

## استفاده از الیاف فولادی موج دار جهت بررسی خواص رئولوژی، پارامترهای مکانیکی و شکست بتن خود متراکم با حجم درشت دانه متفاوت

سید امید حسینی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

محمدرضا سهرابی \*

دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

سید روح الله موسوی

دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

محمد قاسمی

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، ایران.

### چکیده

با توجه به مقاومت پایین بتن در برابر ترک خوردگی و حجم قابل توجه سنگدانه مصرفی در این ماده، در تحقیق حاضر به بررسی تأثیر افزایش حجم الیاف فولادی موج دار (۰.۱۵٪، ۰.۳٪ و ۰.۴۵٪) و حجم درشت دانه‌ها به کل سنگدانه‌ها (۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪ و ۶۰٪) بر مشخصات بتن خودمتراکم تازه، سخت شده و همچنین مکانیک شکست پرداخته شده است. در این راستا آزمایشات جریان اسلامپ، جعبه L و حلقه L در بخش بتن تازه، آزمایشات مقاومت فشاری، کششی و مدول الاستیسیته در بخش بتن سخت شده و همچنین چقرمگی شکست مود اول در بخش مکانیک شکست بر روی ۱۰۸ نمونه استوانه ای انجام گردید. نتایج نشان داد که افزایش حجم درشت دانه، سبب بهبود خواص رئولوژی و افزایش حجم الیاف فولادی موج دار باعث کاهش کارایی و روانی بتن خودمتراکم خواهد شد. از طرفی افزایش حجم الیاف فولادی موج دار سبب بهبود مقاومت فشاری در بتن‌های حاوی حجم ۵۰ و ۶۰ درصد درشت دانه خواهد شد. تنها در بتن‌های حاوی ۶۰ درصد درشت دانه، افزایش حجم الیاف منجر به افت ناچیز در مقاومت کششی بتن‌های خودتراکم مسلح الیافی خواهد شد. افزایش حجم درشت دانه (۳۰٪ - ۶۰٪) پارامتر مدول الاستیسیته نمونه‌های حاوی درصد ثابت الیاف را بهبود می بخشد. همچنین با افزایش حجم الیاف فولادی موج دار در ۳۰٪ و ۴۰٪ حجم درشت دانه، مقدار چقرمگی شکست برای مود اول نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی الیاف فولادی موج دار افزایش می یابد.

واژه‌های کلیدی: بتن خودمتراکم، الیاف فولادی موج دار، حجم درشت دانه، چقرمگی شکست، پارامترهای مکانیکی.

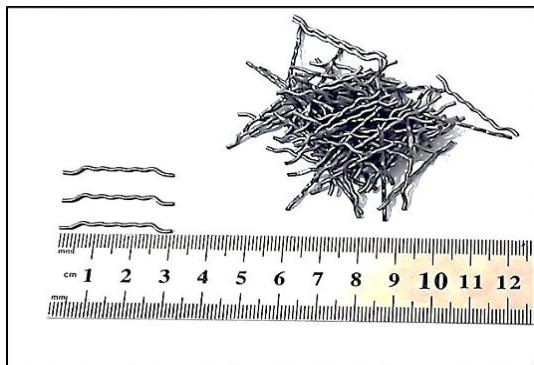
## ۱- مقدمه

مدول الاستیسیته بتن خودتراکم در مقاومت‌های پایین و مقاومت‌های بالا در مقایسه با بتن معمولی به ترتیب حدود ۴۰ درصد و ۵ درصد کمتر است. هر چند سایر محققان این نظر در خصوص رابطه مدول الاستیسیته بتن خودتراکم و معمولی را تأیید نمی‌کنند [۲۱ و ۲۲]. در حالت کلی به علت تشکیل ریزترک‌ها و حفره‌های زیاد در ناحیه انتقال سطحی، مشخصات شکست بتن تحت تاثیر کیفیت این ناحیه است. در این راستا طراحی سازه‌های بتنی بر اساس مفاهیم مکانیک شکست راهکار نوینی در فرایند ساخت بوده و برای ارزیابی پاسخ سازه ای المان‌های بتنی بویژه در سازه‌های حجیم و گسترده مورد استفاده قرار گرفته است [۲۳]. یکی از پارامترهای مهم در بحث مکانیک شکست، ضرایب شدت تنش در مودهای بارگذاری می‌باشد. وقتی که ضرایب شدت تنش به مقادیر بحرانی خود می‌رسند به عنوان چقرمگی شکست معرفی می‌گردند. چقرمگی شکست معیاری برای مقاومت مصالح در مقابل گسترش ترک می‌باشد [۲۴]. این پارامتر می‌تواند به عنوان پارامتر ورودی مهمی برای طراحان و مهندسان جهت تخمین عمر سرویس دهی مصالح ترک خورده تحت مودهای مختلف شکست به کار رود [۲۵]. در بتن خودتراکم تاثیر تغییر در حجم درشت دانه بر ویژگی‌های شکست در مقایسه با پارامترهای مکانیکی بیشتر و برجسته تر است [۲۶]. چن و لیو [۲۷] معتقد هستند که ناحیه صدمه دیده نوک ترک به شدت تحت تاثیر حجم و سایز درشت دانه است. علیها و همکاران [۲۸] مشاهده کردند که استفاده از الیاف فورتا-فرو در بتن باعث افزایش مقاومت در برابر ترک خوردگی تحت مود بارگذاری خالص اول و سوم می‌شود.

همانطور که پیشینه تحقیق نشان می‌دهد نوع بتن، تغییر حجم سنگ‌دانه و الیاف در پارامترهای مکانیکی و شکست بتن خود تراکم تأثیرگذار می‌باشد و با توجه به محدود بودن تحقیقات گذشته درباره تغییر حجم سنگ‌دانه در بتن خودتراکم الیافی، تحقیق جامعی در خصوص تأثیر این دو متغیر بر عملکرد بتن‌های خودتراکم الیافی وجود ندارد. ضمن آنکه اسکلت بندی و حجم قابل توجهی از بتن شامل سنگ‌دانه‌ها بوده و میزان و حجم این مصالح، مشخصات بتن تولیدی را نیز تحت تاثیر مستقیم قرار می‌دهد. لذا در این تحقیق تأثیر حجم درشت دانه (۳۰ درصد تا ۶۰

بتن ماده‌ای است که دارای کاربرد وسیعی در صنعت ساخت و ساز می‌باشد. تغییر در مواد تشکیل دهنده بتن (سیمان، سنگ‌دانه، آب و مواد افزودنی) می‌تواند مشخصات این ماده را تغییر دهد که همین مسأله مورد توجه طراحان قرار گرفته است [۱]. بتن خودتراکم، یکی از انواع بتن با عملکرد مطلوب است که تحت وزن خود در قالب جاری می‌شود و احتیاج به ویریه ندارد [۲]. این نوع بتن در اواسط دهه ۱۹۸۰ به منظور کاهش هزینه‌های ساخت در ژاپن مورد استفاده قرار گرفت. ویژگی‌هایی همچون عدم نیاز به ویریه، خواص رئولوژی مطلوب، عبور راحت از میان تراکم آرماتورها و بهبود سرعت ساخت باعث محبوبیت این نوع بتن نسبت به بتن معمولی شده است [۸-۳]. از آنجا که بتن ماده ای شکننده بوده و مقاومت کششی پایینی دارد در مقابل ایجاد ترک و گسترش آن مقاومت کمی از خود نشان می‌دهد [۹]. استفاده از الیاف فولادی در بتن، توانایی جذب انرژی، تغییرشکل‌های قبل از شکست، شکل‌پذیری سازه، و بار نهایی را به علت پدیده تاثیر پل افزایش می‌دهد [۱۰ و ۱۱]. توزیع یکنواخت الیاف فولادی در بتن خودتراکم در مقایسه با پارامترهایی مانند اندازه نمونه و عمق شکاف<sup>۱</sup>، رفتار بتن در حالت سخت شده را بیشتر تحت تاثیر قرار می‌دهد [۱۲]. ناحیه انتقال محدوده ای شامل ریزترک‌های زیاد و بسیار حساس در المان‌های بتنی است که پارامترهای شکست را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۱۳]. از آنجاییکه طرح اختلاط بتن خودتراکم در مقایسه با بتن معمولی به علت وجود حجم ریزدانه و خمیر بیشتر، متفاوت است ناحیه انتقال سطحی در این دو نوع بتن عملکرد متفاوتی دارد [۱۴]. وجود مواد پودری بیشتر و عدم استفاده از ویریه، سبب می‌شود که ناحیه انتقال در بتن خودتراکم بسیار قوی‌تر از بتن معمولی باشد [۱۵]. از طرفی نسبت سیمان به سنگ‌دانه‌ها و اندازه سنگ‌دانه‌ها همچون نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری تاثیر دارد لذا به علت متفاوت بودن اندازه و حجم سنگ‌دانه‌ها در بتن خودتراکم نسبت به بتن معمولی، نتایج مشخصات مکانیکی تحت تأثیر این پارامترها قرار دارد [۱۶-۱۸]. سو و همکاران [۱۹] معتقد هستند که کاهش حجم درشت‌دانه تأثیر چندانی بر مدول الاستیسیته بتن خودتراکم ندارد. از نظر دومن [۲۰]

<sup>1</sup> Notch depth



شکل ۱- الیاف فولادی مورد استفاده در این تحقیق

### ۲-۱-۳- سنگ دانه ها

مصالح درشت دانه شکسته با حداکثر قطر ۲۰ میلی متر و ریزدانه های طبیعی مورد استفاده در این تحقیق، از اطراف شهر زاهدان تهیه شده است که الزامات آیین نامه EFNARC [۳۰] را برآورده می کند. حسب شکل ۲، درصد های عبوری از هر الک مطابق محدوده مجاز ASTM C 33 [۳۱] انتخاب شده است.

### ۲-۱-۴- فوق روان کننده

برای دست یابی به ویژگی های بتن تازه خودتراکم الیافی، از کاهنده شدید آب که فوق روان کننده نامیده می شود و دارای رنگ زرد و بر پایه پلی کربوکسیلات می باشد استفاده شده است. فوق روان کننده مصرفی در این تحقیق که به منظور افزایش روانی مخلوط بتن تازه مورد استفاده قرار می گیرد، مشخصات آن در جدول ۳ نشان داده شده است که منطبق بر ASTM C 494 [۳۲] می باشد.

### ۲-۱-۵- آب

آب شرب مصرفی مورد استفاده در این تحقیق با دمای  $22 \pm 2$  درجه سانتی گراد و دارای ویژگی های منطبق بر الزامات ASTM C 94 [۳۳] برای تولید و عمل آوری نمونه ها استفاده شده است.

### ۲-۲ طرح اختلاط

۱۲ طرح اختلاط بتن خودتراکم مسلح به الیاف فولادی موج دار در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. میزان حجم الیاف فولادی موج دار و حجم درشت دانه به ترتیب در بازه ۰,۱۵٪ تا ۰,۴۵٪ و ۳۰٪ تا ۶۰٪ قرار دارد. در این تحقیق، مقدار سیمان، مقدار کل

درصد) و حجم الیاف فولادی موجدار (۰,۱۵ تا ۰,۴۵ درصد) بر مشخصات تازه بتن خودتراکم شامل جریان اسلامپ، حلقه آ، جعبه L شکل و در بخش بتن سخت شده مقاومت فشاری، کششی و مدول الاستیسیته مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه انجام کارهای آزمایشگاهی نیازمند هزینه زیادی جهت مصرف مصالح می باشد در این تحقیق نیز جهت بررسی خصوصیات شکست بتن خودتراکم حاوی الیاف فولادی موج دار از نمونه های دیسک های خمشی شیاردار استفاده می گردد که با توجه به شکل هندسی آن حجم مصالح کمی جهت آزمایش مصرف می شود و انجام آزمایش نیز ساده می باشد.

### ۲- تست آزمایشگاهی

#### ۲-۱-۲- ویژگی مصالح استفاده شده

##### ۲-۱-۱-۲- سیمان

در تمام طرح ها از سیمان تپ ۲ معمولی کارخانه سیمان سیستان که دارای مشخصات فیزیکی و شیمیایی مطابق جدول ۱ است استفاده شده است. مشخصات سیمان فوق منطبق بر ASTM C 150 [۲۹] می باشد.

جدول ۱- مشخصات سیمان مورد استفاده در تحقیق

ترکیب	سیمان پر تلند
SiO <sub>2</sub>	21.05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.76
CaO	62.86
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.43
MgO	3.46
Na <sub>2</sub> O	0.21
Surface area(cm <sup>2</sup> /g)	3110

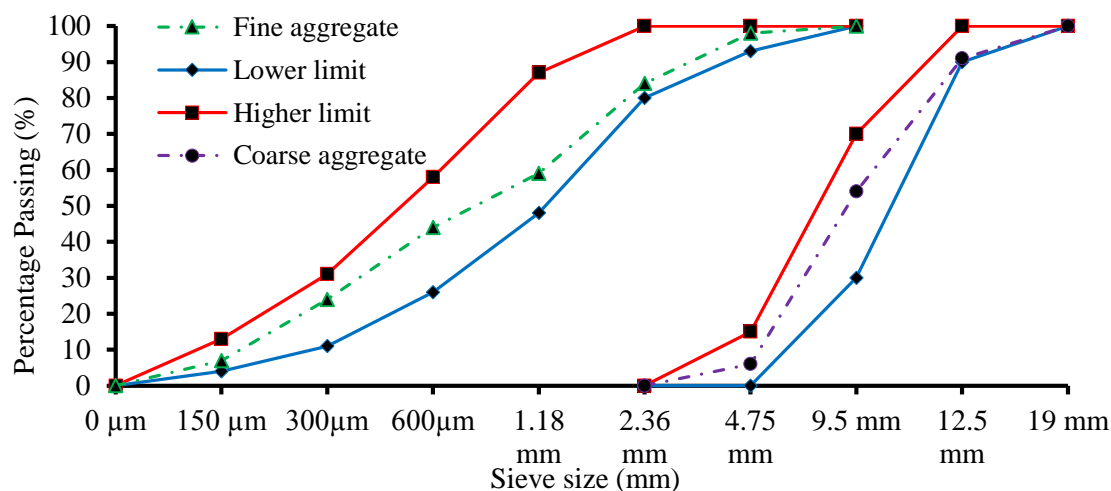
#### ۲-۱-۲- الیاف فولادی موج دار

الیاف مورد استفاده در این تحقیق، الیاف فولادی موج دار به طول ۳۰ میلی متر و قطر ۰,۶ میلی متر می باشد که مشخصات آن در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین شکل، الیاف فولادی موج دار فوق الذکر را نشان می دهد.

جدول ۲- مشخصات الیاف فولادی موج دار مورد استفاده در تحقیق

۳۰	طول (میلی متر)
۰,۶	قطر (میلی متر)
۷۸۵۰	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)
۱۲۰۰	مقاومت کششی (مگاپاسکال)

سنگ دانه و نسبت آب به سیمان در تمامی طرح اختلاط ها ثابت و به ترتیب برابر با ۴۸۰ و ۱۶۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ۰٫۵ می باشد. مقدار فوق روان کننده در بازه ۳٫۲ تا ۵٫۷ کیلوگرم بر متر مکعب قرار دارد. طرح اختلاط ها با نماد # VA \* S.F نشان داده شده اند که S.F نشان دهنده الیاف فولادی بطوریکه علامت \* معرف درصد الیاف فولادی موج دار (۰٫۱۵، ۰٫۳، ۰٫۴۵) و # نشان دهنده حجم درشت درشت دانه ببطوریکه علامت # نشان دهنده حجم درشت دانه نسبت به حجم کل سنگ دانه ها (۰٫۳۰، ۰٫۴۰، ۰٫۵۰) و ۶۰٪ می باشد. مشخصات تمامی طرح اختلاط ها در جدول ۴ نشان داده شده است.



شکل ۲- توزیع اندازه ذرات سنگ دانه های ریز و درشت

جدول ۳- مشخصات فوق روان کننده

عنوان	مقدار استاندارد	نتایج آزمایش	آیین نامه مربوطه
چگالی	۱,۱۴۶-۰,۹۳۸	۱,۱	ASTM C494 [32]
PH	۷,۴-۵,۴	۷	-
Chlorine (ppm)	≤ 2400	۶۰۰	ASTM C494 [32]
رنگ	-	زرد	-

جدول ۴- مشخصات طرح های اختلاط تحقیق حاضر

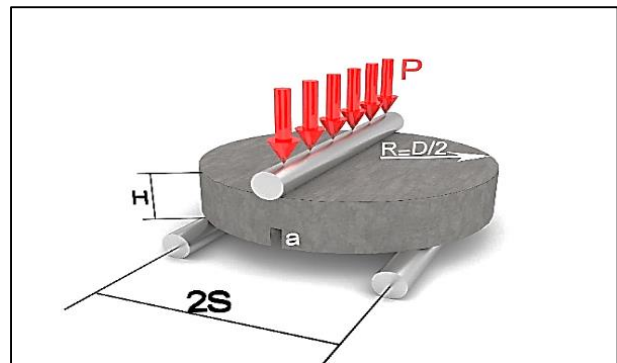
طرح ها	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	شن (kg/m <sup>3</sup> )	الیاف فولادی موج دار (درصد)	فوق روان کننده (kg)	پودر سنگ (kg/m <sup>3</sup> )
SF(0.15)VA(30)	۱۱۲۰	۴۸۰	۰/۱۵	۳/۲	۱۲۰
SF(0.3)VA(30)	۱۱۲۰	۴۸۰	۰/۳	۳/۲	۱۲۰
SF(0.45)VA(30)	۱۱۲۰	۴۸۰	۰/۴۵	۳/۲	۱۲۰
SF(0.15)VA(40)	۹۶۰	۶۴۰	۰/۱۵	۴/۵	۱۲۰
SF(0.3)VA(40)	۹۶۰	۶۴۰	۰/۳	۴/۵	۱۲۰
SF(0.45)VA(40)	۹۶۰	۶۴۰	۰/۴۵	۴/۵	۱۲۰
SF(0.15)VA(50)	۸۰۰	۸۰۰	۰/۱۵	۵	۱۲۰
SF(0.3)VA(50)	۸۰۰	۸۰۰	۰/۳	۵	۱۲۰
SF(0.45)VA(50)	۸۰۰	۸۰۰	۰/۴۵	۵	۱۲۰
SF(0.15)VA(60)	۶۴۰	۹۶۰	۰/۱۵	۵/۷	۱۲۰
SF(0.3)VA(60)	۶۴۰	۹۶۰	۰/۳	۵/۷	۱۲۰
SF(0.45)VA(60)	۶۴۰	۹۶۰	۰/۴۵	۵/۷	۱۲۰

### ۳-۲- نمونه های دیسک های خمشی شیاردار

محققان برای بررسی رفتار شکست مصالح مختلف تحت شرایط بارگذاری مود خالص اول، مود خالص دوم و ترکیبی آنها از نمونه های مختلف استفاده کردند. یکی از نمونه هایی که اخیراً مورد توجه محققین قرار گرفته دیسک های خمشی شیاردار می باشد که برای شبیه سازی رفتار مصالح در شرایط بارگذاری مود اول، مود سوم و ترکیب آنها استفاده شده است. در این نمونه ها زمانیکه محور بارگذاری بر محور ترک عمود باشد شکست در حالت مود خالص اول را نشان می دهد و زمانیکه محور بارگذاری و محور ترک دارای زاویه ۶۲٫۵ درجه باشند شکست در حالت مود خالص سوم را نشان می دهد [۳۴]. مطابق شکل ۳، دیسک های خمشی شیاردار یک دیسک دایره ای است که دارای شعاع  $R$  و ضخامت  $H$  می باشد. این نمونه ها دارای یک ترک قطری به عمق  $a$  در یک وجه خود هستند. نمونه ها تحت بارگذاری خمشی سه نقطه ای با طول تکیه گاه  $2S$  قرار می گیرند. در این نمونه ها زمانیکه محور بارگذاری بر محور ترک اولیه عمود باشد نشان دهنده مود خالص اول و زمانیکه محور بارگذاری با محور ترک اولیه دارای زاویه ۶۲٫۵ درجه باشد نشان دهنده مود خالص سوم می باشد [۳۴]. در این نمونه ها، مقدار چقرمگی شکست بحرانی برای مود خالص اول ( $K_{IC}$ ) توسط رابطه ۱ محاسبه می گردد.

$$K_{IC} = Y_I \frac{6 P_{Cr} S \sqrt{\pi a}}{RH^2} \quad (1)$$

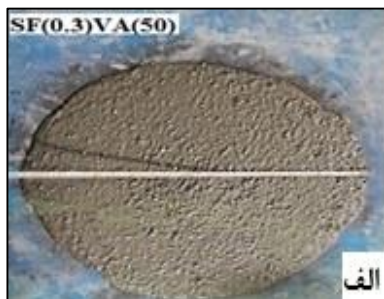
که  $P_{Cr}$  بار اعمالی و  $Y_I$  ضریب هندسه یا ضریب شکل می باشد که به نسبت  $\frac{a}{H}$  و  $\frac{S}{R}$  بستگی دارد که در مرجع [۳۵] قابل دسترس می باشد.



شکل ۳- هندسه و نحوه بارگذاری دیسک خمشی شیاردار

### ۳-۱- خواص بتن تازه

در این تحقیق جهت بررسی خواص رئولوژی بتن خودتراکم مسلح به الیاف فولادی موج دار، آزمایشات جریان اسلامپ، حلقه J و جعبه L شکل مطابق الزامات آیین نامه افنارک [۳۶] انجام گردید. آزمایش جریان اسلامپ جهت توانایی بتن برای آزادی حرکت تحت وزن خود به کار می رود. آزمایش حلقه J برای بررسی قابلیت عبور بتن خودتراکم از میان تراکم میلگرد را نشان می دهد. آزمایش جعبه L شکل انسداد بتن خودتراکم در هنگام عبور از میلگردها را بدون جداسدگی اجزای بتن بیان می کند. تصاویر آزمایش رئولوژی تحقیق حاضر در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- آزمایشات بتن تازه (الف): جریان اسلامپ، ب: حلقه J و

ج: جعبه L

### ۲-۳- آزمایشات مکانیکی

جهت انجام مقاومت فشاری از نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۱۵۰ در ۳۰۰ منطبق بر آیین نامه BS EN 12390 [۳۷] استفاده گردید. برای هر طرح اختلاط، ۳ نمونه ساخته شد و در نهایت میانگین نمونه‌ها گزارش شده است. مقاومت کششی منطبق بر آیین نامه ASTM C 496 [۳۸] بر روی نمونه‌های استوانه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین مطابق آیین نامه ASTM C 469 [۳۹] آزمایش مدول الاستیسیته نیز بررسی شده است. (نمونه استوانه‌ای ۱۵ در ۳۰). در مجموع تعداد ۱۰۸ نمونه جهت انجام آزمایشات فوق، ساخته شد. نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب باز شد و سپس برای سپری کردن دوره عمل‌آوری در مخزن حاوی آب با دمای  $22 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد منتقل گردید. تصاویر ۵-الف تا ۵-ج، به ترتیب آزمایش مقاومت فشاری، کششی و مدول الاستیسیته را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶ (الف، ب و ج) - روند آماده‌سازی نمونه‌های دیسک‌های خمشی شیاردار



(ب)



(الف)



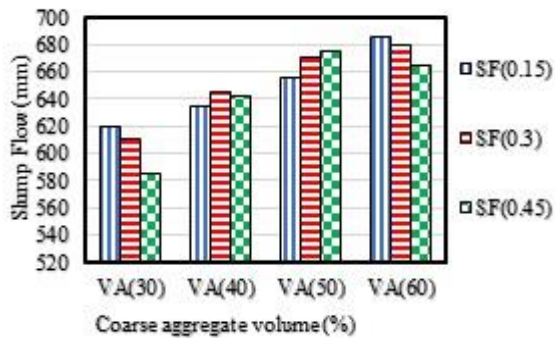
(ج)

شکل ۵- (الف: آزمایش مقاومت فشاری ب: آزمایش مقاومت کششی ج: آزمایش مدول الاستیسیته)



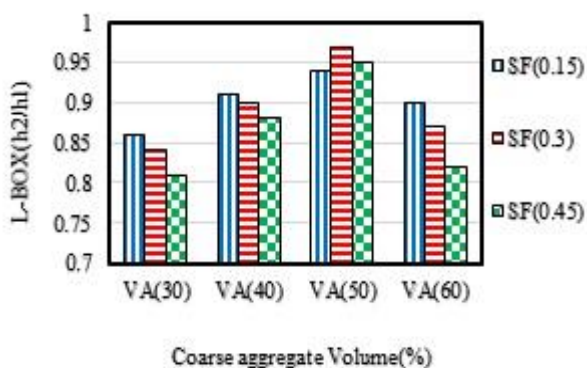
استفاده از الیاف فولادی موج دار جهت بررسی خواص ...

به ترتیب باعث افت اسلامپ به میزان ۱,۴۳٪ و ۴,۵٪ خواهد شد. طرح SF(0.45)VA(60) دارای بیشترین مقدار جریان اسلامپ و طرح SF(0.15)VA(30) کمترین مقدار جریان اسلامپ را در میان تمامی طرح های اختلاط دارا هستند.



شکل ۸- تغییرات جریان اسلامپ

نتایج آزمایش L-BOX بیانگر افت قابلیت عبور با افزایش درصد الیاف در بتن های خودمترکم حاوی حجم ثابت درشت دانه ها می باشد (شکل ۹). بیشترین مقدار قابلیت عبور مربوط به طرح SF(0.3)VA(50) می باشد.



شکل ۹- تغییرات مقادیر آزمایش جعبه L

#### ۴-۲- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری بتن های خودمترکم مسلح الیافی در شکل ۱۰ نشان داده می شود. مقاومت فشاری کلیه نمونه ها در سن ۲۸ روزه در بازه ۲۹,۲ تا ۴۱,۰۳ مگاپاسکال قرار دارد. در حجم درشت دانه ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد با افزایش حجم الیاف فولادی موج دار از ۰,۱۵٪ به ۰,۴۵٪، مقاومت فشاری به ترتیب ۸ درصد کاهش، ۱۵,۱ درصد کاهش، ۱۵,۶ درصد افزایش و ۲۰ درصد افزایش داشته است. اصلانی و همکاران [۱۸]، ادعا کردند که با افزایش حجم الیاف فولادی از ۰,۲۵ به ۱، مقاومت فشاری بتن از

همچنین شکل ۷ نحوه آزمایش نمونه های دیسک خمشی شیاردار تحت بارگذاری مود اول و آزمایش خمش سه نقطه ای را نشان می دهد.



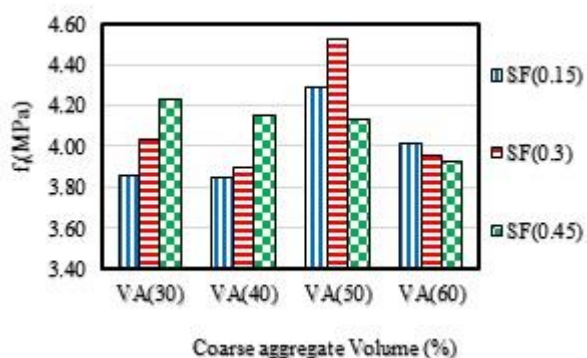
شکل ۷- قرارگیری نمونه های دیسک های خمشی شیاردار تحت بارگذاری مود اول

#### ۴-نتایج و بحث

##### ۴-۱- رئولوژی

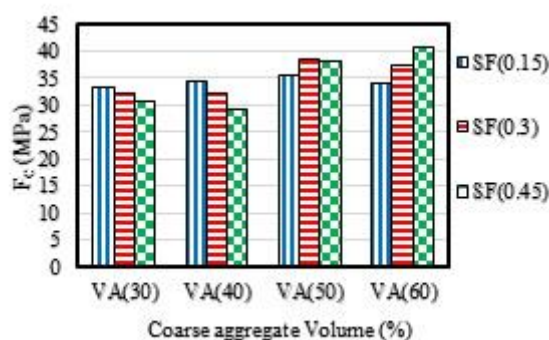
در شکل ۸ تغییرات جریان اسلامپ بر اساس حجم درشت دانه و حجم الیاف فولادی موج دار مختلف نمایش داده شده است. میزان اسلامپ کلیه بتن های خودمترکم حاوی الیاف فولادی موج دار در بازه ۵۸۵ تا ۶۸۵ میلیمتر می باشد که الزامات آیین نامه افنارک [۳۶] را رعایت می کند. بر اساس شکل ۸ زمانیکه حجم درشت دانه ها برابر با ۳۰ درصد و ۶۰ درصد می باشد با افزایش حجم الیاف از ۰,۱۵٪ به ۰,۴۵٪ مقدار اسلامپ کاهش می یابد. این پدیده برای طرح حاوی ۳۰ درصد به کاهش مقدار درشت دانه ها و در نتیجه کاهش نیروی فشاردهنده (پشران) می باشد اما در بیشترین حجم سنگ دانه (۶۰ درصد)، شکل ظاهری الیاف (دوسرهوک و موجدار بودن) و اندرکنش بین سنگ دانه ها و الیاف، قابلیت جریان پذیری را کاهش می دهد. در حالی که در VA(40) و VA(50)، افزایش حجم الیاف پذیری بتن خودمترکم را بهبود می بخشد. در حجم های مختلف الیاف، با افزایش حجم درشت دانه ها از ۳۰٪ به ۶۰٪ مقدار اسلامپ افزایش می یابد. ترک و همکاران [۴۰] مدعی هستند استفاده از ۱٪ و ۱,۵٪ الیاف فولادی،

VA(60)، مقدار مقاومت کششی حدود ۱,۷٪ کاهش یافته است. نیک بین و همکاران [۴۲] با افزایش حجم درشت دانه ها از ۳۰ درصد به ۶۰ درصد، مقاومت کششی در ابتدا کمی کاهش و سپس افزایش می یابد. از نظر آنها این پدیده به قوی تر بودن سنگ دانه ها در مقایسه با سایر اجزای بتن نسبت داده می شود. مقاومت کششی در سن ۲۸ روزه برای طرح اختلاط های حاوی ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد حجم درشت دانه نسبت به حجم کل، با افزایش حجم الیاف فولادی موج دار (۱۵٪-۰,۴۵٪) به ترتیب در بازه ۳,۸۶ تا ۴,۲۳، ۳,۸۵ تا ۴,۱۵، ۴,۲۹ تا ۴,۱۳ و ۴,۰۱ تا ۳,۹۳ مگاپاسکال تغییر می کند.



شکل ۱۱- تغییرات مقاومت کششی

۴۶,۲۴ به ۶۰,۴۱ مگاپاسکال افزایش یافته است. همچنین با افزایش حجم درشت دانه از ۳۰ به ۶۰ در بتن های خودمتراکم حاوی ۰,۱۵٪، ۰,۳٪ و ۰,۴۵٪ به ترتیب منجر به بهبود ۲,۷ درصد، ۱۶,۳٪ و ۳۴٪ مقاومت فشاری خواهد شد. مداح و همکاران [۴۱] معتقد هستند تأثیر حجم درشت دانه بر مقاومت فشاری مثبت بوده و در بتن های با مقاومت کمتر مشهودتر است. نیک بین و همکاران [۴۲] گزارش کردند بهبود مقاومت فشاری با افزایش حجم درشت دانه ها به ایجاد اسکلت بندی بهتر در بتن نسبت داده می شود. از طرفی افزایش حجم سنگ دانه منجر به گسترش ناحیه ITZ شده و فاصله بین درشت دانه ها را کاهش می دهد.



شکل ۱۰- تغییرات مقاومت فشاری

#### ۴-۴- مدول الاستیسیته

مدول الاستیسیته نمونه های تحقیق حاضر، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مدول الاستیسیته کلیه نمونه ها در بازه ۲۶,۳ تا ۳۴,۲ گیگاپاسکال قرار دارد که کمترین مقدار مربوط به طرح SF(0.45)VA(30) و بیشترین مقدار مربوط به طرح اختلاط SF(0.45)VA(60) می باشد. وقتی که حجم درشت دانه برابر با ۳۰ درصد می باشد کاهش ناچیزی در مقدار مدول الاستیسیته با افزایش درصد الیاف فولادی موج دار (از ۰,۱۵٪ به ۰,۴۵٪) مشاهده شده است (به میزان ۳,۳ درصد کاهش) اما در حجم درشت دانه ۴۰ درصد و ۶۰ درصد، افزایش حجم الیاف فولادی موج دار (از ۰,۱۵٪ به ۰,۴۵٪) سبب بهبود مدول الاستیسیته (به ترتیب ۲۰,۴ درصد و ۹,۶ درصد) می شود. همچنین در درصد حجم الیاف ثابت با افزایش حجم درشت دانه از ۳۰ درصد به ۶۰ درصد، مقدار مدول الاستیسیته بهبود می یابد. این پدیده احتمالاً به بهبود اسکلت بندی بتن بر اثر افزایش مقدار درشت دانه مربوط می باشد.

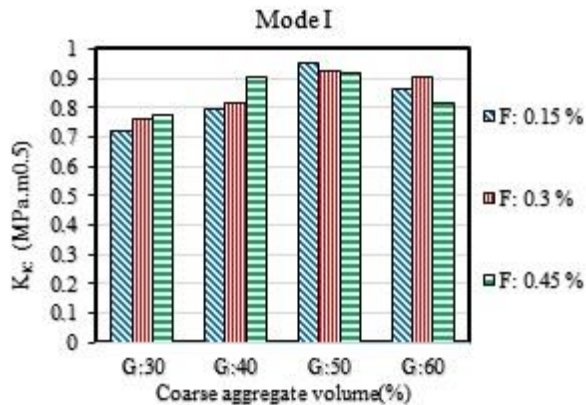
#### ۴-۳- مقاومت کششی

شکل ۱۱ بیانگر مقاومت کششی بتن های خودتراکم مسلح الیافی می باشد. بر اساس شکل ۱۱، با افزایش حجم الیاف برای VA(30) و VA(40)، مقاومت کششی افزایش می یابد. درصد تغییرات مقاومت کششی بتن های حاوی ۰,۴۵٪ الیاف فولادی موج دار در مقایسه با بتن های حاوی ۰,۱۵٪ الیاف فولادی موج دار برای VA(30)، VA(40)، VA(50) و VA(60) به ترتیب برابر با ۹,۷٪ و ۷,۹٪ افزایش، ۳,۷٪ و ۲٪ کاهش داشته است. افزایش مقاومت کششی بتن های خودمتراکم حاوی الیاف فولادی (۰,۲۵ تا ۱) از ۶,۲۵ به ۶,۹۷ مگاپاسکال توسط اصلانی و همکاران [۱۸] گزارش شده است. طرح اختلاط SF(0.3)VA(50) دارای بیشترین مقدار مقاومت کششی (۴,۵۲ مگاپاسکال) و طرح اختلاط SF(15)VA(40) دارای کمترین مقدار مقاومت کششی (۳,۸۵ مگاپاسکال) می باشد. در درصد الیاف ۰,۴۵٪، با افزایش حجم درشت دانه از VA(30) به



استفاده از الیاف فولادی موج دار جهت بررسی خواص ...

درصد الیاف مقدار چقرمگی شکست مود خالص اول ۳,۳ درصد کاهش یافته است. بیشترین تاثیر گذاری الیاف در G:40 بوده که باعث افزایش ۱۳,۸ درصدی چقرمگی شکست شده است. از طرفی در G:60، استفاده از ۰,۳ درصد الیاف فولادی منجر به ارائه بهترین نتایج شده است.



شکل ۱۴- تغییرات مقادیر چقرمگی شکست مود اول

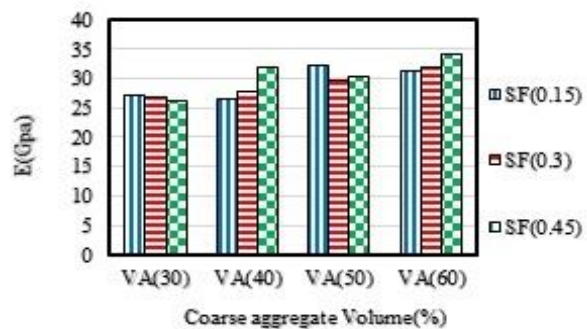
از طرفی با افزایش حجم سنگ‌دانه از ۳۰٪ به ۵۰٪ مقادیر چقرمگی شکست خالص مود اول افزایش و با افزایش حجم سنگ‌دانه از ۵۰٪ به ۶۰٪ مقادیر چقرمگی شکست کاهش می‌یابد. در حقیقت با توجه به اینکه سنگ‌دانه مصرفی در خمیر بتن باعث می‌شود وقتی بتن تحت بار قرار می‌گیرد مسیر شکست دارای پیچ و خم زیادی شود و مقاومت بیشتری برای گسترش ترک ایجاد شود که باعث افزایش چقرمگی شکست می‌شود اما با افزایش حجم سنگ‌دانه از ۵۰٪ به ۶۰٪، سنگ‌دانه درگیری بیشتری با الیاف داشته و فضای چرخش به الیاف نداده و این اندرکنش سنگ‌دانه و الیاف باعث شده الیاف تأثیر منفی داشته باشد.

### ۵- نتیجه‌گیری

این تحقیق به بررسی تأثیر حجم درشت دانه (۳۰٪ تا ۶۰٪) و حجم الیاف فولادی موج دار (۰,۱۵٪ تا ۰,۴۵٪) بر خواص رئولوژی و پارامترهای مکانیکی بتن خودتراکم الیافی پرداخته است. نتایج به صورت زیر بیان می‌گردند:

۱- به‌طور کلی افزایش حجم درشت دانه از ۳۰ به ۶۰، سبب می‌شود جریان پذیری، اسلامپ و قابلیت عبور بتن‌های حاوی درصد ثابت الیاف، بهبود یابد اما تأثیر افزایش حجم الیاف بر خواص بتن تازه

Schindler و همکاران [۴۳]، معتقد هستند زمانیکه حجم کل سنگ‌دانه ثابت باشد مدول الاستیسیته کمتر تحت تأثیر نسبت ریزدانه به درشت دانه است.



شکل ۱۲- تغییرات مدول الاستیسیته

### ۴-۵- مود اول شکست در نمونه‌های دیسک های خمشی شیاردار

بعد از انجام آزمایش خمش سه نقطه ای بر روی نمونه های دیسک تحقیق حاضر، مقادیر چقرمگی شکست مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌شود. شکل ۱۳ نحوه شکست نمونه های دیسک های خمشی شیاردار تحقیق حاضر را تحت شرایط بارگذاری مود اول نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- نحوه شکست نمونه دیسک خمشی شیاردار تحت

بارگذاری مود اول

مطابق شکل ۱۴، در مود اول با افزایش درصد الیاف فولادی موج دار از ۰,۱۵ تا ۰,۴۵ مقدار چقرمگی شکست مود اول برای ۳۰ درصد و ۴۰ درصد حجم درشت دانه افزایش نشان می‌دهد. اما زمانیکه حجم درشت دانه مصرفی برابر ۵۰ درصد باشد با افزایش

concrete, Journal of Advanced Concrete Technology 2003;1:5-15.

[6] Uysal M, Self-compacting concrete incorporating filler additives: Performance at high temperatures, Constr Build Mater 2012;26:701-6.

[7] Lotfy A, Hossain KMA and Lachemi M, Lightweight self-consolidating concrete with expanded shale aggregates: Modelling and optimization, International Journal of Concrete Structures and Materials 2015;9:185-206.

[8] Sharifi Y, Afshoon I and Firoozjaie Z. Fresh Properties of Self-Compacting Concrete Containing Ground Waste Glass Micro particles as Cementing Material. J Adv Concr Tech 2015; 13:50-67.

[9] Zhou L, Zheng Y, Yu Y, Song G, Hou L and Guo Y. Experimental study of mechanical and fresh properties of HVFA-SCC with and without PP fibers. Constr Build Mater 2021; 267:121010.

[10] Boulekbache B, Hamrat M, Chemrouk M, Amziane S. Flexural behavior of steel fibre-reinforced concrete under cyclic loading, Constr Build Mater 2016;126:253-62.

[11] Ryabchikov A, Tamme V, Laurson M, Investigation of Mechanical Properties of Steel Fibre- Reinforced Concrete 2015;96:012018.

[12] Barragán BE. Failure and toughness of steel fiber reinforced concrete under tension and shear, Universitat Politècnica de Catalunya 2002.

[13] Akcaoglu T, Tokyay M, Celik T. Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behavior of concrete under uniaxial compression. Cem Concr Compos 2004; 26:633-8.

[14] Leemann A, Loser R, Munch B. Influence of cement type on ITZ porosity and chloride resistance of self-compacting concrete. Cem Concr Compos 2010; 32:626-36.

[15] Koning G, Holsechemacher K, Dehn F, Weibe D. Self-compacting concrete-time development of material properties and bond behavior. In: Ozawa K, Ouchi M, editors. Proceedings of the 2nd international RILEM symposium on self-compacting concrete. Tokyo: COMS Engineering Corporation; 2001. P. 507-16.

[16] Parra C, Valcuende M, Gomez F. Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete. Constr Build Mater 2011; 25:201-7.

[17] Domone PL. A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. Cem Concr Compos 2007; 29:1-12.

[18] Aslani F, Liu Y, Wang Y. The effect of NiTi shape memory alloy, polypropylene and steel fibres on the fresh and mechanical properties of self-compacting concrete, Constr Build Mater 2019;215:644-659.

در کمترین (۳۰ درصد) و بیشترین (۶۰ درصد) حجم درشت دانه، منفی می‌باشد.

۲- مقاومت فشاری بتن‌های خودمتراکم حاوی حجم درشت دانه ۳۰ و ۴۰ درصد، با افزایش مقدار حجم الیاف کاهش می‌یابد. اما زمانی که حجم درشت دانه‌ها در بتن برابر با ۵۰ و ۶۰ درصد می‌باشد افزایش حجم الیاف (از ۰,۱۵ به ۰,۴۵) به ترتیب باعث افزایش ۱۵,۶ و ۲۰ درصد مقاومت خواهد شد.

۳- استفاده از حجم درشت دانه ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد و حجم الیاف ۰,۱۵، ۰,۳ و ۰,۴۵، سبب بهبود مقاومت کششی نمونه‌ها خواهد شد اما با افزایش حجم الیاف افت ناچیزی (حدود ۲ درصد) در مقاومت کششی بتن‌های حاوی حجم درشت دانه ۶۰ درصد مشاهده شده است.

۴- پارامتر مدول الاستیسیته نمونه‌های حاوی درصد ثابت الیاف فولادی موج دار، با افزایش حجم درشت دانه‌ها در بتن بهبود می‌یابد. با وجود کاهش این پارامتر در VA(30)، با افزایش درصد الیاف مصرفی، در سایر حجم‌های درشت دانه (۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد) افزایش مقدار مدول الاستیسیته مشاهده شده است.

۵- با افزایش حجم درشت دانه از ۳۰٪ به ۵۰٪ در حضور الیاف مقدار چقرمگی شکست خالص مود اول در نمونه‌های دیسک‌های خمشی شیاردار افزایش یافته ولی از ۵۰٪ به ۶۰٪ مقادیر چقرمگی شکست کاهش می‌یابد.

## ۶- مراجع

- [1] [1] Sorelli, L, Meda, A and Plizzari, GA. Steel fiber concrete slabs on ground: a structural matter, ACI Struct J 2006;103.
- [2] Kazemi, MT, Golsorkhtabar, H, Beygi. MHA and Gholamiyabar, M, Fracture properties of steel fiber reinforced high strength concrete using work of fracture and size effect methods, Constr Build Mater 2017;142:482-89.
- [3] Ghasemi M, Ghasemi MR and Mousavi SR. Investigating the effects of maximum aggregate size on self-compacting Steel fiber reinforced concrete fracture parameters. Constr Build Mater 2018; 162:674-682.
- [4] Ghasemi M, Ghasemi MR and Mousavi SR. Studying the fracture parameters and size effect of steel fiber-reinforced self-compacting concrete. Constr Build Mater. 2019; 201:447-60.
- [5] Okamura H and Ouchi M, Self-compacting

- Mixed Concrete, American Society of Testing and Materials Standards; 2009.
- [34] Aliha MRM, Razmi A and Mousavi A. Fracture study of concrete composites with synthetic fibers additive under modes I and III using ENDB specimen. *Constr Build Mater* 2018;190:612-22.
- [35] Aliha MRM, Bahmani A and Akhondi SH. Determination of mode III fracture toughness for different materials using a new designed test configuration. *Materials & Design* 2015;86:863-71.
- [36] EFNARC, The European Guidelines for Self-Compacting Concrete, Specification, Production and Use, 2005.
- [37] BS EN 12390, Part 3: Testing Hardened Concrete. Method of Determination of Compressive Strength of Concrete Cubes, British Standards Institution, 2000.
- [38] ASTM C 496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, American Standards for Testing and Materials, 2011.
- [39] ASTM C 469, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, American Society of Testing and Materials, 2004.
- [40] Turk K, Bassurucu M, Birkin RE. Workability, Strength and flexural toughness properties of hybrid steel fiber reinforced SCC with high-volume fiber 2021;266:120944.
- [41] Meddah MS, Zitouni S, Belâabes S. Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete. *Constr Build Mater* 2010; 24:505–12.
- [42] Nikbin IM, Beygi MHA, Kazemi MT, Vaseghi Amiri J, Rahmani E, Rabbanifar S, Eslami M. A comprehensive investigation into the effect of aging and coarse aggregate size and volume on mechanical properties of self-compacting concrete. *Mater Des* 2014; 59:199-210.
- [43] Schindler AK, Barnes RW, Roberts JB, Rodriguez S. Properties of self-consolidating concrete for prestressed members. *ACI Mater J* 2007;104(1): 53–61.
- [19] Su N, Hsu K, Chai H. A simple mix design method for self-compacting concrete. *Cem Concr Res* 2001;31(12):1799–807.
- [20] Domone PL. A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. *Cem Concr Compos* 2007; 29:1–12.
- [21] Van Itterbeek P, Cauberg N, Parmentier B, Vandewalle L, Lesage K. Eurocode 2 predictions vs. mechanical properties of self-compacting concrete. In: Khayat K, Feys D, editors. *Proceedings of SCC 2010 design production and placement of SCC*. Springer, RILEM Publications 2010;2:823–32.
- [22] Persson BA. Comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete. *Cem Concr Res* 2001; 31:193–8.
- [23] Bazant Z and Planas J, Fracture and size effect in concrete and other quasi-brittle materials," CRC Press, 1998.
- [24] Hoseini SO, Sohrabi MR, Mousavi SR, Ghasemi M. Effects of coarse aggregate and wavy steel fiber volumes on the critical stress intensity factors of mode I and mode III cracks in self-compacting concrete using ENDB specimens. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 2022; 121:103421.
- [25] Aliha MRM and Jafari Haghghat Pour P. Fracture resistance study for hot mix asphalt mixture under out of plane sliding mode. *Eng Fract Mech*. 2020; 15:107230.
- [26] Nikbin IM, Beygi MHA, Kazemi MT, Vaseghi Amiri J, Rahmani E, Rabbanifar S and Eslami M, Effect of coarse aggregate volume on fracture behavior of self-compacting concrete. *Constr Build Mater* 2014; 52:137-45.
- [27] Chen B and Liu J, Effect of aggregate on the fracture behavior of high strength concrete. *Constr Build Mater* 2004;18:585-90.
- [28] Aliha MRM, Razmi A and Mousavi A. Fracture study of concrete composites with synthetic fibers additive under modes I and III using ENDB specimen. *Constr Build Mater*. 2018;190:612-22.
- [29] ASTM C150/C150M Standard Specification for Portland Cement. 2012.
- [30] EFNARC, The European Guidelines for Self-Compacting Concrete, Specification. 2005.
- [31] ASTM C 33. Standard specification for concrete aggregates. American Society of Testing and Materials Standards; 2003.
- [32] ASTM C 494. Standard specification for chemical admixtures for concrete. Annual book of ASTM Standards, 2002.
- [33] ASTM C 94, Standard specification for Ready

## Using Wavy Steel Fibers to Study the Rheological Properties, Mechanical and Fracture Parameters of Self-Compacting Concretes with Different Coarse Aggregate Volumes

Seyed Omid Hoseini

Ph. D student, Civil Engineering Department, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

Mohammad Reza Sohrabi \*

Associate Professor, Civil Engineering Department, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

Seyed Roohollah Mousavi

Associate Professor, Civil Engineering Department, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

Mohammad Ghasemi

Assistant Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Velayat University, Iranshahr, Iran.

### Abstract

Considering the low concrete resistance to cracking and high volume of aggregate used in it, this study has addressed the effects of increasing the volume of wavy steel fibers (0.15, 0.3 and 0.45%) and volume of coarse aggregates (30, 40, 50 and 60%) in relation to the total volume of aggregates on the properties of fresh, hardened self-compacting concrete as well as on the fracture mechanics. To this end, different tests were performed on: 1) fresh concrete (slump-flow, T-50, J-Ring, Sieve analysis and L-BOX tests), 2) hardened concrete (compressive strength, tensile strength and modulus of elasticity tests) and 3) fracture mechanics (Mode I fracture toughness test on ENDB specimens) using 108 cylindrical specimens. Results showed that increasing the coarse aggregate volume improves the rheological properties and increasing the wavy steel fiber volume reduces the efficiency and flowability of the self-compacting concrete, but improves the compressive strength in concretes containing 50 and 60% coarse aggregate volume. Increasing this volume, will slightly reduce the tensile strength of only the fiber reinforced self-compacting concretes containing 60% coarse aggregates. Increasing the coarse aggregate volume by 30 to 60% improves the modulus of elasticity of specimens containing a fixed fiber percent and increasing the volume of wavy steel fibers, at 30 and 40% coarse aggregate volumes, increases the fracture toughness (Mode I) of the self-compacting concrete specimens containing wavy steel fibers.

**Keywords:** Self-compacting concrete, wavy steel fibers, coarse aggregate volume, fracture toughness, mechanical parameters.

---

\* Corresponding Author: sohrabi@hamoon.usb.ac.ir