



Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



Studying Water to Cement Ratio and Steel Fiber Volume Fraction Effects on the Self-Compacting Steel Fiber-reinforced Concrete Fracture Parameters

Mohammad Ghasemi¹, Mohammad Reza Ghasemi², Seyed Roollah Mousavi³

1- PhD candidate in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Balochestan, Zahedan, Iran

2- Professor, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Balochestan, Zahedan, Iran

3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Balochestan, Zahedan, Iran

ABSTRACT

In this research, efforts were made to study the effects of water to cement ratio (W/C) and steel fibre volume fraction (V_f (%)) on the fracture parameters of self-compacting steel fibre-reinforced concrete using both Work Fracture and Size Effect Methods. In an experimental program, a variety of water to cement ratio and volume of steel fibres were considered and five mix designs were prepared in two series. In the first, water to cement ratio were altered (Includes values : $W/C=0.42, 0.52, \text{ and } 0.62$) with a constant volume of steel fibre ($V_f=0.3\%$), and in the second, varied volume of steel fibres (Includes values: $V_f=0.1, 0.3, \text{ and } 0.5\%$) with a constant water to cement ratio (0.52) were considered. Results have shown that an increase in the water to cement ratio reduces the fracture energy, However, we see a different behaviour in the lower water to cement ratio, while an increase in the volume of steel fibre not only increases the fracture energy causing the concrete to become more ductile, but it can also reduce the size effect greatly. G_F/G_f has been found for all mix designs about 11.81 and it has been concluded that the work fracture method yields more fracture energy than the Size effect method.

ARTICLE INFO

Receive Date: 21 December 2018

Revise Date: 11 April 2019

Accept Date: 23 April 2019

Keywords:

Fiber reinforced concrete

Fracture energy

Steel fiber

Self-compacting concrete

Size effect

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.161671.1745

*Corresponding author: mohammad reza ghasemi

Email address: mrghasemi@eng.usb.ac.ir

بررسی اثر آب به سیمان و حجم الیاف فولادی در پارامترهای شکست بتن خودمتراکم حاوی الیاف فولادی

محمد قاسمی^۱، محمد رضا قاسمی^{۲*}، سید روح الله موسوی^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

چکیده

در این تحقیق اثر نسبت اب به سیمان و درصد حجمی الیاف فولادی بر روی پارامترهای شکست بتن خودمتراکم به دو روش کار شکست و اثر اندازه مورد بررسی قرار گرفته است. در یک برنامه آزمایشگاهی نسبت آب به سیمان و درصد حجمی الیاف فولادی متغیر در نظر گرفته شده، بدین منظور ۵ طرح اختلاط در ۲ سری ساخته شده است که در سری اول نسبت اب به سیمان متغیر (شامل مقادیر ۰/۴۲، ۰/۵۲ و ۰/۶۲) و درصد الیاف فولادی مقدار ثابت ۰/۳ درصد در نظر گرفته شده و در سری دوم درصد الیاف فولادی متغیر (شامل ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵) و نسبت اب به سیمان مقدار ثابت ۰/۵۲ درصد در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت آب به سیمان انرژی شکست کاهش و بتن تردتر می‌شود هر چند که در نسبت آب به سیمان کمتر شاهد رفتار متفاوتی می‌باشیم و همچنین با افزایش درصد الیاف فولادی انرژی شکست افزایش و بتن شکل پذیرتر می‌گردد. همچنین نتایج نشان می‌دهد افزایش درصد الیاف فولادی می‌تواند در کاهش اثر اندازه موثر باشد. انرژی شکست در روش کار شکست نسبت به روش اثر اندازه مقدار بیشتری دارد و نسبت GF/Gf برای تمام طرح اختلاط‌ها محاسبه شده است.

کلمات کلیدی: بتن الیافی، انرژی شکست، الیاف فولادی، بتن خود متراکم، اثر اندازه

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	10.22065/JSCE.2019.161671.1745
۱۳۹۷/۰۹/۳۰	۱۳۹۸/۰۱/۲۲	۱۳۹۸/۰۲/۰۳	۱۳۹۸/۰۲/۰۳	۱۴۰۰/۰۲/۳۰	doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.161671.1745
*نویسنده مسئول:		محمد رضا قاسمی			
پست الکترونیکی:		mrghasemi@eng.usb.ac.ir			

۱- مقدمه

بتن خودمتراکم بتنی است که تحت اثر وزن خودش در قالب حرکت کرده و قابلیت جریان خوبی داشته و نیاز به هیچ و بیره‌ای ندارد، به همین دلیل در صنعت جایگاه ویژه‌ای دارد. اما ضعف بتن در کشش چه در بتن معمولی و چه در بتن خودمتراکم باعث شده تا محققین استفاده از الیاف در بتن را به طور خاص مورد بررسی قرار دهند. استفاده از الیاف فولادی در بتن توسط محققین زیادی گزارش شده است [۱-۴]. استفاده از الیاف در بتن خود متراکم روی خواص مکانیکی، رئولوژیکی و جذب انرژی تأثیر گذار می‌باشد. انرژی شکست یکی از پارامترهای مهم در جذب انرژی و آنالیز شکست بتن می‌باشد [۵، ۶]. زمانی که ترک ایجاد می‌شود الیاف با زدن پل در دو طرف ترک مانع از باز شدگی ترک و جذب انرژی بیشتر و شکل پذیری بالاتر بتن می‌گردد. Madandoust و همکاران [۶] گزارش کردند که حضور الیاف در بتن ممکن است باعث تأثیر منفی در سایر خواص بتن از جمله مقاومت فشاری گردد، و چون توزیع الیاف در بتن به صورت تصادفی بوده و در آزمایش مقاومت فشاری اگر الیاف در راستای نیرو قرار داشته باشند مانند یک حفره عمل کرده که می‌تواند محل شروع ریز ترکها از آن نقطه بوده و این امر باعث کاهش افت مقاومت فشاری با افزایش درصد الیاف در بتن باشد.

انرژی شکست بتن یکی از پارامترهای مهم در آنالیز شکست بتن می‌باشد. یکی از ساده‌ترین و رایج‌ترین روشها محاسبه انرژی شکست به روش کارشکست^۱ می‌باشد که اولین بار توسط Hilerborge [۷] ارائه گردید. Bazant و Pfeiffer [۸] برای محاسبه انرژی شکست و پارامترهای شکست روش دیگری به نام اثراندازه^۲ ارائه نمودند و نشان دادند که انرژی شکست وابسته به اندازه سازه می‌باشد.

تغییر در هریک از مواد تشکیل دهنده بتن مانند: تغییر در اندازه بزرگترین سنگدانه اسمی، نسبت آب به سیمان، افزودن الیاف به بتن باعث تغییر در انرژی شکست بتن خودمتراکم می‌گردد که این مطلب توسط محققین زیادی گزارش شده است. Alberti و همکاران [۹] نشان دادند که در بتن خودمتراکم مسلح شده به الیاف پلی اولیفن با افزایش درصد الیاف انرژی شکست افزایش می‌یابد. Kazemi و همکاران [۱۰] تغییر انرژی شکست با تغییر درصد حجمی الیاف در بتن با مقاومت بالا را به دو روش کار شکست و اثراندازه مورد بررسی قرار دادند گزارش کردند با افزایش درصد حجمی الیاف انرژی شکست بتن افزایش می‌یابد. Ghasemi و همکاران [۱۱] نشان دادند که با افزایش بزرگترین سنگدانه اسمی در بتن خودمتراکم مسلح شده به الیاف فولادی، انرژی شکست و پارامترهای شکست تغییر می‌کند. Karamloo و همکاران [۱۲] گزارش کردند که در بتن خود متراکم حاوی سنگدانه سبک با افزایش نسبت آب به سیمان انرژی شکست کاهش می‌یابد. آنها در این تحقیق از دو روش کار شکست و اثر اندازه استفاده نمودند و نشان دادند که در روش کارشکست با افزایش نسبت آب به سیمان انرژی شکست کاهش و پارامتر مشخصه (L_{ch}) افزایش می‌یابد و در روش اثر اندازه افزایش نسبت آب به سیمان انرژی شکست کاهش و پارامتر مشخصه (C_f) نیز افزایش می‌یابد. Sahin و Koksai [۱۳] اثر آب به سیمان و مقاومت الیاف فولادی را در بتن با مقاومت بالا مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند با تغییر نسبت اب به سیمان (شامل مقادیر : ۰/۳۵ ، ۰/۴۵ و ۰/۵۵) و مقاومت الیاف فولادی انرژی شکست و پارامتر طول مشخصه رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد و مشخص شد که توزیع الیاف در ماتریس بتن و مقاومت کششی الیاف دو پارامتر مهم در بتن حاوی الیاف فولادی می‌باشد.

با توجه به اینکه بتن خود متراکم تحت اثر وزن خود در قالب حرکت می‌کند توزیع تصادفی الیاف می‌تواند نقش تعیین کننده‌ای در انرژی شکست بتن خود متراکم حاوی الیاف فولادی بازی کند. همچنین با توجه به تحقیقات کم در زمینه انرژی شکست بتن خود متراکم حاوی الیاف فولادی، در این تحقیق تلاش شده است تا اثر تغییر نسبت اب به سیمان و تغیر درصد الیاف فولادی بر روی پارامترهای شکست را به دو روش کارشکست و اثر اندازه مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور در یک بررسی آزمایشگاهی تیرهای دارای شکاف اولیه^۳ در اندازه‌های مختلف ساخته شده و تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای با جک با کنترل جابجایی قرار گرفته که نتایج آن در بخش های بعد ارائه شده است.

¹ -work fracture method(WFM)

² -Size effect method (SEM)

³ -Notched beam

۲- محاسبه پارامترهای شکست :

۲-۱- روش کار شکست:

برای محاسبه انرژی شکست از تیرهای دارای شکاف اولیه تحت آزمایش خمش سه نقطه ای با استفاده از جک کنترل کرنش استفاده می‌گردد. در این روش از سطح زیر نمودار نیرو جابجایی استفاده می‌شود که این روش اولین بار توسط هیلبرورگ [۷] ارائه گردید.

$$G_F = \frac{W}{b(d-a_0)} \quad (1)$$

که در آن W سطح زیر نمودار نیرو جابجایی، b عرض نمونه، d ارتفاع نمونه و a_0 عمق ناچ می‌باشد. هیلبرورگ همچنین پارامتر طول مشخصه (L_{ch}) را معرفی نمود که مشخص کننده رفتار شکل پذیر یا ترد بتن می‌باشد.

$$L_{ch} = \frac{EG_F}{f_t^2} \quad (2)$$

که در آن E مدول الاستیسیته و f_t مقاومت کششی می‌باشد. این روش به نام کار شکست در RILEM 50 FMC [۱۴] توصیه شده است. البته باید این نکته را در نظر داشت که این توصیه نامه برای بتن معمولی می‌باشد، به همین دلیل بسیاری از محققین [۱۳،۹] این روش را با استفاده از ASTM 1609 [۱۵] و RILEM TC-169 [۱۶] مورد استفاده قرار داده‌اند.

۲-۲- روش اثر اندازه:

با توجه به اینکه در روش کار شکست تنها نمونه‌ها در یک سایز ساخته شده و اثر اندازه در نظر گرفته نمی‌شود به همین دلیل انرژی شکست با استفاده از روش دوم که بر پایه اثر اندازه می‌باشد نیز محاسبه می‌گردد. این روش که توسط Bazant ارائه شده و به نام روش اثر اندازه شناخته شده می‌شود که در RILEM TC 89 [۱۷] توصیه شده است. این روش نشان می‌دهد که انرژی شکست وابسته به اثر اندازه بوده و برای محاسبه پارامترهای شکست تنها نیاز به محاسبه بار ماکزیمم^۴ بوده که از آزمایش تیرهای شکافدار در اندازه‌های مختلف تحت آزمایش خمش سه نقطه ای با استفاده از جک با کنترل جابجایی بدست می‌آید. سپس با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی بر روی بار ماکزیمم، پارامترهای تجربی B و d_0 طبق روابط زیر محاسبه می‌گردد :

$$Y = AX + C \quad (3)$$

$$X = d \quad Y = \left(\frac{1}{\sigma_N}\right) \quad d_0 = \frac{C}{A} \quad B = \frac{1}{\sqrt{C}}$$

نرخ انرژی آزاد شده بدون بعد که وابسته به ژئو متری نمونه می‌باشد با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود :

$$g(\alpha) = 2.25\pi \left(\frac{S}{d} F(\alpha)\right)^2 \quad (4)$$

که در این رابطه S طول دهانه آزاد بوده و در شکل ۱ نشان داده شده است و $F(\alpha)$ تابع استخراج کمکی می‌باشد. در نهایت پارامترهای شکست از روابط زیر محاسبه می‌گردد :

$$G_f = \frac{g(\alpha_0)}{AE} \quad (5)$$

$$C_f = \frac{Cg(\alpha_0)}{A\dot{g}(\alpha_0)} \quad (6)$$

$$K_{IC} = \sqrt{EG_f} \quad (7)$$

⁴ Peak load

که در آن $\alpha_0 = \frac{a_0}{d}$ ، طول ترک a_0 ، مدول الاستیسیته E ، شیب خط رگرسیون C_f ، طول موثر منطقه صدمه دیده نوک ترک^۵ و K_{IC} چقرمگی شکست می باشد. در این روش محاسبه تنش اسمی با توجه به تشابه و ژئومتری نمونه ها از فرمول زیر محاسبه می شود :

$$\sigma_N = \frac{B}{\sqrt{1+\beta}} \quad , \quad \beta = \frac{d}{d_0} \quad (۸)$$

در این رابطه β عدد تردی می باشد که توسط Bazant و Kazemi [۱۸] ارائه شده است. در این رابطه اگر $d \gg d_0$ باشد نشان می دهد که رفتار سازه ترد و نزدیک به مکانیک شکست خطی^۶ (LEFM) می باشد و اگر $d \ll d_0$ باشد نشان می دهد که رفتار سازه نزدیک به تنش حدی^۷ می باشد و بین این دو مقدار رفتار شکست غیر خطی را نشان می دهد



شکل ۱: مجموعه دستگاه برای آزمایش نمونه ها، نمونه با ارتفاع ۱۰ سانتی متر (چپ)، ارتفاع ۲۰ سانتی متر (راست)

جدول ۱: مشخصات طرح های اختلاط بتن ساخته شده

مواد مصرفی	Weight(kg/m ³)					
	سری ۱			سری ۲		
	SCSF-42-3	SCSF-52-3	SCSF-62-3	SCSF-52-1	SCSF-52-3	SCSF-52-5
سیمان(kg)	400	375	350	375	375	375
درصد الیاف فولادی Sf(%)	0.3	0.3	0.3	0.1	0.3	0.5
w/c (by weight)	0.42	0.52	0.62	0.52	0.52	0.52
آب	168	195	217	195	195	195
فوق روان کننده(kg)	5.3	3.75	3	3	3.75	4.5
وزن واحد حجم(kg/m ³)	2245	2260	2345	2240	2260	2295
آزمایشات بتن خودمترکم تازه						
Flow time(sec)	3	2.6	2.10	2.8	2.6	2.88
Slump flow(mm)	710	715	700	680	715	670
L-Box(h ₂ /h ₁)	0.94	0.88	0.86	0.86	0.88	0.85
Sieve test(%)	1.8	2.9	2	1	2.9	1

⁵ effective length of fracture process zone

9- Line elastic fracture mechanic(LEFM)

10- strength criteria

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- مواد

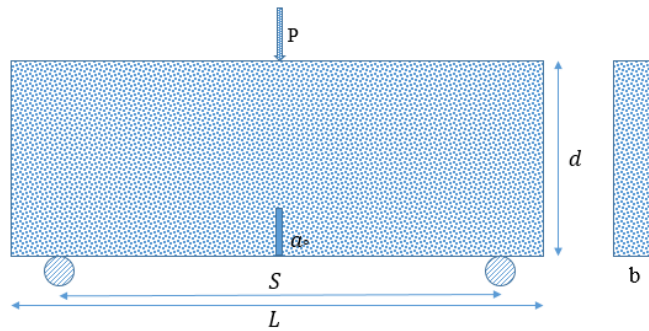
سیمان پرتلند تیپ II، ماسه طبیعی با مدول نرمی ۲,۸ ریزدانه و سنگدانه طبیعی شکسته با بزرگترین اندازه ۱۲,۵ میلی متر و جرم مخصوص ۲,۹ برای درشت دانه استفاده شده است. از پودر سنگ نیز استفاده شده تا ویسکوزیته بتن خود متراکم افزایش یابد. الیاف فولادی دو سر قلاب به طول ۳۰ میلی متر با قطر ۰,۷ میلی متر و مقاومت کششی ۱۲۰۰ نیوتن بر میلی متر مربع با نسبت طول به قطر ۸ مورد استفاده قرار گرفته است. در تمام طرح‌ها از فوق روان کننده با پایه پلی کربوکسی لیت^۱ به بتن اضافه شده تا روانی لازم مطابق توصیه نامه EFNARK [۱۹] را داشته باشد.

۳-۲- طرح اختلاط :

برنامه آزمایشگاهی به گونه ای تنظیم شده تا رابطه بین تغییر نسبت آب به سیمان (w/c) و پارامترهای شکست همچنین رابطه بین تغییر درصد حجم الیاف (V_f) و پارامترهای شکست به دو روش کار شکست و اثر اندازه مورد ارزیابی قرار گیرد. بدین منظور ۵ طرح اختلاط در دو سری در نظر گرفته شده که در جدول ۱ نشان داده شده است. در سری اول سه طرح اختلاط شامل تغییر نسبت آب به سیمان ۰/۴۲، ۰/۵۲ و ۰/۶۲ می باشد در این سری از طرح اختلاطها میزان حجم الیاف ۰/۳٪ مقدار ثابت در نظر گرفته شده، تا با تغییر نسبت آب به سیمان میزان تغییرات در انرژی شکست مورد بررسی قرار گیرد. در سری دوم ۳ طرح اختلاط جداگانه در نظر گرفته شده که در آن حجم الیاف ۰/۱٪، ۰/۳٪ و ۰/۵٪ تغییر می کند در این سری از طرح اختلاطها نسبت آب به سیمان ۰/۵۲ ثابت در نظر گرفته شده تا با تغییر حجم الیاف تغییر در انرژی شکست مورد بررسی قرار گیرد. البته در دو سری طرحها یک طرح اختلاط مشترک است که در مجموع نیاز به ساخت ۵ طرح می باشد. در تمام طرح اختلاطها نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب باز شده و به داخل تانک آب با دمای $20 \pm 2^\circ$ به مدت ۲۸ روز تا زمان آزمایش نگهداری شده است.

۳-۳- اندازه نمونه‌ها و روش تست :

برای محاسبه پارامترهای شکست از آزمایش تیرهای دارای شکاف اولیه تحت آزمایش خمش سه نقطه ای (شکل ۲) استفاده می شود اندازه و اندازه نمونه‌ها در دو روش کار شکست و اثر اندازه متفاوت می باشد. در روش کار شکست اندازه نمونه تیرها با استفاده از توصیه ASTM 1609 [۱۵] به ابعاد $100 \times 100 \times 350 \text{ mm}^3$ با دهانه 300 mm مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش نسبت a_0/d برای تمام نمونه‌ها مقدار ثابت ۰/۳۳ در نظر گرفته شده است. در روش اثر اندازه با استفاده از توصیه RILEM TC 89 [۱۷] عرض نمونه b (شکل ۲) با استفاده از ماکزیمم اندازه سنگدانه انتخاب می گردد. اما با توجه به اینکه در این تحقیق از الیاف فولادی به طول ۳۰ میلی متر استفاده شده است ASTM 1609 توصیه می کند که عرض قالب b سه برابر طول الیاف انتخاب گردد. با توجه به اینکه در بتن خود متراکم بتن تحت اثر وزن خودش در قالب بدون نیاز به هیچ ویبره ای بین میلگردها حرکت می کند بنابراین در این تحقیق برای توزیع مناسب الیاف در قالب عرض قالب b برای تمام نمونه‌ها مقدار ثابت ۱۰۰ میلی متر در نظر گرفته شده است، سایر ابعاد قالب از قبیل d ، L/d ، S/d نیز بر اساس توصیه RILEM TC-89 انتخاب شده که در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین مقدار a_0/d مقدار ثابت ۰,۲ برای تمام نمونه‌ها در نظر گرفته شده است. در هر دو روش برای ایجاد شکاف از ورق acrylic استفاده شده و عرض ناچ مقدار ثابت ۳ میلی متر می باشد.



شکل ۲: ابعاد و مشخصات نمونه‌های ساخته شده [۱۱]

جدول ۲: ابعاد نمونه‌های ساخته شده به روش اثر اندازه

اندازه نمونه‌ها	$d(mm)$	$b(mm)$	a_0/d	S/d	L/d
کوچک	100	100	0.2	2.5	2.67
متوسط	200				
بزرگ	400				

۴-۱-۴-۲: آنالیز نتایج:

همانطور که در بخش ۲ توضیح داده شد برای محاسبه پارامترهای شکست از روش کار شکست و اثر اندازه استفاده شده است

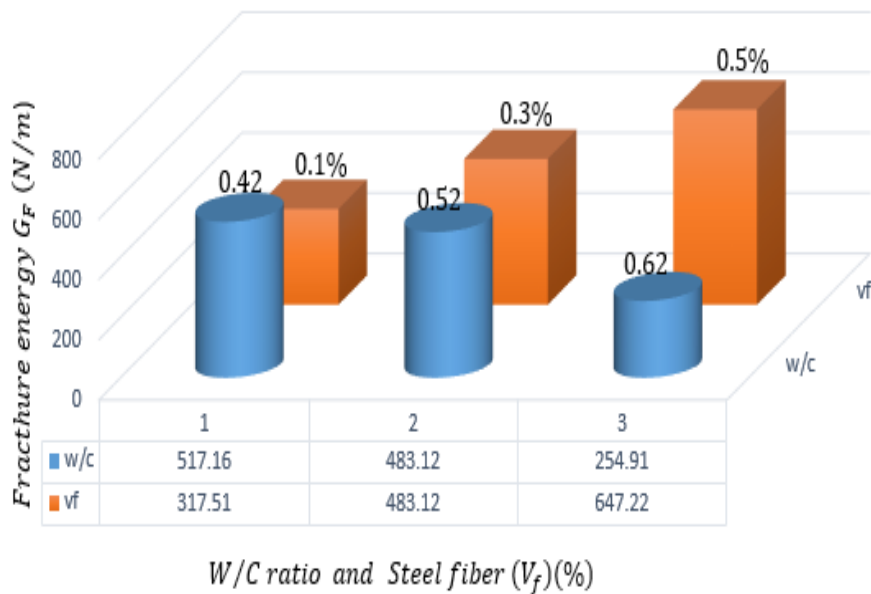
که این دو روش را جداگانه مورد بررسی قرار می‌دهیم:

۴-۱-۴-۱: روش کار شکست:

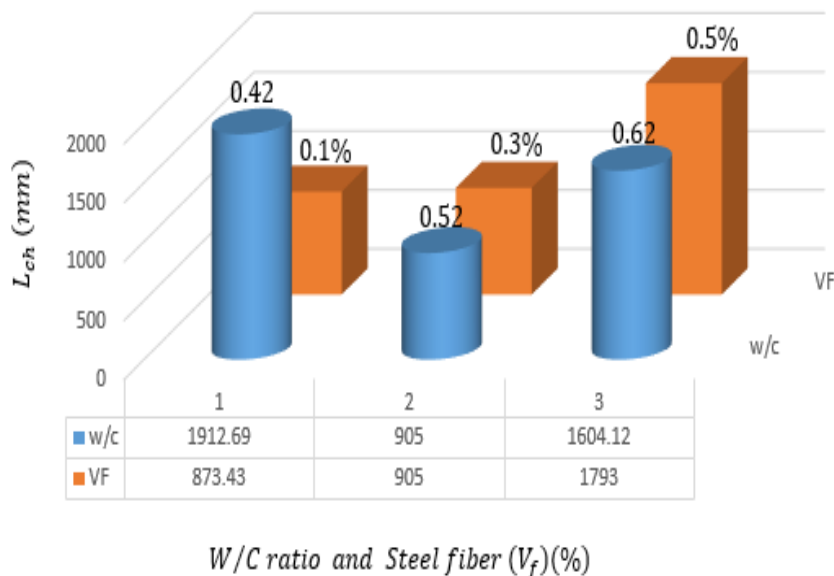
در این روش برای محاسبه انرژی شکست (G_F) از سطح زیر نمودار نیرو جابجایی طبق رابطه (۱) که در بخش ۲ ذکر گردید محاسبه می‌گردد. همچنین پارامتر طول مشخصه (L_{ch}) از رابطه ۲ بدست می‌آید که نتایج در جدول ۳ و شکل ۳ و ۴ ارائه شده است. همانطور که قبلاً ذکر گردید ۲ سری طرح اختلاط در نظر گرفته شده است. که در سری اول پارامتر نسبت آب به سیمان متغییر در نظر گرفته شده و مقدار درصد الیاف ۰/۳٪ درصد ثابت در نظر گرفته شده است و در سری دوم حجم الیاف فولادی متغییر و نسبت آب به سیمان مقدار ثابت ۰/۵۲ در نظر گرفته شده است. در شکل ۳ و ۴ مقدار G_F و L_{ch} را در مقابل تغییر نسبت آب به سیمان (W/C) نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌کنید انرژی شکست با افزایش نسبت آب به سیمان کاهش می‌یابد. شکل ۴ نشان می‌دهد که پارامتر طول مشخصه

جدول ۳: محاسبه مشخصات مکانیکی بتن و پارامترهای شکست محاسبه شده به روش کار شکست

طرح اختلاط	$Steel\ fiber(V_f)(\%)$	$f'_c(MPa)$	$E(GPa)$	$f_t(MPa)$	G_F	L_{ch}
SCSF-42-3	0.3	21.5	26.3	2.6	517.16	1912
SCSF-52-3	0.3	27.55	24.48	3.58	483	905
SCSF-62-3	0.3	20.5	22	2.2	254.97	1604
SCSF-52-1	0.1	24.55	26.95	3.13	317.51	873
SCSF-52-5	0.5	22.55	23.91	2.93	647	1793



شکل ۳: انرژی شکست محاسبه شده به روش کارشکست برای نسبت آب به سیمان و درصد الیاف فولادی



شکل ۴: پارامتر طول مشخصه محاسبه شده به روش کار شکست برای نسبت آب به سیمان و درصد الیاف فولادی

با افزایش نسبت آب به سیمان ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. در تحقیقات گذشته برای بتن‌های بدون الیاف محققین نشان دادند که با افزایش نسبت آب به سیمان G_F کاهش و L_{ch} افزایش می‌یابد [۱۲] دلیل این پدیده را هم می‌توان اینگونه بیان کرد که با افزایش نسبت آب به سیمان تخلخل بیشتر شده و امکان رشد ریز تر کهها نیز بیشتر می‌شود در نتیجه بتن شکل پذیر تر می‌شود. اما در شکل ۴ نشان می‌دهد که در نسبت آب به سیمان ۰/۴۲ میزان ریز ترکه‌ها در اطراف الیاف و سنگدانه کمتر شده و این باعث عملکرد بهتر الیاف می‌شود در نتیجه الیاف باعث شکل پذیری بیشتر بتن در نسبت آب به سیمان کمتر می‌گردد. بررسی‌های اخیر نشان می‌دهد که کیفیت ناحیه انتقال^۹ و خمیر سیمان بستگی زیادی به نسبت آب به سیمان دارد و زمانی که تخلخل زیاد باشد ریز ترکه‌ها گسترش می‌یابد. در شکل ۳ و ۴ همچنین تغییرات G_F و L_{ch} را در مقابل تغییر حجم الیاف مشاهده می-

⁹ - quality of ITZ zone

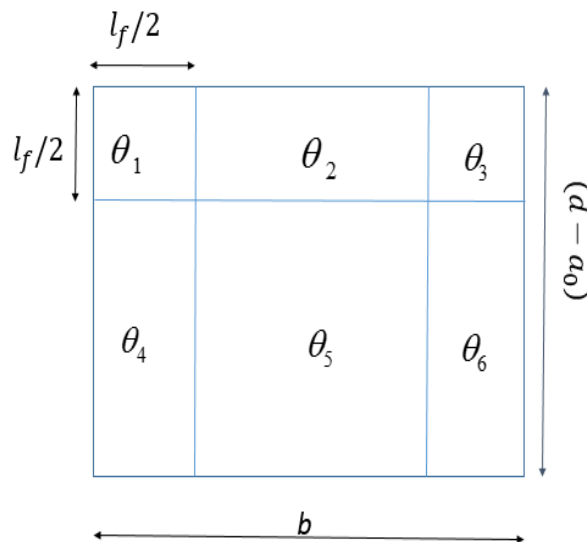
نمایید. شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزایش درصد الیاف انرژی شکست افزایش می‌یابد. این پدیده را می‌توان اینطور توضیح داد که الیاف با زدن پل در دو طرف ترک مانع از رشد ترک شده و جذب انرژی بالا می‌رود و نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد الیاف شکل پذیری بهبود می‌یابد.

یکی از نکات دیگری که برای بتن خودمترکم مسلح شده به الیاف فولادی می‌توان بحث نمود نحوه توزیع الیاف در سطح شکست می‌باشد. برای محاسبه الیاف در سطح شکست محققین بسیاری تحقیق نمودند. *Vandewall* و *Dapont* [۲۱] نشان دادند که برای محاسبه تئوری الیاف فولادی در سطح شکست از رابطه زیر می‌توان استفاده نمود

$$N_{th} = \alpha \times \frac{A \times V_f}{A_f} \quad (9)$$

که در این رابطه $\alpha = 0.519$ ، A سطح مقطع تیر بدون شکاف اولیه، V_f درصد حجمی الیاف و A_f سطح مقطع یک عدد الیاف می‌باشد. برای محاسبه فاکتور جهت از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\theta = \frac{N_{th}}{N_{exp}} \quad (10)$$



شکل ۵: فاکتور جهت بر اساس تقسیم بندی Vandewall و Dupont

Vandewall و *Dupont* برای محاسبه فاکتور جهت^{۱۰} و اثر دیواره^{۱۱}، سطح مقطع تیر را با توجه به طول الیاف (l_f) به نواحی مختلف تقسیم (شکل ۵) و برای هر قسمت به طور جداگانه فاکتور جهت را محاسبه نمودند که نتایج در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- فاکتور جهت محاسبه شده

	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
<i>Dupont and Vandewall</i>	0.84	0.6	0.84	0.6	0.5	0.6
<i>SCSF-42-3</i>	0.5	0.5	0.1	0.37	0.31	0.12
<i>SCSF-52-3</i>	0.5	0.27	0.5	0.5	0.21	0.25
<i>SCSF-62-3</i>	0.5	0.45	0.5	0.37	0.21	0.25
<i>SCSF-51-1</i>	1	0.5	0	0.33	0.33	0.33
<i>SCSF-52-5</i>	0.75	0.27	1	0.35	0.26	0.35

¹⁰ -orientation factor

¹¹ -Wall affect

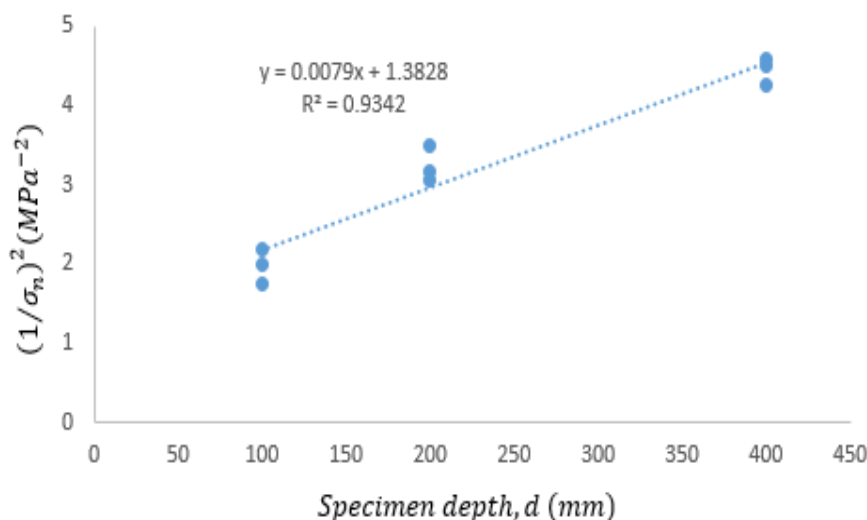
نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که عملاً "پیش بینی توزیع الیاف در سطح شکست کار سختی می‌باشد. عوامل متعددی می‌تواند در توزیع الیاف در بتن موثر باشد از جمله: اختلاط بتن، نحوه پر کردن قالب، اندازه قالب، نوع بتن، تیپ و نوع الیاف و جنس الیاف از جمله پارامترهایی مهمی هستند که می‌توانند در نحوه توزیع الیاف در سطح شکست بتن موثر باشد.

۴-۲- روش اثر اندازه:

در این روش برای محاسبه انرژی شکست همانطور که در بخش ۲ توضیح داده شد، تیرهای دارای شکاف اولیه در اندازه‌های مختلف تحت آزمایش خمش ۳ نقطه‌ای قرار گرفته و طبق توصیه‌نامه RILEM TC 89 تنها نیاز به محاسبه بار ماکزیمم بوده و تغییرات بعد از ترک

در این روش نیاز نمی‌باشد. جدول ۵ نتایج حاصل از بار ماکزیمم تیرهای دارای شکاف اولیه در اندازه‌های مختلف را نشان می‌دهد. برای محاسبه انرژی اولیه شکست و پارامترهای شکست برای هر طرح اختلاط نیاز به آنالیز رگرسیون بر روی نتایج بار ماکزیمم می‌باشد، که در

شکل ۶ به عنوان مثال طرح اختلاط FSC-4-3 نشان داده شده است. نتایج حاصل از خط رگرسیون که شامل شیب و عرض از مبدا می‌باشد عبارتند از: $A=0.0079$ و $C=1.3828$



شکل ۶: رگرسیون خطی محاسبه شده برای محاسبه پارامترهای روش اثر اندازه برای نمونه SCSF-42-3

پارامترهای شکست حاصل از روش اثر اندازه در جدول ۶ نشان داده شده است. شکل ۷ تا ۹ نتایج حاصل از انرژی شکست (G_f) و طول موثر ناحیه صدمه دیده (C_f) و چقرمگی شکست (K_{IC}) را در مقابل تغییر نسبت آب به سیمان نشان می‌دهد. همانطور که در بخش قبل توضیح داده شد می‌توان اینطور نتیجه گیری کرد که با کاهش نسبت آب به سیمان تخلخل در اطراف سنگدانه و الیاف کاهش می‌یابد و در نتیجه الیاف عملکرد بهتری از خود نشان داده و شکل پذیری بهتر می‌شود که شکل ۸ و ۹ نیز این را تایید می‌کند. شکل ۱۰ تا ۱۲ نیز نتایج حاصل از G_f ، C_f و K_{IC} در مقابل تغییر حجم الیاف نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش حجم الیاف فولادی انرژی شکست افزایش یافته و شکل پذیری بهبود می‌یابد. در شکل ۱۳ نتایج بار ماکزیمم حاصل از آزمایش با نتایج بار ماکزیمم تولید شده توسط روش اثر اندازه که از پارامترهای شکست بدست می‌آید نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که پارامترهای محاسبه شده از هر ترکیب می‌تواند برای پیش بینی ساختار شکست بتن خود متراکم حاوی الیاف فولادی (FSC) استفاده شود. از دیگر پارامترهای مهم در روش اثر اندازه عدد تردی (β) می‌باشد که همانگونه که در بخش ۲ توضیح داده شده برای محاسبه مد شکست مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۱۴ نشان می‌دهد که برای همه طرح‌های اختلاط β در محدوده شکست غیر خطی می‌باشد. بررسی منحنی اثر اندازه نیز از نکات مهم

در روش اثر اندازه می‌باشد. شکل ۱۵ نشان می‌دهد که داده‌های تجربی به خوبی با منحنی اثر اندازه بازانت منطبق شده است، نتایج شکل ۱۵ مشخص می‌کند که با کاهش نسبت اب به سیمان شکل پذیری افزایش یافته و در حجم الیاف ۰.۵٪ بیشترین میزان شکل پذیری مشاهده می‌گردد.

جدول ۵: بار ماکزیمم محاسبه شده برای نمونه در اندازه‌های مختلف به روش اثر اندازه

طرح اختلاط	a_0/d	$d(mm)$	بار ماکزیمم نمونه تیر ساخته شده		
			تیر ۱	تیر ۲	تیر ۳
SCSF-42-3	0.2	100	6755	7055	7555
		200	10720	11420	11220
		400	19380	18880	18680
SCSF-52-3	0.2	100	7356.5	7396.5	7056.5
		200	12426	14226	12226
		400	21704	21104	18104
SCSF-62-3	0.2	100	5455	5255	5855
		200	8120	8420	8220
		400	14880	13580	13880
SCSF-52-1	0.2	100	7258	6458	7058
		200	13432	12732	13532
		400	19928	19728	-
SCSF-52-5	0.2	100	6257.37	7457.37	7057.37
		200	13429.5	13829.5	13229.5
		400	20518	21218	19918

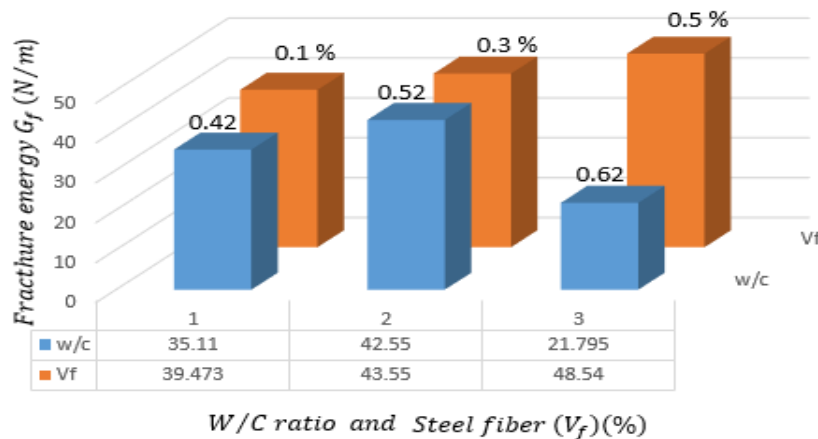
جدول ۶: پارامترهای شکست محاسبه شده به روش اثر اندازه

طرح اختلاط	$G_f(N/m)$	$C_f(mm)$	$B(MPa)$	$d_0(mm)$	$K_{IC}(MPa-mm^{0.5})$	$\delta_c(mm)$
SCSF-42-3	35.11	33.34	0.85	175.27	30.38	0.0213
SCSF-52-3	42.55	30.55	0.943	160.26	32.27	0.0232
SCSF-62-3	21.795	27.58	0.673	145	21.89	0.0160
SCSF-52-1	39.47	33.83	0.906	177.83	32.61	0.0224
SCSF-52-5	48.54	36.37	0.912	191.18	34.07	0.0274

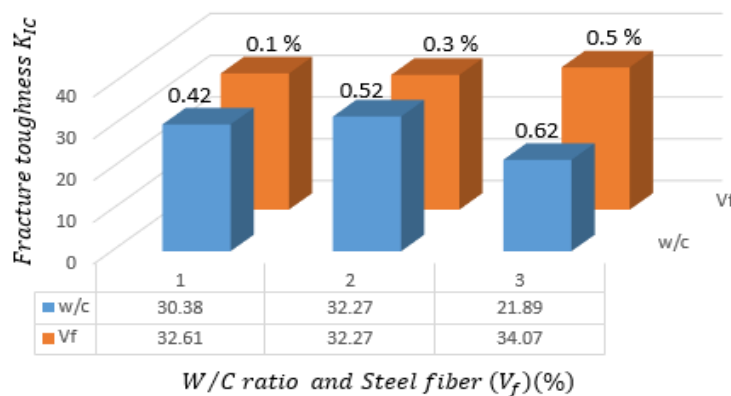
جدول ۷: نسبت بین انرژی شکست به روش کارشکست و اثر اندازه

طرح اختلاط	G_F/G_f
SCSF-42-3	14.73
SCSF-52-3	11.35
SCSF-62-3	11.69
SCSF-52-1	8
SCSF-52-5	13.32

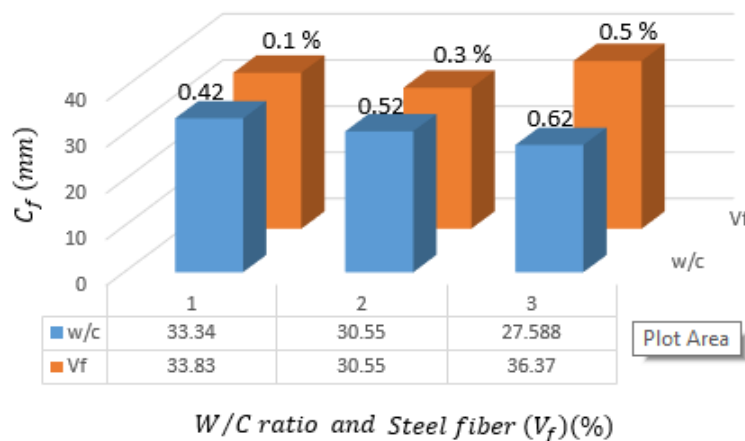
Giraudon و Bazant [۲۰] نشان دادند که G_F را می توان از روی مقدار G_f محاسبه نمود همچنین نشان دادند که نسبت G_F/G_f در حدود ۲٫۵ با ضریب تغییرات ۴۰٪ می باشد. جدول ۷ نسبت G_F/G_f برای ۰٫۱٪، ۰٫۳٪، ۰٫۵٪ الیاف فولادی در نسبت حجمی و نسبت آب به سیمان ۰٫۴۲، ۰٫۵۲، ۰٫۶۲ را نشان می دهد. با توجه به اینکه در روش کار شکست تمام سطح زیر نمودار نیرو جابجایی و در روش اثر اندازه فقط شیب اولیه نمودار برای محاسبه انرژی شکست مورد استفاده قرار می گیرد بنابراین همواره مقدار G_F بزرگتر از G_f می باشد.



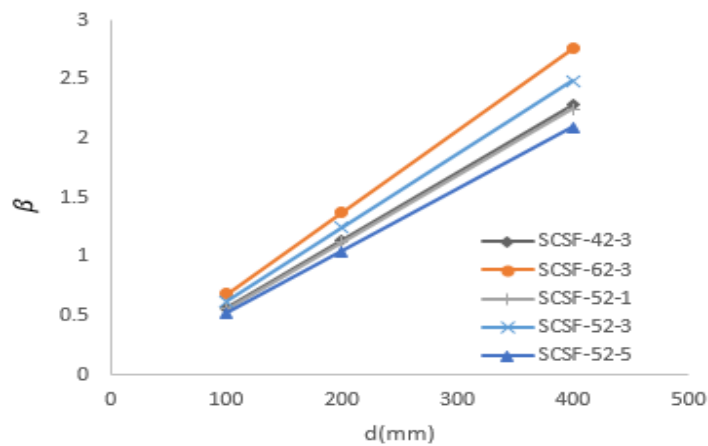
شکل ۷: محاسبه انرژی شکست به روش اثر اندازه برای نسبت های آب به سیمان و درصد الیاف فولادی



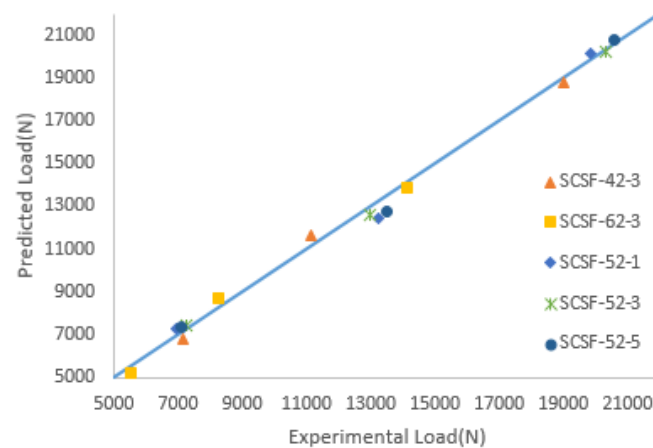
شکل ۸: محاسبه پارامتر استحکام به روش اثر اندازه برای نسبت های آب به سیمان مختلف و درصد الیاف فولادی



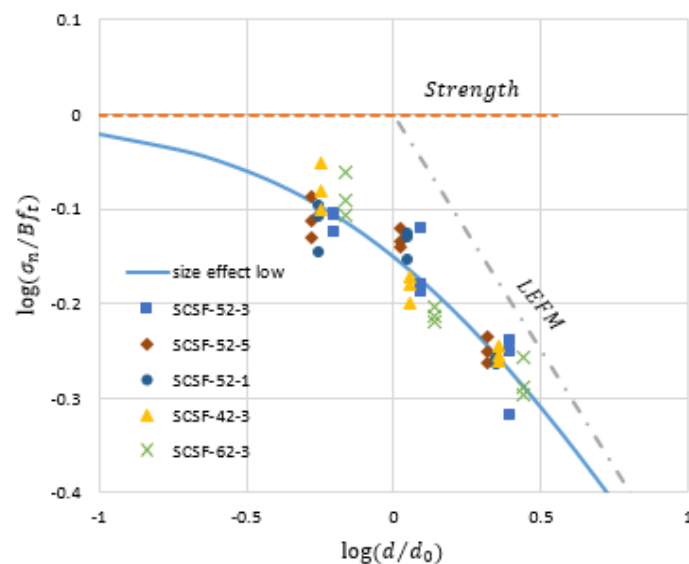
شکل ۹: پارامتر طول منطقه صدمه دیده نوک ترک به روش اثر اندازه برای نسبت های آب به سیمان مختلف و درصد الیاف فولادی



شکل ۱۰: مقایسه نتایج بار ماکزیمم حاصل از آزمایش با نتایج حاصل از فرمول اثر اندازه بازانت



شکل ۱۱: پارامتر β محاسبه شده به روش اثر اندازه



شکل ۱۲: نتایج حاصل از آزمایش نمونه‌ها بر روی منحنی اثر اندازه برای نسبت‌های آب به سیمان مختلف و درصد الیاف فولادی

در ASTM 1609 توصیه شده است که برای بتن‌های حاوی الیاف، پارامتر استحکام (toughness) بتن ($T_{P-\delta}$) که عبارت است از سطح زیر نمودار نیرو جابجایی تا نقطه $l/150$ مورد محاسبه قرار گرفته تا اثرات الیاف بعد از ترک برای نمونه‌ها در اندازه‌های مختلف با نسبت جابجایی یکسان مورد مطالعه قرار گیرد. همچنین مقاومت خمشی تیرها با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردد

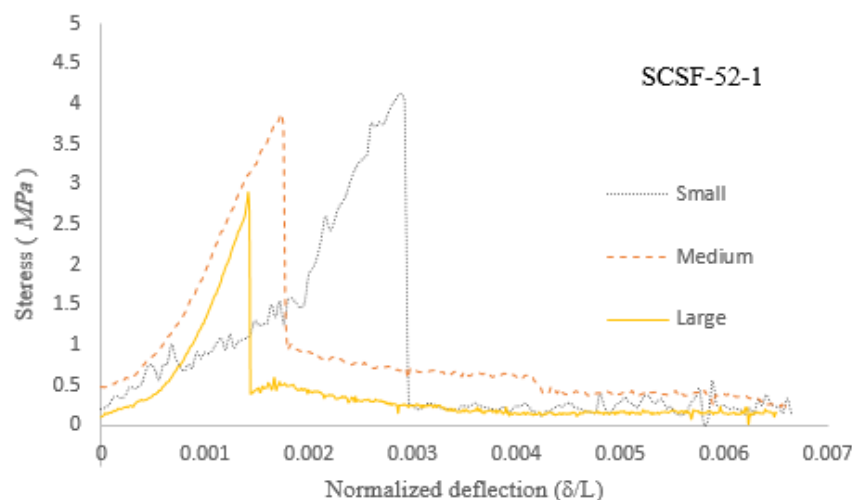
$$f = \frac{3 PS}{2 bd^2} \quad (11)$$

که در این رابطه P نیروی بدست آمده از آزمایش خمش، S طول دهانه آزاد، b عرض تیر و d ارتفاع تیر می‌باشد. نتایج در جدول ۸ برای ۳ نمونه در اندازه‌های مختلف نشان داده شده است.

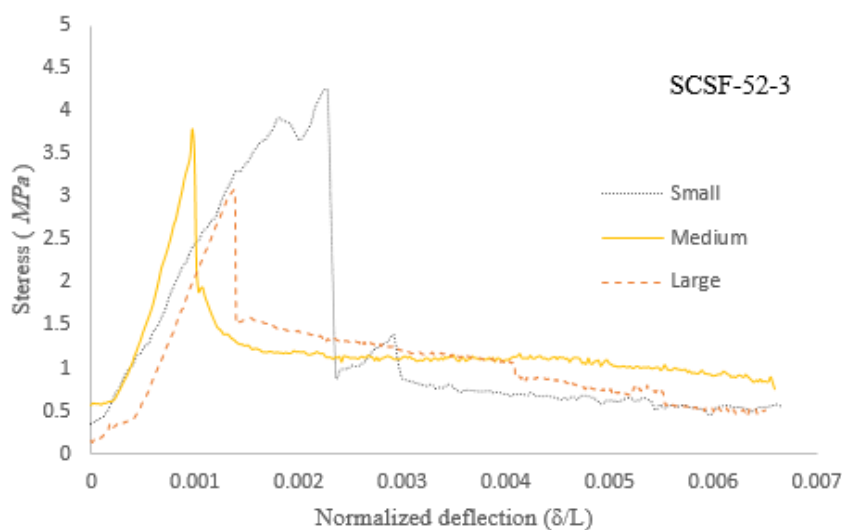
جدول ۸: پارامتر استحکام برای نمونه در اندازه‌های مختلف

طرح اختلاط	Steel fiber(%)	d (mm)	$T_{P-\delta}$ (Nmm)	$T_{f-\delta/L}$ (Pa)
SCSF-52-1	0.1	100	2474	5.74
	0.1	200	10213	5.98
	0.1	400	17912	2.62
SCSF-52-3	0.3	100	3877	9.08
	0.3	200	13428	7.87
	0.3	400	46008	6.73
	0.3	400	46008	6.73
SCSF-52-5	0.5	100	4050	9.50
	0.5	200	15440	9.04
	0.5	400	62164	9.09

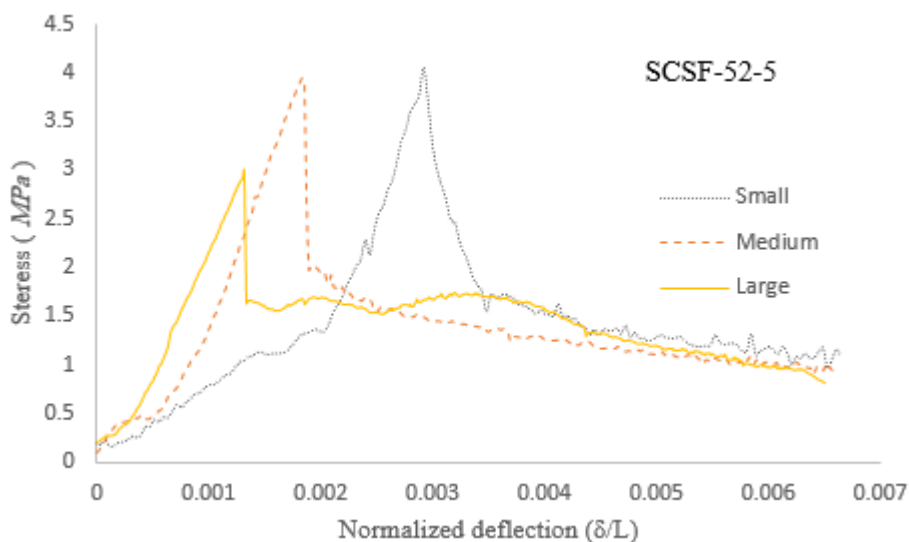
شکل ۱۳ تا ۱۵ نمودار تنش در مقابل جابجایی نرمال شده برای نمونه‌ها در اندازه‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱۳ تا ۱۵ ملاحظه می‌نمایید با بزرگ شدن اندازه نمونه مقدار تنش حداکثر کاهش می‌یابد. همچنین نشان می‌دهد که با افزایش درصد الیاف رفتار بعد از ترک بهبود می‌یابد. شکل ۱۶ پارامتر استحکام نرمالایز شده ($T_{f-\delta/L}$) را که عبارت است از سطح زیر نمودار تنش در مقابل جابجایی نرمال شده (که از حاصل تقسیم جابجایی نمونه بر طول نمونه می‌باشد) برای نمونه‌ها در اندازه‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد با افزایش اندازه نمونه مقاومت خمشی کاهش می‌یابد اما با افزایش درصد الیاف اثر اندازه بسیار کمتر می‌شود و نتایج نشان می‌دهند که استفاده از الیاف می‌تواند میزان اثر اندازه را در بتن کاهش دهد.



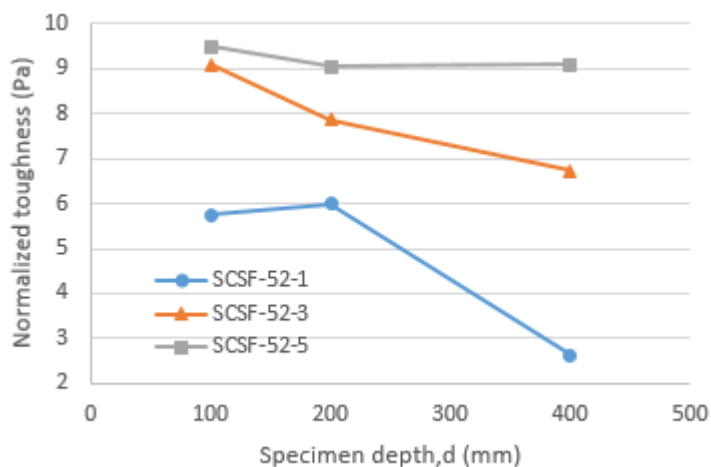
شکل ۱۳: نمودار تنش در مقابل جابجایی نرمال شده برای نمونه در اندازه‌های مختلف با ۰/۱ درصد الیاف



شکل ۱۴: نمودار تنش در مقابل جابجایی نرمال شده برای نمونه در اندازه‌های مختلف با ۰/۳ درصد ایف



شکل ۱۵: نمودار تنش در مقابل جابجایی نرمال شده برای نمونه در اندازه‌های مختلف با ۰/۵ درصد ایف



شکل ۱۶: اثر اندازه نمونه‌ها با تغییر ارتفاع تا نقطه $l/150$ در مقابل سختی نرمال شده

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق پارامترهای شکست با تغییر نسبت آب به سیمان و درصد حجم الیاف فولادی به دو روش کار شکست و اثر اندازه مورد بررسی قرار گرفته و نتایج زیر حاصل گردید :

در روش کار شکست:

۱- با افزایش نسبت آب به سیمان انرژی شکست کاهش و L_{ch} نیز در مجموع می توان گفت افزایش می یابد که نشان می دهد بتن رفتار شکل پذیرتری دارد. اما شاهد رفتار متفاوت در نسبت آب به سیمان ۰/۴ مشاهده می گردد، که می توان گفت دلیل این رفتار پیوستگی بهتر الیاف با بتن در نسبت آب به سیمان کمتر می باشد.

۲- با افزایش درصد الیاف فولادی از ۰,۱٪ به ۰,۵٪ انرژی شکست افزایش و L_{ch} نیز افزایش می یابد که نشان از تمایل به شکل پذیری بیشتر بتن می باشد
در روش اثر اندازه:

۳- با افزایش نسبت آب به سیمان انرژی شکست ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد، یعنی در نسبت آب به سیمان ۰,۵۲ بیشترین مقدار G_f و در نسبت آب به سیمان ۰,۶۲ کمترین مقدار G_f مشاهده می گردد. همچنین نتایج نشان می دهد C_f و L_{ch} با افزایش نسبت آب به سیمان کاهش می یابد

۴- با افزایش درصد الیاف فولادی انرژی شکست افزایش و C_f و K_{IC} نیز افزایش می یابد که نشان می دهد بتن رفتار شکل پذیرتری دارد.

۵- در مجموع در مقایسه دو روش کار شکست و اثر اندازه و چون در روش کار شکست ، اثرات بعد از ترک نیز در نظر گرفته می شود نتایج بهتر از روش اثر اندازه بوده و به همین دلیل G_F بیشتر از G_f می باشد.

۶- نتایج رفتار بعد از ترک نمونه ها در اندازه های مختلف نشان می دهد که افزایش درصد الیاف در کاهش اثر اندازه می تواند موثر باشد.

منابع

- [1] Nehme S.G., Lászl R. , Mir A.E., Mechanical performance of steel fiber reinforced self-compacting concrete in plane, Procedia Engineering, 2017; 196:90 – 96
- [2] Fuente A, Pujadas P, Blanco A, Aguado A, Experiences in Barcelona with the use of fibres in segmental linings. Tunneling and Underground Space Technology 2012;27:60–71
- [3] Iqbal sh, Ali A, Holschemacher A, Bier TH. Mechanical properties of steel fiber reinforced high strength lightweight self-compacting concrete (SHLSCC). Constr. Build. Mater 2015;98:325–333
- [4] Azhdary MoghaddaM M., Miri M., Rigi M., The effect of rebar coating types on bars corrosion of self-compacting concrete, JSCE, 2017: 172-185
- [5] Sanginabadi K., Rostami R., Habibi N., Mostofinejad D., Zarrebini M., Fracture mechanics of fiber reinforced concrete: Experimental study of composition, geometry and hybridization of fibers, JSCE, 2018: 83-94
- [6] Madandoust R, Ranjbar M.M, Ghavidel R, Shahabi F. Assessment of factors influencing mechanical properties of steel fiber reinforced self-compacting concrete. Mat. Des. 2015;83:284–294

- [7] Hillerborg A. Results of three comparative test series for determining the fracture energy GF of concrete. *Mater Struct* 1985;18:407–413
- [8] Bazant Z, Pfeiffer P, Determination of fracture energy from size effect and brittleness number, *ACI Mater. J* 1987;84:463–480.
- [9] Alberti MG, Enfedaque A, Galvez JC. Comparison between polyolefin fibre reinforced vibrated conventional concrete and self-compacting concrete. *Constr. Build. Mater* 2015;85: 182–194
- [10]-Kazemi M.T., Golsorkhtabar H., Beygi M.H.A, Gholamitabar M., Fracture properties of steel fiber reinforced high strength concrete using work of fracture and size effect methods, *Constr. Build. Mater.* 2017;142: 482–489
- [11] Ghasemi M., Ghasemi M.R., Mousavi S.R., Investigating the effects of maximum aggregate size on self-compacting steel fiber reinforced concrete fracture parameters, *Constr. Build. Mater.* 2018;162: 674–682.
- [12]] Karamloo M., Mazloom M., Payganeh G., Influences of water to cement ratio on brittleness and fracture parameters of self-compacting lightweight concrete, *Engineering Fracture Mechanics*, 2016; 168: 227-241
- [13] Sahin Y, Koksal F. The influences of matrix and steel fibre tensile strengths on the fracture energy of high-strength concrete. *Const. Build. Mater*, 2011;25:1801–1806
- [14] RILEM FMC-50. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. *Mater Struct* 1985;18(4):287–290.
- [15] ASTM C 1609/C 1690M-07. Standard test method for flexural performance of fiber reinforced concrete (using beam with third-point loading) 2007: 1–8
- [16] RILEM TC-169-SOC. Indirect test for stress-crack opening curve 2007
- [17] RILEM TC-89. Size-effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete. *Mater Struct* 1990;23(6):461–465.
- [18] Bazant ZP, Kazemi MT, Determination of fracture energy, process zone length and brittleness number from size effect, with application to rock and concrete, *IJFr* 1990;44:111–131
- [19] EFNARC, The European Guidelines for Self-Compacting Concrete, Specification, Production and Use 2005
- [20] Bazant ZP, Becq-Giraudon E, Statistical prediction of fracture parameters of concrete and implications for choice of testing standard, *Cem. Concr. Res*, 2002;32:529–556.
- [21] Dupont L., Vandewalle L., Distribution of steel fibres in rectangular sections, *Cem. Concr. Compos.* 2005;27:391–398.