ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی متری قسمت افقی جعبه، زمان رسیدن بتن به این نواحی را ثبت شده است. با تعیین ارتفاع بتن در قسمت قائم (H_1) و ارتفاع بتن در انتهای قسمت افقی (H_2)، نسبت (H_2/H_1) که نسبت ضریب انسداد یا نسبت بلوکه شدن نامیده می شود، محاسبه می گردد. هرچه روانی بتن بالاتر باشد، ارتفاع H_1 و H_2 به همدیگر نزدیک بوده و ضریب انسداد به عدد ۱ میل می کند. هرچه روانی بتن کمتر باشد، ضریب انسداد به صفر میل می کند. هرچند که معیار مشخصی برای این نسبت وجود ندارد، اما بر اساس تجربیات محققین گذشته، محدوده ۰/۸ تا ۱ برای نسبت بلوکه شدن در بتن خودتراکم قابل قبول است [۲۵ و ۲۶].

۳-۳-۲- آزمایش جعبه- U

این آزمایش در مرکز تحقیقات تکنولوژی شرکت Taisei ژاپن ابداع و گسترش یافت و برای ارزیابی قابلیت روانی (پرکردن) بتن خودتراکم به کار می رود. جعبه ی این آزمایش U شکل بوده و با یک ورق متحرک به دو قسمت تقسیم می شود (شکل ۶). میلگردهای با قطر اسمی ۱۳ میلی متر در پشت دریچه تعبیه شده است. فاصله مرکز تا مرکز میلگردها ۵۰ میلی متر و فاصله آزاد میلگردها تقریباً ۳۵ میلی متر است. بر اساس استاندارد UNI 11044 [۲۷] سطح داخلی جعبه U شکل را مرطوب کرده و دریچه پایینی جعبه بسته شده است. سپس حدود ۲۰ لیتر بتن در قسمت سمت چپ جعبه ریخته شده و پس از مدت یک دقیقه با برداشتن ورق متحرک میانی، بتن از سمت چپ

جعبه به سمت راست جعبه جریان پیدا خواهد کرد. با توقف جریان بتن، ارتفاع بتن در هر دو سمت جعبه اندازه گیری و با پارامترهای H_1 و H_2 نامگذاری می شوند. اختلاف ارتفاع این دو مقدار را با پارامتری به نام اختلاف ارتفاع پر کردن ثبت خواهد شد. هرچه اختلاف ارتفاع پر کردن به صفر نزدیک تر باشد، بتن روانی بهتری دارد [۲۸].



شکل ۶: دستگاه آزمایش جعبه-U.



شکل ۵: دستگاه آزمایش جعبه-L.



شکل ۷: نمونه های مورد استفاده در آزمایش مقاومت فشاری.

۳-۳-۳- آزمایش مقاومت فشاری

برای تعیین مقاومت فشاری تعداد ۲۷ نمونه فشاری مکعبی (سه نمونه از هر طرح اختلاط) بر اساس ۹ طرح اختلاط ارائه شده در جدول ۴ به اضلاع ۱۰ سانتی متر ساخته و آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ASTM C39 [۲۹] بر روی این نمونه ها انجام گرفته است. آزمایش بر روی نمونه ها در سن ۲۸ روزه و با استفاده از یک جک ۲۰۰ تنی انجام شده است. نمونه های مورد استفاده در شکل ۷ نشان داده شده اند.

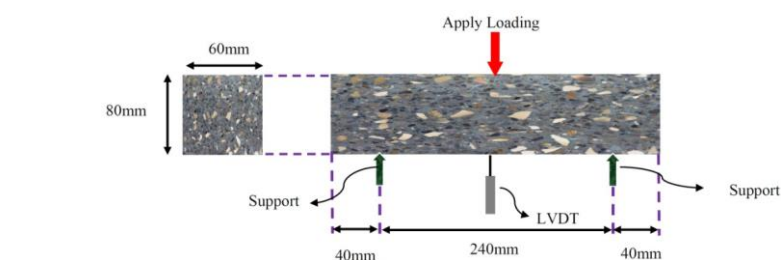
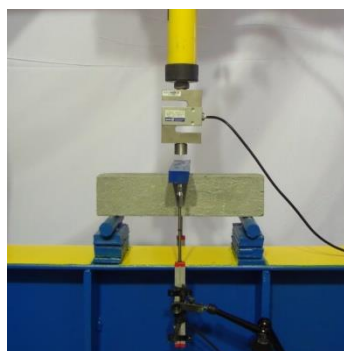
۳-۳-۴- آزمایش عملکرد خمشی

در این آزمایش تیرهای خمشی با ابعاد $32 \times 8 \times 6$ cm بر اساس استاندارد ASTM C1609 [۳۰] مورد آزمایش خمش سه نقطه ای (اعمال بار متمرکز در وسط دهانه) قرار گرفته اند. نمونه ها در سن ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفته و فاصله بین تکیه گاه ها از یکدیگر برابر ۲۴ سانتیمتر می باشد. نیروی متمرکز وارد بر وسط دهانه تیر با استفاده از جک خمشی اعمال و این نیرو تا لحظه ایجاد شکست به آرامی

افزایش (1.0 MPa/min) می یابد. نیروی وارده در هر ۰/۱ ثانیه با استفاده از یک دستگاه Load Cell ده تنی و استفاده از یک دستگاه Data Logger ثبت و گزارش خواهد شد. نمونه ها و دستگاه مورد استفاده در این آزمایش در شکل ۸ نشان داده شده است.



الف) نمونه های مورد استفاده در تست خمش



ب) شکل شماتیک و دستگاه تست خمش

شکل ۸: نمونه ها و تجهیزات مورد استفاده در آزمایش خمش سه نقطه ای.



شکل ۹: انجام آزمایش مقاومت کششی.

۳-۳-۵- آزمایش مقاومت کششی

جهت بررسی تاثیر الیاف فولادی و سنگدانه گرانیتهی بازیافتی بر مقاومت کششی بتن خودتراکم توانمند ساخته شده در این پژوهش، تعداد ۲۷ نمونه استوانه ای به قطر ۱۰۰ میلیمتر و ارتفاع ۲۰۰ میلیمتر بر اساس استاندارد ASTM C496 [۳۱] مورد آزمایش قرار گرفته است. لازم به ذکر است که از هر طرح اختلاط ۳ نمونه ساخته شده است. در شکل ۹ نمایی از انجام آزمایش کشش برزیلی آمده است.

۴- نتایج آزمایش ها

در این بخش نتایج آزمایش های اشاره شده در بخش قبل ارائه و نتایج مورد تفسیر قرار گرفته است.

۴-۱- آزمایش جعبه-L

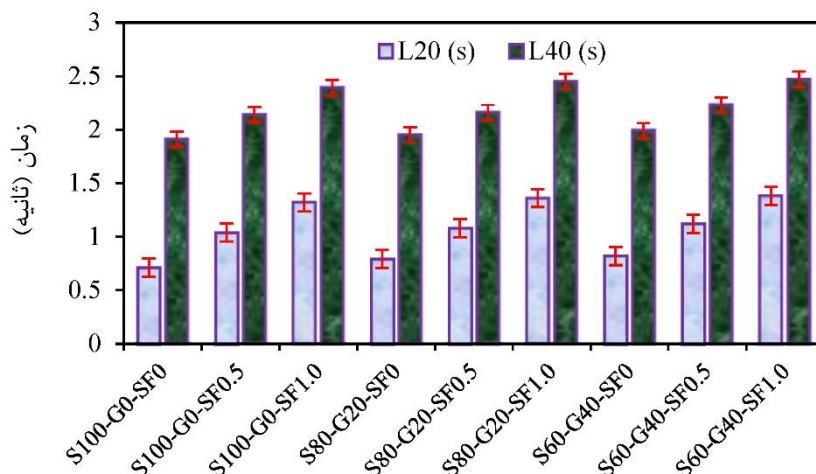
نتایج آزمایش جعبه-L در جدول ۵ آمده است. لازم به ذکر است که محدوده قابل قبول برای نسبت (H_2/H_1) بین ۰/۸ تا ۱ می‌باشد [۲۵ و ۲۶]. هرچه این نسبت به عدد یک نزدیک‌تر باشد بیانگر برابری ارتفاع بتن در دو ناحیه است که این بدین معنی است که بتن قابلیت عبور از آرماتور و کارایی مطلوبی دارد. نتایج نشان داده شده بیانگر آن است تمامی طرح‌ها در محدوده قابل قبول قرار گرفته‌اند. در نمونه‌های بدون سنگدانه‌های گرانیته، نسبت (H_2/H_1) با افزایش درصد الیاف کاهش یافته که دلیل آن ایجاد ساختاری درهم تنیده تر به علت وجود الیاف می‌باشد. از سوی دیگر در نمونه‌های بدون الیاف فولادی، نسبت (H_2/H_1) با افزایش درصد جایگزینی گرانیته با ریزدانه کاهش یافته است. همچنین با تعیین L_{20} و L_{40} که بیانگر زمان طی شده برای رسیدن بتن به فواصل ۲۰۰ و ۴۰۰ میلیمتری قسمت افقی جعبه از قسمت قائم است، مقایسه‌ای در مورد میزان روانی و کارایی طرح اختلاط‌های مورد استفاده انجام شده است. نتایج بدست آمده در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج بیانگر آن است که با افزایش میزان سنگدانه گرانیته و درصد الیاف فولادی، زمان رسیدن به این فواصل نیز افزایش می‌یابد که این امر بر کاهش میزان کارایی دلالت دارد.

۴-۲- آزمایش جعبه-U

نتایج این آزمایش (جدول ۶) را می‌توان با به دست آوردن اختلاف ارتفاع بتن در دو محفظه تفسیر کرد. هرچه اختلاف ارتفاع بتن در دو محفظه به صفر نزدیک باشد، روانی و قابلیت عبور بتن بیشتر بوده و هرچه این مقدار بیشتر باشد، ویسکوزیته و تنش تسلیم بتن نیز بیشتر است که امکان بروز پدیده انسداد را افزایش می‌دهد. حداکثر اختلاف ارتفاع بتن در دو محفظه برای بتن خود تراکم بایستی کمتر از ۳ سانتیمتر باشد [۳۲]. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که با افزایش میزان سنگدانه گرانیته و درصد الیاف فولادی، روانی بتن کاهش یافته و اختلاف ارتفاع تعیین شده نیز روند صعودی دارد. در نمونه‌های بدون سنگدانه گرانیته، اختلاف ارتفاع بدست آمده با اضافه کردن ۰/۵ و ۱/۰ درصد الیافی فولادی به ترتیب ۱/۳ و ۲ برابر افزایش داشته است. از سوی دیگر با اضافه کردن ۲۰ و ۴۰ درصد سنگدانه گرانیته به نمونه‌های بدون الیاف، افزایشی به ترتیب برابر با ۱۳/۵ و ۲۶/۸ درصدی مشاهده شده است

جدول ۵: نتایج آزمایش جعبه-L.

شماره	طرح اختلاط	H ₁ (cm)	H ₂ (cm)	$\frac{H_2}{H_1}$	محدوده مجاز	وضعیت
۱	S100-G0-SF0	۸/۶۲	۸/۴۱	۰/۹۸	۱-۰/۸	قابل قبول
۲	S100-G0-SF0.5	۹/۰۲	۸/۲۶	۰/۹۲	۱-۰/۸	قابل قبول
۳	S100-G0-SF1.0	۹/۷۱	۸/۱۱	۰/۸۴	۱-۰/۸	قابل قبول
۴	S80-G20-SF0	۸/۶۵	۸/۳۶	۰/۹۷	۱-۰/۸	قابل قبول
۵	S80-G20-SF0.5	۹/۰۷	۸/۲۴	۰/۹۱	۱-۰/۸	قابل قبول
۶	S80-G20-SF1.0	۹/۷۳	۸/۰۳	۰/۸۳	۱-۰/۸	قابل قبول
۷	S60-G40-SF0	۸/۷۴	۸/۳۸	۰/۹۶	۱-۰/۸	قابل قبول
۸	S60-G40-SF0.5	۹/۱۷	۸/۲۸	۰/۹۰	۱-۰/۸	قابل قبول
۹	S60-G40-SF1.0	۹/۷۵	۷/۹۲	۰/۸۱	۱-۰/۸	قابل قبول



شکل ۱۰: مقایسه زمانی L20 و L40 در آزمایش جعبه-L.

جدول ۶: نتایج آزمایش جعبه-U.

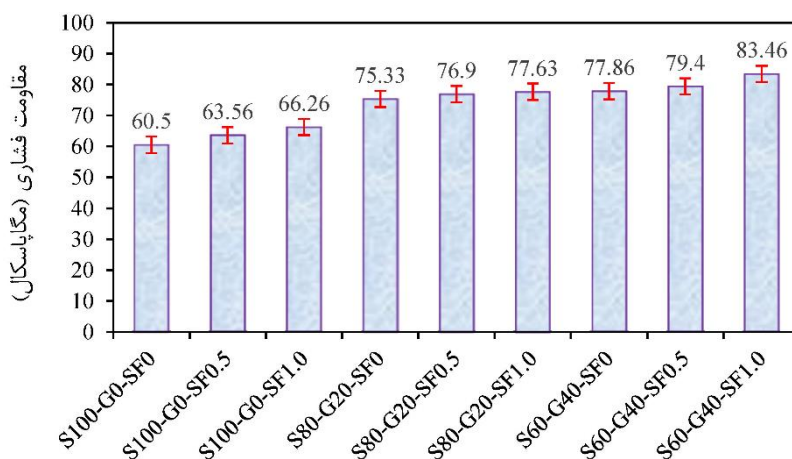
شماره	طرح اختلاط	H ₁ (mm)	H ₂ (mm)	H ₁ - H ₂	محدوده مجاز (mm)	وضعیت
۱	S100-G0-SF0	۳۱۴/۱۴	۲۹۵/۸۶	۸/۲۸	۳۰-۰	قابل قبول
۲	S100-G0-SF0.5	۳۰۹/۴۵	۲۹۰/۵۵	۱۸/۹	۳۰-۰	قابل قبول
۳	S100-G0-SF1.0	۳۱۲/۶۳	۲۸۷/۳۷	۲۵/۲۶	۳۰-۰	قابل قبول
۴	S80-G20-SF0	۳۰۴/۷	۲۹۵/۳	۹/۴	۳۰-۰	قابل قبول
۵	S80-G20-SF0.5	۳۱۰/۵۱	۲۸۹/۴۹	۲۱/۰۲	۳۰-۰	قابل قبول
۶	S80-G20-SF1.0	۳۱۳/۶۹	۲۸۶/۳۱	۲۷/۳۸	۳۰-۰	قابل قبول
۷	S60-G40-SF0	۳۰۵/۲۵	۲۹۴/۷۵	۱۰/۵	۳۰-۰	قابل قبول
۸	S60-G40-SF0.5	۳۱۰/۸۷	۲۸۹/۱۳	۲۱/۷۴	۳۰-۰	قابل قبول
۹	S60-G40-SF1.0	۳۱۳/۸۷	۲۸۵/۲۶	۲۸/۴۴	۳۰-۰	قابل قبول

۴-۳- آزمایش مقاومت فشاری

پس از انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه های ساخته شده، نتایج آن در شکل ۱۱ ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده قابل بیان است که استفاده از ۰/۵ درصد الیاف فولادی بطور میانگین سبب افزایش ۵/۰۶ درصدی مقاومت فشاری شده است. این در حالی است که یک درصد الیاف فولادی، مقاومت فشاری را به میزان ۹/۵۲ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش داده است. در مورد تاثیر سنگدانه گرانیته بر مقاومت فشاری به وضوح مشخص است که همچون الیاف، مقاومت فشاری به دلیل استفاده از سنگدانه گرانیته افزایش یافته است. نتایج مشابهی توسط سایر محققین نیز بدست آمده است [۸ و ۱۳]. این افزایش برای درصدهای جایگزینی ۲۰ و ۴۰ درصد به ترتیب برابر با ۲۰/۸۸ و ۲۶/۵۲ درصد می باشد.

بنابر نتایج بدست آمده، شاهد تاثیر مثبت الیاف فولادی و سنگدانه گرانیته بر مقاومت فشاری نمونه های مکعبی بتنی مورد بررسی می باشیم. قابل ذکر است که تاثیر سنگدانه گرانیته بر مقاومت فشاری چشمگیرتر از اثر الیاف فولادی می باشد. قابل ذکر است که نرخ افزایش مقاومت در نمونه های حاوی ۲۰ درصد سنگدانه گرانیته بیشتر از نرخ افزایش نسبت به نمونه حاوی ۴۰ درصد سنگدانه گرانیته بوده است [۴]. علت این امر در دو موضوع قابل بیان است. اولاً با افزایش میزان جایگزینی سنگدانه گرانیته به میزان ۴۰ درصد، ماسه به خوبی فضای بین سنگدانه های گرانیته را پر نکرده و این سبب بروز ریز فضاهای خالی (تخلخل) بیشتر در بتن می شود [۳۳]. زمانی که نمونه تحت نیروی فشاری قرار می گیرد، نیرو در راستای ضعیف حرکت کرده و سبب رخداد ریز ترک اولیه شده و با افزایش نیرو، ریز ترکها گسترش یافته و سبب گسیختگی نمونه بتنی می شود. دلیل دوم بر این موضوع استوار است که با افزایش ۴۰ درصدی میزان سنگدانه گرانیته و با توجه به مقاومت فشاری بالای گرانیته و رفتار شکننده آن تحت فشار در نیروهای بالا، بتن رفتار تردی پیدا می کند. استدلال

اشاره شده در مرجع [۴] به تفضیل مورد بررسی قرار گرفته است. ضعف در منطقه انتقالی پیرامون سنگدانه‌های گرانیته می‌تواند یکی از دلایل ترک خوردگی اولیه باشد. قابل ذکر است که بزرگترین بعد سنگدانه گرانیته ۱/۷ سانتی‌متر می‌باشد و هرچه اندازه سنگدانه‌های گرانیته بیشتر می‌شود، طبیعتاً منطقه انتقالی بزرگتری را هم خواهند داشت، بدان معنی که در محدوده بزرگتری شاهد ترک‌های اولیه بیشتری هستیم.



شکل ۱۱: نتایج آزمایش مقاومت فشاری.

۴-۳- آزمایش عملکرد خمشی

پس از انجام آزمایش عملکرد خمشی بر روی نمونه تیرهای بتنی بر اساس طرح اختلاط‌های موردنظر، نتایج آزمایش خمش به صورت سه نقطه‌ای (اعمال بار متمرکز به وسط دهانه) بصورت مقادیر نیروی بیشینه تحمل شده، مقاومت خمشی، تغییرشکل متنظر با مقاومت خمشی (Δ_y) و تغییرشکل نهایی (Δ_u) در جدول ۷ ارائه شده است. در محاسبه مقاومت خمشی نمونه‌های منشوری، با برداشت بیشینه نیروی تحمل شده توسط نمونه و با استفاده از رابطه زیر، مقاومت خمشی آنها محاسبه شده است.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (1)$$

در این رابطه، L ، F و b و h به ترتیب حداکثر نیروی خمشی تحمل شده، طول تیر، عرض تیر و ارتفاع تیر می‌باشد.

جدول ۷: نتایج آزمایش رفتار خمشی.

شماره	طرح اختلاط	بیشینه نیرو (kN)	مقاومت خمشی (MPa)	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)
۱	S100-G0-SF0	۳۳۶۰	۴/۲	۰/۱۶	۰/۱۶
۲	S100-G0-SF0.5	۶۷۶۹/۴	۸/۵	۰/۵۲	۳/۷
۳	S100-G0-SF1.0	۷۸۳۱	۹/۸	۰/۷۱	۵/۶
۴	S80-G20-SF0	۳۸۴۰	۴/۸	۰/۶۲	۰/۶۲
۵	S80-G20-SF0.5	۸۱۹۰/۹	۱۰/۲	۰/۶۷	۶/۲
۶	S80-G20-SF1.0	۹۵۷۴/۴	۱۱/۹	۰/۷	۷/۷
۷	S60-G40-SF0	۳۹۲۰	۴/۹	۰/۶۵	۰/۶۵
۸	S60-G40-SF0.5	۸۵۹۵/۶	۱۰/۸	۰/۷۴	۷/۷
۹	S60-G40-SF1.0	۹۹۴۹/۲	۱۲/۴	۰/۸۲	۱۰

با توجه به نتایج بدست آمده، با افزایش میزان درصد الیاف فولادی و درصد سنگدانه گرانیته، مقاومت خمشی نمونه‌ها نیز افزایش یافته است. روند افزایشی مقاومت خمشی، از طرح اختلاط شماره ۱ تا طرح اختلاط شماره ۶ شیب بیشتری نسبت به سیر صعودی از طرح

۷ تا ۹ را دارا می باشد. در نمونه های بدون سنگدانه گرانیتی (طرح ۱ تا ۳)، افزایش درصد الیاف فولادی از صفر در نمونه شاهد به نیم (S100-G0-SF0.5) و یک (S100-G0-SF1.0) درصد به ترتیب سبب افزایش ۱۰۲ و ۱۳۵ درصدی در مقاومت خمشی شده است. در همین گروه قابل ذکر است که تغییر مکان نهایی وسط تیرها نیز به ترتیب افزایش ۲۳ و ۳۵ برابر داشته است. در نمونه های بدون الیاف فولادی و با درصدهای جایگزینی ۲۰ و ۴۰ درصد از ماسه با سنگدانه های گرانیتی، قابل مشاهده است که مقاومت خمشی به ترتیب ۱۴/۲۸ و ۱۶/۷ درصدی داشته است. نتایج بدست آمده با یافته‌های محققان دیگر نیز مطابقت داشته و آنها نیز بهبود مقاومت خمشی را با افزایش میزان جایگزینی سنگدانه گرانیتی با ریزدانه گزارش نمودند [۱۸ و ۳۴]. بررسی اثر همزمان سنگدانه های گرانیتی و الیاف فولادی نشان داده است که بیشترین مقاومت خمشی در نمونه S60-G40-SF1.0 که حاوی ۴۰ درصد جایگزینی و یک درصد الیاف می باشد بدست آمده است. در نمونه S60-G40-SF1.0، مقاومت خمشی، جابجایی متناظر با مقاومت خمشی و جابجایی نهایی به ترتیب به میزان ۲، ۴ و ۶۱ برابر رشد داشته است. در شکل ۱۲ رشد ترک در تیرهای بتنی با درصد الیاف صفر، ۰/۵ و ۱ درصد نشان داده شده است.



(الف) نمونه بدون الیاف



(ب) نمونه با الیاف نیم درصد



(پ) نمونه با الیاف یک درصد

شکل ۱۲: رشد ترک و شکست در نمونه های با درصد الیاف مختلف.

در مورد شکست خمشی تیرهای بتنی قابل ذکر است که تیرهای بدون الیاف فولادی، بلافاصله پس از رخ دادن اولین ترک، به دونیم تقسیم می شدند. در مورد رفتار و نحوه تاثیر الیاف فولادی بر افزایش مقاومت خمشی و شکل پذیری نمونه تیرهای بتنی قابل بیان است که با افزایش درصد الیاف فولادی مورد استفاده در نمونه تیرهای بتنی مورد آزمایش، مقاومت خمشی تیر افزایش یافته و شکست

خمشی به صورت شکل پذیر رخ داده است. الیاف فولادی دارای مورد استفاده در این مطالعه دارای دو ناحیه مختلف می باشد. ناحیه اول شامل طول الیاف است که دارای امواج سینوسی است. ناحیه دوم به دو قسمت انتهایی الیاف اطلاق می شود که به صورت قلاب برای ایجاد درگیری بهتر با خمیر سیمان درآمده اند. درگیری بین الیاف فولادی و خمیر سیمان و به دنبال آن ایجاد اصطکاک و اتلاف نیروی وارد بر بتن، به علت شکل خاص این دو ناحیه از الیاف می باشد. زمانی که بتن تحت اثر نیروهای کششی قرار می گیرد، به علت ضعف بتن در کشش، الیاف فولادی نقش اصلی را در جذب انرژی و کاهش تنش های کششی و خمشی وارد بر بتن بر عهده دارد.

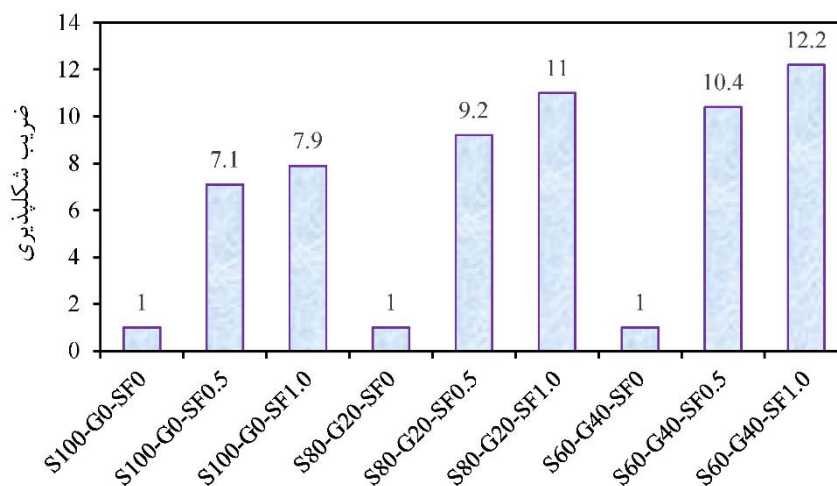
مکانیزم رفتاری الیاف فولادی تحت نیروهای کششی بدین صورت است که ابتدا الیاف فولادی با ایجاد اصطکاک و درگیری مناسب با بتن، به واسطه ی اعوجاج طولی خود، تحمل نیروی کششی را تا زمانی ادامه می دهند که ناحیه اول، حالت اعوجاج خود را از دست داده و صاف می شود. در این مرحله مسئولیت تحمل نیروهای کششی از ناحیه اول به ناحیه دوم منتقل می شود و دو سر الیاف با ایجاد درگیری مناسب با خمیر سیمان، ادامه روند تحمل نیروی کششی را فراهم می کنند. با افزایش میزان نیروی کششی، الیاف فولادی به مرور قابلیت تحمل خود را از دست می دهد و سبب شکست بتن می شود. در واقع رفتار الیاف در این حالت (درگیری ناحیه دوم) به دو صورت ممکن است رخ دهد. حالت اول این که الیاف با درگیری مطلوب با بتن به کمک دو سر قلاب خود، در طول خود دچار بریدگی می شود و سبب از دست رفتن قابلیت تحمل نیروهای کششی شده که در نتیجه منجر به ترک خوردگی و سپس شکست بتن می شود. این حالت رفتاری مطلوب برای الیاف فولادی می باشد و بدین موضوع دلالت دارد که خمیر سیمان و الیاف در دو انتهای الیاف، به طور مناسبی درگیر شده و بیرون زدگی الیاف از بتن رخ نمی دهد. حالت دوم بدین صورت است که دو سر قلاب الیاف فولادی با بتن درگیری مطلوبی نداشته و با افزایش نیروی کششی، الیاف از بتن جدا شده و پدیده ی بیرون کشیدگی الیاف فولادی رخ می دهد.

برای بررسی دقیقتر رفتار خمشی نمونه ای منشوری ساخته شده در ادامه ضریب شکل پذیری و میزان جذب انرژی آنها مورد مقایسه قرار گرفته است. در این مطالعه شکل پذیری بصورت نسبت تغییرمکان نهایی به تغییرمکان مقاومت خمشی تعریف شده است. ضریب شکل پذیری تیرها مطابق تعریف انجام شده در شکل ۱۳ نشان داده شده است. با توجه نتایج حاصل از ضریب شکل پذیری و با علم به این موضوع که عامل اصلی تاثیرگذار بر شکل پذیری الیاف فولادی است، می توان اشاره نمود که نمونه های ساخته شده بر اساس طرح اختلاط های بدون الیاف فولادی (S100-G0-SF0، S80-G20-SF0 و S60-G40-SF0) فاقد شکل پذیری هستند و شکست تندی دارند. عدد یک در معیار شکل پذیری در نتایج فوق بر این امر دلالت دارد. با افزایش میزان درصد الیاف فولادی، شکل پذیری تیرها افزایش یافته و در طرح S60-G40-SF1.0 بیشترین میزان ضریب شکل پذیری بدست آمده است. انرژی جذب شده توسط نمونه تیرهای خمشی، که پارامتری مهم برای تعیین میزان توانایی در اتلاف انرژی خمشی اعمالی بر نمونه هاست، از تعیین مساحت زیر نمودار نیرو-تغییرمکان حاصل می شود. نتایج جذب انرژی در شکل ۱۴ نشان داده شده است. با توجه نتایج بدست آمده قابل مشاهده است که در طرح اختلاط هایی که در آنها الیاف فولادی استفاده نشده، مقدار جذب انرژی ناچیز است. در طرح اختلاط هایی که در ساخت آنها از ۰/۵ درصد الیاف فولادی استفاده شده (S100-G0-SF0.5، S80-G20-SF0.5 و S60-G40-SF0.5)، به وضوح تاثیر مثبت الیاف فولادی بر جذب انرژی نمونه ها قابل مشاهده است. با افزایش درصد الیاف فولادی از ۰/۵ به یک درصد، شاهد افزایش قابل توجه جذب انرژی می باشیم. از اینرو قابل ذکر است که با افزایش درصد الیاف فولادی در نمونه تیرهای خمشی، جذب انرژی نمونه ها افزایش پیدا می کند.

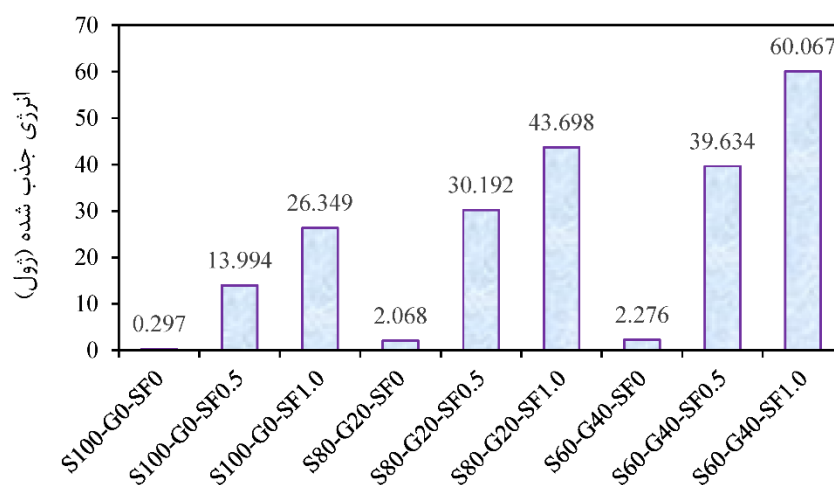
افزایش شکل پذیری را می توان به عنوان مهمترین اثر الیاف بر رفتار نمونه های بتنی مسلح دانست. از اینرو اندازه گیری طاقت خمشی در مطالعات انجام شده توسط محققین بر روی نمونه های الیافی مورد توجه می باشد. تعیین طاقت خمشی نمونه ها با استفاد از اندیس های طاقت خمشی در تغییرمکان های مورد نظر و بر مساحت زیر نمودار نیرو-تغییرمکان نمونه ها تعیین گردیده است. محاسبات بر اساس روابط زیر می باشد:

$$\begin{aligned} I_5 &= \Omega_{3\delta} / \Omega_{\delta} \\ I_{10} &= \Omega_{5.5\delta} / \Omega_{\delta} \\ I_{20} &= \Omega_{10.5\delta} / \Omega_{\delta} \end{aligned} \quad (2)$$

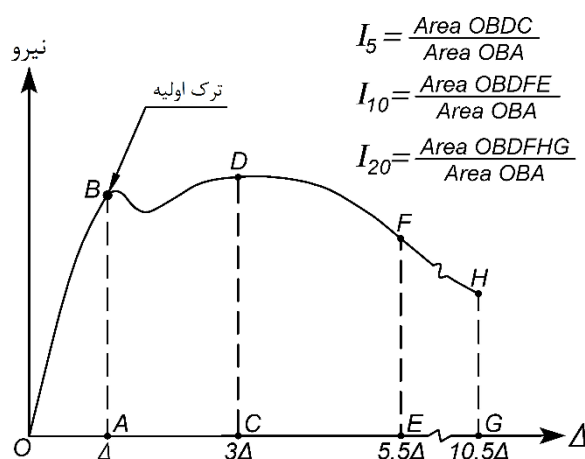
که در رابطه فوق، δ جابجایی متناظر با وقوع اولین ترک و ضرایب Ω_{δ} ، $\Omega_{3\delta}$ ، $\Omega_{5.5\delta}$ و $\Omega_{10.5\delta}$ بر اساس شکل ۱۵ محاسبه می شوند.



شکل ۱۳: میزان ضریب شکل پذیری تیرهای خمشی.



شکل ۱۴: میزان انرژی جذب شده در تیرهای خمشی.



شکل ۱۵: نمودار بار-تغییر مکان برای تعیین طاقت خمشی.

در جدول ۸ نتایج بدست آمده برای طاقت خمشی نمونه‌ها ارائه شده است. نتایج نشان داده است که برای نمونه‌های بدون الیاف، بدلیل شکست ترد نمونه‌ها و عدم شکل‌پذیری، عملاً مساحت‌های زیر نمودار نیرو-تغییر مکان در مقادیر مدنظر برابر تغییر مکان متناظر بیشینه نیرو بوده و به همین دلیل اندیس‌های طاقت خمشی که از نسبت مساحت‌ها بدست می‌آید، برای نمونه‌های بدون الیاف فولادی همگی برابر واحد است. در نمونه‌های با ۰/۵ و ۱ درصد الیاف فولادی، با افزایش شکل‌پذیری، مساحت زیر نمودار نیرو-تغییر مکان نیز افزایش یافته و این امر سبب افزایش اندیس‌های طاقت خمشی شد. اندیس‌های طاقت خمشی برای نمونه‌های حاوی یک درصد الیاف فولادی بیشتر از نمونه‌های با ۰/۵ درصد الیاف فولادی است (به دلیل بیشتر بودن شکل‌پذیری تیرها با افزایش درصد الیاف فولادی از ۰/۵ درصد به یک درصد). همچنین ضرایب مقاومت باقی‌مانده برای نمونه‌های با الیاف یک درصد، بیشتر از مقاومت باقی‌مانده برای نمونه‌های حاوی ۰/۵ درصد الیاف است.

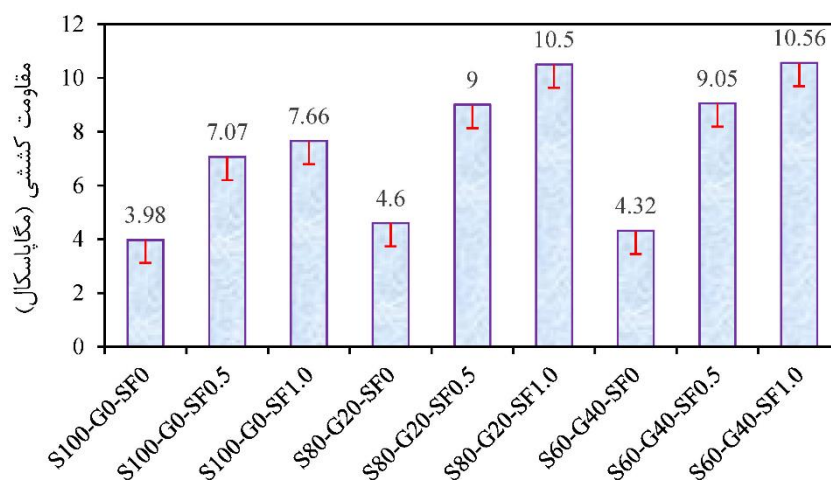
جدول ۸: نتایج طاقت خمشی.

شماره	طرح اختلاط	I_5	I_{10}	I_{20}	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$
۱	S100-G0-SF0	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰/۰	۰/۰
۲	S100-G0-SF0.5	۳/۹	۵/۵	۷/۴۲	۳۲	۱۹/۲
۳	S100-G0-SF1.0	۴/۱۳	۵/۸	۷/۸۲	۳۳/۴	۲۰/۲
۴	S80-G20-SF0	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰/۰	۰/۰
۵	S80-G20-SF0.5	۵/۲	۷/۵	۱۰/۴	۴۶	۲۹
۶	S80-G20-SF1.0	۵/۸	۸/۵	۱۱/۷۶	۵۴	۳۲/۶
۷	S60-G40-SF0	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۰/۰	۰/۰
۸	S60-G40-SF0.5	۵/۳	۷/۹۵	۱۱/۲۸	۵۳	۳۳/۳
۹	S60-G40-SF1.0	۵/۶	۸/۴	۱۲/۷	۵۶	۴۳

۴-۴- آزمایش مقاومت کششی

نتایج تست کششی در شکل ۱۶ نشان داده شده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که در نمونه‌های بدون الیاف، اضافه کردن ۲۰ و ۴۰ درصد سنگدانه گرانیتهی بجای ریزدانه سبب افزایش ۱۵/۵۸ و ۸/۵۴ درصدی در مقاومت کششی شده است. روند نتایج بدست آمده برای مقاومت کششی مشابه مقاومت فشاری می‌باشد. از سوی دیگر در نمونه‌های الیافی حاوی نیم (S100-G0-SF0.5، S80-G20-SF0.5 و S60-G40-SF0.5) و یک درصد (S100-G0-SF1.0، S80-G20-SF1.0 و S60-G40-SF1.0) الیاف فولادی، تغییر در درصد جایگزینی سنگدانه گرانیتهی تغییر قابل توجهی در مقاومت کششی ایجاد نمی‌کند که این موضوع بدلیل نقش کلیدی الیاف فولادی می‌باشد. در نمونه‌های با ۲۰ و ۴۰ درصد جایگزینی سنگدانه‌های گرانیتهی، اضافه کردن نیم درصد الیاف فولادی به ترتیب سبب افزایش

۲۷/۲۹ و ۲۸ درصدی در مقاومت کششی شده است. این افزایش در نمونه های حاوی یک درصد الیاف فولادی به ترتیب برابر با ۳۷/۰۷ و ۳۷/۸۵ درصد می باشد.



شکل ۱۶: نتایج آزمایش مقاومت کششی (آزمون شکافت).

۵- نتیجه گیری

هدف از این مطالعه ارزیابی خصوصیات تازه و مکانیکی بتن خود متراکم-مقاومت بالا متشکل از سنگدانه های بازبافتی گرانیته به عنوان جایگزینی ریزدانه می باشد. براساس آزمایش های انجام شده، نتایج زیر قابل بیان است:

- نتایج آزمایش های جعبه-L و جعبه-U نشان داده است که با افزایش میزان سنگدانه گرانیته و درصد الیاف فولادی، روانی بتن کاهش یافته و اختلاف ارتفاع افزایش می یابد اما تمامی طرح ها در این مطالعه در محدوده قابل قبول آئین نامه ای و توصیه ای قرار گرفته اند.
- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نشان داده است که تاثیر سنگدانه گرانیته بر مقاومت فشاری چشمگیرتر از اثر الیاف فولادی می باشد. قابل ذکر است که نرخ افزایش مقاومت در نمونه های حاوی ۲۰ درصد سنگدانه گرانیته بیشتر از نرخ افزایش نسبت به نمونه ۴۰ درصد بوده است. استفاده از نیم و یک درصد الیاف فولادی بطور میانگین سبب افزایش ۵/۰۶ و ۹/۵۲ درصدی مقاومت فشاری در نمونه های بدون سنگدانه گرانیته شده است. همچنین افزایش مقاومت فشاری در نمونه های فاقد الیاف برای درصدهای جایگزینی ۲۰ و ۴۰ درصد به ترتیب برابر با ۲۰/۸۸ و ۲۶/۵۲ درصد می باشد. بیشترین مقاومت فشاری برای نمونه S60-G40-SF1.0 که دارای درصد جایگزینی ۴۰ درصد و میزان الیاف یک درصد است می باشد.
- در نمونه های بدون سنگدانه گرانیته، افزایش درصد الیاف فولادی از صفر در نمونه شاهد به نیم و یک درصد به ترتیب سبب افزایش ۱۰۲ و ۱۳۵ درصدی در مقاومت خمشی می شود. همچنین تغییر مکان نهایی وسط تیرها نیز به ترتیب افزایش ۲۳ و ۳۵ برابر داشته است. در نمونه های بدون الیاف فولادی و با درصدهای جایگزینی ۲۰ و ۴۰ درصد از ماسه با سنگدانه های گرانیته، مشاهده شده است که مقاومت خمشی به ترتیب ۱۴/۲۸ و ۱۶/۷ درصد افزایش داشته است. بیشترین مقاومت خمشی در نمونه حاوی ۴۰ درصد جایگزینی و یک درصد الیاف بدست آمده است.
- بررسی ضریب شکل پذیری نشان داده است که نمونه های بدون الیاف فولادی فاقد شکل پذیری بوده و مقدار جذب انرژی ناچیزی داشته اند. در طرح اختلاط های دارای نیم درصد الیاف فولادی، مقادیر جذب انرژی نمونه ها بشدت افزایش داشته که

نشانگر تاثیر بیشتر آن نسبت به نوع سنگدانه مصرفی دارد. از سوی دیگر نتایج نشان داده است که برای بهبود اثر الیاف بایستی از درصد جایگزینی بیشتری از سنگدانه های گرانیتی استفاده نمود.

- در تیرهای با سنگدانه های گرانیتی و بدون الیاف فولادی، بلافاصله پس از رخ دادن اولین ترک خمشی شکست ترد اتفاق افتاده است اما با افزایش درصد الیاف فولادی مورد استفاده در نمونه ها شکل پذیری افزایش یافته و نوع شکست بصورت شکل پذیر رخ می دهد.
- نتایج تست کششی بیابگر آن است که در نمونه های بدون الیاف، اضافه کردن ۲۰ و ۴۰ درصد سنگدانه گرانیتی بجای ریزدانه سبب افزایش ۱۵/۵۸ و ۸/۵۴ درصدی در مقاومت کششی شده است. بیشترین تاثیر در مقاومت کششی نمونه ها مرتبط با درصد الیاف مصرفی بوده و اضافه کردن نیم و یک درصد الیاف فولادی به ترتیب سبب افزایشی در حدود ۳۰ و ۳۸ درصد در مقاومت کششی می گردد.

مراجع

- [1] Okamura, Hajime, Ozawa, Takeaki, Ouchi, Masahiro. (2000). Self-compacting concrete. *Structural Concrete*, 1 (1), 3-17.
- [2] Jain, Abhishek, Gupta, Rajesh, Chaudhary, Sandeep. (2020). Sustainable development of self-compacting concrete by using granite waste and fly ash. *Construction and Building Materials*, 262, 120516.
- [3] Sharma, Rahul, Khan, Rizwan. (2017). Sustainable use of copper slag in self compacting concrete containing supplementary cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*, 151, 179-192.
- [4] Jain, Abhishek, Gupta, Rajesh, Chaudhary, Sandeep. (2019). Performance of self-compacting concrete comprising granite cutting waste as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 221, 539-552.
- [5] Jain, Abhishek, Siddique, Salman, Gupta, Trilok, Jain, Sudhir, Sharma, Ravi, Chaudhary, Sandeep. (2020). Evaluation of concrete containing waste plastic shredded fibers: Ductility properties. *Structural Concrete*, 22(1), 566-575.
- [6] Taji, Iman, Ghorbani, Saeid, Brito, Jorgede, Tam, Vivian, Sharifi, Sohrab, Davoodi, Ali, Tavakkolizadeh, Mohammadreza. (2019). Application of statistical analysis to evaluate the corrosion resistance of steel rebars embedded in concrete with marble and granite waste dust. *Journal of Cleaner Production*, 210, 837-846.
- [7] Aarhi, Karmegam, Arunachalam, Kalidas. (2018). Durability studies on fibre reinforced self compacting concrete with sustainable wastes. *Journal of Cleaner Production*, 174, 247-255.
- [8] Zafar, Muhammad Saeed, Javed, Usman, Khushnood, Rao Arsalan, Nawaz, Adnan, Zafar, Tayyab. (2020). Sustainable incorporation of waste granite dust as partial replacement of sand in autoclave aerated concrete. *Construction and Building Materials*, 250, 118878.
- [9] Mendoza, Joan-Manuel, Feced, Maria, Feijoo, Gumersindo, Josa, Alejandro, Gabarrell, Xavier, Rieradevall, Joan. (2014). Life cycle inventory analysis of granite production from cradle to gate. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19, 153-165.
- [10] Ramos, Telma, Matos, Ana, Schmidt, Bruno, Rio, João, Sousa-Coutinho, Joana. (2013). Granitic quarry sludge waste in mortar: Effect on strength and durability. *Construction and Building Materials*, 47, 1001-1009.
- [11] Menezes, Romualdo, Ferreira, Heber, Neves, Gelmires, Lira, Helio, Ferreira, Heber. (2005). Use of granite sawing wastes in the production of ceramic bricks and tiles. *Journal of the European Ceramic Society*, 25(7), 1149-1158.
- [12] Montani, Carlo (2016). XXVII World Marble and Stones Report. Aldus Casa di Edizioni, Carrara.
- [13] Karmegam, Aarhi, Kalidass, Arunachalam, Ulaganathan, Dileepan. (2014). Utilization of granite sawing waste in self compacting concrete. *Gradevinar*, 66(11), 997-1006.
- [14] Singh, Sarbjeet, Khan, Shahrukh, Khandelwal, Ravindra, Chugh Arun, Nagar, Ravindra. (2016). Performance of sustainable concrete containing granite cutting waste. *Journal of Cleaner Production*, 119, 86-98.
- [15] Ghannam, Shehdeh, Najm, Husam, Vasconez, Rosa. (2016). Experimental study of concrete made with granite and iron powders as partial replacement of sand. *Sustainable Materials and Technologies*, 9, 1-9.
- [16] Vijayalakshmi, M, Sekar, Anandh, Ganesh, Ganapathy. (2013). Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste. *Construction and Building Materials*, 46, 1-7.
- [17] Ghorbani, Saeid, Taji, Iman, Brito, Jorgede, Negahban, Mohammadamin, Ghorbani, Sahar, Tavakkolizadeh, Mohammadreza, Davoodi, Ali. (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.
- [18] Singh, Sarbjeet, Nagar, Ravindra, Agrawal, Vinay, Rana, Aditya, Tiwari, Anshuman. (2016). Sustainable utilization of granite cutting waste in high strength concrete. *Journal of Cleaner Production*, 116, 223-235.

- [19] Singh, Sarbjeet, Nande, Neha, Bansal, Prakhar, Nagar, Ravindra. (2017). Experimental Investigation of Sustainable Concrete Made with Granite Industry By-Product. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(6), 04017017.
- [20] Elyamany, Hafez, M. Abd Elmoaty, Abd Elmoaty, Mohamed, Basma. (2014). Effect of filler types on physical, mechanical and microstructure of self compacting concrete and Flow-able concrete. *Alexandria Engineering Journal*, 53(2), 295-307.
- [21] Sadek, Dina, El-Attar, Mohamed, Ali, Haitham. (2016). Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 121, 19-32.
- [۲۲] کشوری، فهیمه، حیاتی، محمد، بارانی، کیانوش. (۱۳۹۸). برنامه‌ریزی راهبردی صنعت سنگ استان لرستان. نشریه مهندسی معدن، ۱۴(۴۳)، ۳۴-۴۸.
- [۲۳] سپهوند، زهرا، بارانی، کیانوش. (۱۳۹۷). تولید سنگ مصنوعی از ضایعات سنگ تزئینی. نشریه مهندسی عمران/امیرکبیر، ۵۰(۳)، ۴۶۰-۴۵۳.
- [24] BS EN 12350-10. (2010). *Testing Fresh Concrete, Self-Compacting Concrete, L-BoX Test*, London, UK.
- [25] Mastali, Mohammad, Dalvand, Ahmad, Sattarifard, Alireza. (2016). The impact resistance and mechanical properties of reinforced self-compacting concrete with recycled glass fiber reinforced polymers. *Journal of Cleaner Production*, 124, 312-324.
- [26] Hama, Sheelan, Hilal, Nahla. (2017). Fresh properties of self-compacting concrete with plastic waste as partial replacement of sand. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(2), 299-308.
- [27] UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione). (2003). *Testing fresh self compacting concrete: Determination of confined flowability in U-shape box*. UNI 11044. Milano, Italy: UNI.
- [28] Yaseri, Sajad, Mahdikhani, Mahdi, Jafarinoor, Ashkan, Masoomi Verki, Vajihollah, Esfandyari, Mostafa, Ghiasian, Seyed Mohsen. (2018). The development of new empirical apparatuses for evaluation fresh properties of self-consolidating mortar: Theoretical and experimental study. *Construction and Building Materials*, 167, 631-648.
- [29] ASTM C39. (2012). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International, West Conshohocken.
- [30] ASTM C1609. (2012). *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)*. ASTM International, West Conshohocken.
- [31] ASTM C496. (2017). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International, West Conshohocken.
- [32] Bani, Ardalan, Reza, Joshaghani, Alireza, Hooton, Douglas. (2017). Workability retention and compressive strength of self-compacting concrete incorporating pumice powder and silica fume. *Construction and Building Materials*, 134, 116-122.
- [33] Bisht, Kunal, Ramana, P.V. (2018). Sustainable production of concrete containing discarded beverage glass as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 177, 116-124.
- [34] Ghannam, Shehdeh, Najm, Husam, Vasconez, Rosa. (2016). Experimental study of concrete made with granite and iron powders as partial replacement of sand. *Sustainable Materials and Technologies*, 9, 1-9.