

# The Effect of Water-Cement Ratio on the Brittleness and Fracture Characteristics of Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete

Hadi Heydarpour<sup>1</sup>, Habib Akbarzadeh Bengar<sup>2\*</sup>, Siroos Gholampour<sup>3</sup>, Mobin Afzalirad<sup>4</sup>

PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran  
Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Mazandaran, Babolsar, Iran, h.akbarzadeh@umz.ac.ir

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran  
Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran

Received: 07 August 2024 Revised: 16 December 2024 Accepted: 16 December 2024

Research paper

## Abstract

A correct understanding of the failure mechanism of self-compacting concrete (SCC) plays an important role in the design of SCC structures and a better understanding of the behavior of structures made of it. Adding steel fibers in self-compacting concrete and different ratios of water to cement can change the cracking behavior and its failure parameters. Therefore, in this research, using 120 grooved beams under three-point bending test, the effect of water-cement ratio (w/c) on the fracture properties and ductility of fiber self-compacting concrete was investigated. The fracture parameters obtained in this study are total fracture energy ( $G_F$ ) and characteristic length ( $l_{ch}$ ) from fracture work method (WFM) and initial fracture energy ( $G_f$ ), effective length of processing area ( $C_f$ ), brittleness number and fracture toughness from size effect method (SEM). The results showed that  $G_F$ ,  $G_f$  with increasing w/c ratio from 0.35 to 0.7 decreased by 23% and 24% respectively. Also, with the increase of w/c ratio from 0.35 to 0.7, the value of parameter  $l_{ch}$  and  $C_f$  increased by 22 and 47%, respectively, while the brittleness number ( $\beta$ ) in SEM decreased by 14.5%. By decreasing the w/c ratio, the strength of the surface transition zone and cement paste increased and the ductility decreased. The ratio of fracture energy obtained from WFM ( $G_F$ ) to initial fracture energy obtained from SEM ( $G_f$ ) for different w/c ratios was equal to 9.9 with a coefficient of variation of 4%. Finally, the obtained values for mechanical properties and test variables were used to develop multivariate prediction models for failure parameters of self-compacting concrete containing fibers with different w/c ratios, which have acceptable accuracy when compared with the results of other researchers.

Key words: Fracture Parameters, Brittleness Number, Fracture Toughness, Self-Compacting Concrete, Steel Fibers

\*Corresponding Author: Habib Akbarzadeh Bengar

Heydarpour, H., Akbarzadeh Bengar, H., Gholampour, S., Afzali Rad, M. The Effect of Water-Cement Ratio on the Brittleness and Fracture Characteristics of Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2024; 9(1): 1-25. <http://doi.org/10.30478/jcsm.2024.471726.1376>

2538-5828/ © 2024 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## تأثیر نسبت آب به سیمان بر مشخصات شکست بتن خودتراکم تقویت شده با الیاف

هادی حیدرپور<sup>۱</sup>، حبیب اکبرزاده بنگر<sup>۲\*</sup>، سیروس غلامپور<sup>۳</sup>، مبین افضلی راد<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائمشهر

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، دانشگاه مازندران، بابلسر

۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائمشهر

۴- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائمشهر

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: h.akbarzadeh@umz.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۷، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۲۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۶

نوع مقاله: پژوهشی

### چکیده

درک صحیح از مکانیزم شکست بتن خودتراکم (SCC)، نقش مهمی در طراحی ساختار SCC و شناخت بهتر از رفتار سازه‌های ساخته شده از آن دارد. افزودن الیاف فولادی در بتن خودتراکم و نسبت‌های مختلف آب به سیمان می‌تواند رفتار ترک‌خوردگی و پارامترهای شکست آن را تغییر دهد. از این رو در این تحقیق، با استفاده از ۱۲۰ تیر شیاردار تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای، به بررسی تأثیر نسبت آب به سیمان ( $w/c$ ) بر خصوصیات شکست و شکل‌پذیری بتن خودتراکم الیافی پرداخته شد. پارامترهای شکست به‌دست‌آمده در این مطالعه انرژی شکست کل ( $G_F$ ) و طول مشخصه ( $l_{ch}$ ) از روش کار شکست (WFM) و انرژی شکست اولیه ( $G_{F1}$ )، طول موثر ناحیه پردازش ( $C_F$ )، عدد شکنندگی و چقرمگی شکست از روش اثر اندازه (SEM) بدست آمدند. نتایج نشان داد که  $G_F$  و  $G_{F1}$  با افزایش نسبت  $w/c$  از ۰/۳۵ به ۰/۷ به ترتیب ۲۳٪ و ۲۴٪ کاهش یافت. همچنین با افزایش نسبت  $w/c$  از ۰/۳۵ به ۰/۷، مقدار پارامتر  $l_{ch}$  و  $C_F$  به ترتیب ۲۲٪ و ۴۷٪ افزایش یافت، در حالی که عدد شکنندگی ( $\beta$ ) در SEM ۱۴/۵٪ کاهش یافت. با کاهش نسبت  $w/c$ ، مقاومت ناحیه انتقال سطحی و خمیر سیمان افزایش و شکل‌پذیری کاهش یافت. نسبت انرژی شکست به دست آمده از WFM ( $G_F$ ) به انرژی شکست اولیه حاصل از SEM ( $G_{F1}$ ) برای نسبت‌های مختلف  $w/c$  برابر با ۹/۹ با یک ضریب تغییرات ۴٪ بدست آمد. در نهایت، مقادیر به‌دست‌آمده برای خواص مکانیکی و متغیرهای آزمایش برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی چند متغیره برای پارامترهای شکست بتن خودتراکم حاوی الیاف با نسبت‌های  $w/c$  مختلف استفاده شد که با مقایسه با نتایج دیگر محققین از دقت قابل قبولی برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: پارامترهای شکست، عدد شکنندگی، چقرمگی شکست، بتن خودتراکم، الیاف فولادی

در سال‌های اخیر توسعه فناوری‌های بتن امکان تولید بتن توانمند را فراهم کرده است که در مقایسه با کارایی و مقاومت بتن معمولی از کارایی و دوام بیشتری برخوردار است. در همین حال، بتن خودتراکم<sup>۱</sup> (SCC) به دلیل خواص روانی و کارایی بسیار مطلوب، توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است. بتن خودتراکم، بتنی است با جریان پذیری بالا که تحت اثر وزن خود و بدون نیاز به ارتعاشات مکانیکی، متراکم شده و قالب را کاملاً پر می‌کند، به طوری که در تمامی مراحل، جدا نشدگی و همگنی خود را حفظ می‌کند [۱ و ۲]. از طرفی، بتن نقش مهمی در صنعت ساختمان دارد و ضعف آن در کشش باعث شده است که بسیاری از محققان به مطالعه استفاده از الیاف فولادی در آن بپردازند [۳ و ۴]. امروزه ثابت شده است که افزودن الیاف به مخلوط بتن علاوه بر بهبود خواص مکانیکی، امکان ایجاد بتنی شکل‌پذیر با قابلیت جذب انرژی بیشتر و همچنین بتنی با ترک خوردگی کمتر را فراهم کرده است [۵]. به طور کلی، پارامترهای موثر بر این بهبود در رفتار بتن خودتراکم مسلح شده به الیاف به شدت وابسته به جنس، شکل، کسر حجمی، مقاومت کششی و مکانیزم مهاری الیاف می‌باشد [۶ و ۷]. در زمینه استفاده از الیاف در بتن خودتراکم تحقیقات بسیاری توسط محققین انجام شده است. از آن جمله ماجین<sup>۲</sup> و همکاران [۸] در مطالعه‌ای به ارزیابی مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی الیاف فولادی پرداخته است. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از الیاف فولاد در SCC علاوه بر کاهش کارایی بتن، می‌تواند مقاومت فشاری بتن را افزایش و توزیع ترک‌ها را یکنواخت‌تر کند. بسیاری از محققان روی جذب انرژی بتن‌های حاوی الیاف کار کرده‌اند. الیاف‌ها از رشد ترک‌ها در بتن جلوگیری کرده و جذب انرژی را افزایش می‌دهند. آلبرتی و همکاران [۹] نشان داده است که افزودن الیاف در بتن معمولی و بتن خودتراکم جذب انرژی را بخصوص در مرحله پس از اوج افزایش می‌دهد. ترک<sup>۳</sup> و همکاران [۵] نیز در مطالعه‌ای به بررسی تاثیر الیاف فولادی بر خصوصیات مکانیکی بتن خودتراکم پرداخته است. نتایج آن‌ها نشان داد کارایی بتن خودتراکم با افزایش کسر حجمی الیاف فولادی کاهش یافت، در حالیکه مقادیر مقاومت فشاری، چقرمگی خمشی و شکل‌پذیری آن افزایش یافت.

مکانیک شکست می‌تواند به عنوان یک روش مناسب برای طراحی بتن در نظر گرفته شود چراکه به خوبی ظرفیت و رفتار بتن را پس از بار حداکثر توصیف می‌نماید. از طرفی، مکانیک شکست توسعه ترک در مواد را مطالعه می‌کند و رفتار یک سازه را با ناپیوستگی‌های هندسی توصیف می‌کند. سازه‌های بسیاری از جمله تونل‌ها، سدها، پل‌ها، سازه‌های مهار هسته‌ای، و غیره وجود دارند که در آن‌ها مساله تحلیل ترک حائز اهمیت است [۱۰ و ۱۱]. در واقع در این سازه‌ها لازم است تا مکانیزم‌های مختلفی را که برای این ترک‌ها رخ می‌دهد شناسایی نموده و اثرات آسیب‌دیدگی ناشی از این ترک‌ها را بر روی آن‌ها بررسی کرد. عوامل بسیاری از جمله تفاوت بین مدول سنگدانه و ماتریس<sup>۴</sup>، سطح تماس<sup>۵</sup> ضعیف بتن سنگدانه و خمیر سیمان، حفره‌های موجود در خمیر سیمان و نوع بار اعمال شده باعث ایجاد ریز ترک و انتشار آن در بتن می‌شوند [۱۲]. از طرفی بازانت و پلاناس<sup>۶</sup> [۱۲] و دباغی و همکاران [۱۳] به این نتیجه رسیدند که یکی از عواملی که بر خواص شکست بتن تأثیر می‌گذارد به منطقه انتقال سطحی (ITZ)<sup>۷</sup> نسبت داده می‌شود که در آن بیشترین تعداد ریز ترک‌ها تشکیل می‌شوند و بنابراین حساس‌ترین ناحیه در ساختار بتن است. خصوصیات ITZ در مقایسه با خصوصیات سنگدانه‌ها و خمیر سیمان بسیار ضعیف می‌باشد. در این ناحیه قبل از اعمال بار بخاطر تنش‌های حرارتی و انقباض ناشی از خشک شدن بتن، ترک‌های بسیار ریزی وجود

<sup>1</sup> Self-Compacting Concrete

<sup>2</sup> Majain

<sup>3</sup> Turk

<sup>4</sup> Matrix

<sup>5</sup> Interface

<sup>6</sup> Bazant and Planas

<sup>7</sup> Interfacial transition zone

دارد که این ترک‌ها به دلیل تخلخل بالا و مقاومت پایین به سرعت گسترش می‌یابند و سبب کاهش چقرمگی شکست بتن می‌شود [۱۳]. فرآیند شکست بتن زمانی رخ می‌دهد که انرژی لازم برای توسعه و رشد ترک‌ها فراهم شود.

همچنین راجشواری و سیواکومار [۱۴] طی مطالعه‌ای نتیجه گرفتند که در SCC هر چقدر سایز و مقدار درشتدانه در بتن بیشتر باشد، انرژی شکست نیز متعاقباً بیشتر می‌باشد. چلیک و بینگول<sup>۸</sup> [۱۵] دریافتند که در SCC با افزودن الیاف‌های بازالت، شیشیه و پلیپروپیلن، انرژی شکست بتن با وجود عدم تغییر آن‌چنانی در مقاومت فشاری، افزایش یافته است.

اگرچه نسبت آب به سیمان (w/c) یکی از مهمترین عواملی است که رفتار شکست بتن را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد، اما هیچ مطالعه‌ای در ادبیات در مورد تأثیر w/c بر ویژگیهای شکست بتن خودتراکم حاوی الیاف انجام نشده است. با این حال، بسیاری از محققان تأثیر w/c را بر پارامترهای شکست سایر انواع بتن در نظر گرفتند. نالاتامی و همکاران<sup>۹</sup> [۱۶] نشان داد که با افزایش نسبت w/c در بتن، رشد ترک سریع‌تر شده و چقرمگی شکست ( $K_{IC}$ ) کاهش می‌یابد. در پژوهشی بیگی و همکاران [۱۷] تأثیر نسبت آب به سیمان بر پارامترهای شکست و شکنندگی بتن خودتراکم را بررسی کرد. نتایج آن‌ها نشان داد که با کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۷ به ۰/۳۵، سطح شکست و طول ناحیه پردازش شکست کاهش یافت، در حالی که انرژی شکست و چقرمگی شکست افزایش یافت. کرملو و همکاران [۱۸] دریافتند که انرژی شکست بتن سبک خودتراکم، با افزایش نسبت w/c از ۰/۳۵ به ۰/۵، ۰/۶۶٪ کاهش یافت.

## ۲- هدف تحقیق

از آنجا که رفتار واقعی سازه‌ها را نمی‌توان با روش‌های تحلیل و طراحی مبتنی بر معیارهای تنش و مقاومت تعیین کرد. از این رو، با استفاده از نظریه‌های مکانیک شکست می‌توان رفتار واقعی سازه‌ها را مورد بررسی قرار داد. اگرچه تا به امروز آیین‌نامه‌های طراحی قادر به استفاده از نظریه‌های مکانیک شکست نشده‌اند، ولی از اهمیت آن و تلاش برای رسیدن به رفتار واقعی سازه کاسته نشده است. از طرفی، پژوهشگران بسیاری تلاش کرده‌اند تا براساس رفتار نیمه ترد بتن، مدل‌های مناسبی برای پیش‌بینی پارامترهای شکست بتن ارائه دهند. این پارامترها عمدتاً با تغییر عوامل مختلف محیطی و درونی چون ترکیبات نسبت مخلوط‌ها تغییر می‌کنند. از این رو در این مطالعه، بر اساس خصوصیات مکانیکی به دست آمده و متغیرهای آزمایش، مدل‌هایی چندمتغیره برای پیش‌بینی پارامترهای شکست بتن خودتراکم حاوی الیاف فولادی با نسبت‌های مختلف آب به سیمان ارائه شدند و با نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاضر و تحقیقات سایر محققین مقایسه شدند. هدف اصلی این تحقیق بررسی تأثیر نسبت w/c بر ویژگی‌های شکست بتن خودتراکم الیافی است. برای این منظور، آزمایش خمش سه نقطه‌ای بر روی ۱۲۰ تیر شیاردار انجام شد. پارامترهای شکست با استفاده از روش کار از شکست (WFM)<sup>۱۰</sup> و روش اثر اندازه (SEM)<sup>۱۱</sup> بر اساس توصیه‌های RILEM [۱۹] مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

## ۳- ارزیابی مشخصات شکست

### ۳-۱- پارامترهای شکست در روش کار شکست

روش‌های مختلفی برای بدست آوردن پارامترهای شکست بتن وجود دارد که از بین آن‌ها، WFM (توصیه شده در RILEM FMC-۵۰ [۱۹]) بسیار ساده است و به‌طور گسترده توسط بسیاری از محققان استفاده می‌شود. با توجه به اینکه در این روش از

<sup>۸</sup> Çelik و Bingöl

<sup>۹</sup> Nallathambi et al.

<sup>۱۰</sup> Work-of-fracture method

<sup>۱۱</sup> Size effect method



تیر خمشی سه نقطه‌ای برای آزمایش استفاده می‌شود، ابعاد آن بر اساس حداکثر اندازه سنگدانه‌های موجود در بتن و از روی جدول استاندارد تعیین می‌شود [۲۰]. اولین مدل مکانیک شکست غیر خطی بتن، مدل هیلبرورگ است که بر اساس مدل ترک چسبیده می‌باشد [۲۱]. در این روش، انرژی شکست با میزان کار مورد نیاز برای ایجاد یک واحد از سطح ترک، برابر است که برای محاسبه آن از مساحت زیر نمودار بار-جابجایی محل اعمال بار در آزمایش، استفاده می‌شود. پس در WFM انرژی شکست ( $G_F$ ) بصورت زیر محاسبه می‌شود:

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

که در آن،  $G_F$  انرژی شکست کل بر حسب  $W_F$  کل انرژی شکست مصرف شده، مربوط به سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان که بر حسب  $N \cdot mm$  می‌باشند. همچنین  $b$ ،  $d$  و  $a_0$  به ترتیب عرض تیر، ارتفاع تیر و عمق شیار بر حسب میلی‌متر می‌باشند. دلیل عمده وابستگی انرژی شکست به ابعاد نمونه، وزن آن می‌باشد. با توجه به اینکه وزن نمونه نقش مهمی در توزیع بار دارد، پس وجود اثر وزن، ممکن است باعث رخ دادن خطاهای قابل توجهی در نتایج بدست آمده شود. به منظور رفع این نقطه ضعف، الیس<sup>۱۲</sup> و همکارانش [۲۲] تحلیل دقیقی بر روی شیوه انجام آزمایش انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که می‌توان اثر اندازه بر روی  $G_F$  را کاهش داد؛ از این رو، روشی به عنوان روش جبران وزن را پیشنهاد کردند. به تبع آن، این روش در استاندارد RILEM TC 187-SOC [۲۳] معرفی و ارائه شده تا در این مطالعه نیز از این روش به کار برده شود.

هیلبرگ و همکارانش [۲۱] شکنندگی و شکل پذیری یک ماده در روش WFM را با استفاده از طول ناحیه فرایند شکست، که با پارامتر طول مشخصه مرتبط است، توصیف کرد. بنابراین، آن‌ها طول مشخصه ماده که مستقل از اندازه و هندسه نمونه می‌باشد را به صورت معادله (۲) ارائه کردند.

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

که در آن،  $l_{ch}$ ،  $E$  و  $f_t$  به ترتیب طول مشخصه (میلی‌متر)، مدول الاستیسیته (مگاپاسکال) و مقاومت کششی (مگاپاسکال) می‌باشند. پارامتر  $l_{ch}$  معیاری برای شکل‌پذیری بتن است، به طوری که هر چه مقدار  $l_{ch}$  بیشتر باشد، شکل‌پذیری بتن بیشتر و در برابر ترک خوردگی مقاومتر است.

### ۳-۲- پارامترهای شکست در روش اثر اندازه

روش اثر اندازه (SEM) توصیه شده توسط RILEM FMT-89 [۲۴]، یکی از روش‌های قابل استفاده است که مستقل از اندازه، نوع و شکل نمونه است. بر اساس این روش، پارامترهای شکست با استفاده از آزمایش خمش سه نقطه‌ای در تیرهای دارای شکاف هندسی مشابه با اندازه‌های مختلف بدست می‌آیند. در SEM، مقاومت اسمی نمونه بتنی با هندسه مشابه را می‌توان طبق قانون اثر اندازه مطابق رابطه (۳) توصیف کرد:

<sup>12</sup> Elices

$$\sigma_N = \frac{B}{\sqrt{1+\beta}}, \beta = \frac{d}{d_0} \quad (3)$$

که در آن،  $\sigma_N$  مقاومت اسمی بر حسب مگاپاسکال می‌باشد. همچنین، پارامتر  $\beta$  نیز عدد شکنندگی پیشنهاد شده توسط بازانت و کاظمی [۲۵] می‌باشد که نشان می‌دهد که چه مود شکستی برای سازه رخ می‌دهد به طوری که اگر  $\beta$  بزرگتر از ۱۰ باشد، گسیختگی با استفاده از مکانیک شکست الاستیک خطی<sup>۱۳</sup> (LEFM) بیان می‌شود و اگر کوچکتر از ۰/۱ باشد برای تعیین گسیختگی از تحلیل حدی پلاستیک می‌توان استفاده کرد و در انتها، اگر  $\beta$  بین این دو مقدار باشد از مکانیک شکست غیرخطی (NLFM) استفاده می‌شود. علاوه بر این، ضرایب  $\beta$  و  $d_0$  پارامترهای تجربی هستند که به خواص مصالح و هندسه سازه مربوط می‌شوند. مقدار  $\sigma_N$  برای نمونه‌هایی با هندسه مشابه در دو بعد را می‌توان با جایگزین کردن نتایج آزمایش‌ها در معادله (۴) محاسبه کرد:

$$\sigma_N = C_n \frac{P_u}{bd} \quad (4)$$

که در آن  $C_n$ ،  $P_u$ ،  $b$  و  $d$  به ترتیب بار حداکثر (نیوتن)، ضریب ثابت، عرض تیر (میلیمتر) و عمق تیر (میلیمتر) می‌باشند. با استفاده از رگرسیون خطی بارهای حداکثر نمونه‌های دارای هندسه مشابه و با اندازه‌های مختلف، و بر اساس معادله (۵)، پارامترهای  $B$  و  $d_0$  را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$Y = AX + C \quad (5)$$

که در آن  $Y = \left(\frac{1}{\sigma_N}\right)^2$ ،  $X = d$ ،  $d_0 = \frac{C}{A}$ ، و  $B = \frac{1}{\sqrt{C}}$  می‌باشد. علاوه بر این،  $A$  شیب خط رگرسیون، و  $C$  محل تقاطع محور  $Y$  از خط رگرسیون است.

در SEM، انرژی شکست و طول موثر ناحیه پردازش را می‌توان با استفاده از معادلات (۶) و (۷) با توجه به مفهوم مکانیک شکست الاستیک خطی بدست آورد.

$$G_f = \frac{g(\alpha_0)}{AE} \quad (6)$$

$$C_f = \frac{g(\alpha_0)}{g'(\alpha_0)} \times \frac{C}{A} \quad (7)$$

در این روابط،  $E$  مدول الاستیسیته بتن،  $g(\alpha_0)$  میزان نرخ آزادسازی انرژی که تابعی بدون بُعد از هندسه سازه است، و  $g'(\alpha_0)$  مشتق اول  $g(\alpha_0)$  با توجه به نسبت  $\alpha_0 = \frac{a_0}{d}$  می‌باشد.

از آنجایی که مقدار  $G_f$  از برون یابی بارهای حداکثر تعداد محدودی تیر با اندازه‌های محدود و برازش آماری بدست می‌آید. کوچکترین خطایی در محاسبه  $A$  (شیب خط رگرسیون) می‌تواند باعث تغییر قابل توجهی در مقدار  $G_f$  شود. بنابراین در محاسبه مقدار  $A$  باید بسیار دقت نمود. دیگر پارامتر شکست نظیر چقرمگی شکست ( $K_{IC}$ ) در این روش به صورت معادله (۸) بیان شد.

$$K_{IC} = \sqrt{EG_f} \quad (8)$$

که در آن،  $K_{IC}$  بر حسب MPa.mm<sup>0.5</sup> می‌باشد.

<sup>13</sup> Linear elastic fracture mechanics



جدول ۲. نسبت‌های مخلوط بتن خودتراکم

| Mix No. | Mixture ID | Fiber $V_f$ (%) | W/C  | Water | Cement | Limestone powder | Fine Aggregates | Coarse Aggregates | SP*  |
|---------|------------|-----------------|------|-------|--------|------------------|-----------------|-------------------|------|
|         |            |                 |      |       |        |                  |                 |                   |      |
| 1       | SCC-WC0.35 | 0.6             | 0.35 | 175   | 500    | 288              | 830             | 728               | 6.32 |
| 2       | SCC-WC0.4  | 0.6             | 0.4  | 188   | 470    | 288              | 830             | 728               | 5.94 |
| 3       | SCC-WC0.44 | 0.6             | 0.44 | 198   | 450    | 288              | 830             | 728               | 5.0  |
| 4       | SCC-WC0.5  | 0.6             | 0.5  | 215   | 430    | 288              | 830             | 728               | 4.4  |
| 5       | SCC-WC0.55 | 0.6             | 0.55 | 220   | 400    | 288              | 830             | 728               | 4.10 |
| 6       | SCC-WC0.6  | 0.6             | 0.6  | 225   | 375    | 288              | 830             | 728               | 3.85 |
| 7       | SCC-WC0.65 | 0.6             | 0.65 | 234   | 360    | 288              | 830             | 728               | 3.57 |
| 8       | SCC-WC0.7  | 0.6             | 0.7  | 238   | 340    | 288              | 830             | 728               | 3.35 |

\*درصد وزن کل مواد سیمان

جدول ۳. خصوصیات تازه‌ی بتن خودتراکم و محدودیت‌های توصیه شده‌ی EFNARC

| Fresh properties           | Slump flow (mm) | Flow time (s) | V-funnel (s) | V-funnel at T <sub>5minutes</sub> (s) | L-Box (h <sub>2</sub> /h <sub>1</sub> ) |
|----------------------------|-----------------|---------------|--------------|---------------------------------------|---|
| Specified limits of EFNARC | 650-800         | 2-5           | 6-12         | Maximum 3s longer than V-funnel       | 0.8-1                                   |
| SCC-WC0.35                 | 690             | 5.2           | 10.34        | 12.14                                 | 0.83                                    |
| SCC-WC0.4                  | 715             | 4.95          | 10.05        | 12.11                                 | 0.88                                    |
| SCC-WC0.44                 | 715             | 4.7           | 9.86         | 11.02                                 | 0.85                                    |
| SCC-WC0.5                  | 720             | 4.7           | 9.84         | 10.93                                 | 0.87                                    |
| SCC-WC0.55                 | 720             | 4.3           | 9.34         | 10.89                                 | 0.88                                    |
| SCC-WC0.6                  | 735             | 4.15          | 9.08         | 10.65                                 | 0.93                                    |
| SCC-WC0.65                 | 725             | 3.9           | 8.95         | 10.5                                  | 0.89                                    |
| SCC-WC0.7                  | 740             | 3.75          | 8.15         | 9.7                                   | 0.91                                    |

#### ۴-۲- نمونه‌های آزمایش و نحوه انجام آزمایش

به منظور ارزیابی پارامترهای شکست با استفاده از WFM، برای هر مخلوط، سه تیر شکافدار با ابعاد یکسان ۱۰۰×۱۰۰×۸۴۰ میلی‌متر (عمق×عرض×طول) و طول دهانه برابر ۸۰۰ میلی‌متر (با نسبت دهانه به عمق تیر برابر با ۸) بر حسب توصیه‌های RILEM FMC-50 [۱۹] استفاده شد. شکل ۲، نمونه‌ی تیر بتنی مورد آزمایش برای تحلیل به روش WFM را نشان می‌دهد. شکاف عمودی اولیه با عرض ثابت ۳ میلی‌متر با قراردادن یک صفحه چوبی در وسط تیر در وجه کششی نمونه‌ها ایجاد شد. در کلیه نمونه‌ها، نسبت عمق شکاف عمودی به عمق هر تیر ۰/۵ ( $a_0 = 0.5d$ ) در نظر گرفته شد. علاوه بر نمونه‌های WFM، مجموعه‌ای از نمونه‌های خمشی دیگر برای SEM بر اساس حداکثر اندازه سنگدانه بتن بر اساس

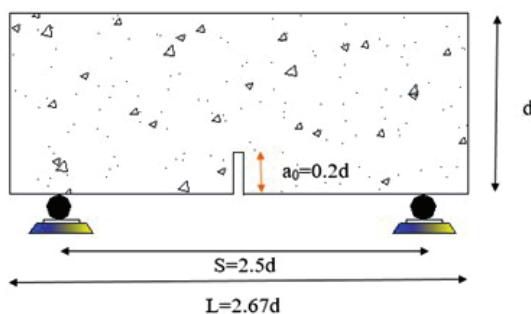
استاندارد RILEM FMT 89 [۲۴] تهیه شد تا پارامترهای شکست با استفاده از این روش به دست آید. در این روش، تیرها دارای عرض یکسان و برابر با ۳۸/۱ میلیمتر و عمق‌های ۳۸/۱، ۷۶/۲، ۱۵۲/۴ و ۳۰۴/۸ میلیمتر و دارای نسبت طول به عمق ثابت و برابر ۲/۶۷ و همچنین نسبت دهانه به عمق ثابت و برابر ۲/۵ می باشد. عمق شکاف در این روش برابر ۰/۲ عمق تیر ( $a_0 = 0.2d$ ) بوده که با توجه به وجود ۴ عمق نمونه متفاوت، عمق شکاف هر نمونه نیز متناسب با ارتفاع آن نمونه متفاوت خواهد بود که برای ایجاد آن در نمونه‌ها همانند روش قبلی، در حین بتن‌ریزی ورقه‌هایی در وسط دهانه هر نمونه و در وجه کششی آن قرار داده شد. تصاویر نمونه‌های SEM در ابعاد مختلف تهیه شده است که در شکل ۳-الف و مشخصات هندسی آن در شکل ۳-ب قابل مشاهده است. در این روش به منظور انجام آزمایش برای هر عمق سه نمونه شیاردار ساخته شد.



شکل ۲. نمونه ساخته شده‌ی WFM



(الف)



(ب)

شکل ۳. (الف) نمونه‌های ساخته شده‌ی SEM؛ (ب) هندسه تیرهای خمشی مورد استفاده مطابق SEM

علاوه براین، برای هر گروه آزمایشگاهی مطابق با BS EN 12390 [۲۷]، سه عدد نمونه مکعبی  $100 \times 100 \times 100$  میلیمتر برای ارزیابی مقاومت فشاری ( $f_c$ ) و همچنین، ۶ نمونه‌ی استوانه‌ای  $150 \times 300$  میلیمتر ساخته شدند، که ۳ نمونه برای آزمایش مدول الاستیسیته (E) و ۳ نمونه برای آزمایش مقاومت کششی ( $f_t$ ) به ترتیب مطابق با ASTM C469 [۲۸] و ASTM C496 [۲۹] انجام شدند. کلیه نمونه‌های بتنی پس از ۲۴ ساعت از قالب بیرون آورده شدند و تا روز ۲۸ مطابق با ASTM C192 مراقبت و نگهداری شدند [۳۰]. تست خمش سه نقطه‌ای روی کلیه تیرهای شیاردار در این مطالعه توسط دستگاه یونیورسال با ظرفیت ۲۵۰ کیلو نیوتون و با استراتژی بار-جابجایی انجام شد. تیرهای شکافدار در WFM و SEM به ترتیب با نرخ ثابت ۰/۴ و ۰/۱ میلیمتر بر دقیقه بارگذاری شدند [۱۷] و [۳۱]. شکل ۴ نحوه انجام آزمایش را برای نمونه‌های WFM و SEM با دستگاه یونیورسال نشان می‌دهد.



(ب)

(الف)

شکل ۴. نمای دستگاه یونیورسال و نمونه‌های آزمایش؛ (الف) نمونه WFM، (ب) نمونه MES ( $d = 76.2 \text{ mm}$ )

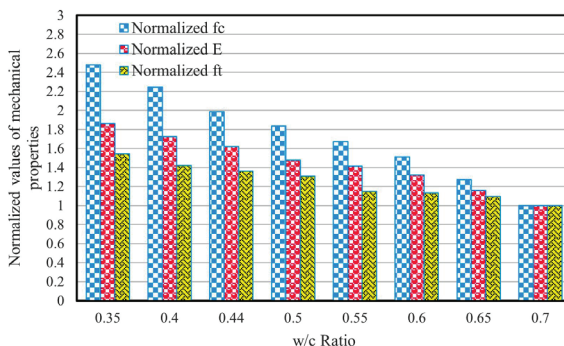
## ۵- نتایج و تحلیل

### ۵-۱- خواص مکانیکی بتن خودتراکم

جدول ۴ و شکل ۵، مقادیر نرمالایز شده خصوصیات مکانیکی نمونه‌های خودتراکم حاوی الیاف با نسبت‌های مختلف آب به سیمان را بر اساس طرح SCC-WC0.7 نشان می‌دهد. از شکل ۵ می‌توان مشاهده کرد که مقادیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول به شدت تحت تأثیر نسبت W/C قرار دارند. با کاهش نسبت W/C از ۰/۷ به ۰/۳۵ مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی الیاف در حدود ۲/۵ برابر افزایش یافت که مهم‌ترین دلیل آن کاهش تخلخل در خمیر سیمان به‌ویژه در ناحیه ITZ بوده است. این امر منجر به بهبود کیفیت ITZ و همچنین افزایش مقاومت فشاری شده است [۳۲ و ۳۳]. به بیانی دیگر در نسبت‌های کمتر آب به سیمان، حجم خمیر سیمان بیشتری در بتن حضور دارد، در نتیجه یکنواختی بیشتری در مقایسه با نسبت‌های بالاتر W/C خواهند داشت [۳۴]. با بررسی شکل ۵، روند مشابه با کسب مقاومت فشاری را می‌توان در مدول الاستیسیته و مقاومت کششی نیز مشاهده کرد. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش نسبت W/C از ۰/۷ به ۰/۳۵، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته نمونه‌ها خودتراکم حاوی الیاف به ترتیب در حدود ۵۵٪ و ۸۶٪ افزایش یافت.

کاهش نسبت W/C باعث بهبود پیوند بین ماتریس سیمان هیدراته و سنگدانه‌ها و در نتیجه سبب افزایش مقاومت و سختی بتن خواهد شد [۳۲]. بیگی و همکاران [۱۷] تأثیر نسبت W/C بر خصوصیات مکانیکی بتن خودتراکم را مطالعه کردند و دریافتند که

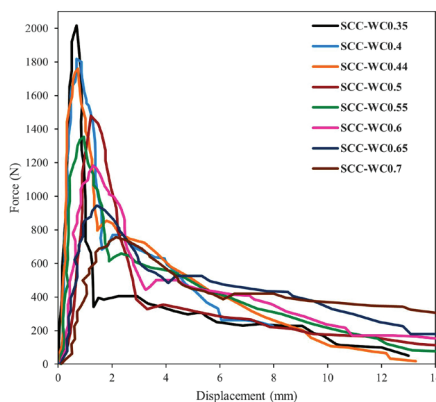
مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی شکافت با کاهش نسبت  $w/c$  از  $0.7$  به  $0.35$  به ترتیب  $190$ ،  $78$ ،  $10.2\%$  افزایش می‌یابد. صدممنازی و همکاران [۳۴] نیز نشان دادند که با کاهش نسبت  $w/c$  از  $0.7$  به  $0.4$ ، مقدار مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی به ترتیب  $119$ ،  $38$  و  $76\%$  افزایش می‌یابد.



شکل ۵. مقادیر نرمالایز شده  $E$ ،  $f_t$ ،  $f_c$  در برابر نسبت‌های مختلف  $w/c$

#### ۵-۲- تجزیه و تحلیل پارامترهای شکست با استفاده از روش کار شکست (WFM)

منحنی بار-جابجایی برای تیرهای شکافدار با استفاده از WFM در شکل ۶ نشان داده شده است. با افزایش نسبت آب به سیمان، شیب شاخه صعودی منحنی نیرو-تغییر مکان بتن خودتراکم کاهش می‌یابد که بیانگر سختی کمتر بتن است. علاوه بر آن، از شکل می‌توان مشاهده کرد که سطح زیر منحنی بار-جابجایی، با افزایش نسبت  $w/c$  به‌طور قابل توجهی کمتر می‌شود که نشان از جذب انرژی پایین‌تر نمونه‌ها دارد. با توجه به شکل می‌توان دریافت که ریزترک‌ها و گسترش آن‌ها بر مناطق قبل و بعد از نقطه اوج تأثیر قابل توجهی بر منحنی‌های بار-جابجایی می‌گذارد. با این حال، هیچ تغییر قابل توجهی در دم منحنی‌ها مشاهده نمی‌شود. همچنین از شکل مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت  $w/c$ ، منحنی بار-جابجایی خوابیده‌تر (شیب شاخه صعودی و نزولی کمتر) می‌شود.



شکل ۶. منحنی نیرو-تغییر مکان برای نسبت‌های مختلف آب به سیمان

میزان تغییرات انرژی شکست بتن خودتراکم حاوی الیاف با  $w/c$  با استفاده از WFM در جدول ۴ و شکل ۷ ارائه شده است. با توجه به جدول ۴ و شکل ۷ می‌توان دریافت که  $G_F$  به‌طور قابل توجهی به نسبت  $w/c$  بستگی دارد، به‌طوری که با افزایش نسبت  $w/c$  از  $0.35$  به  $0.7$ ، مقدار  $G_F$  از  $1294/5$  به  $991/9$   $N/m$  کاهش می‌یابد که با افت  $23\%$  همراه است. علت کاهش انرژی شکست

بتن خودتراکم، محتوا و اندازه منافذ در ITZ بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها می‌باشد که با افزایش نسبت w/c، میزان تخلخل در ماتریس بتن افزایش یافته و در نتیجه انرژی شکست کاهش می‌یابد.

به‌طور کلی بدون در نظر گرفتن نوع بتن، انرژی شکست با کاهش نسبت w/c افزایش می‌یابد. با کاهش نسبت w/c، میزان تخلخل در خمیر سیمان کاهش می‌یابد که منجر به افزایش مقاومت ITZ و عبور مسیر شکست از میان سنگدانه‌ها می‌شود. مطالعات اخیر همچنین وابستگی کیفیت ITZ و خمیر سیمان به نسبت w/c را نشان می‌دهد [۳۵]. همچنین تغییرات نسبت w/c توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. جیاکو و همکاران<sup>۱۴</sup> [۳۶] دریافتند که برای HSC، تغییرات  $G_F$  از ۲۰۵ به ۱۳۵ N/m برای نسبت w/c از ۰/۲۸-۰/۷۵ تغییر می‌کند. بیگی و همکاران [۱۷] تأثیر نسبت w/c بر پارامترهای شکست بتن خودتراکم را مطالعه کردند و دریافتند که انرژی شکست تقریباً ۳۵٪ با کاهش نسبت w/c از ۰/۷ به ۰/۳۵ افزایش می‌یابد. بهاراتکومار و همکاران<sup>۱۵</sup> [۳۷] گزارش دادند که برای بتن با عملکرد بالا<sup>۱۶</sup> (HPC)، با افزایش نسبت w/c از ۰/۳۶ به ۰/۵، ۴۷٪ کاهش می‌یابد. با انجام آزمایش‌های خمشی سه نقطه‌ای بر روی HWC صدرممتازی و همکاران [۳۴] نشان دادند که با افزایش نسبت w/c از ۰/۳۵ به ۰/۶۳ از ۱۳۶/۵ به ۱۱۲ N/m کاهش می‌یابد.

جدول ۴. مشخصات مکانیکی و پارامترهای شکست بتن خودتراکم حاوی الیاف با نسبت‌های مختلف w/c

| Mix ID     | Fiber $V_f$ (%) | w/c  | $f_c$ (MPa) | E (GPa) | $f_t$ (MPa) | Average $G_F$ (N/m) | $l_{ch}$ (mm) |
|------------|-----------------|------|-------------|---------|-------------|---------------------|---------------|
| SCC-WC0.35 | 0.6             | 0.35 | 73.2        | 42.5    | 8.1         | 1294.5              | 862.6         |
| SCC-WC0.4  | 0.6             | 0.4  | 66.2        | 39.3    | 7.45        | 1261.7              | 883.5         |
| SCC-WC0.44 | 0.6             | 0.44 | 58.6        | 36.9    | 7.13        | 1241                | 900.8         |
| SCC-WC0.5  | 0.6             | 0.5  | 54.2        | 33.7    | 6.87        | 1179.4              | 931.1         |
| SCC-WC0.55 | 0.6             | 0.55 | 49.3        | 32.2    | 6.01        | 1118                | 960.5         |
| SCC-WC0.6  | 0.6             | 0.6  | 44.6        | 30.1    | 5.94        | 1008.1              | 979.4         |
| SCC-WC0.65 | 0.6             | 0.65 | 37.5        | 26.4    | 5.75        | 998.6               | 1028.7        |
| SCC-WC0.7  | 0.6             | 0.7  | 29.5        | 22.8    | 5.24        | 991.9               | 1056.5        |

با توجه به تاثیر قابل توجه نسبت w/c بر انرژی شکست و مقاومت فشاری بتن، رابطه‌ای بین  $f_c$ ،  $G_F$  و w/c با بکار بردن تحلیل رگرسیون غیر خطی بدست آمده که برای نمونه‌های خودتراکم تقویت شده با الیاف به صورت رابطه (۹) با یک ضریب تعیین بالا ارائه شده است:

$$G_F = 731 \left( \left( \frac{w}{c} \right)^{-0.38} f_c^{0.047} \right) \quad R^2 = 0.97 \quad (9)$$

<sup>14</sup> Giacco et al.

<sup>15</sup> Bharatkumar et al.

<sup>16</sup> High Performance Concrete

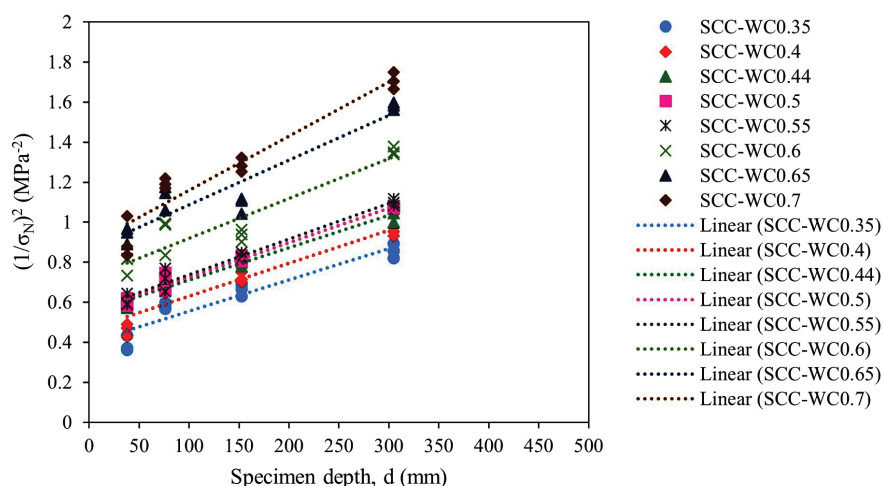


$$P_n^0 = P_n + \frac{2S_n - L_n}{2S_n} \times g \times m_n \quad (11)$$

که در آن،  $P_n^0$  و  $P_n$  به ترتیب بار اوج اصلاح شده و بار اوج ثبت شده توسط تجهیزات آزمایش،  $m_n$  جرم نمونه،  $S_n$  فاصله دهانه نمونه،  $L_n$  طول نمونه،  $g$  شتاب گرانش و  $n$  شماره‌ی نمونه‌های آزمایش شده (بین ۱ تا تعداد کل نمونه‌ها) می‌باشند. بار اوج اصلاح شده برای کلیه نمونه‌های تیر حاوی الیاف فولادی با نسبت‌های مختلف  $w/c$  در جدول ۵ ارائه شده است. تحلیل رگرسیون خطی برای تعیین پارامترهای شکست در SEM برای نمونه‌های SCC حاوی الیاف با نسبت‌های مختلف  $w/c$  در شکل ۹ ارائه شده است.

جدول ۵. بارهای اوج اصلاح شده در SEM برای نمونه‌های خودتراکم با نسبت‌های مختلف  $w/c$

| Mix.ID     | $f_c$<br>(MPa) | d<br>(mm) | Corrected peak load, $P_n^0$ (N) |        |        |
|------------|----------------|-----------|----------------------------------|--------|--------|
|            |                |           | Beam 1                           | Beam 2 | Beam 3 |
| SCC-WC0.35 | 73.2           | 38.1      | 2382                             | 2205   | 2411   |
|            |                | 76.2      | 3751                             | 3790   | 3857   |
|            |                | 152.4     | 7005                             | 7112   | 7314   |
|            |                | 304.8     | 12300                            | 12550  | 12817  |
| SCC-WC0.4  | 66.2           | 38.1      | 2113                             | 1990   | 2057   |
|            |                | 76.2      | 3576                             | 3612   | 3517   |
|            |                | 152.4     | 6870                             | 6930   | 6700   |
|            |                | 304.8     | 11760                            | 11900  | 12030  |
| SCC-WC0.44 | 58.6           | 38.1      | 1909                             | 1870   | 1920   |
|            |                | 76.2      | 3460                             | 3570   | 3400   |
|            |                | 152.4     | 6400                             | 6580   | 6500   |
|            |                | 304.8     | 11250                            | 11625  | 11360  |
| SCC-WC0.5  | 54.2           | 38.1      | 1901                             | 1844   | 1905   |
|            |                | 76.2      | 3420                             | 3577   | 3359   |
|            |                | 152.4     | 6360                             | 6477   | 6458   |
|            |                | 304.8     | 11200                            | 11230  | 11190  |
| SCC-WC0.55 | 49.3           | 38.1      | 1890                             | 1809   | 1894   |
|            |                | 76.2      | 3425                             | 3590   | 3310   |
|            |                | 152.4     | 6303                             | 6380   | 6400   |
|            |                | 304.8     | 11160                            | 10990  | 11080  |
| SCC-WC0.6  | 44.6           | 38.1      | 1608                             | 1606   | 1696   |
|            |                | 76.2      | 2913                             | 2922   | 3179   |
|            |                | 152.4     | 5917                             | 5995   | 6112   |
|            |                | 304.8     | 9998                             | 9890   | 10034  |
| SCC-WC0.65 | 37.5           | 38.1      | 1538                             | 1490   | 1476   |
|            |                | 76.2      | 2713                             | 2822   | 2679   |
|            |                | 152.4     | 5517                             | 5495   | 5690   |
|            |                | 304.8     | 9298                             | 9190   | 9234   |
| SCC-WC0.7  | 29.5           | 38.1      | 1450                             | 1390   | 1430   |
|            |                | 76.2      | 2483                             | 2562   | 2529   |
|            |                | 152.4     | 5050                             | 5190   | 5030   |
|            |                | 304.8     | 9000                             | 8900   | 8780   |



شکل ۹. رگرسیون خطی برای تعیین پارامترهای شکست در SEM برای نمونه‌ها با نسبت‌های مختلف w/c

شکل ۱۰، تغییرات  $G_f$  را در مقابل نسبت‌های مختلف w/c در نمونه‌های SCC تقویت شده با الیاف نشان می‌دهد. جدول ۶ و شکل ۱۰ نشان می‌دهد که مقدار  $G_f$  از ۱۲۹/۶ به ۹۷N/m/۹ با افزایش نسبت w/c از ۰/۳۵ به ۰/۷ کاهش می‌یابد که کمترین مقدار مربوط به نمونه SCC-WC0.7 (با بیشترین نسبت w/c) می‌باشد. بنابراین، مقدار پارامتر  $G_f$  برای SCC با افزایش نسبت w/c از ۰/۳۵ به ۰/۷ با یک افت در حدود ۲۴٪ بدست آمده است. دلیل افت انرژی شکست SCC می‌تواند ضعف ناحیه انتقال سطحی (ITZ) بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها باشد که با افزایش نسبت آب به سیمان رخ می‌دهد [۳۳].

مقاومت فشاری یک معیار مهم برای تعیین رفتار سازه در برابر بارهای محوری بتن است که بسیاری از خواص مکانیکی بتن به آن بستگی دارد. جدول ۶ نشان می‌دهد که مقدار  $G_f$  برای بتن خودتراکم الیافی با نسبت‌های مختلف آب به سیمان با افزایش مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. در این تحقیق با کاهش نسبت w/c از ۰/۷ به ۰/۳۵، مقاومت فشاری ۱۴۸٪ افزایش پیدا کرد و میزان انرژی شکست ۳۲٪ افزایش یافت. نتایج محققان از جمله بیگی و همکاران [۱۷]، کرملو و همکاران [۱۸] و صالحی و مظلوم [۳۸] روی بتن‌های خودتراکم با نسبت آب به مواد سیمانی متفاوت نشان داد که با کاهش مقاومت فشاری،  $G_f$  بتن نیز کاهش می‌یابد. علاوه بر آن، گتو و همکاران [۳۹] گزارش کردند که با افزایش ۱۶۰٪ در مقاومت فشاری، انرژی شکست ۱۲٪ افزایش یافت. تحقیقات انجام شده توسط ژائو و همکاران [۴۰] نیز نشان دادند که با افزایش مقاومت فشاری از ۲۰ به ۶۰ مگاپاسکال، انرژی شکست حدود ۲۰٪ افزایش می‌یابد و پس از آن ثابت می‌ماند.

با استفاده از داده‌های جدول ۶، رابطه‌ای برای  $G_f$  بر اساس متغیرهای مقاومت فشاری بتن ( $f_c$ ) و نسبت w/c برای نمونه‌های SCC تقویت شده با ۰/۶ الیاف فولادی در رابطه (۱۲) ارائه شده است.

(۱۲)

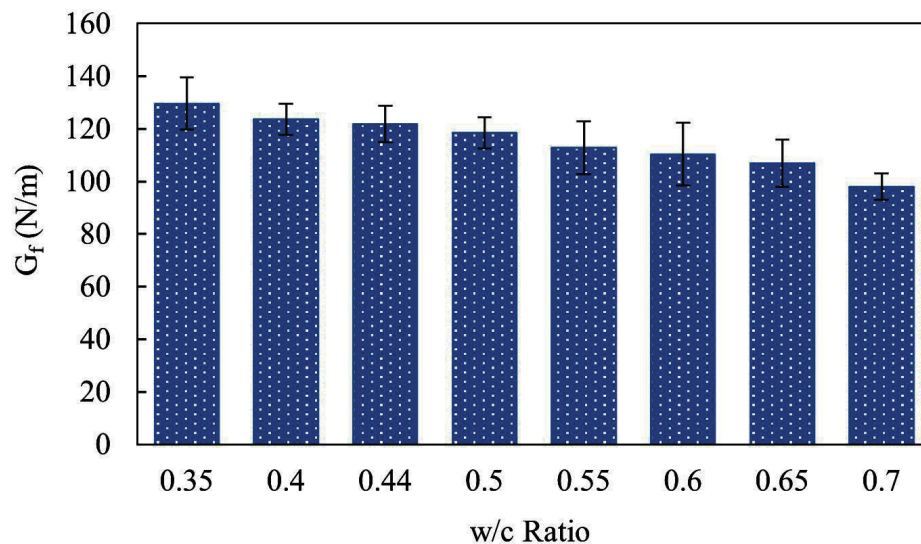
$$G_f = 40.6 \left( \left( \frac{w}{c} \right)^{-0.052} + f_c^{0.26} \right) \quad R^2 = 0.99$$

<sup>17</sup> Gettu et al.

<sup>18</sup> Zhao et al.

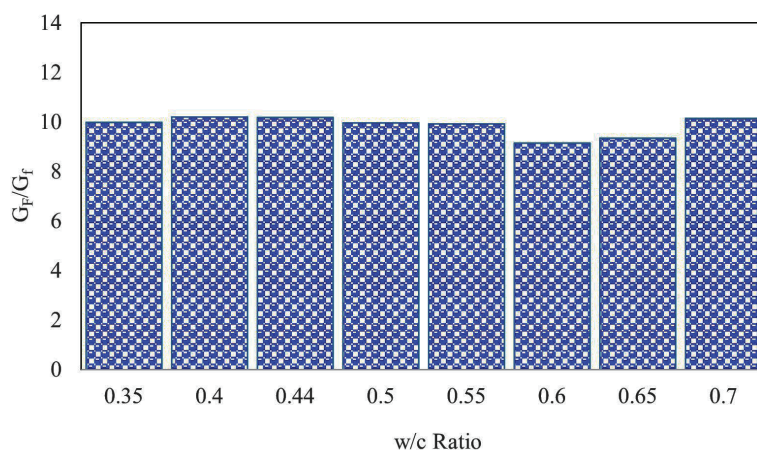
جدول ۶. پارامترهای شکست بتن خودتراکم در SEM با نسبت‌های مختلف w/c

| Series     | $f_c$<br>(MPa) | E<br>(GPa) | $a_0/d$ | $g(\alpha_0)$ | $G_f$<br>(N/m) | $C_f$<br>(mm) | B<br>(MPa) | $d_0$<br>(mm) | $K_{IC}$<br>(MPa.mm <sup>0.5</sup> ) |
|------------|----------------|------------|---------|---------------|----------------|---------------|------------|---------------|--------------------------------------|
| SCC-WC0.35 | 73.2           | 42.5       | 0.2     | 7.28          | 129.6          | 52.2          | 1.58       | 305.5         | 68.3                                 |
| SCC-WC0.4  | 66.2           | 39.3       | 0.2     | 7.28          | 123.6          | 64.4          | 1.43       | 325.5         | 68.6                                 |
| SCC-WC0.44 | 58.6           | 36.9       | 0.2     | 7.28          | 121.8          | 69.1          | 1.34       | 338.1         | 67.0                                 |
| SCC-WC0.5  | 54.2           | 33.7       | 0.2     | 7.28          | 118.4          | 70.2          | 1.34       | 339.1         | 65.9                                 |
| SCC-WC0.55 | 49.3           | 32.2       | 0.2     | 7.28          | 112.7          | 73.2          | 1.33       | 341.1         | 65.1                                 |
| SCC-WC0.6  | 44.6           | 30.1       | 0.2     | 7.28          | 110.3          | 73.6          | 1.18       | 348.2         | 60.4                                 |
| SCC-WC0.65 | 37.5           | 26.4       | 0.2     | 7.28          | 106.8          | 76.2          | 1.08       | 352.7         | 57.2                                 |
| SCC-WC0.7  | 29.5           | 22.8       | 0.2     | 7.28          | 97.9           | 76.8          | 1.06       | 357.2         | 51.8                                 |



شکل ۱۰. تغییرات  $G_f$  با نسبت آب به سیمان برای بتن خودتراکم حاوی الیاف

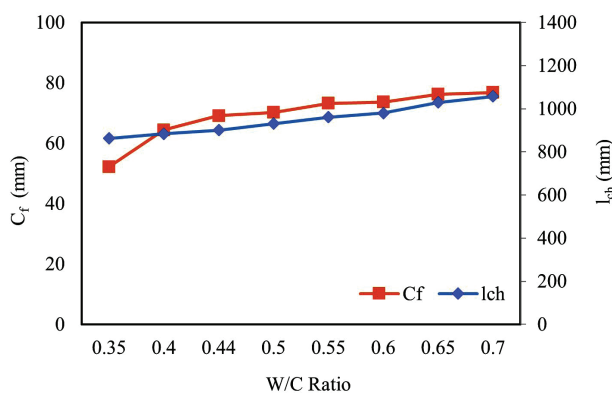
همچنین، نسبت  $G_F/G_f$  برای بتن خودتراکم حاوی الیاف با نسبت‌های مختلف w/c در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، به‌طور متوسط، نسبت  $G_F$  بدست آمده از WFM به  $G_f$  بدست آمده از SEM برای بتن‌های SCC تقویت شده با الیاف برابر با ۹/۹ با یک ضریب تغییرات ۴٪ بدست آمده است. همچنین مقدار نسبت  $G_F/G_f$  برای بتن خودتراکم توسط بیگی و همکاران [۱۷]، بتن سبک خودتراکم توسط صالحی و مظلوم [۳۸] و بتن خودتراکم تقویت شده با الیاف توسط قاسمی و همکاران [۳۲] به ترتیب حدود ۲/۹۲، ۲/۷ و ۴/۹ گزارش شده است. علت افزایش  $G_F/G_f$  در این تحقیق بخاطر مقدار الیاف مورد استفاده است.



شکل ۱۱. نسبت  $G_p/G_f$  برای بتن خودتراکم تقویت شده با الیاف در مقابل w/c

جدول ۶ و شکل ۱۲، تغییرات پارامتر  $C_f$  در برابر نسبت‌های مختلف w/c را برای SCC تقویت شده با الیاف نشان می‌دهد. از شکل ۱۲ می‌توان دریافت که مقدار پارامتر  $C_f$  برای SCC تقویت شده با الیاف، با افزایش نسبت w/c افزایش می‌یابد. کمترین و بیشترین مقدار پارامتر  $C_f$  به ترتیب در نمونه‌های SCC-WC $_{0.35}$  و SCC-WC $_{0.7}$  با مقدار ۵۲/۲ و ۷۶/۸ میلی‌متر رخ داده است. علاوه بر این با توجه به شکل ۱۲ طول مشخصه  $L_{ch}$  در WFM و پارامتر شکست  $C_f$  در SEM روند تقریباً یکسانی در مقابل نسبت w/c دارند.

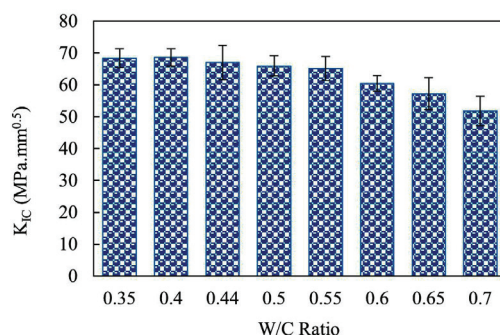
نتایج دیگر محققان از جمله صدر ممتازی و همکاران [۳۴] برای بتن سنگین وزن نیز نشان داد که افزایش نسبت w/c از ۰/۴ تا ۰/۷ باعث کاهش مقدار  $G_f$  از ۵۳/۶۲ به ۳۴/۶۶ N/m و افزایش مقدار  $C_f$  از ۲۳/۸۸ به ۳۰/۳۸ میلی‌متر شده است. همچنین، نتایج آزمایش بیگی و همکاران [۱۷] بر روی بتن خودتراکم نشان داد که با افزایش نسبت w/c از ۰/۳۵ به ۰/۷، مقدار  $G_f$  از ۵۲/۸ به ۲۹/۵ N/m کاهش و مقدار  $C_f$  از ۱۴/۱ به ۲۹/۱ میلی‌متر افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، قاسمی و همکاران [۳۲] نیز برای بتن خودتراکم تقویت شده با الیاف نشان داد که با افزایش w/c از ۰/۴۲ به ۰/۶۲، مقدار  $G_f$  از ۶۶/۵ به ۲۹/۴ N/m و مقدار  $C_f$  از ۷۲ به ۴۱ کاهش یافت.



شکل ۱۲. تغییرات  $C_f$  در مقابل نسبت w/c

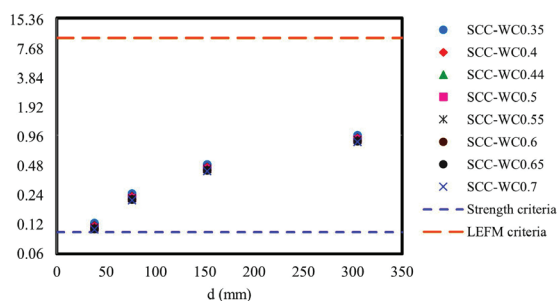
شکل ۱۳، تغییرات  $K_{IC}$  را در مقابل نسبت‌های مختلف  $w/c$  در نمونه‌های SCC تقویت شده با الیاف نشان می‌دهد. جدول ۶ و شکل ۱۳ نشان می‌دهد که مقدار  $K_{IC}$  از  $۶۸/۳$  به  $۸/۵۱ \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{0.5}$  با افزایش نسبت  $w/c$  از  $۰/۳۵$  به  $۰/۷$  کاهش می‌یابد که این افت در حدود  $۲۴\%$  می‌باشد. مقدار پارامتر  $K_{IC}$  برای سایر انواع بتن (بیگی و همکاران [۱۷] برای بتن خودتراکم، کرملو و همکاران [۱۸] برای بتن خودتراکم سبک وزن، صدرممتازی و همکاران [۳۴] برای بتن مگنیت سنگین وزن) با افزایش نسبت  $w/c$  کاهش می‌یابد که منجر به جذب انرژی کمتر در بتن می‌شود. دلیل افت چقرمگی شکست SCC همانند انرژی شکست آن می‌تواند ضعف ناحیه انتقال سطحی (ITZ) بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها باشد که با افزایش نسبت آب به سیمان رخ می‌دهد [۳۳]. با بکار بردن از تحلیل رگرسیون غیر خطی، رابطه‌ی  $K_{IC}$  بر اساس متغیرهای مقاومت فشاری بتن ( $f_c$ ) و نسبت  $w/c$  برای نمونه‌های SCC حاوی  $۰/۶\%$  الیاف به صورت رابطه (۱۳) بیان شده است.

$$K_{IC} = 8.3 \left( \left( \frac{w}{c} \right)^{0.32} f_c^{0.57} \right) \quad R^2 = 0.97 \quad (13)$$



شکل ۱۳. مقادیر چقرمگی شکست بتن خودتراکم تقویت شده با الیاف در مقابل  $w/c$

همانطور که قبلاً گفته شد، عدد شکنندگی ( $\beta$ ) به عنوان یکی از مهمترین پارامترهای پیش‌بینی الگوی شکست در نظر گرفته شده است. در این تحقیق، تغییرات  $\beta$  با عمق تیر برای نسبت‌های مختلف  $w/c$  در شکل ۱۴ ارائه شده است. همانطور که از شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، تمام داده‌ها در محدوده معیارهای مکانیکی شکست غیرخطی قرار دارند، اما با افزایش ابعاد نمونه در مقایسه با اندازه ناحیه FPZ، معیارهای طراحی به معیارهای LEFM نزدیک می‌شوند. همچنین، با توجه به طرح اثر اندازه، رفتار بتن‌های خودتراکم تقویت شده با الیاف با کاهش نسبت  $w/c$  به معیار LEFM نزدیکتر شده است. به عبارت دیگر، با کاهش نسبت  $w/c$ ، بتن رفتار شکننده‌تری خواهد داشت و ناحیه FPZ کوچکتر می‌شود.



شکل ۱۴. تغییرات عدد شکنندگی با عمق تیر برای نسبت‌های مختلف  $w/c$

## ۶- نتیجه‌گیری

از آنجایی که نسبت w/c به عنوان یک پارامتر مهم برای تعیین خصوصیات بتن خودتراکم حاوی الیاف در نظر گرفته می‌شود، در مطالعه حاضر، اثر نسبت w/c بر پارامترهای شکست SCC حاوی الیاف با استفاده از روش کار شکست و اثر اندازه به دست آمد. بدین منظور این آزمایش‌ها بر روی ۱۲۰ تیر شیاردار در یک سیستم تست سروو کنترل شده با روش تست خمشی سه نقطه‌ای انجام شد. نتایج زیر را می‌توان از این مطالعه استخراج کرد:

۱. خصوصیات مکانیکی نمونه‌های خودتراکم تقویت شده با الیاف یعنی مقاومت فشاری و مقاومت کششی و مدول الاستیسیته به ترتیب ۱۴۸، ۵۵ و ۸۶٪ با کاهش نسبت w/c از ۰/۷ به ۰/۳۵ افزایش یافت.

۲. مقادیر انرژی شکست کل ( $G_F$ ) بدست آمده در WFM و انرژی شکست اولیه ( $G_{F1}$ ) بدست آمده در SEM با افزایش نسبت w/c از ۰/۳۵ به ۰/۷ به ترتیب در حدود ۲۳ و ۲۴٪ کاهش یافت. علاوه بر این، در بتن‌های خودتراکم انرژی‌های شکست در WFM و SEM با افزایش مقاومت فشاری افزایش پیدا کرد. نسبت  $G_{F1}/G_F$  برای بتن‌های خودتراکم تقویت شده با الیاف برابر با ۹/۹ با یک ضریب تغییرات ۴٪ بدست آمده است.

۳. با افزایش نسبت w/c از ۰/۳۵ به ۰/۷، مقدار  $l_{ch}$  از ۸۶۲/۶ به ۱۰۵۶/۵ میلی‌متر افزایش یافت. از این رو، مقدار بالاتر  $l_{ch}$  در نمونه‌هایی با نسبت w/c بالاتر، نشان از مقاومت بهتر آن‌ها در برابر ترک‌خوردگی می‌باشد.

۴. با افزایش نسبت w/c از ۰/۳۵ به ۰/۷ در نمونه‌های SCC، مقدار طول موثر ناحیه پردازش شکست ( $C_f$ ) از ۵۲ به ۷۷ میلی‌متر افزایش یافت، در حالیکه مقدار چقرمگی شکست ( $K_{IC}$ ) از ۶۸ به ۵۲ MPa.mm<sup>0.5</sup> کاهش یافت. به بیان دیگر، با افزایش نسبت w/c از ۰/۳۵ به ۰/۷ در SCC، طول ناحیه پردازش شکست ( $C_f$ ) با یک افزایش ۴۷٪ و چقرمگی شکست ( $K_{IC}$ ) در SEM با یک افت ۲۴٪ روبرو شد.

۵. با افزایش ابعاد نمونه نسبت به طول ناحیه پردازش شکست (FPZ<sup>۱۹</sup>)، معیار طراحی به معیار LEFM نزدیک شد، به طوری که عدد شکنندگی SCC با افزایش عمق نمونه به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین بر اساس SEM، رفتار نمونه‌های SCC با کاهش نسبت w/c شکننده‌تر می‌شود به طوری که به معیار LEFM نزدیک‌تر شد.

## ۷- تشکر و قدردانی

از آزمایشگاه سازه دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل و آزمایشگاه شرکت کاوش آزما طرح بابل بابت فراهم نمودن تجهیزات و امکان استفاده از آن، تشکر و قدردانی می‌گردد.

## منابع

- [1] Ouchi, M. (2000). *Self-compacting concrete-development, applications and investigations*. NORDIC CONCRETE RESEARCH-PUBLICATIONS-, 23, 29-34.
- [2] Khalooee, S., Ahmadi, B., Askarinejad, A. & Nekooei, M. (2019). *The effect of cementitious materials paste volume and use of zeolite on the properties of self-compacting concrete*. Journal of Concrete Structures and Materials, 4(1), 100-109.

<sup>19</sup> Length of FPZ

- [3] Nematzadeh, M., & Fallah-Valukolaee, S. (2021). *Experimental and analytical investigation on structural behavior of two-layer fiber-reinforced concrete beams reinforced with steel and GFRP rebars*. *Construction and Building Materials*, 273, 121933.
- [4] Ghorbani, A. (2021) *Experimental and analytical investigation on the effect of steel fibers on the mechanical properties and performance of fibrous self-compacting concretes*. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 6(2), 115-131.
- [5] Turk, K., Bassurucu, M., & Bitkin, R. E. (2021). *Workability, strength and flexural toughness properties of hybrid steel fiber reinforced SCC with high-volume fiber*. *Construction and Building Materials*, 266, 120944.
- [6] Zolfagharzadeh, M.H. & Farokhzad, R. (2020). *Influence of various fibers on rheology behavior of self-compacting concrete*. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 5(1), 70-91.
- [7] Yazıcı, Ş., İnan, G., & Tabak, V. (2007). *Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC*. *Construction and Building Materials*, 21(6), 1250-1253.
- [8] Majain, N., Rahman, A. B. A., Mohamed, R. N., & Adnan, A. (2019, April). *Effect of steel fibers on self-compacting concrete slump flow and compressive strength*. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 513, No. 1, p. 012007)*. IOP Publishing.
- [9] Alberti, M. G., Enfedaque, A., & Gálvez, J. C. (2015). *Comparison between polyolefin fibre reinforced vibrated conventional concrete and self-compacting concrete*. *Construction and building materials*, 85, 182-194.
- [10] Beygi, M. H., Kazemi, M. T., Nikbin, I. M., & Amiri, J. V. (2014). *The effect of aging on the fracture characteristics and ductility of self-compacting concrete*. *Materials & Design*, 55, 937-948.
- [11] Hasan-Ghasemi, A., Nematzadeh, M., & Fallahnejad, H. (2022). *Post-fire residual fracture characteristics and brittleness of self-compacting concrete containing waste PET flakes: Experimental and theoretical investigation*. *Engineering Fracture Mechanics*, 261, 108263.
- [12] Bazant, Z. P., & Planas, J. *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasi-Brittle Materials*, 1998.
- [13] Dabbaghi, F., Fallahnejad, H., Nasrollahpour, S., Dehestani, M., & Yousefpour, H. (2021). *Evaluation of fracture energy, toughness, brittleness, and fracture process zone properties for lightweight concrete exposed to high temperatures*. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 116, 103088.
- [14] Raja Rajeshwari, B., & Sivakumar, M. V. N. (2020). *Influence of coarse aggregate properties on specific fracture energy of steel fiber reinforced self compacting concrete*. *Advances in concrete construction*, 9(2), 173-181.
- [15] Çelik, Z., & Bingöl, A. F. (2020). *Fracture properties and impact resistance of self-compacting fiber reinforced concrete (SCFRC)*. *Materials and Structures*, 53, 1-16.
- [16] Nallathambi, P., Karihaloo, B. L., & Heaton, B. S. (1984). *Effect of specimen and crack sizes, water/cement ratio and coarse aggregate texture upon fracture toughness of concrete*. *Magazine of concrete research*, 36(129), 227-236.
- [17] Beygi, M. H., Kazemi, M. T., Nikbin, I. M., & Amiri, J. V. (2013). *The effect of water to cement ratio on fracture parameters and brittleness of self-compacting concrete*. *Materials & Design*, 50, 267-276