

# بررسی تاثیر نسبت آب به مواد سیمانی و مقدار دوده سیلیسی بر رفتار شکست و مشخصات تردی بتن مقاومت بالا با روش اثر اندازه

سید محمد موسوی<sup>۱</sup>، رحمت مدن دوست<sup>۲\*</sup>، ملک محمد رنجبر<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان

۲- دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان

۳- دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان

[rmadandoust@guilan.ac.ir](mailto:rmadandoust@guilan.ac.ir)

تاریخ پذیرش: [۹۸/۴/۱۸]

تاریخ دریافت: [۹۷/۱۲/۵]

## چکیده

این پژوهش به مطالعه و تحلیل رفتار شکست بتن مقاومت بالا با مقادیر مختلف دوده سیلیسی به همراه تغییر در نسبت آب به مواد سیمانی با روش اثر اندازه (SEM) می‌پردازد. در این پژوهش آزمایشگاهی، در مجموع ۱۰ طرح اختلاط مورد آزمایش قرار گرفته است. برای بررسی آثار نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی در محدوده مربوط به بتن مقاومت بالا و تاثیر مقادیر دوده سیلیسی، نسبت‌های کم آب به مواد سیمانی (W/C) ۰/۲۴، ۰/۳، ۰/۳۵، و ۰/۴. مورد بررسی قرار گرفته است و علاوه بر آن در دو نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۲۴ و ۰/۳۵، یک طرح مربوط به بتن مقاومت بالا بدون افزودنی دوده سیلیسی و مابقی برای درصد نسبت وزنی دوده سیلیسی نسبت به مواد سیمانی با مقادیر ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ بوده است. برای تعیین ویژگی‌های شکست بتن‌ها در این پژوهش، در مجموع تعداد ۱۲۰ عدد تیر مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی از مقدار ۰/۳۵، مقدار انرژی شکست اولیه ( $G_f$ ) کاهش می‌یابد و از سوی دیگر پارامترهای دیگر شکست شامل طول موثر منطقه صدمه دیده پیش رونده ترک ( $C_f$ ) و جابه‌جایی بحرانی نوک ترک ( $CTOD_c$ ) کاهش یافته است، و در طرف مقابل عدد تردی ( $\beta$ ) افزایش یافته است. همچنین با افزایش مقدار دوده سیلیسی در هر یک از نسبت‌های آب به مواد سیمانی ۰/۳۵ و ۰/۲۴، انرژی شکست، طول منطقه صدمه دیده نوک ترک، چقرمگی شکست ( $K_{IC}$ ) و جابه‌جایی بحرانی نوک ترک کاهش می‌یابد و در طرف مقابل عدد تردی افزایش یافته است. نتایج این بررسی نشان داده‌اند با استفاده از پارامترهای شکست بدست آمده از روش اثر اندازه می‌توان پیشینه بار وارد شده بر بتن‌های مقاومت بالا را به صورت صحیح پیش‌بینی نمود.

**واژگان کلیدی:** بتن مقاومت بالا، روش اثر اندازه، رفتار شکست، چقرمگی شکست، عدد تردی

## ۱- مقدمه

گسترده استفاده می‌شوند. بتن از لحاظ نوع رفتار جزء مصالح ترد به شمار می‌آید که دارای مقاومت کششی ناچیزی هست و در برابر گسترش ترک مقاومت کمی دارد. از طرف دیگر بتن را می‌توان به عنوان یک مصالح نیمه ترد به شمار آورد که علت آن

بتن‌های مقاومت بالا امروزه با توجه به اینکه تکنولوژی ساخت آنها پیشرفت قابل توجهی نموده است، در ساختمان‌های بلند و پل‌ها و سازه‌های نیازمند به بتن با مقاومت بالا به صورت

علت استفاده از آن در ساخت بتن‌های مقاومت بالا مورد توجه قرار گرفته است [11]. این مواد که دارای ذرات بسیار ریز هستند، باعث افزایش تراکم در ناحیه سطح مشترک سنگدانه و خمیرسیمان می‌شوند و در نتیجه مقاومت باوند مشترک را افزایش می‌دهند که در نتیجه باعث افزایش مقاومت بتن می‌شود [12]. گوینا و همکاران [13] با بررسی ناحیه ITZ در حالت بتن بدون دوده سیلیسی و حاوی آن گزارش نمودند که با بهبود کیفیت، چقرمگی شکست کاهش می‌یابد. همچنین تسدیمیر و همکاران [1] با بررسی کیفیت ناحیه ITZ در حالت بدون دوده سیلیسی و ۱۰٪ وزنی دوده سیلیسی نسبت به مواد سیمانی نشان دادند با استفاده از دوده سیلیسی مقدار انرژی شکست کاهش یافته است. بحارات کومار و همکاران [14] با بررسی بتن با استفاده از افزودنی خاکستر بادی به مقدار ۲۰٪ وزنی مواد سیمانی نتیجه‌گیری نمودند که انرژی شکست برای نمونه‌های حاوی افزودنی خاکستر بادی نسبت به بتن بدون افزودنی پوزولانی کاهش می‌یابد.

از آنجا که اثر مقادیر مختلف دوده سیلیسی و همزمان تاثیر نسبت‌های بسیار کم آب به مواد سیمانی بر رفتار و پارامترهای شکست بتن مقاومت بالا تاکنون توسط روش اثر اندازه در محدوده بتن‌های مقاومت بالا و در نسبت‌های بسیار پائین آب به مواد سیمانی، بسیار کم بررسی شده است و همچنین با توجه به اهمیت روش اثر اندازه در تعیین پارامترها و ویژگی‌های شکست بتن که نیاز به مطالعات و بررسی‌های جامع دارد، پس این پژوهش نسبت به بررسی و تخمین مقادیر پارامترهای شکست با روش اثر اندازه، پرداخته است. در مجموع ۱۲۰ نمونه تیر شکافدار، تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای قرار گرفته است که روش مورد استفاده در این پژوهش توسط دستورالعمل RILEM [15] ارائه شده است. برای بررسی اثر نسبت آب به مواد سیمانی (w/c)، چهار نسبت در محدوده بتن‌های مقاومت بالا شامل مقادیر ۲۴٪، ۳۰٪، ۳۵٪ و ۴۰٪ با درصد وزنی دوده سیلیسی نسبت به مواد سیمانی ۱۰٪ در نظر گرفته شده است و برای بررسی اثر افزودنی دوده سیلیسی، در دو نسبت آب به مواد سیمانی ۲۴٪ و ۳۵٪، دوده سیلیسی با مقادیر درصدی وزنی ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ نسبت به مواد سیمانی و حالت بدون استفاده از دوده سیلیسی در نظر گرفته شده است.

در نوع رفتار آن در برابر گسترش ترک است. با توجه به اینکه بتن از فازهای مختلفی تشکیل شده است، در تعیین ویژگی‌های شکست بتن، نقش هریک از این اجزا باید به صورت مجزا بررسی شود. سطح مشترک انتقال ماتریس خمیر سیمان و سنگدانه (ITZ) به عنوان یکی از عوامل مهم و تاثیرگذار بر رفتار مکانیکی بتن‌های مختلف همواره مورد بررسی پژوهشگران زیادی بوده است [1]. دو عامل تاثیرگذار در کیفیت ساختار این ناحیه و در نتیجه بر ویژگی‌ها و رفتار شکست بتن‌ها، نسبت آب به سیمان و مقدار مواد پوزولانی در طرح اختلاط بتن است.

نسبت آب به سیمان به عنوان یکی از عوامل مهم در ساختار ITZ دارای نقش بسیار مهم است به گونه‌ای که با افزایش این نسبت تخلخل در این ناحیه افزایش می‌یابد [2, 3] و بخش قابل توجهی از تخلخل بوجود آمده در سطح سنگدانه بدین علت رخ می‌دهد. پژوهشگران مختلفی گزارش نمودند که کیفیت ITZ تاثیر زیادی روی روند آغاز گسترش ترک در بتن دارد [4-6] که مهمترین آثار آن در بتن‌ها با نسبت آب به سیمان بالا است، که باعث می‌شود با توجه به کاهش فشردگی ماتریس در این ناحیه، شروع و گسترش ترک در این ناحیه رخ دهد. پروکسکی و لانگیر [7] در پژوهش‌های خود روی بتن‌ها با نسبت‌های مختلف آب به سیمان نشان دادند که با افزایش نسبت آب به سیمان چقرمگی شکست کاهش می‌یابد و تغییرات نسبت آب به سیمان تاثیر زیادی بر پارامترهای شکست دارد. میندس و همکاران [8] در پژوهش‌های خود روی بتن‌ها با نسبت‌های مختلف آب به سیمان نشان دادند که رابطه مشخصی بین نسبت آب به سیمان و انرژی شکست وجود ندارد. جو و تایی [9] در پژوهش دیگری بیان داشتند که با کاهش نسبت آب به سیمان انرژی شکست روند افزایشی دارد. از سوی دیگر کارپیتتری و بریگنتی [10] در پژوهش روی بتن‌ها با نسبت‌های آب به سیمان ما بین ۴۵٪ تا ۷۵٪، نشان داده‌اند که مقدار انرژی شکست در مقدار مشخصی از نسبت آب به سیمان ماکزیم مقدار را خواهد داشت و با کاهش و افزایش نسبت آب و سیمان از آن مقدار اوپتیمم، انرژی شکست کاهش می‌یابد.

استفاده از مورد پوزولانی دوده سیلیسی یکی از عوامل مهم دیگر در بهبود ساختار و کیفیت ناحیه ITZ است که به این

که در اینجا  $P_u$  بیشینه نیروی وارد بر نمونه،  $b$  عرض نمونه  $d$  اندازه عمق نمونه و  $C_n$  ضریب همبستگی رابطه است. با وجود تئوری مقاومت که در آن اثر اندازه وجود ندارد، براساس مکانیک شکست خطی که در آن  $\sigma_N = \alpha D^{-0.5}$ ، بیانگر وجود وابستگی به اثر اندازه می‌باشد. برای مصالح نیمه ترد اثر اندازه در دو محدوده معیار مقاومت و شکست ترد وجود دارد که توسط بازانت با رابطه (۲) ارائه شد [16].

$$\sigma_N = \frac{B}{(1+\beta)^{0.5}} \quad (2)$$

که در آن:

$$\beta = \frac{d}{d_0} \quad (3)$$

در اینجا  $B$  و  $d_0$  ضرایب تجربی هستند که به نوع مصالح و هندسه نمونه بستگی دارد و  $\beta$  عدد تردی است. زمانی که  $\beta$  خیلی کوچک باشد ( $\beta < 1$ ) رفتار سازه انعطاف‌پذیر است، بنابراین می‌توان از معیار مقاومت استفاده نمود و برای  $\beta$  خیلی زیاد ( $\beta > 10$ )، رفتار سازه ترد هست پس می‌توان از مکانیک شکست خطی استفاده نمود. در حالیکه  $1 \leq \beta \leq 10$  باشد مکانیک شکست غیرخطی (NLFM) بر رفتار سازه حاکم است.

با توجه به نیروهای بیشینه بدست آمده از آزمایش ( $p_j^0$ ) که بوسیله وزن نمونه مطابق دستورالعمل RILEM [15] اصلاح شده است و تعیین رگرسیون خطی براساس مختصات  $X_i = dj$  و  $Y_i = \left(\frac{b \cdot dj}{p_j^0}\right)^2$ ، مقادیر شیب و عرض از مبدأ خط با رابطه (۴) تعیین می‌شود.

$$Y = AX + C \quad (4)$$

که در اینجا  $A$  شیب،  $C$  عرض از مبدأ خط است. با تعیین مقدار  $A$  و  $C$  می‌توان ضرایب  $d_0$  و  $B$  را با روابط زیر تعیین نمود.

$$B = \frac{1}{\sqrt{C}} \quad (5)$$

$$d_0 = \frac{C}{A} \quad (6)$$

بازانت و کاظمی [17] در پژوهشهای خود به این نتیجه رسیدند که دو ویژگی مهم رفتار شکست بتن شامل انرژی شکست (

پارامترهای شکست مورد بررسی علاوه بر مقدار انرژی شکست ( $G_f$ ) شامل عدد تردی ( $\beta$ )، پیش‌بینی بیشینه مقدار بار قابل تحمل، بازشدگی بحرانی نوک ترک ( $CTOD_C$ )، چقرمگی شکست ( $K_{IC}$ ) و طول موثر منطقه صدمه دیده پیش رونده شکست بتن ( $C_f$ ) بوده است.

## ۲- روش اثر اندازه SEM

تعیین پارامترهای شکست مانند چقرمگی شکست و طول منطقه شکست پیش‌رونده در طراحی سازه‌های بتن آرمه، برای شناخت دقیق‌تر جزئیات رفتار بتن ضروری است. از نظر مهندسی، اثر اندازه سازه یکی از مهمترین مفاهیم ارائه شده مکانیک شکست است، پس ارائه رابطه بین ویژگی‌های شکست بتن مانند چقرمگی شکست ( $K_{IC}$ ) و انرژی شکست ( $G_f$ ) و ارتباط آن با سازوکار اثر اندازه مهم است. از مهمترین امتیازات این روش این است که پارامترهای شکست به دست آمده از این روش نسبت به روش کار شکست (WFM) مستقل از اندازه و شکل نمونه هست.

با توجه به اینکه انرژی شکست ( $G_f$ ) برای ارزیابی رفتار شکست برای مصالح ترد در محدوده مکانیک شکست خطی کافی است، برای مصالح نیمه ترد مانند بتن، به علت وجود میکروتورها در منطقه صدمه دیده شکست، تنها این پارامتر کافی نیست و طول ناحیه صدمه دیده ( $C_f$ ) از ویژگی‌های مهم شکست در سازه، مورد نیاز هست. وابستگی به اندازه برای مقاومت اسمی سازه‌های بتنی که از لحاظ هندسی مشابه هستند مطابق قانون اثر اندازه توسط بازانت ارائه شد [16]. براین اساس بازانت پیشنهاد داده است برای نمونه‌هایی که از لحاظ هندسی مشابه هستند، اگر اندازه نمونه‌ها از مقدار کوچک تا بزرگ تغییر نماید، انرژی شکست بدست آمده مستقل از اندازه بوده و از مکانیک شکست خطی می‌توان استفاده نمود. بنابراین بر اساس قانون اثر اندازه برای نمونه‌هایی که از لحاظ هندسی در دو بعد مشابه هستند، مقاومت اسمی به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود.

$$\sigma_N = C_n \cdot \frac{P_u}{b \cdot d} \quad (1)$$

### ۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- مصالح مورد استفاده

در تهیه بتن مقاومت بالا از سیمان پرتلند I-۴۲۵ ساخت کارخانه فیروزکوه ایران استفاده شده است. در این پژوهش برای بهبود عملکرد باند ماتریس انتقال و کسب مقاومت بالا در بتن، از پودر دوده سیلیسی تولید شده در کارخانه فروسیلیس سمنان ایران استفاده شده است که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سیمان و دوده سیلیسی در جدول (۱) نشان داده شده است. با توجه به استفاده از بتن‌های با نسبت آب به مواد سیمانی پائین در این پژوهش، نیاز به استفاده از فوق روان کننده مناسب بوده است که از فوق روان کننده بر پایه پلی کربکسیلات تهیه شده از شرکت آبادگران استفاده شده است. ریزدانه مورد استفاده از نوع ماسه شسته از معدن هراز استان مازندران، دارای مدول نرمی ۲/۶۷ و ارزش ماسه‌ای ۹۵٪ و وزن مخصوص ۲/۶۰ بوده است. درشت‌دانه مورد استفاده از نوع آهکی و شکسته و دارای ماکزیمم اندازه سنگدانه ۱۲/۵ میلی‌متر و وزن مخصوص آن ۲/۶۲ هست که دانه‌بندی سنگدانه‌ها مطابق آئین‌نامه ASTM C-33 بوده است [18].

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان و دوده سیلیسی

Chemical analysis result (%)	silica cement	silica fume
SiO <sub>2</sub>	20.6	89.22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.86	1.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.37	2.12
CaO	63.56	1.87
MgO	2.18	1.61
SO <sub>3</sub>	2.3	-
Na <sub>2</sub> O	0.33	0.556
K <sub>2</sub> O	0.54	1.056
LOI	2.2	2.6
Insoluble Residue	0.47	-
Free CaO	1.46	-
C <sub>3</sub> S	56.9	-
C <sub>2</sub> S	15.83	-
C <sub>3</sub> A	4.19	-
C <sub>4</sub> AF	9.58	-
<b>Physical properties</b>		
specific gravity	3.14	2.21
Fineness ,Blain Test (Cm <sup>2</sup> /gr)	3210	-
Compressive Strength, 28 days(kg/cm <sup>2</sup> )	456	-
Autoclave expansion (%)	0.07	-

Table 1. Cement and silica fume properties.

(G<sub>f</sub>) و طول منطقه صدمه دیده اطراف ترک (C<sub>f</sub>) را بصورت روابط (۷ و ۸) می‌توان ارائه داد.

$$G_f = \frac{g(\alpha_0)}{E \cdot A} \quad (7)$$

$$C_f = \frac{g(\alpha_0)}{g'(\alpha_0)} \cdot \frac{C}{A} \quad (8)$$

که در اینجا E مدول الاستیسیته،  $g(\alpha_0)$  نرخ انرژی رها شده و بدون بعد، و  $g'(\alpha_0)$  مشتق آن است.  $\alpha_0 = \frac{a_0}{d}$  نسبت طول ترک اولیه به عمق نمونه و  $g(\alpha)$  به صورت رابطه (۹) است.

$$g(\alpha) = \left(\frac{S}{d}\right)^2 \pi \cdot \alpha [1.5F(\alpha)]^2 \quad (9)$$

این توابع وابسته به هندسه نموده است و می‌توان آنها را از طریق مکانیک شکست خطی LEFM تعیین کرد.

همچنین پارامترهای دیگر شکست شامل چقرمگی شکست ( $K_{IC}$ ) و مقدار بازشدگی بحرانی نوک ترک در بار بیشینه ( $CTOD_C$ ) را می‌توان با استفاده از پارامترهای بدست آمده از روابط (۱۰ و ۱۱) تعیین کرد.

$$K_{IC} = \sqrt{E \cdot G_f} \quad (10)$$

$$CTOD_C = \frac{8K_{IC}}{E} \sqrt{\frac{C_f}{2\pi}} \quad (11)$$

در حقیقت قانون اثر اندازه که توسط بازانت [16,17] ارائه شد نه تنها اثر اندازه را مورد بررسی قرار می‌دهد، بلکه اثر هندسه نمونه را نیز مورد توجه قرار می‌دهد. برای تعیین ویژگی‌های مکانیکی شکست بتن در این پژوهش نیاز به تعیین ویژگی‌های مکانیکی بتن در هر طرح اختلاط، شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و نیروی بیشینه وارده بر نمونه‌های با هندسه مشابه و در اندازه‌های مختلف از محدوده عمق‌های کوچک تا بزرگ است، تا با انجام تحلیل رگرسیون و محاسبه ضرایب رگرسیون و دیگر ضرایب مورد نیاز بر اساس روابط ارائه شده در این روش، پارامترهای شکست محاسبه شود.

برابر مقدار ۴۰ میلی متر و نسبت طول نمونه به عمق ۲/۶۷ و نسبت طول دهانه به عمق ۲/۵ بوده است. قالب‌های ساخته شده برای بتن‌ریزی از نوع PVC بوده‌اند که قبل از انجام بتن‌ریزی به وسیله یک قطعه ورق PVC با ضخامت ۳ میلی متر شکافی در قسمت وسط دهانه ایجاد شد. نسبت عمق شکاف عمودی به عمق نمونه برای تمام تیرها و طرح اختلاط‌ها در این روش یک سوم در نظر گرفته شد. هندسه نمونه‌های مورد استفاده و تیرهای ساخته شده در روش SEM در شکل (۱) نشان داده شده است. برای هر طرح اختلاط، بعد از بتن‌ریزی، به مدت ۲۴ ساعت در محیط آزمایشگاه نگهداری شده و سپس بتن‌ها از قالب بیرون آورده شده و در داخل مخزن آب در دمای ۲۶ °C نگهداری شد. نمونه‌ها بعد از ۲۸ روز به وسیله دستگاه یونیورسال با بیشترین ظرفیت ۱۵۰ کیلو نیوتن تحت بارگذاری با کنترل تغییر مکان بارگذاری شدند. برای تعیین مقاومت فشاری، سه نمونه مکعبی ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر مطابق [19] BS EN 12390 و برای تعیین مدول الاستیسیته و مقاومت کششی، شش نمونه استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلی متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی متر به ترتیب مطابق ASTM C469 [20] و [21] ASTM C496 بتن‌ریزی شد و برای هر طرح اختلاط بمدت ۲۸ روز در آب نگهداری شده و سپس تحت آزمایش قرار گرفتند.

۲-۳- طرح اختلاط، آماده سازی نمونه‌ها و روش آزمایش  
برای بررسی تأثیر نسبت آب به مواد سیمانی روی پارامترهای شکست بتن مقاومت بالا با مقادیر مختلف دوده سیلیسی، یک سری طرح اختلاط با نسبت‌های آب به مواد سیمانی ۰/۳، ۰/۲۴، ۰/۳۵ و ۰/۴. با مقدار درصد وزنی دوده سیلیسی نسبت به مواد سیمانی ۱۰٪ در نظر گرفته شده است که در جدول (۲) مشخصات طرح اختلاط نشان داده شده است و برای بررسی تأثیر مقادیر مختلف دوده سیلیسی در رفتار و ویژگی‌های شکست بتن مقاومت بالا، برای دو نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۲۴ و ۰/۳۵، طرح‌های اختلاط برای حالت بدون دوده سیلیسی و برای مقادیر وزنی دوده سیلیسی ۰/۵، ۱۰٪ و ۱۵٪ نسبت به مواد سیمانی در نظر گرفته شده است. نسبت‌های اختلاط در جدول (۲) نشان داده شده است.

با توجه به اینکه هدف از این پژوهش آزمایشگاهی بررسی تأثیر مقدار دوده سیلیسی و نسبت آب به مواد سیمانی در محدوده متداول مربوط به بتن مقاومت بالا، در رفتار شکست بتن مقاومت بالا با روش اثر اندازه (SEM) است، برای این روش از نمونه‌های تیر مکعبی با شکاف اولیه ایجاد شده در قسمت وسط دهانه، مطابق دستورالعمل RILEM [15] استفاده شد. پس با در نظر گرفتن یک عرض ثابت برای همه نمونه‌ها و ابعاد دیگر که از لحاظ هندسی با هم مشابه بوده‌اند، چهار اندازه برای عمق نمونه‌ها از اندازه کوچک به بزرگ ۴۰، ۸۰، ۱۶۰ و ۳۲۰ میلی متر در نظر گرفته شد و عرض نمونه‌ها برای همه نمونه‌ها

جدول ۲. جدول مشخصات طرح اختلاط بتن مورد استفاده-سری ۱ و ۲

Materials (Kg/m <sup>3</sup> )								
Seri 1	Cement	Coarse aggregate	Sand	Silica fume	Water	Super plasticizer	w/c (by weight)	Slump (mm)
WT1	540	1070	655	60	144	5.38	0.24	16
WT2	490.5	1070	655	54.5	163.5	2.86	0.3	18
WT3	450	1070	655	50	175	2.41	0.35	17
WT4	405	1070	655	45	180	1.78	0.4	22
Seri 2								
SF1	600	1070	655	0	144	4.45	0.24	12
SF2	570	1070	655	30	144	4.96	0.24	18
SF3	540	1070	655	60	144	5.38	0.24	16
SF4	510	1070	655	90	144	6.14	0.24	21
SF5	475	1070	655	0	175	2.19	0.35	24
SF6	450	1070	655	25	175	2.32	0.35	20
SF7	450	1070	655	50	175	2.41	0.35	17
SF8	425	1070	655	75	175	2.93	0.35	14

Table 2. Mix design proportions.

جدول (۳) مقادیر نیروهای حداکثر بدست آمده از آزمایش که مطابق RILEM TC-89 با توجه به وزن نمونه مطابق رابطه زیر اصلاح شده است را نشان می دهد:

$$P_j^0 = P_j + \frac{2l_j - L_j}{2l_j} m_j g \quad j=1,2,\dots,n \quad (12)$$

که در اینجا  $P_j$  حداکثر نیروی وارده آزمایشگاهی،  $m_j$  جرم نمونه  $j$ ،  $g$  شتاب گرانشی و  $n$  تعداد تستهای مورد آزمایش،  $L_j$  طول نمونه و  $l_j$  طول دهانه تیر می باشد.

بر اساس مدل ترک الاستیک موثر که در آن رفتار ترک با اضافه کردن مقدار معینی به طول ترک اولیه بدون تنش های چسبنده در نظر گرفته می شود، از اثر تنش های چسبنده در منطقه صدمه دیده نوک ترک صرف نظر شده و انرژی شکست اولیه، انرژی لازم برای ایجاد سطح شکست جدید است. این انرژی شکست به عنوان یک ویژگی اساسی بتن برای پیش بینی منطقی و صحیح از شکست در این نوع مصالح در سازه بکار می رود. به عبارت دیگر می توان گفت این مقدار بدست آمده بیانگر مقاومت ترک در برابر رشد ناپایدار و در نتیجه گسیختگی عضو است. همان گونه که در بخش (۲) تشریح شده است با انجام تحلیل رگرسیون خطی مطابق رابطه (۵) و همچنین تعیین ضریب شیب  $A$  و عرض از مبدا  $C$ ، می توان بر اساس رابطه (۷) انرژی شکست را تعیین نمود. برای نسبت های آب به مواد سیمانی مورد بررسی مقادیر انرژی شکست در جدول (۴) و شکل (۲) نشان داده شده است. همان گونه که در شکل مشاهده می شود، برای بتن های مقاومت بالا در محدوده بسیار کم نسبت آب به مواد سیمانی، کاهش این نسبت از مقدار ۰.۳۵ و از طرف دیگر افزایش مقاومت فشاری باعث کاهش انرژی شکست می شود. در جدول (۴) مشخصات مکانیکی و برخی ویژگی های شکست بتن های مورد استفاده نشان داده شده است. همان گونه که دیده می شود با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی از مقدار ۰.۳۵ به ۰.۲۴، مقدار انرژی شکست از مقدار ۴۹/۱ ژول بر متر مربع به ۴۵ ژول بر متر مربع می رسد که در نتیجه ۸/۳٪ کاهش می یابد. همچنین بیشترین مقدار انرژی شکست در مقدار آب به مواد سیمانی ۰.۳۵ بدست آمده است و پس از آن روند کاهش داشته است. مشابه چنین نتیجه ای توسط کارپنتری و بریگنتی [10] برای بتن های با مقاومت معمولی بدون استفاده از دوده

شکل ۱. (a) هندسه تیر، (b) تصویر یک سری از نمونه ها

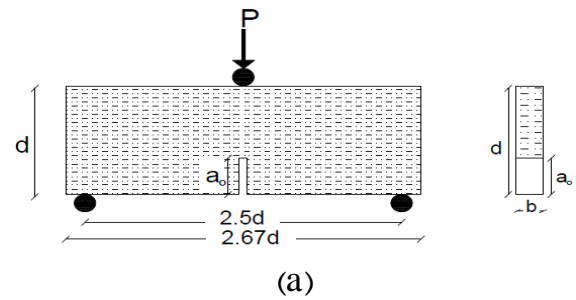


Fig. 1. (a) Geometry and (b) image of beams.

جدول ۳. نیروهای حداکثر اصلاح شده در روش SEM

Mix ID	d (mm)	$\frac{a_0}{d}$	Corrected maximum loads $P^0(N)$		
			Beam1	Beam2	Beam3
WT1	40	1/3	1752	1690	1780
	80	1/3	3204	2825	3025
	160	1/3	4743	4952	4648
	320	1/3	7247	7514	7803
WT2	40	1/3	1654	1544	1628
	80	1/3	2823	2866	3012
	160	1/3	4311	4825	4632
WT3	40	1/3	1589	1472	1658
	80	1/3	2737	2816	2624
	160	1/3	4639	4452	4506
	320	1/3	7024	7255	7432
WT4	40	1/3	1421	1538	1524
	80	1/3	2410	2532	2742
	160	1/3	4633	4411	4321
	320	1/3	6954	6635	7215

Table 3. Maximum corrected loads in SEM

#### ۴- نتایج و بررسی

##### ۴-۱- تاثیر نسبت آب به مواد سیمانی

مزیت کلیدی و مهم روش اثر اندازه سادگی چگونگی آزمایش آن است به طوری که بر اساس دستورالعمل RILEM در این روش در کنار تعیین ویژگی های مکانیکی بتن، نیازمند تعیین مقادیر نیروی ماکزیمم وارده بر تیرهای شکافدار می باشد، و بی نیاز از نحوه پاسخ بعد از بار حداکثر می باشد.

انعطاف‌پذیر بتن مقاومت بالا با وجود افزایش انرژی شکست در آن است و باعث گردیده مقدار آن ۴۲/۹٪ افزایش یابد. بازانت و کاظمی [17] خود مقدار  $C_f$  را بین مقدار ۱۰ تا ۲۵ میلی‌متر پیش بینی نمودند که مقدار بدست آمده در این پژوهش در این محدوده قرار دارد، هرچند در بعضی از پژوهش‌ها به مقدار بیشتری نیز اشاره شده است.

شکل ۳. مقادیر طول منطقه صدمه دیده در برابر w/c

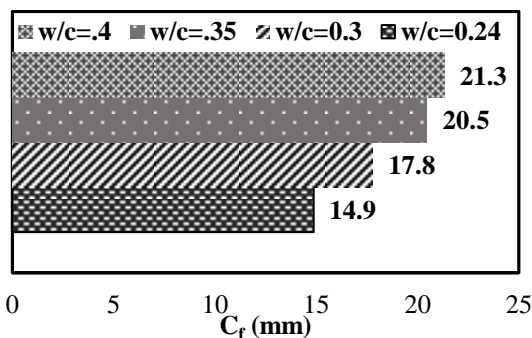


Fig. 3. Relationship between  $C_f$  and w/c ratio

بر اساس رابطه اثر اندازه که بیانگر معادله یک منحنی است که تعیین کننده رفتار حاکم روی نوع تحلیل شکست مصالح است، به طوری که از معیار مقاومت در بالاترین حد تا معیار تحلیل شکست الاستیک خطی در پایین ترین حد متغیر است، تعیین محدوده رفتاری بتن بررسی شده حائز اهمیت است. در شکل (۴) منحنی اثر اندازه برای بتن‌های مقاومت بالای بررسی شده در این پژوهش با نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی بر اساس مشخصات آزمایشگاهی بدست آمده نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود مقادیر به دست آمده آزمایشگاهی با مقادیر پیش‌بینی شده بر اساس منحنی رابطه اثر اندازه مطابق رابطه (۲) هماهنگی قابل قبولی دارند. به روشنی دیده می‌شود با افزایش اندازه نمونه تنش اسمی کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه مطابق قانون اثر اندازه معیارهای غالب بر نوع تحلیل رفتار شکست تعیین می‌شود، همان‌گونه که در شکل مشخص است با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی در بتن، رفتار آن در ناحیه شکست غیرخطی قرار دارد لکن به محدوده مکانیک شکست الاستیک خطی

سیلیسی نیز گزارش شده است، به طوری که بر آن اساس با کاهش نسبت آب به سیمان از حالت اوپتیمم، مقدار انرژی شکست کاهش یافته است.

جدول ۴. برخی از مشخصات مکانیکی بتن‌های سری ۱

Mix ID	$f_c$ (Mpa)	$E_c$ (Gpa)	$f_t$ (Mpa)	$C_f$ (mm)	CTOD <sub>c</sub> (mm)
WT1	101.0	42.6	5.11	14.9	0.0127
WT2	93.20	40.1	4.63	17.8	0.0146
WT3	84.2	39.1	4.22	20.5	0.0162
WT4	77.3	37.2	3.85	21.3	0.0168

Table 4. Mechanical properties of concrete Seri 1

شکل ۲. تغییر انرژی شکست نسبت به تغییرات آب به مواد سیمانی

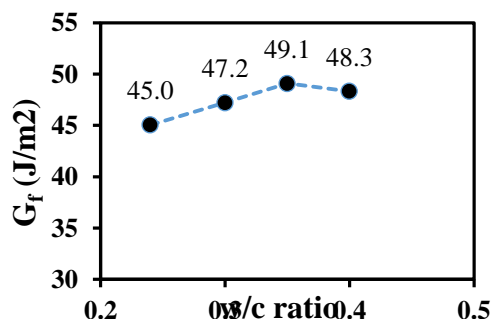


Fig. 2. The Variation of  $G_f$  versus w/c ratio

با توجه باینکه روش اثر اندازه بر پایه مدل ترک الاستیک موثر به عنوان یکی از مدل‌های تحلیل شکست در سازه‌های بتنی است، به جهت اینکه در اعضاء سازه‌ای دارای ترک، انرژی شکست در حالت رشد پایدار ترک بررسی می‌شود، و از آنجا که طول ترک اولیه با افزایش بار وارد شده بر سازه افزایش می‌یابد، بنابراین پارامتر دیگری به نام طول موثر شکست به عنوان پارامتر  $C_f$  در این روش مورد نیاز است. این پارامتر به عنوان ناحیه‌ای که در ناحیه اطراف ترک متشکل از میکروتورکها و نواحی صدمه دیده ترک است شناخته می‌شود و هر چقدر دارای مقدار بیشتری باشد بیانگر رفتار نرم‌تر و انعطاف پذیرتر بتن است و به عنوان شاخص تردی در بتن تلقی می‌شود. شکل (۳) تغییرات مقدار  $C_f$  را نسبت به تغییرات نسبت آب به مواد سیمانی نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است، مقدار  $C_f$  در برابر افزایش نسبت آب به مواد سیمانی افزایش می‌یابد به طوری که از مقدار ۱۴/۹ میلی‌متر به مقدار ۲۱/۳ میلی‌متر می‌رسد که بیانگر رفتار

۴-۲- تاثیر مقدار دوده سیلیسی

با توجه به اینکه تاثیر دوده سیلیسی به عنوان یک ماده افزودنی پوزولانی مهم در رفتار شکست بتن‌های مقاومت بالا دارای اهمیت زیادی است، برای دو نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵ و ۰/۲۴، مطابق طرح اختلاط اشاره شده در بخش (۳) با مقادیر مختلف دوده سیلیسی، نمونه‌های ساخته شده تحت خمش سه نقطه‌ای قرار گرفته‌اند که در جدول (۵) مقادیر نیروهای بیشینه وارد شده برای نمونه‌ها با اندازه‌های مختلف برای طرح‌های اختلاط سری ۲ با اصلاح توسط وزن نمونه‌ها نشان داده شده است. برای طرح‌های اختلاط SF7 و SF3 با توجه به یکی بودن با طرح‌های اختلاط به ترتیب WT1 و WT3 نتایج در بخش ۴-۱ اشاره شده است.

با توجه به روابط بخش (۲) که در آن تحلیل رگرسیون خطی بر اساس نیروی بیشینه اصلاح شده با وزن نمونه و ابعاد نمونه‌های مورد استفاده انجام شده است، نتایج تحلیل در جدول (۶) نشان داده شده است. مطابق دستورالعمل RILEM [15] برای افزایش قابلیت اطمینان به نتایج بدست آمده برای پارامترهای شکست حاصل از آزمایش نمونه‌ها، هر کدام از ضرایب واریانس شیب خط رگرسیون ( $\omega_A$ ) و عرض از مبدا آن ( $\omega_C$ ) و عرض نسبی باند پراکندگی نتایج ( $m$ ) که روابط آن در دستورالعمل اشاره شده است نباید به ترتیب از مقادیر ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۲ بیشتر شود. به عنوان نمونه همان‌گونه که در شکل (۵) نشان داده شده است برای طرح اختلاط با مشخصه SF1 برای بتن با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۲۴ و بدون استفاده از دوده سیلیسی، تحلیل رگرسیون انجام شده بیانگر این است که شیب خط  $A=0.072$  و عرض از مبدا  $C=0.7981$  با ضریب همبستگی  $R=0.9319$  است و مقدار ضریب واریانس شیب  $\omega_A$ ، عرض از مبدا  $\omega_C$  و عرض نسبی باند پراکندگی  $m$  به ترتیب برابر ۰/۰۸، ۰/۱۱ و ۰/۱۵ بدست آمده است. مقادیر پارامترهای بدست آمده برای تمام طرح‌های اختلاط بررسی شده با روش اثر اندازه برای رگرسیون خطی در جدول (۶) نشان داده شده است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد مقادیر بدست آمده در محدوده قابل قبول دستورالعمل قرار دارند.

(LEFM) نزدیک می‌شود که نشان‌دهنده ترد بودن بیشتر آن و در نتیجه کاهش طول موثر منطقه صدمه دیده بتن است.

شکل ۴: منحنی اثر اندازه برای نتایج آزمایش بدست آمده

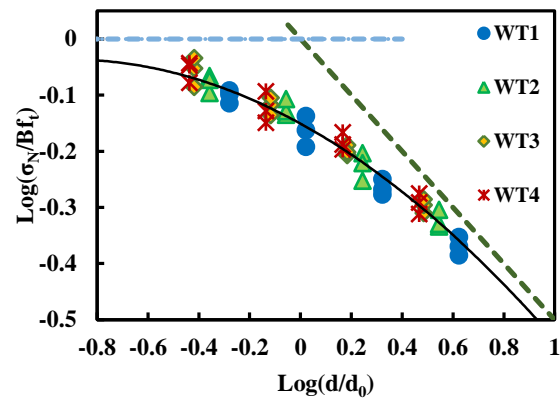


Fig. 4. Size effect curve of test results.

جدول ۵. نیروهای بیشینه اصلاح شده در روش SEM

Mix	d	$\frac{a_0}{d}$	Corrected maximum loads		
			Beam1	Beam2	Beam3
SF1	40	1/3	1302	1779	1546
	80	1/3	3095	2544	2765
	16	1/3	4622	4465	4752
SF2	32	1/3	7288	7012	7516
	40	1/3	1663	1365	1720
	80	1/3	3140	2634	2845
SF3	16	1/3	4356	4925	4536
	32	1/3	6975	7325	7712
	40	1/3	1911	1675	1865
SF4	80	1/3	3321	3122	3245
	16	1/3	4438	4798	5066
	32	1/3	7524	7856	7288
SF5	40	1/3	1288	1465	1563
	80	1/3	2647	2216	2586
	16	1/3	4421	4167	4648
SF6	32	1/3	6654	7124	7432
	40	1/3	1562	1322	1572
	80	1/3	2672	2635	2546
SF7	16	1/3	4603	4465	4523
	32	1/3	7209	6821	7423
	40	1/3	1724	1512	1565
SF8	80	1/3	2766	2456	2765
	16	1/3	4613	4756	4852
	32	1/3	7221	7321	6898

Table 5. Maximum corrected loads in SEM



سیلیسی مصرفی با توجه به نسبت پائین آب به مواد سیمانی و کیفیت بالای ناحیه سطح مشترک خمیر سیمان و سنگدانه و کاهش تخلخل در آن، مسیر گسترش ترک از داخل سنگدانه عبور می‌نماید و بر پایه آنچه در آزمایش شکست مشاهده شده است غالباً سطوح شکست صیقلی و صاف است. همچنین در نسبت آب به مواد سیمانی ۰.۳۵، نیز با افزایش مقدار دوده سیلیسی مصرفی تا ۱۵٪، انرژی شکست از مقدار ۵۲/۴ ژول بر متر مربع به مقدار ۴۷/۴ ژول بر متر مربع می‌رسد که بیانگر کاهش ۹/۵٪ است. چنین نتیجه‌ای توسط بحارات کومار [14] نیز بیان شده است به طوری که در پژوهش خود گزارش نموده است که در بتن مورد آزمایش با جایگزینی ۲۰٪ افزودنی خاکستر بادی به جای سیمان، مقدار انرژی شکست کاهش می‌یابد.

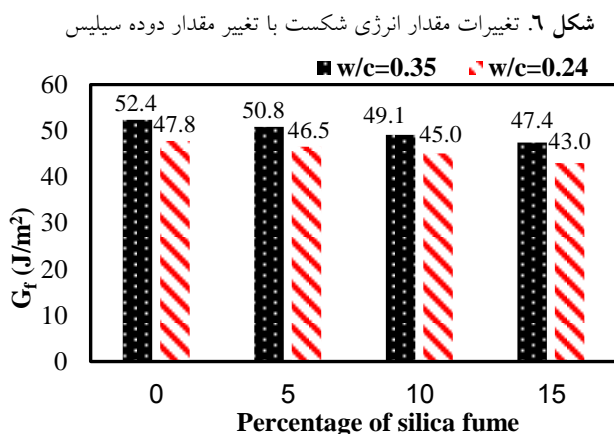


Fig. 6. The Variation of G<sub>f</sub> versus silica fume.

جدول ۷. مشخصات مکانیکی بتن سری ۲

Mix ID	f <sub>c</sub> (Mpa)	E <sub>c</sub> (Gpa)	f <sub>t</sub> (Mpa)	G <sub>f</sub> (J/m <sup>2</sup> )	B (Mpa)	d <sub>0</sub> (mm)
SF1	92.3	41.3	4.87	47.8	1.12	110.8
SF2	95.4	41.8	5.06	46.5	1.16	101.5
SF3	101	42.6	5.11	45	1.33	76.1
SF4	103.2	42.9	5.18	43	1.46	60.6
SF5	76.8	38.2	3.7	52.4	0.98	145.6
SF6	81.3	38.8	3.96	50.8	1.16	123.7
SF7	84.2	39.1	4.22	49.1	1.14	104.8
SF8	85.2	39.4	4.3	47.4	1.17	96.1

Table 7. Mechanical properties of concrete.

جدول ۶. مقادیر بدست آمده از رگرسیون خطی برای طرح اختلاط

Mix series	A	C	ω <sub>A</sub>	ω <sub>C</sub>	m
SF1	0.0072	0.7981	0.08	0.11	0.15
SF2	0.0073	0.7406	0.08	0.13	0.17
SF3	0.0074	0.5635	0.04	0.08	0.09
SF4	0.0077	0.4667	0.05	0.14	0.13
SF5	0.0071	1.0336	0.10	0.11	0.17
SF6	0.0072	0.8907	0.07	0.08	0.12
SF7	0.0074	0.7756	0.05	0.07	0.09
SF8	0.0076	0.7301	0.07	0.07	0.14

Table 6. The values obtained from linear regression for different mix designs

شکل ۵. رگرسیون خطی برای طرح اختلاط SF1

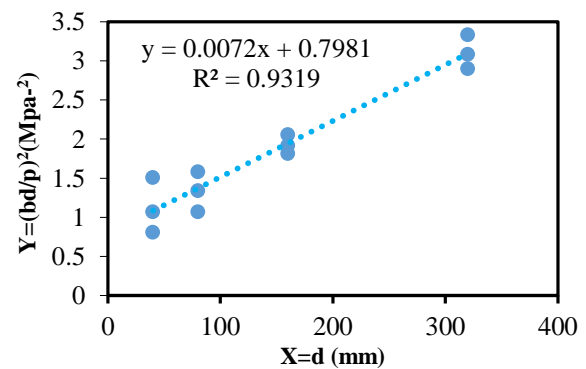


Fig. 5. Linear regression for SF1.

همانگونه که در شکل (۶) مشخص است برای بتن‌های مورد آزمایش مقدار انرژی شکست اولیه با افزایش مقدار دوده سیلیسی مصرفی کاهش می‌یابد و از طرفی این نتیجه در هر دو نسبت آب به مواد سیمانی مشاهده شده است. نتایج به دست آمده نشان داده است که برای بتن‌های مقاومت بالا با افزایش مقدار دوده سیلیسی و با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی که باعث افزایش مقاومت فشاری و مقاومت کششی شده، از سوی دیگر باعث کاهش انرژی شکست می‌شود. در جدول (۷) برخی ویژگی‌های مکانیکی بتن‌های مورد آزمایش نشان داده شده است. همانگونه که در این جدول نشان داده شده است با افزایش مقدار دوده سیلیسی مصرفی از مقدار صفر تا مقدار ۱۵٪ وزنی، در نسبت آب به مواد سیمانی ۰.۲۴، مقدار انرژی شکست ۱۰٪ کاهش می‌یابد. در واقع با توجه به افزایش مقدار دوده

ویژگی‌های مهم شکست بتن در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۸) تغییرات مقدار چقرمگی شکست  $K_{IC}$  نسبت به مقدار دوده سیلیسی مصرفی در بتن نشان داده شده است. با توجه به اینکه برخی پژوهش‌های انجام شده در تعیین چقرمگی شکست در محدوده بتن با مقاومت نرمال بوده است و برای آن بتن‌ها عمدتاً با تراکم ماتریس خمیر سیمان و بهبود منطقه سطح تماس دو فاز سنگدانه و خمیر سیمان باعث افزایش چقرمگی شکست شده است لکن در این پژوهش، در نسبت‌های بسیار کم آب به مواد سیمانی همان‌گونه که نشان داده شده است، با افزایش مقدار نسبت دوده سیلیسی استفاده شده، چقرمگی شکست کاهش می‌یابد، به طوری که با افزایش مقدار دوده سیلیسی مصرفی از حالت بتن بدون دوده سیلیسی به بتن مقاومت بالا با مقدار ۱۵٪ وزنی دوده سیلیسی، مقدار چقرمگی شکست در نسبت آب به مواد سیمانی ۲۴٪ از مقدار ۴۴/۴۱ مگاپاسکال در جذر میلی متر به ۴۲/۹۴ مگاپاسکال در جذر میلی متر رسیده که بیانگر کاهش ۳/۳٪ است. این کاهش برای نسبت آب به مواد سیمانی ۳۵٪ برابر ۳/۳٪ بوده است. رئیسی و همکاران [22] نتیجه‌ای مشابه برای بتن SCC با افزودن مقادیر ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ وزنی نسبت به مواد سیمانی با افزودنی خاکستر پوسته برنج گزارش نموده‌اند.

شکل (۷) تغییرات طول موثر ناحیه پیش رونده ترک را با تغییر مقدار دوده سیلیسی در دو نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۲۴ و ۰/۳۵ نشان می‌دهد. در روش اثر اندازه این پارامتر با تردی بتن مرتبط است و به عنوان ویژگی بتن شمرده می‌شود. همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است، برای نسبت دوده سیلیسی مصرفی ۱۵٪ در نسبت آب به مواد سیمانی ۲۴٪ مقدار  $C_f$  برابر ۱۱/۸ میلی‌متر بوده است که با کاهش مقدار دوده سیلیسی به مقدار صفر، مقدار آن به ۲۱/۶ میلی‌متر افزایش می‌یابد. در نسبت آب به مواد سیمانی ۳۵٪ نیز با کاهش مقدار دوده سیلیسی، مقدار  $C_f$  افزایش یافته است و از ۱۸/۸ میلی متر به ۲۸/۴ میلی متر رسیده است که بیانگر افزایش ۵۱/۱٪ بوده است.

شکل ۷. مقادیر  $C_f$  در برابر مقدار دوده سیلیسی

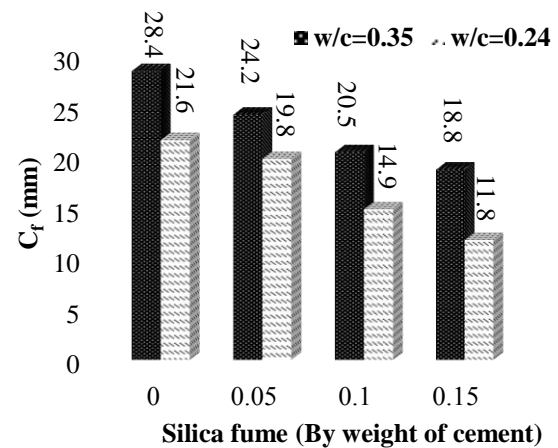


Fig. 7.  $C_f$  changes versus silica fume content.

شکل ۸. تغییرات چقرمگی شکست در برابر مقادیر دوده سیلیسی

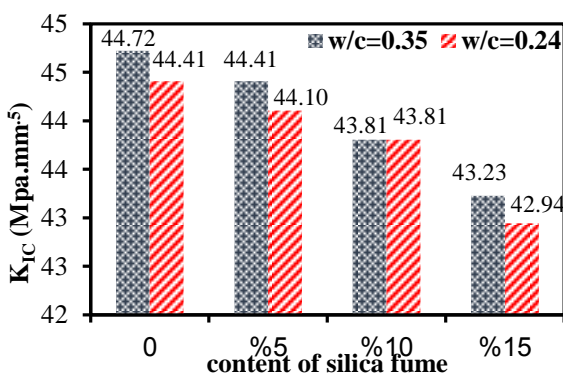


Fig. 8.  $K_{IC}$  changes versus the value of silica fume.

در تئوری‌های مختلف ارائه شده برای تحلیل مکانیک شکست مصالح، چقرمگی شکست ( $K_{IC}$ ) یا ضریب شدت تنش بحرانی بعنوان یکی از خواص مکانیکی مهم در نظر گرفته می‌شود و به عنوان مقاومت بتن در مقابل رشد ناپایدار ترک بکار می‌رود. به عبارت دیگر با توجه به اینکه اعضا بتنی با  $K_{IC}$  برابر از میدان تنش یکسان در اطراف ترک برخوردارند، بنابراین بتن‌هایی که دارای چقرمگی شکست پائین تری دارند ترک‌های کوچکتری را می‌توانند تحمل کنند. چقرمگی شکست به عنوان معیاری سنجیده می‌شود که اگر در بتن دارای ترک، این مقدار به حد بحرانی برسد شکست بتن آغاز می‌شود پس به عنوان یکی از

از پارامترهای مهم که از مشخصات شکست مصالح است و توسط بازانت [16] به عنوان معیار مشخصه تردی مصالح معرفی شده است، عدد تردی  $\beta$  است. بازانت و کاظمی [16]

ظرفیت باربری بتن‌های مورد آزمایش را با تغییرات مقدار دوده سیلیسی و آب به مواد سیمانی نشان می‌دهد. مقادیر بدست آمده نشان می‌دهد بیشینه نیروی وارد شده برای بتن‌های مقاومت بالا با مقادیر مختلف دوده سیلیسی را می‌توان به صورت صحیحی توسط مشخصه‌ها و پارامترهای شکست پیش‌بینی نمود.

شکل ۱۰. نیروهای ماکزیمم آزمایشگاهی و تخمینی

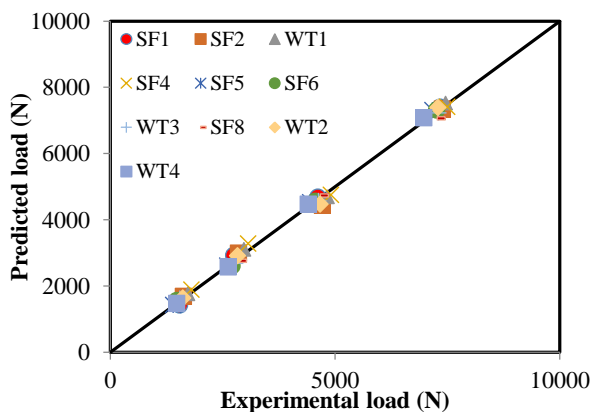


Fig. 10. Maximum laboratory and estimated loads.

یکی از مفاهیم کاربردی در مکانیک شکست این است که برای اینکه بار بحرانی و نهایی وارد بر یک عضو و همچنین طول بحرانی ترک منجر به شکست در یک سازه تعیین و پیش‌بینی شود، دو پارامتر چقرمگی شکست ( $K_{IC}$ ) و جابه‌جایی باز شدگی بحرانی نوک ترک ( $CTOD_C$ ) باید تعیین شود. به طوری که برخی از روش‌های بررسی رفتار مکانیک شکست مصالح، با نام روش دو پارامتری، شامل این دو مشخصه بتن بیان شده و ارائه شده‌اند. پژوهشگران مختلف نشان دادند در تیرهای با اندازه‌های مختلف ولی مصالح مشابه مقادیر  $CTOD_C$  آنها ثابت است. اهمیت این پارامتر در شروع و گسترش ترک است به طوری که زمانی که جابه‌جایی باز شدگی نوک ترک به حد بحرانی خود ( $CTOD_C$ ) می‌رسد رشد ترک در بتن آغاز می‌شود. بنابراین با بررسی این مشخصه برای بتن، یکی از عوامل تعیین کننده و مهم در رشد ترک در اعضا بتنی مشخص می‌شود. برای بتن مقاومت بالا با درصد‌های مختلف دوده سیلیسی و نسبت‌های آب به مواد

نشان دادند که این ضریب مشخص کننده الگوی شکست سازه یا عضو، و تعیین کننده معیار طراحی است. به عبارت دیگر این ضریب مشخص کننده این است که آیا مکانیک شکست خطی بر طراحی عضو سازه حاکم است و یا اینکه از معیار و روابط شکست غیر خطی باید در بررسی رفتار شکست اعضاء سازه تحت بارهای بحرانی استفاده نمود. همان‌گونه که در شکل (۹) نشان داده شده است، تغییرات  $\beta$  نسبت به عمق نمونه  $d$  به گونه‌ای است که با افزایش عمق و اندازه نمونه نسبت به اندازه موثر منطقه صدمه دیده شکست بتن، رفتار تردتری را نشان می‌دهد و رفتار آن به مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM) نزدیک می‌شود. با توجه به مقادیر بدست آمده در تمامی مقادیر دوده سیلیسی مصرفی و نسبت‌های آب به مواد سیمانی مکانیک شکست غیرخطی (NLFM) حاکم هست.

شکل ۹. تغییرات عدد تردی در برابر عمق نمونه

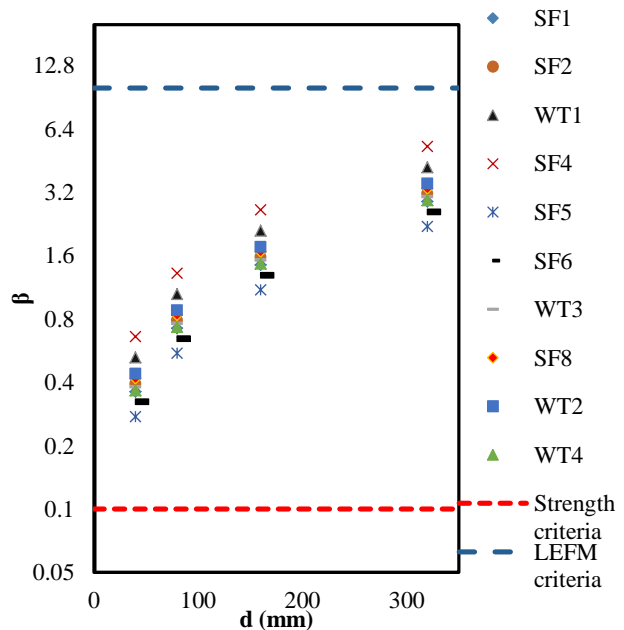


Fig. 9. Changes in the brittleness number.

همان‌گونه که پیشتر اشاره شد، از مهمترین مزیت‌های روش اثر اندازه تخمین مقدار ظرفیت نیروی ماکزیمم بتن مورد آزمایش بر اساس پارامترهای شکست تعیین شده مطابق رابطه اثر اندازه است، به طوری که با پارامترهای شکست تعیین شده می‌توان مقدار آن را پیش‌بینی نمود. شکل (۱۰) مقادیر بیشینه

ترک در اطراف نوک ترک و مناطق حاوی میکروترک، مکانیک شکست غیر خطی بر رفتار این بتن ها حاکم است.

شکل ۱۲. منحنی اثر اندازه برای بتن با طرح اختلاط مختلف

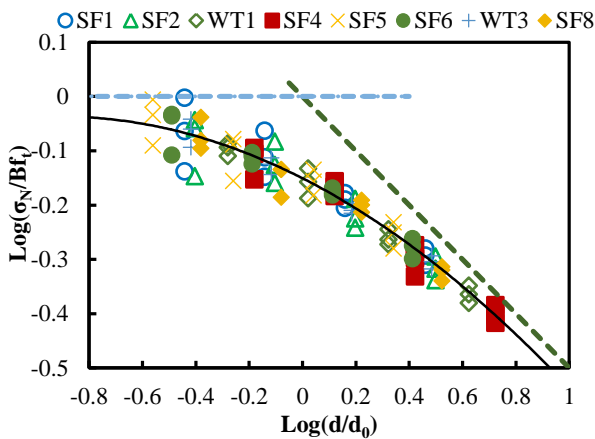


Fig. 12. Size effect curve for different mix design.

### ۵- نتیجه گیری:

این پژوهش آزمایشگاهی به بررسی روش اثر اندازه بر روی رفتار و ویژگی های شکست بتن مقاومت بالا صورت گرفته است و تاثیر نسبت های مختلف درصد وزنی دوده سیلیسی و نسبت های آب به مواد سیمانی در مقادیر بسیار کم که برای بتن مقاومت بالا مورد استفاده است را مورد بررسی قرار داده است. براساس آزمایش های صورت گرفته مطابق دستورالعمل RILEM FMT-89 [15] و ارزیابی رفتار بتن نتایج زیر بدست آمد:

- براساس نتایج بدست آمده از روش اثر اندازه، انرژی شکست اولیه  $G_f$  تابع مقدار دوده سیلیسی استفاده شده بوده است به طوری که در محدوده درصد وزنی استفاده شده، با افزایش درصد دوده سیلیسی به مقدار ۱۵٪ نسبت به بتن بدون دوده سیلیسی، مقدار انرژی شکست اولیه در نسبت  $W/C=۰.۳۵$  و  $W/C=۰.۲۴$  به ترتیب ۹/۵٪ و ۱۰٪ کاهش یافته است.
- کاهش نسبت آب به مواد سیمانی از مقدار ۳۵٪ به ۲۴٪ باعث کاهش انرژی شکست اولیه در بتن مقاومت بالا شده است، بطوریکه مقدار آن در نسبت  $W/C=۰.۳۵$  نسبت به  $W/C=۰.۲۴$  بمیزان ۸/۳٪ کاهش یافته است.

سیمانی همان گونه که در شکل (۱۱) مشخص است با افزایش مقدار دوده سیلیسی و کاهش نسبت آب به مواد سیمانی این مقدار کاهش می یابد، به طوری که در نسبت آب به مواد سیمانی ۲۴٪ مقدار آن از ۰.۱۱۰ میلی متر برای مقدار دوده سیلیسی ۱۵٪ به مقدار ۰.۱۶۰ میلی متر برای بتن بدون دوده سیلیسی افزایش می یابد. همچنین برای نسبت آب به مواد سیمانی ۳۵٪ نیز این مقدار از ۰.۱۵۲ میلی متر به ۰.۱۹۹ میلی متر افزایش می یابد که در هر دو نسبت آب به مواد سیمانی با افزایش مقدار دوده سیلیسی مقدار  $CTOD_C$  کاهش می یابد. تسدمیرو همکاران [1] در مطالعه ای که برای بتن با مقاومت نرمال با افزودن ماده دوده سیلیسی با مقدار ۱۰٪ وزنی نسبت به مواد سیمانی انجام داده اند، چنین نتیجه ای را برای بازشدگی بحرانی انتهای ترک ( $CMOD$ ) گزارش کرده اند.

شکل ۱۱. تغییرات  $CTOD_C$  در برابر مقدار دوده سیلیسی

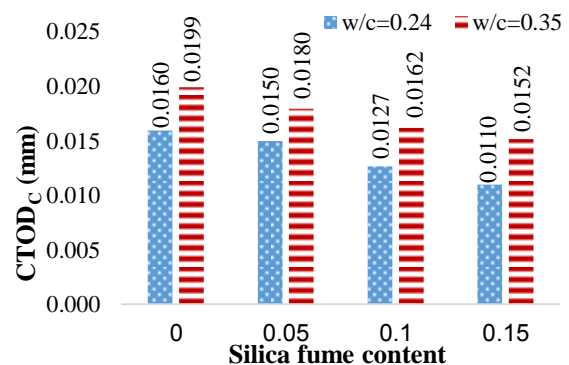


Fig. 11. Changes in  $CTOD_C$  versus silica fume.

در شکل (۱۲) نمودار منحنی اثر اندازه برای بتن های مقاومت بالا برای نسبت های مختلف مقدار دوده سیلیسی در دو نسبت آب به مواد سیمانی نشان داده شده است. همان گونه که در شکل مشخص است در مجموع نتایج به دست آمده هماهنگی قابل قبولی با مقادیر پیش بینی شده مطابق منحنی اثر اندازه دارند. با توجه باینکه مقادیر بدست آمده نزدیک به محدوده آنالیز شکست الاستیک قرار دارند لکن همه بتن ها در مابین دو محدوده حد خطی و حد مقاومت قرار دارند و با وجود رفتار ترد این نوع بتن، با توجه به وجود ناحیه پیش رونده

- 5- Bentur, A., 1990. Microstructure, interfacial effects and micromechanics of cementitious composites, *Advances in Cementitious Materials. Am. Ceram. Soc.*, 16, pp.523-550.
- 6- Merchant, I.J., Macphee, D.E., Chandler, H.W. and Henderson, R.J., 2001. Toughening cement-based materials through the control of interfacial bonding. *Cement and concrete research*, 31(12), pp.1873-1880.
- 7- Prokopski, G. and Langier, B., 2000. Effect of water/cement ratio and silica fume addition on the fracture toughness and morphology of fractured surfaces of gravel concretes. *Cement and Concrete Research*, 30(9), pp.1427-1433.
- 8- Mindess, S., Young, J.F. and Darwin, D., 1981. *Concrete* (pp. 339-344). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- 9- Jo, B.W. and Tae, G.H., 2001. Experimental study on fracture energy of low-heat concrete by three-point bend tests. *Russian journal of nondestructive testing*, 37(12), pp.907-915.
- 10- Carpinteri, A. and Brighenti, R., 2010. Fracture behaviour of plain and fiber-reinforced concrete with different water content under mixed mode loading. *Materials & Design*, 31(4), pp.2032-2042.
- 11- Köksal, F., Altun, F., Yiğit, İ. and Şahin, Y., 2008. Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes. *Construction and building materials*, 22(8), pp.1874-1880.
- 12- Aitcin, P.C., 2014. *Binders for durable and sustainable concrete*. CRC Press.
- 13-Guinea, G.V., El-Sayed, K., Rocco, C.G., Elices, M. and Planas, J., 2002. The effect of the bond between the matrix and the aggregates on the cracking mechanism and fracture parameters of concrete. *Cement and concrete research*, 32(12), pp.1961-1970.
- 14- Bharatkumar, B.H., Raghuprasad, B.K., Ramachandramurthy, D.S., Narayanan, R. and Gopalakrishnan, S., 2005. Effect of fly ash and slag on the fracture characteristics of high performance concrete. *Materials and Structures*, 38(1), p.63.
- 15- Recommendation, R.D., 1990. Size-effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete. *Materials and Structures*, (23), pp.461-465.
- 16- Bažant, Z. P., &Kazemi, M. T., 1990. Size effect in fracture of ceramics and its use to determine fracture energy and effective process zone length. *Journal of the American Ceramic Society*, 73(7), 1841-1853.
- 17- Bazant, Z. P., &Kazemi, M. T., 1990. Determination of fracture energy, process zone length and brittleness number from size effect, with application to rock and concrete. *International Journal of fracture*, 44(2), 111-131.
- 18- ASTM C 33: Standard specification for concrete aggregates. American standards for testing and materials; 2003.
- 19-BS EN 12390. part3: Testing hardened concrete. Method of determination of compressive strength of concrete cubes. British standards institution; 2000.
- 20- ASTM C 469: Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression. American Standards for Testing and Materials; 2002.
- 21- ASTM C 496: Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. American Standards for Testing and Materials; 2011.
- 22- Raisi, E.M., Amiri, J.V. and Davoodi, M.R., 2018. Influence of rice husk ash on the fracture characteristics and brittleness of self-compacting concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 199, pp.595-608.

- ۳) کاهش نسبت آب به مواد سیمانی در محدوده مورد استفاده در ساخت بتن مقاومت بالا، باعث کاهش مقادیر  $C_f$  شده است که بیانگر تردی بیشتر بتن مقاومت بالا با کاهش این نسبت است. با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی از ۴٪ به ۲۴٪ مقدار  $C_f$  بمیزان ۳۰٪ کاهش یافته است.
- ۴) برخلاف بتن‌های با مقاومت نرمال، در بتن‌های با نسبت  $W/C$  بسیار کم، با افزایش مقدار دوده سیلیسی چقرمگی شکست کاهش یافته است، به طوری که برای بتن با نسبت آب به مواد سیمانی ۳۵٪ و ۲۴٪ با افزایش مقدار درصد وزنی دوده سیلیسی از مقدار صفر به مقدار ۱۵٪ وزنی، چقرمگی شکست ۳/۳٪ کاهش یافته است.
- ۵) افزایش مقدار دوده سیلیسی مصرفی باعث کاهش مقدار  $C_f$  در هر دو نسبت آب به مواد سیمانی شده است. به طوری که با افزایش آن از مقدار صفر به ۱۵٪ وزنی، مقدار طول ناحیه پیش رونده ترک برای نسبت آب به مواد سیمانی ۳۵٪ و ۲۴٪ به ترتیب ۳۳/۸٪ و ۴۵/۴٪ کاهش می‌یابد.
- ۶) در تمامی نمونه‌های مقاومت بالای مورد آزمایش با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی و افزایش مقدار دوده سیلیسی عدد تردی ( $\beta$ ) افزایش یافته است.
- ۷) نتایج نشان داده است با استفاده از پارامترهای شکست بدست آمده از روش اثر اندازه برای بتن‌های مقاومت بالا با درصد‌های مختلف دوده سیلیسی و نسبت‌های کم آب به مواد سیمانی، بیشینه نیروی وارد شده بر اعضاء به صورت صحیح قابل پیش‌بینی است.

## References

## ۶-منابع

- 1- Tasdemir, C., Tasdemir, M.A., Lydon, F.D. and Barr, B.I., 1996. Effects of silica fume and aggregate size on the brittleness of concrete. *Cement and Concrete Research*, 26(1), pp.63-68.
- 2- Mitsui, K., Li, Z., Lange, D.A. and Shah, S.P., 1994. Relationship between microstructure and mechanical properties of paste-aggregate interface. *Materials Journal*, 91(1), pp.30-39.
- 3- Husem, M., 2003. The effects of bond strengths between lightweight and ordinary aggregate-mortar, aggregate-cement paste on the mechanical properties of concrete. *Materials Science and Engineering: A*, 363(1-2), pp.152-158.
- 4- Akçaoğlu, T., Tokyay, M. and Çelik, T., 2005. Assessing the ITZ microcracking via scanning electron microscope and its effect on the failure behavior of concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(2), pp.358-363.

## Investigation of the effect of water to cementitious materials ratio and silica fume on the fracture behavior and brittleness of high strength concrete by size effect method

Seyed Mohammad Mousavi<sup>1</sup>, Rahmat Madandoust<sup>2\*</sup>, Malek Mohammad Ranjbar<sup>3</sup>

1-Ph.D. Student, Faculty of Engineering, University of Guilan

2- Associated professor, Faculty of Engineering, University of Guilan

3- Associated professor, Faculty of Engineering, University of Guilan

### Abstract

The use of high strength concrete (HSC) is increasing due to the expansion of the construction technology of these concretes. In structural engineering, concrete is known as a material with brittle behavior that the tensile strength of which is negligible compared to its compressive strength and show low resistance to crack propagation. Moreover, the concrete can be considered as a quasi-brittle material, which is due to the type of behavior related to the crack propagation and is also existed around the crack tip of fracture process zone (FPZ) that involves a set of microcracks. From the perspective of structural behavior, the size effect of the structure is one of the most important concepts provided by the fracture mechanics; therefore, it is important to provide an equation between concrete fracture properties such as fracture toughness ( $K_{IC}$ ) and fracture energy ( $G_f$ ) and its correlation with the size effect mechanism. The fracture energy is one of the most important characteristics for analysis of fracture behavior in concrete, evidenced to be a concrete property, showing its strength to cracking and fracture toughness. Given that the fracture energy ( $G_f$ ) is sufficient to calculate the fracture behavior evaluation for the brittle materials in range of linear fracture mechanics, for the quasi-brittle materials such as concrete, this is not a sufficient parameter due to the presence of microcracks in the fracture process zone, and the length of fracture process zone ( $C_f$ ) is one of the important properties of fracture in the unlimited-size structures. For determining the fracture parameters of concrete, various methods have been proposed. One of the most important methods that is presented by Bazant is the size effect method (SEM). This research studies and analyzes the fracture behavior of high strength concrete (HSC) with various amounts of silica fume, along with a change in water to cementitious materials ratio (w/c) with SEM. In this experimental study, a total of 10 mixing designs have been tested. To investigate the effects of different w/c ratios in the range of HSC and the effect of silica fume, four w/c ratios of 0.24, 0.3, 0.35 and 0.4 Examined and in two w/c ratios of 0.24 and 0.35 a mix design for plain concrete without silica fume and three mix designs prepared with silica fume content of 5%, 10% and 15% by weight of cement. To determine the fracture characteristics of concrete, a total of 120 beams were tested. The results showed that by decreasing the w/c ratio from 0.35 in the range of HSC, the value of initial fracture energy ( $G_f$ ), the effective length of fracture processing zone ( $C_f$ ) and the critical crack tip opening displacement ( $CTOD_c$ ) decreased and on the other hand the brittleness number ( $\beta$ ) increased. Also, by increasing the amount of silica fume in the w/c ratios of 0.35 and 0.24, the fracture energy, the length of the fracture processing zone, the fracture toughness ( $K_{IC}$ ), the critical crack tip opening displacement reduced, and the brittleness number increased. Also, the results indicated that by using the fracture parameters obtained from the SEM, the maximum load on the high strength concrete specimen can be predicted correctly.

**Keywords:** Size effect method, Fracture behavior, Fracture toughness, Brittleness number.