



## بررسی آزمایشگاهی پارامترهای شکست تیر بتنی ساخته شده از ماده مرکب سیمانی مهندسی شده

سید مهدی امیرفخریان، محمدرضا اصفهانی\*

دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۰۹

بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۲۱

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۱/۰۴

### کلمات کلیدی:

ماده مرکب سیمانی مهندسی شده

(ECC)

انرژی شکست

چقرمگی

کار شکست (WFM)

اثر اندازه بازانت (SEM)

**خلاصه:** وجود ترک در سازه‌های بتنی سبب می‌شود که در بسیاری از موارد معیارهای متداول قادر به پیش‌بینی صحیح شکست آن‌ها نباشند. با بهره‌گیری از علم مکانیک شکست و معیارهای موجود آن می‌توان رفتار شکست این‌گونه سازه‌ها را به درستی پیش‌بینی کرد. در این پژوهش آزمایشگاهی با استفاده از روش‌های مکانیک شکست، پارامترهای شکست تیر خمشی ساخته شده از ماده مرکب سیمانی مهندسی شده (ECC) مورد بررسی قرار می‌گیرد. ۶ نمونه تیر آزمایشگاهی شکاف‌دار با ابعاد  $350 \times 100 \times 100$  میلی‌متر بر اساس روش کار شکست (WFM) و ۱۸ نمونه تیر آزمایشگاهی شکاف‌دار با ابعاد  $380 \times 140 \times 70$ ،  $190 \times 70 \times 70$  و  $760 \times 280 \times 70$  میلی‌متر بر اساس روش اثر اندازه بازانت (SEM) ساخته و آزمایش شدند. مواد مورد استفاده برای تهیه ECC شامل الیاف پلی‌پروپیلن، سیمان، غبار کوره آهن، میکروسلیس و پودر سنگ بودند. از دو نسبت الیاف (۱ و ۲ درصد) در مخلوط‌های مختلف استفاده شد. مشاهده شد که با افزایش الیاف از ۱ درصد به ۲ درصد مقدار مقاومت خمشی، انرژی شکست در روش WFM ( $G_F$ )، انرژی شکست در روش SEM ( $G_F$ ) و چقرمگی شکست ( $K_{IC}$ ) نمونه‌ها افزایش می‌یابند. از طرف دیگر، مقاومت فشاری، طول مشخصه ( $L_{ch}$ ) و عدد تردی نمونه‌ها با افزایش الیاف کاهش می‌یابند. همچنین قانون اثر اندازه بازانت در نمونه‌های مختلف ساخته شده از ECC مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

### ۱- مقدمه

برای جبران ضعف بتن در مقابل تنش‌های کششی و افزایش شکل‌پذیری، انواع جدیدی از بتن‌ها در سال‌های اخیر معرفی شده‌اند [۱ و ۲]. ماده مرکب سیمانی مهندسی شده (ECC) یکی از انواع بتن‌های الیافی با کارایی بالا (HPFRC) است [۳ و ۴]. ECC دارای خاصیت مهم سخت‌شدگی کرنش است، عواملی همچون تغییر مکان بالا در لحظه شکست و تحمل بار بعد از شکست نشان دهنده خاصیت سخت‌شدگی کرنش بوده و این خاصیت در ECC منجر به جذب انرژی بالا می‌شود [۵]. انرژی شکست در مواد دارای رفتار سخت‌شدگی کرنش دارای دو جزء خارج صفحه ترک و داخل صفحه ترک است. جزء خارج صفحه ترک شامل منطقه گسترش یافته ریزترک‌ها است که قبل از گسترش ترک نوک ترک را احاطه می‌کند (همانند ترک‌های چند گانه در نمونه کششی تک محوره) این حجم بالای جریان ترک سبب افزایش جذب انرژی می‌شود. جزء داخل صفحه ترک نیز همان مکانیزم پل

زدن الیاف است، مجموع این دو جزء سبب جذب انرژی بالایی می‌شود [۷ و ۶]. ECC از مقاومت کششی معمولی ۴-۶ مگاپاسکال و شکل‌پذیری بیشتر از ۳ تا ۵ درصد برخوردار است [۸ و ۹]. در ECC تشکیل میکرو ترک‌ها بسیار زیاد است و جذب انرژی غیرالاستیک گسترده‌ای خارج از صفحه شکست رخ می‌دهد [۱۰]. مقاومت فشاری ECC با بتن‌های الیافی تفاوت چندانی ندارد [۱۱].

آزمایش‌های مختلف روی نمونه‌های بتنی نشان می‌دهد که رفتار خمیر سخت‌شده، رفتاری ترد نبوده و جریان شکست غیرخطی است و قبل از شکست ناپایدار، گسترش ترک پایدار رخ می‌دهد [۱۲]. برای مواد ترد، حالت خاصی از مکانیک شکست که در آن منطقه آسیب دیده (در فلزات منطقه پلاستیک) نوک ترک کوچک و قابل نظر کردن بوده را مکانیک شکست خطی (LEFM) گویند. در مواد نیمه‌ترد همچون بتن، به دلیل بزرگی منطقه آسیب دیده نوک ترک، استفاده از اصول LEFM منجر به نتایج نادرست می‌شود. در بتن از اصول مکانیک شکست غیرخطی (NLFM)

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: esfahani@um.ac.ir



مخصوص شکست، میزان انرژی جذب شده در واحد سطح ترک است و یکی از ثابت‌های شکست مواد شبه ترد می‌باشد [۲۰] و از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$G_F = \frac{W_0}{b(d - a_0)} \quad (1)$$

در رابطه (۱) مقدار انرژی شکست بوده که برابر با مساحت زیر نمودار بار - جابه‌جایی است،  $b$  عرض نمونه،  $d$  ارتفاع نمونه و  $a_0$  ارتفاع اولیه شکاف می‌باشد (شکل ۱). پارامتر دیگری نیز توسط هیلربرگ و همکاران معرفی شده که طول مشخصه ماده ( $L_{ch}$ ) نام دارد و از مشخصات ماده است و با رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۲۲ و ۱۴]:

$$L_{ch} = \frac{E \cdot G_F}{f_t^2} \quad (2)$$

در رابطه (۲)  $E$  مدول الاستیسیته،  $G_F$  انرژی شکست و  $f_t$  مقاومت کششی نمونه است.  $L_{ch}$  متناسب با طول ناحیه صدمه دیده است.

## ۲-۲- روش اثر اندازه بازانت (SEM)

یکی از مهم‌ترین کاربردهای مکانیک شکست محاسبه اثر اندازه سازه است. اثر اندازه زمانی اهمیت خود را نشان می‌دهد که هدف تفسیر رفتار یک سازه در اندازه واقعی بر اساس نمونه‌های آزمایشگاهی باشد [۲۳ و ۱۸]. در روش SEM، پارامترهای شکست با استفاده از آزمایش خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های شکافدار مشابه و با اندازه‌های مختلف به دست می‌آیند. یو و همکاران [۲۴] نشان دادند که از دیدگاه نظری و تجربی، نتایج SEM واقع بینانه‌تر و کامل‌تر و با خطای کمتر در مقایسه با روش‌های دیگر است. همچنین هوور و بازانت [۲۵] ثابت کردند که نتایج به دست آمده از SEM برای شکست مواد شبه ترد دقیق‌تر است. دو روش WFM و SEM می‌توانند مکمل یکدیگر باشند. بازانت و پفیفر تئوری اثر اندازه را به صورت رابطه (۳) ارائه دادند [۲۳]:

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

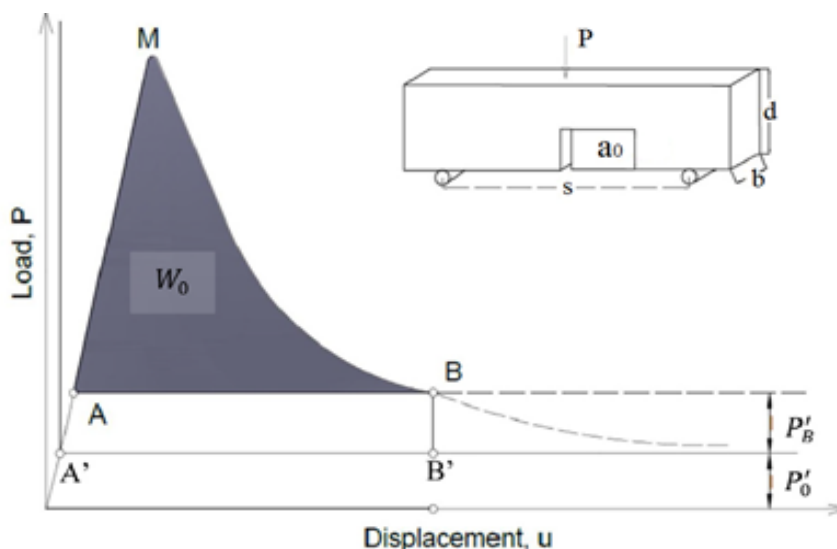
استفاده می‌شود [۱۳]. در دهه‌های گذشته مدل‌های مختلفی برای تعیین چقرمگی شکست مواد بتنی پیشنهاد شده است. مدل ترک مجازی هیلربرگ و همکاران [۱۴]، مدل ترک نواری بازانت و او [۱۵]، مدل ترک دو پارامتری جنک و شاه [۱۷ و ۱۶] و مدل اثر اندازه بازانت و کاظمی [۱۸] از جمله مدل‌های پیشنهاد شده برای بررسی رفتار شکست و تعیین چقرمگی بتن می‌باشند. همچنین می‌توان در علم مکانیک شکست از روش‌های عددی استفاده نمود. در بسیاری از مسائل سازه‌ای، به دلیل وجود پیچیدگی در هندسه و بارگذاری سازه، روش‌های عددی در تحلیل ترک به کار گرفته می‌شوند. این راهکارها به طور کلی به دو روش اجزای محدود و اجزای مرزی انجام می‌شوند. نرم افزارهای متعددی نیز برای تحلیل سازه ترک‌دار و بررسی رفتار مکانیک شکست مواد تهیه شده است. به عنوان مثال در پژوهشی، تحلیل عددی شبه-استاتیک انشعاب ترک در اجسام جامد ترد بر اساس روش اصلاح شده جابجایی منفصل بررسی شده است [۱۹]. با توجه به نبود مطالعات کافی در مورد پارامترهای شکست نمونه‌های ساخته شده از مخلوط ECC به خصوص مطالعات آزمایشگاهی، در این پژوهش سعی شده است تا با بهره‌گیری از علم مکانیک شکست، به صورت آزمایشگاهی به بررسی پارامترهای شکست و چقرمگی مخلوط ECC پرداخته شود.

## ۲- محاسبه پارامترهای شکست

همانطور که پیشتر اشاره شد، برای پیش‌بینی رفتار شکست بتن روش‌های مختلفی توسط پژوهشگران ارائه شده است. از بین این روش‌ها، روش کار شکست (WFM) و روش اثر اندازه (SEM) در استاندارد RILEM ذکر شده و مبنای کار بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. در این دو روش با بهره‌گیری از آزمایش خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های شکافدار به بررسی پارامترهای شکست از قبیل انرژی شکست ( $G_F$ ،  $G_F$ )، طول مشخصه ماده ( $L_{ch}$ )، طول بحرانی ترک ( $C_f$ ) و چقرمگی شکست ( $K_{IC}$ ) پرداخته می‌شود. بررسی پارامترهای شکست در ECC سبب شناخت جذب انرژی و چقرمگی شکست این نوع ماده سیمانی می‌شود.

## ۲-۱- روش کار شکست (WFM)

روش کار شکست هیلربرگ و همکاران [۱۴] روشی است که بر مبنای مدل ترک چسبیده بنا نهاده شده است. این روش و روش اثر اندازه بازانت در استاندارد RILEM [۲۱ و ۲۰] ذکر شده و بر مبنای آزمایش خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های شکافدار قرار دارند. در WFM انرژی



شکل ۱. نمودار بار - جابه‌جایی در روش WFM

Fig. 1. Load -displacement relationship in WFM

شکست ( $G_f$ )، افزایش طول بحرانی ترک ( $C_f$ ) و چقرمگی شکست ( $K_{IC}$ ) و همچنین دو پارامتر تجربی  $B$  و  $d_0$  طبق رابطه‌های زیر به دست می‌آیند:

$$d_0 = \frac{C}{A}, \quad B = \frac{1}{\sqrt{C}} \quad (6)$$

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

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

$$K_{IC} = \sqrt{E.G_f} \quad (9)$$

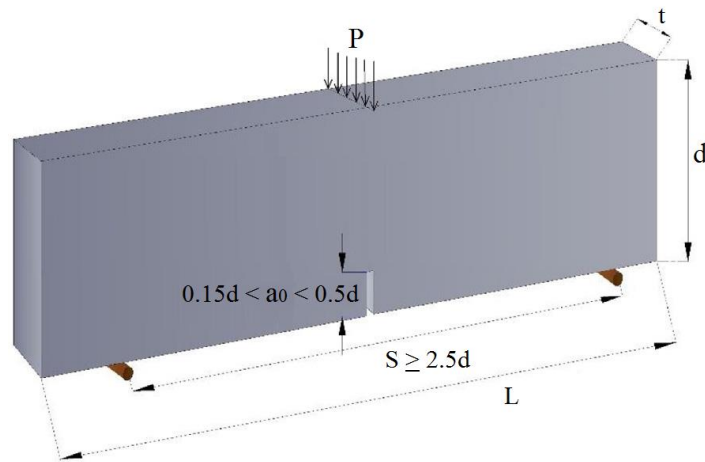
در رابطه‌های بالا  $g(\alpha_0)$  و  $g'(\alpha_0)$  پارامترهای بدون بعد از نرخ‌هایی انرژی و  $A$  و  $C$  شیب و عرض از مبدا خط محاسبه شده از آنالیز رگرسیون خطی است. رابطه‌های بالا به طور کامل در استاندارد RILEM TC 89-FMC [۲۱] آورده شده است. در این استاندارد پیشنهاد شده است

در رابطه (۳)  $\beta$  عدد تردی بوده که توسط بازانت و کاظمی [۱۸] معرفی گردیده و نشان دهنده ترد بودن سازه است،  $f_t$  مقاومت کششی،  $d_j$  عمق نمونه و  $B$  و  $d_0$  پارامترهای تجربی هستند. در روش SEM برای محاسبه پارامترهای شکست، ابتدا دو پارامتر  $X_j$  و  $Y_j$  برای هر نمونه محاسبه می‌شوند:

$$X_j = d_j, \quad Y_j = \left(\frac{d_j \cdot t}{P_j^0}\right)^2 \quad (4)$$

$$P_j^0 = P_j + \frac{2S_j - L_j}{2S_j} g \cdot m_j \quad (5)$$

در رابطه (۴)  $t$  ضخامت نمونه و  $P_j^0$  بار حداکثر تصحیح شده است. رابطه (۵) برای محاسبه  $P_j^0$  که تصحیح بار حداکثر می‌باشد در استاندارد RILEM TC89-FMC [۲۱] ارائه شده است. در رابطه (۵)  $P_j$  بار حداکثر به دست آمده از آزمایش برای هر نمونه،  $g$  شتاب گرانش ( $m/s^2$ ) و  $L$  و  $S$  به ترتیب دهانه، طول و جرم نمونه است. بعد از محاسبه رابطه (۴) و انجام آنالیز رگرسیون خطی، خط  $Y=AX+C$  به دست آمده و با استفاده از روابط زیر پارامترهای شکست از قبیل انرژی



شکل ۲. نمونه تیر در روش SEM بر مبنای استاندارد RILEM

Fig. 2. Beam specimen in SEM based on RILEM standard

با طول ۱۲ میلی‌متر و قطر ۱۲ میکرومتر استفاده شد. همچنین در این پژوهش از میکروسیلیس، پودر سنگ و غبار کوره ذوب آهن به عنوان جایگزین ماسه سیلیسی و خاکستر بادی بهره گرفته شد. با جایگزینی این مواد علاوه بر بهینه کردن هزینه ECC، از مصالح محلی برای تولید این ماده مرکب استفاده شد. مشخصات الیاف مصرفی در جدول ۱ ارائه شده است.

در این پژوهش با بررسی‌های انجام شده دو طرح اختلاط مناسب انتخاب و مقاومت فشاری و مقاومت خمشی این دو طرح تعیین می‌شود. سپس به بررسی پارامترهای شکست ECC و اثر مقدار الیاف مصرفی بر روی پارامترهای شکست با بهره‌گیری از تحلیل مکانیک شکست پرداخته می‌شود. نسبت اجزای تشکیل دهنده در ۲ طرح اختلاط در نظر گرفته شده در جدول ۲ ارائه شده است.

برای تهیه ECC از سیمان تیپ ۲ و فوق روان کننده از نوع روان کننده‌ها بر پایه پلی‌کربوکسیلات استفاده شد. نسبت آب به مواد چسبنده در دو طرح مورد بررسی ثابت و برابر ۰/۵ بود و مواد ریزدانه (میکروسیلیس، پودر سنگ و غبار کوره آهن) با حداکثر اندازه ۰/۲ میلی‌متر استفاده شد. برای تهیه مخلوط ECC از مخلوط‌کن با سرعت چرخش متفاوت (مخلوط‌کن مورد استفاده دارای سرعت چرخش آرام، متوسط و تند بود) استفاده شد، برای تهیه ECC ابتدا آب و فوق روان کننده با یکدیگر مخلوط می‌شوند و در حالی که مخلوط‌کن در دور آرام چرخش قرار دارد میکروسیلیس، پودر سنگ و سیمان اضافه می‌شوند، بعد از یکنواخت شدن مخلوط، الیاف عمل‌آوری شده (الیاف

که عرض نمونه  $(t)$  تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای حداقل ۳ برابر اندازه بزرگ‌ترین سنگدانه در نظر گرفته شود، اما در استاندارد ASTM 1609 [۲۶] عرض نمونه دارای الیاف، ۳ برابر طول الیاف پیشنهاد شده است. در این پژوهش با توجه به توزیع مناسب الیاف در مخلوط ECC، عرض در تمام نمونه‌ها ثابت و برابر ۷۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ نمونه با نسبت‌های پیشنهادی استاندارد RILEM TC 89-FMC مشاهده می‌شود.

### ۳- طراحی و ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

در این بخش ابتدا ویژگی‌های مصالح به کار رفته برای تهیه ECC و روش ساخت این ماده سیمانی معرفی شده، سپس با بهره‌گیری از استانداردهای موجود به نحوه ساخت نمونه‌های ECC برای انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی، خمشی و مکانیک شکست پرداخته می‌شود.

#### ۳-۱- مشخصات مصالح

طرح اختلاط اولیه‌ای که توسط لی [۴] برای ECC ارائه گردیده است شامل سیمان، آب، خاکستر بادی، ماسه سیلیسی، الیاف پلی‌وینیل الکل (PVA) و فوق روان کننده است. نکته مهمی که در مورد ECC وجود دارد هزینه بالای این ماده مرکب است. عمده هزینه ECC مربوط به الیاف PVA و ریزدانه سیلیسی و همچنین استفاده بیشتر سیمان در ECC نسبت به بتن‌های دیگر است. در این پژوهش به جای استفاده از الیاف PVA، از الیاف پلی پروپیلن

جدول ۱. مشخصات الیاف پلی پروپیلن مصرفی

Table 1. Characteristics of PPFs

الیاف	طول الیاف (mm)	قطر الیاف (microns)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	ازدیاد طول (%)	استحکام کششی (MPa)	دمای ذوب (°C)
PP	۱۲	۱۲	۹۳۰	۸۰	۴۰۰	۱۶۵

جدول ۲. وزن مصالح مصرفی در یک متر مکعب مخلوط ECC (وزن به کیلوگرم)

Table 2. Proportions of Materials in one cubic meter of ECC mixture (Weight in kg)

طرح*	سیمان	میکروسیلیس	پودرسنگ معدنی	سرباره کوره آهن	الیاف (درصد حجمی)	آب	فوق روان کننده
ECC 1-10	۴۹۶	۲۶۴	۵۹۶	۱۳۲	۰/۰۱	۴۵۲	۲۱
ECC 2-10	۴۹۶	۲۶۴	۵۹۶	۱۳۲	۰/۰۲	۴۵۲	۲۵

\* در این جدول طرح‌ها به صورت ECC a-b نام‌گذاری شده‌اند، a درصد الیاف و b درصد میکروسیلیس مصرفی است.

قرار گرفت (شکل ۳-ب). بارگذاری بر روی نمونه‌های خمشی به صورت تدریجی با سرعتی در حدود ۳۵N/s صورت پذیرفته و نیرو توسط نیروسنج ۵۰ کیلو نیوتونی و تغییر مکان توسط تغییر مکان سنج خطی (LVDT) اندازه‌گیری شد. نتایج آزمایش فشاری و خمشی به صورت میانگین در جدول ۳ ارائه شده است.

با توجه به جدول ۳ مشاهده می‌شود که با افزایش الیاف از مقدار ۱٪ به مقدار ۲٪ مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته نمونه کاهش و مقاومت خمشی نمونه افزایش یافته است. علت کاهش مقاومت فشاری در نمونه ECC را می‌توان این‌گونه بیان کرد که با افزایش الیاف امکان قرارگیری الیاف در راستای نیرو افزایش می‌یابد. الیاف در راستای نیرو همانند حفره عمل می‌کنند و محل رشد ریزترک‌ها شده و باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شوند. همچنین علت افزایش مقاومت خمشی در ECC رفتار پل گونه‌ی الیاف در دو طرف ترک است که مانع باز شدن و گسترش ترک‌ها می‌شود. همانطور که در نمودار تنش خمشی - جابه‌جایی وسط دهانه (شکل ۴) مشاهده می‌گردد با افزایش بار، ترک خوردگی در نمونه گسترش یافته و پس از توزیع و توسعه ریزترک‌ها نهایتاً با افزایش بار و گسیختگی الیاف، نمونه دچار شکست می‌شود. نحوه شکست نمونه خمشی در شکل ۵ نمایش داده شده است.

قبل از مصرف به وسیله فشار باد از هم جدا شده و فرآوری شد) به آرامی به مخلوط اضافه گردیده و در آخر غبار کوره آهن به مخلوط اضافه می‌شود. بعد از این مرحله مواد به مدت ۵ دقیقه به دور تند چرخش مخلوط‌کن، با یکدیگر مخلوط شده تا الیاف به طور یکنواخت در بتن پراکنده شوند.

۳-۲- مشخصات فشاری و خمشی ECC تولید شده

برای تعیین مقاومت فشاری ECC تولید شده، نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر به تعداد ۳ عدد برای هر طرح طبق استاندارد BS EN 12390-3 [۲۷] تهیه شد و پس از عمل‌آوری به مدت ۲۸ روز در داخل گونی مرطوب و پلاستیک، مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفت. لازم به ذکر است دستگاه مورد استفاده برای مقاومت فشاری قادر به اندازه‌گیری مدول الاستیسیته بر مبنای مدول الاستیسیته سکانتی است. شکست در نمونه‌های فشاری به آرامی و بدون خرد شدگی ناگهانی و با ایجاد ریزترک‌هایی در راستای بارگذاری نیرو در نمونه اتفاق افتاد (شکل ۳-الف). همچنین برای تعیین مقاومت خمشی ECC، ۳ عدد نمونه منشوری با ابعاد ۳۰×۱۰۰×۵۰ میلی‌متر برای هر طرح، طبق استاندارد ASTM C78 [۲۸] پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه مورد آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای

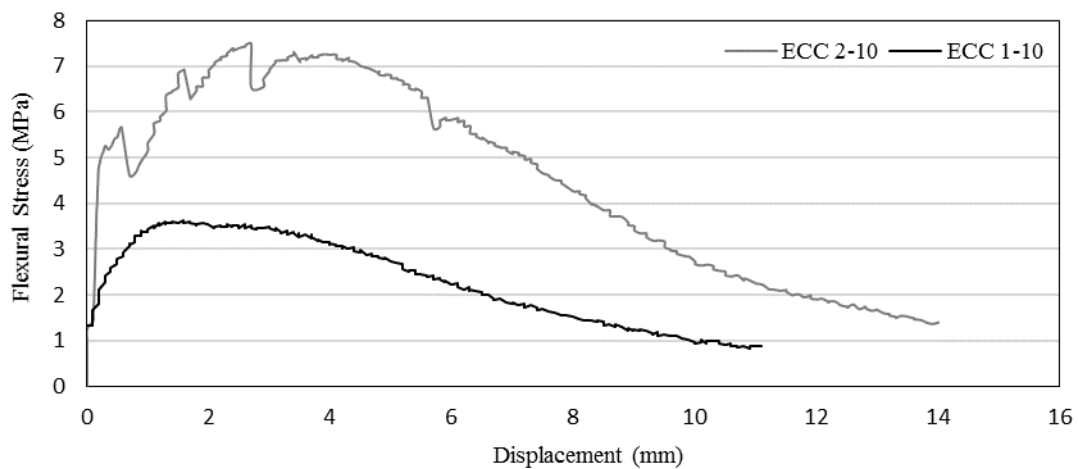


شکل ۳. (الف) شکست در نمونه فشاری (ب) آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای  
 Fig. 3. (a) Fracture in compressive test (b) Four-point bending test

جدول ۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت خمشی

Table 3. Test results of compressive and flexural strengths

طرح	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مقاومت فشاری نمونه مکعبی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت خمشی (MPa)
ECC 1-10	۱۹۱۱	۵۱/۳	۲۵/۹	۳/۹
ECC 2-10	۱۸۶۱	۴۴/۹	۲۲/۶	۶/۷



شکل ۴. نمودار تنش خمشی - جابه‌جایی تحت خمشی چهار نقطه‌ای  
 Fig. 4. Flexural stress-displacement relationship under four-point bending



شکل ۵. نحوه شکست و تشکیل ریز ترک‌ها در نمونه خمشی

Fig. 5. Fracture pattern and microcracks in bending test

جدول ۴. ابعاد و نسبت‌های نمونه SEM

Table 4. Dimensions and ratios of SEM specimens

$\frac{a_0}{d}$	$\frac{S}{d}$	$\frac{L}{d}$	$b$ (mm)	$d$ (mm)	$L$ (mm)	$a_0$ (mm)
۰/۲	۲/۵	۲/۷۱	۷۰	۷۰	۱۴۰	۲۸۰
						۱۹۰
						۳۸۰
						۷۶۰
						۱۴
						۲۸
						۵۶

چوبی) به عنوان میله مینا برای اندازه‌گیری جابه‌جایی وسط دهانه طبق استاندارد RILEM استفاده گردید، این جزئیات در شکل ۶-الف نمایش داده شده است. برای تعیین مقاومت کششی مخلوط ECC از آزمایش کشش دونیم شدگی (کشش برزیلی) استفاده شد. ابعاد نمونه در نظر گرفته شده، استوانه ۱۰۰×۲۰۰ میلی‌متر بر مبنای ASTM C496 [۲۹] است. همچنین برای تعیین مقاومت فشاری نمونه به عنوان نمونه شاهد در زمان انجام آزمایش مکانیک شکست از استوانه ۱۰۰×۲۰۰ میلی‌متر بر مبنای استاندارد ASTM C39 [۳۰] استفاده شد. این مشخصات در جدول ۵ آورده شده است. نمونه‌ها بعد از عمل‌آوری به مدت ۲۸ روز در داخل گونی مرطوب و پلاستیک، مورد آزمایش مکانیک شکست قرار گرفتند. در این آزمایش که به صورت خمش سه نقطه‌ای صورت گرفت، نیرو توسط نیروسنج ۵۰ کیلو نیوتونی و تغییر مکان وسط تیر توسط تغییر مکان‌سنج خطی (LVDT) ثبت و به دستگاه ثبت داده‌ها منتقل شد. تعدادی از نمونه‌های ساخته شده برای آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و آزمایش‌های

۳-۳- نمونه‌های آزمایشگاهی برای تحلیل به روش مکانیک شکست برای بررسی پارامترهای شکست به روش WFM از ۳ تیر شکاف‌دار برای هر طرح اختلاط (مجموعاً ۶ عدد) به ابعاد ۳۵۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر بر مبنای استاندارد ASTM 1609 [۲۶] استفاده شد. ارتفاع شکاف بر مبنای استاندارد ASTM 1609 برابر با ۳۳ میلی‌متر و عرض شکاف برابر با ۳ میلی‌متر است. همچنین برای بررسی پارامترهای شکست به روش SEM سه اندازه مختلف نمونه و از هر کدام به تعداد ۳ عدد نمونه (مجموعاً در ۲ طرح اختلاط ۱۸ عدد نمونه) بر مبنای استاندارد RILEM TC 89 [۲۱] تهیه شد. در جدول ۴ ابعاد و نسبت‌های در نظر گرفته شده در این پژوهش بر اساس شکل ۲ ارائه شده است. در شکل ۶-الف دستگاه آزمایش برای روش‌های WFM و SEM نشان داده شده است. در روش SEM عرض شکاف برای همه نمونه‌ها ثابت و برابر ۳ میلی‌متر است. قالب‌های مورد استفاده برای تهیه نمونه در هر دو روش از جنس چوب چند لایه است. برای جلوگیری از خورد شدگی بتن در محل تکیه‌گاه‌ها و محل اثر بار از صفحات فلزی با ضخامت مناسب استفاده شد. همچنین از خط‌کش (صفحه

جدول ۵. خصوصیات مکانیکی مخلوط ECC

Table 5. Mechanical properties of ECC mixture

طرح	مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
ECC 1-10	۴۱/۴	۳/۲۹	۲۵/۹
ECC 2-10	۳۶/۲	۴/۲۶	۲۲/۶



شکل ۶. (الف) دستگاه آزمایش (ب) تعدادی از نمونه‌های ساخته شده

Fig. 6. (a) Test set up (b) Some of specimens

شکست و پارامتر طول مشخصه ( $L_{ch}$ ) بر مبنای استاندارد 50-FMC RILEM [۲۰] و براساس رابطه‌های (۱) و (۲) قابل محاسبه می‌باشند. در روش کار شکست،  $G_F$  معادل با مساحت زیر منحنی بار - تغییر مکان تیر شکاف‌داری است که تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای قرار گرفته است (شکل ۱). در این پژوهش با توجه به تغییر شکل زیاد ECC، مساحت منحنی تا تغییر مکان ۱۱ میلی‌متر محاسبه شد. زو<sup>۱</sup> و ژو<sup>۱۲</sup> بیان می‌دارند در مواقعی که نمودار حالت تخت دارد، آزمایش تا لحظه رسیدن به نیروی صفر ادامه پیدا می‌کند، اما معمولاً آزمایش را در یک تغییر مکان خاص به اتمام رسانده و مساحت را تا آن نقطه حساب می‌کنند. همچنین به علت تغییر مکان ناچیز و نزدیک به صفر تیر تحت وزن خود، از اثر وزن تیر در این آزمایش چشم‌پوشی شد. در شکل ۷ نمودار نیرو - جابه‌جایی نمونه‌های

مکانیک شکست در شکل ۶-ب نشان داده شده است.

#### ۴- نتایج آزمایشگاهی

بعد از ساخت نمونه‌های ECC و عمل‌آوری ۲۸ روزه، نمونه‌ها تحت بارگذاری قرار گرفته و پس از انجام محاسبات، پارامترهای شکست در دو روش SEM و WFM به دست می‌آیند. با بهره‌گیری از دو روش SEM و WFM مزایا و کارایی این دو روش و همچنین ظرفیت جذب انرژی و چقرمگی شکست در ECC مشخص می‌شود.

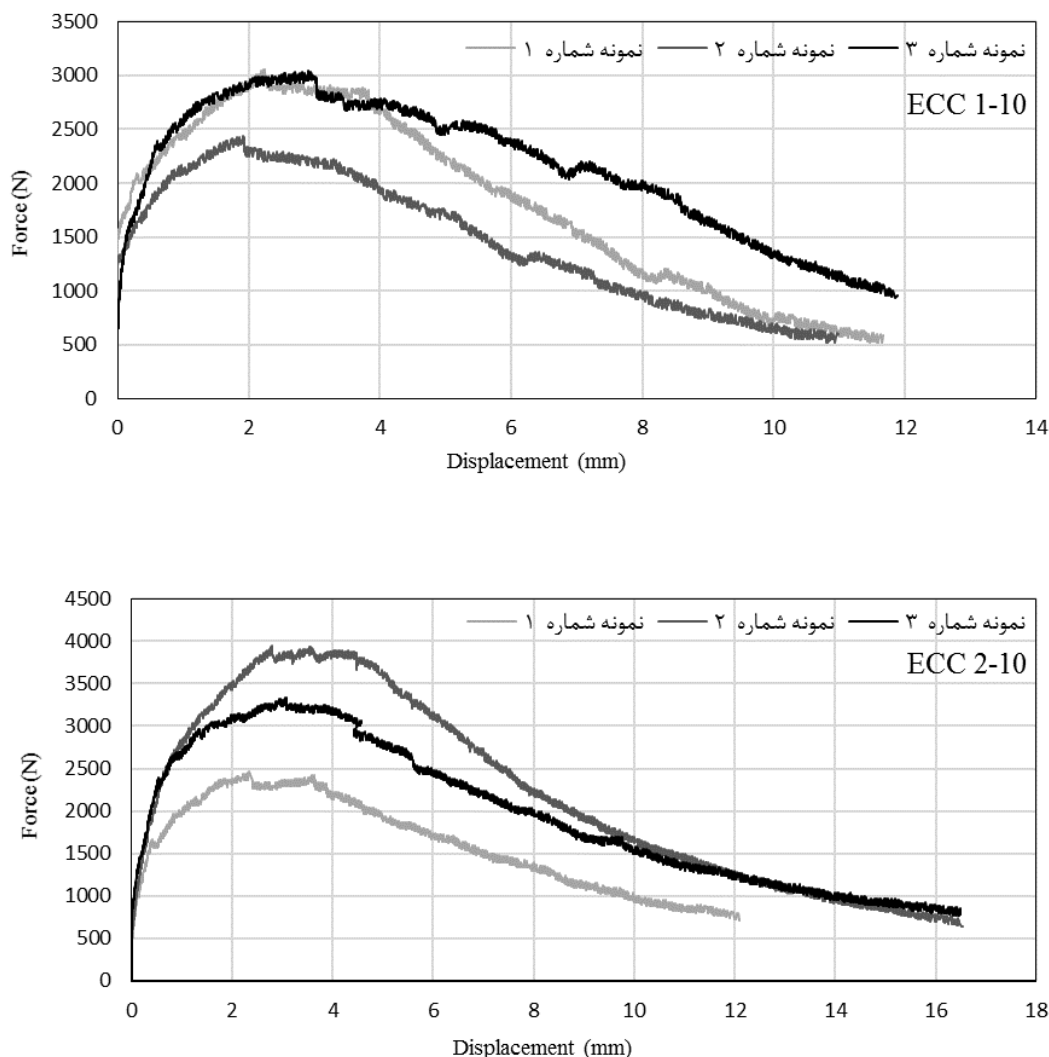
#### ۴-۱- پارامترهای شکست بر مبنای روش WFM

#### ۴-۱-۱- انرژی شکست ( $G_F$ )

انرژی شکست در روش WFM ( $G_F$ ) به عنوان انرژی شکست نهایی شناخته شده و به عنوان پارامتر شکست ماده معرفی می‌گردد [۳۱]. انرژی

1 Xu  
2 Zhu





شکل ۷. نمودار نیرو - جابه‌جایی نمونه در روش کار شکست (WFM)

Fig. 7. Load - displacement relationships in WFM

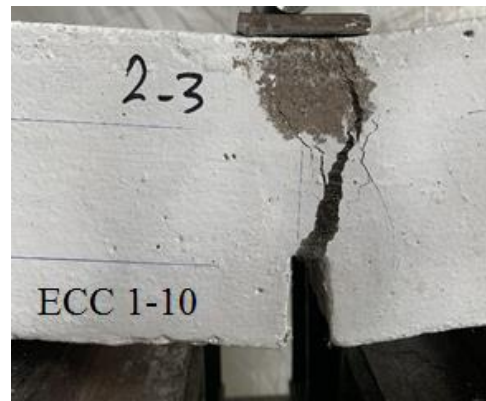
میلی‌متر)، ۱۲۰ نیوتون بر متر است. در پژوهشی دیگر از گونبسی<sup>۲</sup> و همکاران [۳۳] بتن سبک‌دانه تقویت شده با الیاف فولادی بررسی شده است. در این پژوهش به علت شکل‌پذیری بالای بتن تولید شده، انرژی شکست بالای ۱۰۰۰ نیوتون بر متر در روش WFM گزارش شده است. مخلوط ECC در مقایسه با برخی از بتن‌ها همانند بتن معمولی که تغییر شکل کمی دارند،  $G_F$  بزرگ‌تری دارد. علت این موضوع را می‌توان در شکل‌پذیری بالای این مخلوط دانست که سبب افزایش انرژی شکست در روش WFM که ارتباط مستقیمی با مساحت زیر منحنی دارد، می‌شود. شکل‌پذیری بالا در مخلوط‌های دارای الیاف همانند ECC به علت رفتار پل‌گونه الیاف است.

ECC 1-10 و ECC 2-10 آورده شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌گردد، نمودار نیرو - جابه‌جایی ECC دارای شکل‌پذیری (تغییر مکان) بالایی بوده و مساحت زیر نمودار در این نوع ماده سیمانی زیاد است. نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که با افزایش الیاف از ۱٪ به مقدار ۲٪ انرژی شکست نمونه (رابطه (۱)) به میزان ۲۲/۵٪ افزایش یافته و از مقدار ۳۰۵۹/۹ نیوتون بر متر در ECC 1-10 به مقدار ۳۷۴۹/۸ نیوتون بر متر در ECC 2-10 رشد کرده است. روزلر<sup>۱</sup> و همکاران [۳۲] در تحقیق خود بر روی بتن معمولی، پارامترهای شکست آن را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند  $G_F$  بتن معمولی با مقاومت فشاری ۳۲ مگاپاسکال (نمونه استوانه‌ای ۱۰۰×۲۰۰

جدول ۶. نتایج آزمایش مکانیک شکست به روش کار شکست (WFM)

Table 6. Results of fracture mechanics of specimens in WFM

طرح	$f'_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	E (GPa)	میانگین $G_F$ (N/m)	میانگین $L_{ch}$ (mm)
ECC 1-10	۴۱/۴	۳/۲۹	۲۵/۹	۳۰۵۹/۹	۷۳۰۲
ECC 2-10	۳۶/۲	۴/۲۶	۲۲/۶	۳۷۴۹/۸	۴۶۶۳



شکل ۸. نحوه شکست نمونه WFM و تشکیل ریز ترک‌ها

Fig. 8. Fracture pattern of WFM specimens and microcracks formation

می‌توان در کمتر بودن مقدار مدول الاستیسیته ( $E$ ) و همچنین بیشتر بودن مقدار مقاومت کششی ( $f_t$ ) طرح ECC 2-10 نسبت به طرح ECC 1-10 دانست. به طور کلی در ECC به علت نبود درشت دانه، مقدار مدول الاستیسیته نسبت به سایر بتن‌ها کمتر و شیب نمودار تنش-کرنش نیز کمتر و ملایم‌تر است و با افزایش شکل‌پذیری این مخلوط، مقدار  $E$  کمتر نیز می‌شود. از طرف دیگر با افزایش الیاف، شکل‌پذیری و مقاومت کششی نیز افزایش می‌یابد. حال با توجه به رابطه  $L_{ch}$  (رابطه (۲)) کم شدن  $E$  و زیاد شدن  $f_t$  با افزایش مقدار الیاف، سبب کاهش پارامتر طول مشخصه در ECC می‌شود. قاسمی و همکاران [۳۴] روندی مشابه با این پژوهش را در مورد  $L_{ch}$  مشاهده کردند. با بررسی و مقایسه این پژوهش و پژوهش‌های گذشته همانند پژوهشی از گونسی و همکاران [۳۳]، در مواردی که اختلاف  $G_F$  بین دو طرح از مقدار معینی بیشتر شود تاثیر کم شدن  $E$  و زیاد شدن  $f_t$  کم شده و افزایش  $G_F$  سبب افزایش  $L_{ch}$  می‌شود.

این رفتار سبب می‌شود در حالی که بار ثابت است تغییر مکان‌های زیادی در نمونه ایجاد شود. از طرف دیگر در مخلوط ECC به علت رفتار سخت‌شدگی کرنش، تنش دوباره توزیع شده و شکست موضعی به تاخیر می‌افتد. همچنین در این مواد منطقه گسترش یافته ریز ترک‌ها قبل از گسترش ترک، نوک ترک را احاطه کرده و سبب حجم بالای جریان ترک می‌شود. مجموع این موارد سبب شکل‌پذیری بالا و در نتیجه انرژی شکست بیشتر نسبت به بتن‌های دیگر در روش WFM می‌شود.

۴-۱-۲- پارامتر طول مشخصه ( $L_{ch}$ )

پارامتر طول مشخصه شاخصی از تردی ماده است. بالا بودن این شاخص نشانه شکل‌پذیرتر بودن ماده خواهد بود. در جدول ۶ با اینکه مقدار انرژی شکست طرح ECC 2-10 بیشتر از طرح ECC 1-10 است، اما طول مشخصه به مقدار حدود ۳۶٪ کاهش داشت. علت این مسئله را

جدول ۷. بار حداکثر اصلاح شده طرح ها

Table 7. Maximum corrected loads of specimems

طرح	$\frac{a_0}{d}$	طول تیر (mm)	دهانه تیر (mm)	ارتفاع تیر (mm)	بار حداکثر اصلاح شده $P_f^0$ (N)		
					تیر ۱	تیر ۲	تیر ۳
ECC 1-10	۰/۲	۱۹۰	۱۷۵	۷۰	۲۸۳۷/۹	۲۶۸۷/۹	۳۰۲۷/۹
		۳۸۰	۳۵۰	۱۴۰	۴۷۵۱/۶	۴۶۱۱/۹	۴۹۴۱/۶
		۷۶۰	۷۰۰	۲۸۰	۸۲۳۷/۲	۷۴۲۷/۲	۷۷۹۷/۶
ECC 2-10	۰/۲	۱۹۰	۱۷۵	۷۰	۳۳۳۷/۷	۳۲۸۷/۷	۳۱۹۷/۷
		۳۸۰	۳۵۰	۱۴۰	۵۷۳۹/۱	۵۶۴۸/۹	۵۱۰۹/۶
		۷۶۰	۷۰۰	۲۸۰	۹۴۳۴/۰	۸۸۹۴/۵	۹۳۶۳/۶

در شکل ۸ نحوه شکست نمونه‌های ECC 1-10 و ECC 2-10 در روش کار شکست آورده شده است. با توجه به این شکل ریزترک‌ها در هر دو نمونه مشاهده شد، اما تشکیل ریزترک‌ها در نمونه ECC 2-10 بیشتر و با عرض باز شدگی کمتر نسبت به نمونه ECC 1-10 دیده شد.

کیفیت برازش است. در استاندارد RILEM TC 89 [۲۱] به منظور افزایش دقت تجزیه و تحلیل، ضریب تغییرات شیب ( $\omega_A$ ) نباید از ۰/۱ و ضریب تغییرات عرض از مبدا ( $\omega_C$ ) و باند پراکندگی ( $m$ ) نباید از ۰/۲ بیشتر شوند. با توجه به جدول ۸ ضرایب  $\omega_A$ ،  $\omega_C$  و  $m$  برای طرح ECC 1-10 به ترتیب برابر ۰/۱۰۴، ۰/۱۰۶ و ۰/۱۶۹ و برای طرح ECC 2-10 برابر با ۰/۱۰۶، ۰/۱۳۴ و ۰/۱۵۷ به دست آمد. مقادیر به دست آمده مطابق با معیارهای استاندارد RILEM است، البته تفاوت بسیار ناچیز در  $\omega_A$  با معیار مورد نظر قابل چشم پوشی است.

پس از محاسبه  $A$  و  $C$ ، با توجه به رابطه‌های (۶-۹) مقادیر پارامترهای شکست در روش SEM به دست می‌آیند. مقادیر این پارامترها در جدول ۹ گزارش شده است.

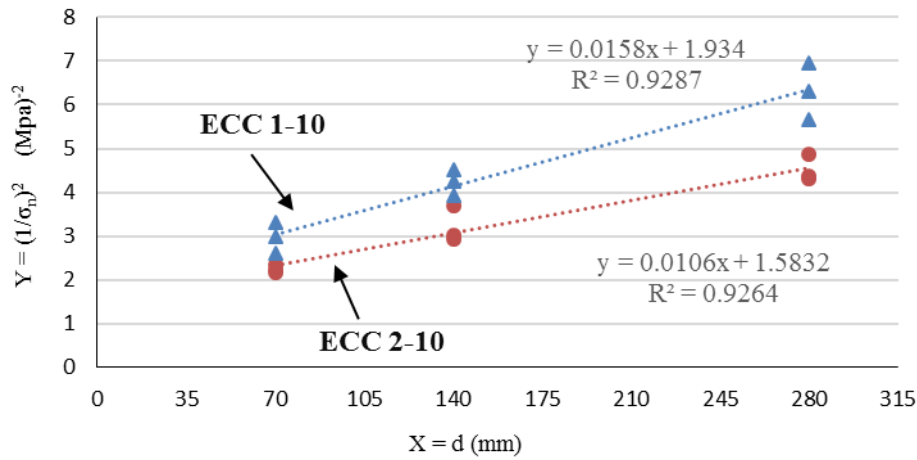
با توجه به جدول ۹ افزایش الیاف از ۱٪ به مقدار ۲٪ سبب افزایش انرژی شکست در روش SEM ( $G_f$ ) به مقدار ۶۹/۶٪ شد. در مورد طول ناحیه صدمه دیده (رابطه (۸)) که پارامتری است برای نشان دادن تردی بتن، این روند افزایش مشاهده شد و مقدار این افزایش ۲۱/۴٪ است. پارامتر  $K_{IC}$  (رابطه (۹)) که نشان دهنده چقرمگی بتن است و با نام ضریب شدت تنش بحرانی و یا چقرمگی شکست شناخته می‌شود، افزایشی معادل با ۲۱/۳٪ در اثر افزایش الیاف از ۱٪ به مقدار ۲٪ دارد. در مجموع افزایش پارامترهای شکست در طرح ECC 2-10 نسبت به طرح ECC 1-10 نشان دهنده چقرمه‌تر بودن طرح ECC 2-10 است. به عبارت دیگر برای گسترش ترک در طرح ECC 2-10 نیاز به انرژی بیشتری بوده و جذب انرژی این

در شکل ۸ نحوه شکست نمونه‌های ECC 1-10 و ECC 2-10 در روش کار شکست آورده شده است. با توجه به این شکل ریزترک‌ها در هر دو نمونه مشاهده شد، اما تشکیل ریزترک‌ها در نمونه ECC 2-10 بیشتر و با عرض باز شدگی کمتر نسبت به نمونه ECC 1-10 دیده شد.

#### ۴-۲- پارامترهای شکست بر مبنای روش SEM

پارامترهای شکست در روش SEM بر مبنای استاندارد RILEM TC 89 [۲۱] قابل محاسبه می‌باشند. در روش SEM انرژی شکست اولیه بر اساس بار حداکثر به دست آمده از تیرهای با هندسه یکسان تعریف می‌شود. بار حداکثر به دست آمده از آزمایش باید قبل از استفاده از آن در رابطه (۴)، توسط رابطه (۵) به وسیله وزن تیر تصحیح شود. بارهای تصحیح شده برای سه نمونه تیر در سه اندازه در جدول ۷ ارائه شده است. بعد از تصحیح بار حداکثر، با بهره‌گیری از آنالیز رگرسیون خطی به برازش خطی داده‌ها پرداخته و با یافتن شیب خط ( $A$ ) و عرض از مبدا ( $C$ ) پارامترهای شکست مخلوط به دست می‌آید. در شکل ۹ نتایج آنالیز رگرسیون برای طرح ECC 1-10 و ECC 2-10 آورده شده است.

همانطور که در شکل ۹ و جدول ۸ مشاهده می‌شود، شیب و عرض از مبدا طرح ECC 1-10 برابر با ۰/۰۱۵۸ و ۱/۹۳۴ و طرح ECC 2-10 برابر با ۰/۰۱۰۶ و ۱/۵۸۳۲ است. ضریب  $R^2$  نیز که به ضریب همبستگی معروف بوده و شاخصی از خوبی برازش است، برای این دو طرح به ترتیب ۰/۹۲۸۷ و ۰/۹۲۶۴ به دست آمد. نزدیک بودن  $R^2$  به عدد یک نشان دهنده



شکل ۹. آنالیز رگرسیون خطی دو طرح ECC 1-10 و ECC 2-10

Fig. 9. Linear regression analysis of ECC 1-10 and ECC 2-10 specimens

جدول ۸. مقادیر آماری تحلیل رگرسیون در روش SEM

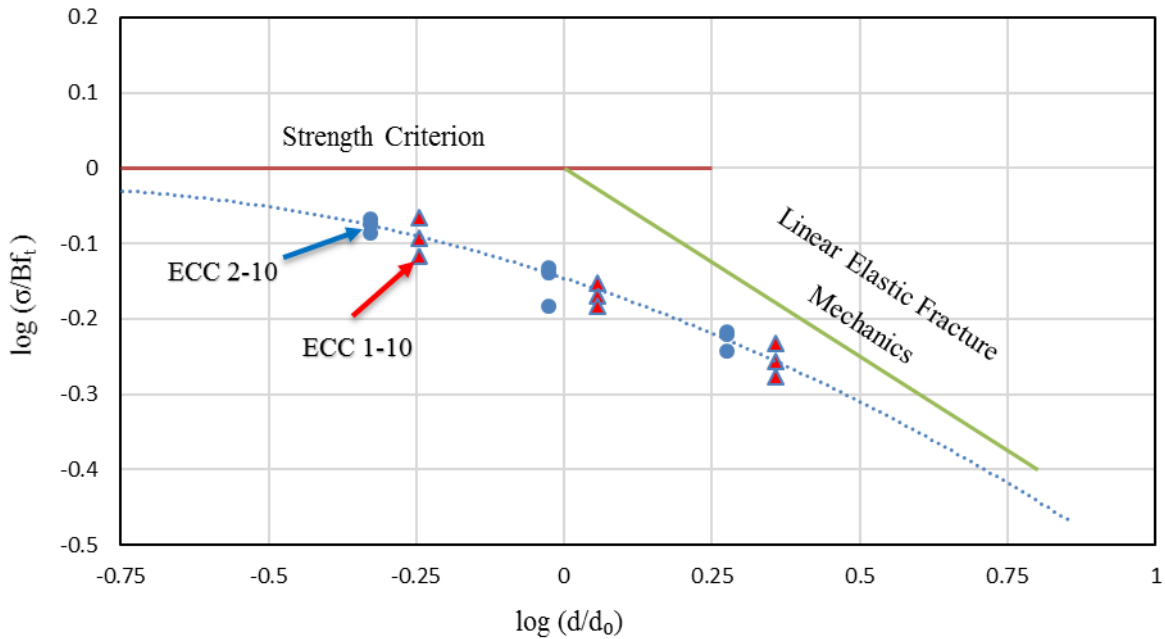
Table 8. Statistical values of regression analysis in SEM

طرح	$A$ (mm <sup>-1</sup> , MPa <sup>-2</sup> )	$C$ (MPa <sup>-2</sup> )	$R^2$	$\omega_A$	$\omega_C$	$m$
ECC 1-10	۰/۰۱۵۸	۱/۹۳۴	۰/۹۲۸۷	۰/۱۰۴	۰/۱۶۰	۰/۱۶۹
ECC 2-10	۰/۰۱۰۶	۱/۵۸۲	۰/۹۲۶۴	۰/۱۰۶	۰/۱۳۴	۰/۱۵۷

جدول ۹. خصوصیات مکانیکی و پارامترهای شکست به دست آمده در روش SEM

Table 9. Mechanical properties and fracture parameters in SEM

طرح	$f_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$E$ (GPa)	$\frac{a_0}{d}$	$g(a_0)$	$G_f$ (N/m)	$C_f$ (mm)	$B$ (MPa)	$d_0$ (mm)	$K_{IC}$ (MPa·mm <sup>0.5</sup> )
ECC 1-10	۴۱/۴	۳/۲۹	۲۵/۹	۰/۲	۷/۲۸	۱۷/۸	۲۳/۳	۰/۷۱۹	۱۲۲/۷	۲۱/۵
ECC 2-10	۳۶/۲	۴/۲۶	۲۲/۶	۰/۲	۷/۲۸	۳۰/۲	۲۸/۳	۰/۷۹۴	۱۴۸/۸	۲۶/۱



شکل ۱۰. نتایج کلیه داده‌ها با اندازه‌های متفاوت بر روی منحنی اثر اندازه بازانت

Fig. 10. Results of all specimens with different sizes on Bažant size effect curve

رفتار نزدیک به رفتار خطی شده و عضو رفتاری ترد دارد و برای آنالیز حالت شکست از معیار مکانیک شکست خطی (LEFM) بهره گرفته می‌شود و هنگامی که  $\beta$  بین ۰/۱ و ۱۰ قرار می‌گیرد، رفتار غیرخطی بتن را نشان داده و روش آنالیز به استفاده از روابط مکانیک شکست غیرخطی (NLFM) انجام می‌شود. مقادیر  $\beta$  برای این پژوهش در جدول ۱۰ آورده شده است. همانطور که در جدول ۱۰ مشاهده می‌شود اعداد بین ۰/۱ و ۱۰ قرار دارند، این نشان می‌دهد که دو طرح ECC 1-10 و ECC 2-10 از اصول مکانیک شکست غیرخطی پیروی می‌کنند و استفاده از معیار LEFM و معیار حدی نتایج نادرستی در مورد مخلوط ECC می‌دهد. همچنین ملاحظه می‌شود که با افزایش ارتفاع تیر (بزرگ‌تر شدن سازه) مقدار عدد تردی نیز بزرگ‌تر شده و به عبارتی سازه تردتر می‌شود. این تردی در نمونه ECC 2-10 به اندازه حدود ۱۷/۵٪ کوچک‌تر است و نشان دهنده شکل‌پذیرتر بودن نمونه با دو درصد الیاف است.

#### ۳-۴- مقایسه انرژی شکست در دو روش WFM و SEM

مهم‌ترین تفاوت دو روش WFM و SEM در نظر گرفتن مساحت

طرح بیشتر است. در شکل ۱۰ منحنی اثر اندازه بازانت بر اساس پارامترهای به دست آمده برای دو طرح ECC 2-10 و ECC 1-10 رسم شده است.

طبق شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود که داده‌های به دست آمده برای مخلوط ECC مطابق با منحنی اثر اندازه بازانت است، این موضوع یعنی اندازه نمونه در ECC موثر بوده و مطابق با مکانیک شکست غیرخطی (NLFM) است. به عبارت دیگر در نمونه‌های کوچک، ECC به سمت معیار مقاومت و در نمونه‌های بزرگ آن به سمت معیار مکانیک شکست خطی میل می‌کند و نمونه کوچک شکل‌پذیرتر و نمونه بزرگ تردتر است.

یکی دیگر از پارامترهای مهمی که در روش بازانت محاسبه می‌شود عدد تردی ( $\beta$ ) است. عدد تردی نه تنها به پارامتر شکست مواد ( $G_f$ ) وابسته است بلکه به تابع هندسی سازه نیز وابستگی دارد. بنابراین می‌توان بیان داشت که در تردی یک سازه علاوه بر مواد، هندسه و اندازه سازه نیز موثر است.  $\beta$  با توجه به رابطه (۳) قابل محاسبه می‌باشد و بیشتر برای تعیین حالت شکست به کار می‌رود. بر این اساس اگر  $\beta < 0/1$  رفتار عضو شکل‌پذیر بوده و برای آنالیز حالت شکست از ضوابط حدی استفاده می‌شود، اگر  $\beta > 10$

جدول ۱۰. عدد تردی مخلوط ECC

Table 10. Brittleness number of ECC

طرح	عدد تردی ( $\beta$ )		
	تیر با ارتفاع $d=70\text{mm}$	تیر با ارتفاع $d=140\text{mm}$	تیر با ارتفاع $d=280\text{mm}$
ECC 1-10	۰/۵۷	۱/۱۴	۲/۲۸
ECC 2-10	۰/۴۷	۰/۹۴	۱/۸۸

شکل‌پذیری بالا و توانایی جذب انرژی بیشتر ECC نسبت به بتن‌های دیگر حتی بعضی از بتن‌های الیافی است. همچنین ذکر این نکته مهم است که در مواد سیمانی با شکل‌پذیری بالا همچون ECC برای ارزیابی بهتر رفتار و پارامترهای شکست آن‌ها روش‌هایی همچون روش WFM به علت در نظر گرفتن مساحت زیر منحنی نیرو-تغییر مکان، نسبت به روش SEM کارایی بالاتری دارند. البته در روش SEM مشخص می‌شود که اثر اندازه در ECC موثر است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش بعد از انتخاب طرح اختلاط مناسب برای تهیه ECC، دو طرح که درصد الیاف مختلفی دارند (۱ و ۲ درصد) در نظر گرفته شد و بعد از تعیین خواص مکانیکی این دو طرح به بررسی و تحلیل پارامترهای شکست آن‌ها به دو روش WFM و SEM و تاثیر مقدار الیاف بر این پارامترها پرداخته شد. بر اساس داده‌های آزمایشگاهی نتایج زیر حاصل شد:

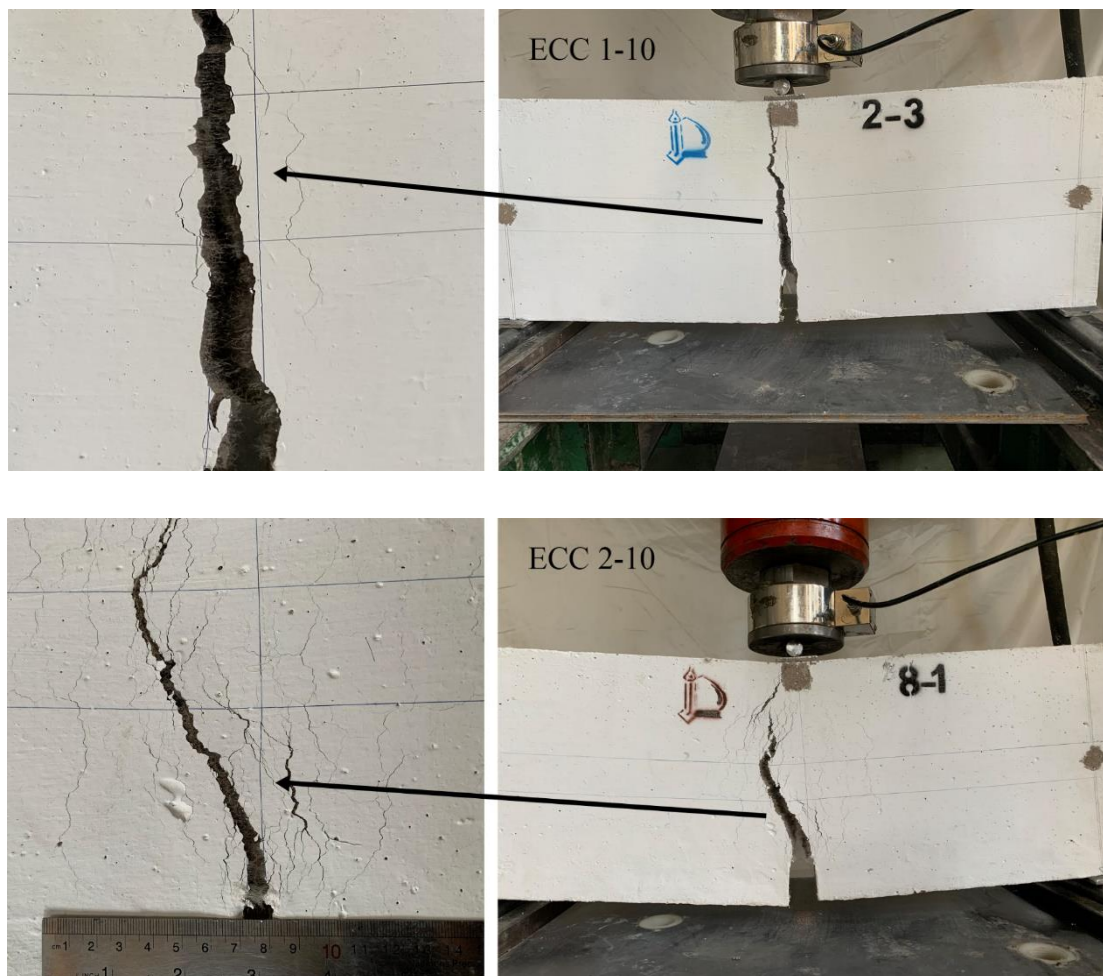
- بر اساس آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی انجام شده بر روی دو طرح ECC 1-10 و ECC 2-10، افزایش الیاف بیشترین تاثیر خود را بر روی ECC در افزایش مقاومت خمشی نشان داده است به عبارت دیگر افزایش الیاف از ۱٪ به ۲٪ مقاومت فشاری در نمونه‌های مکعبی را حدود ۱۲/۵٪ کاهش، مقاومت کششی را حدود ۲۹/۴٪ و مقاومت خمشی را حدود ۷۲٪ افزایش داد.

- افزایش الیاف از ۱٪ در طرح ECC 1-10 به ۲٪ در طرح ECC 2-10 سبب افزایش انرژی شکست در هر دو روش WFM و SEM شد. این افزایش در روش WFM ۲۲/۵٪ و در روش SEM ۶۹/۶٪ است.

- پارامتر طول مشخصه با افزایش الیاف از ۱٪ در طرح ECC 1-10 به ۲٪ در طرح ECC 2-10، به مقدار ۳۶٪ کاهش یافت. علت

زیر منحنی نیرو - تغییر مکان در روش WFM و در نظر گرفتن تنها بار حداکثر در روش SEM است، همچنین در نظر گرفتن اثر اندازه در روش SEM و در نظر نگرفتن آن در روش WFM تفاوت دیگر این دو روش است. برخی از محققین همانند بازان و کاظمی [۱۸] نشان دادند که می‌توان رابطه‌ای بین انرژی شکست در دو روش WFM و SEM بیان نمود اما با توجه به وابستگی ( $G_f$ ) به اندازه نمونه، شکل نمونه و نحوه آزمایش نمی‌توان گفت که این نتیجه دقیق و قابل اطمینان باشد. در این تحقیق نسبت ( $G_F / G_f$ ) برای طرح ECC 1-10 برابر ۱۷۱/۹ و برای طرح ECC 2-10 ۱۲۴/۱ است. پژوهشگران مقدار  $G_F / G_f$  را برای بتن معمولی بین ۲ تا ۲/۵ گزارش کرده‌اند [۳۶ و ۳۵]، همچنین برای بتن با کارایی بالا این نسبت برابر ۲/۸ است [۳۷]. در تحقیقی دیگر روزلر و همکاران [۳۲] نسبت  $G_F / G_f$  برای بتن الیافی با الیاف مصنوعی برابر با ۹۵ به دست آمده است. اختلاف زیاد انرژی شکست در دو روش WFM و SEM در ECC این موضوع را نشان می‌دهد که این ماده سیمانی ظرفیت باربری (ظرفیت تحمل نیرو) را افزایش قابل توجهی نمی‌دهد بلکه با افزایش بسیار زیاد تغییر شکل ظرفیت جذب انرژی را افزایش می‌دهد. در شکل ۱۱ نحوه شکست نمونه در روش SEM در تیر با ارتفاع ۲۸۰ میلی‌متر آورده شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود ریزترک‌ها در نمونه ECC 2-10 بیشتر از نمونه ECC 1-10 است. در این نمونه‌ها با بروز ترک در مقطع، الیاف وارد عمل شده و سبب تحمل بار اضافه می‌شوند، این تحمل بار تا زمان گسیختگی الیاف ادامه پیدا می‌کند. در شکل‌ها این گسیخته شدن الیاف مشاهده می‌شود.

نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که افزایش الیاف سبب افزایش چقرمگی شکست می‌شود، چقرمگی شکست بتن ECC در روش WFM نسبت به سایر بتن‌ها همچون بتن معمولی [۳۲] و بتن خودتراکم مسلح شده با الیاف فولادی [۳۴] بسیار بیشتر است. این موضوع نشان دهنده



شکل ۱۱. نحوه شکست و تشکیل ریز ترک‌ها در نمونه SEM

Fig. 11. Fracture pattern and microcracks in SEM specimens

در نظر گرفتن مساحت زیر منحنی در روش WFM و در نظر گرفتن بار حداکثر در روش SEM و نسبت  $G_F / G_f$  در ECC می‌توان نتیجه گرفت که مخلوط ECC ظرفیت باربری (ظرفیت تحمل نیرو) را افزایش قابل توجهی نمی‌دهد بلکه با افزایش قابل توجه تغییر شکل، ظرفیت جذب انرژی را افزایش می‌دهد. بنابراین به علت در نظر گرفتن مساحت زیر منحنی و قسمت نمودار بعد از بار حداکثر در روش WFM این روش در مخلوط ECC نتیجه بهتری نسبت به روش SEM دارد.

- افزایش پارامترهای شکست چه در روش WFM و چه در روش SEM در مخلوط ECC نشان دهنده این است که بر اساس معیارهای مکانیک شکست، ظرفیت و شکل‌پذیری اعضای ساخته شده از بتن ECC نسبت به بتن معمولی بالاتر است.

این موضوع را می‌توان مدول الاستیسیته کم‌تر و مقاومت کششی زیادتر ECC 2-10 نسبت به طرح ECC 1-10 و همچنین اختلاف کم انرژی شکست در این دو طرح دانست.

- سایر پارامترهای شکست از قبیل طول ناحیه صدمه دیده و ضریب شدت تنش بحرانی با افزایش الیاف از ۱٪ به مقدار ۲٪ به ترتیب ۲۱/۴٪ و ۲۱/۳٪ افزایش یافت.

- قانون اثر اندازه بازانت برای مخلوط ECC نشان می‌دهد که اثر اندازه در ECC موثر است و برای تحلیل و آنالیز شکست در ECC باید از اصول مکانیک شکست غیرخطی استفاده کرد.

- نسبت  $G_F / G_f$  برای دو طرح ECC 1-10 و ECC 2-10 به ترتیب برابر با مقادیر ۱۷۱/۹ و ۱۲۴/۱ به دست آمد. با توجه به

- parameters for crack propagation in hardening cement paste and mortar, *International Journal of Fracture*, 157(1-2) (2009) 33-43.
- [13] S.P. Shah, S.E. Swartz, C. Ouyang, *Fracture mechanics of concrete: applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials*, John Wiley & Sons, 1995.
- [14] A. Hillerborg, M. Modéer, P-E. Petersson, *Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements*, *Cement and concrete research*, 6(6) (1976) 773-781.
- [15] Z.P. Bažant, B.H. Oh, *Crack band theory for fracture of concrete*, *Material and construction*, 16(3) (1983) 155-177.
- [16] Y. Jenq, S. Shah, *A fracture toughness criterion for concrete*, *Engineering Fracture Mechanics*, 21(5) (1985) 1055-1069.
- [17] Y. Jenq, S.P. Shah, *Two parameter fracture model for concrete*, *Journal of engineering mechanics*, 111(10) (1985) 1227-1241.
- [18] Z. Bažant, M. Kazemi, *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) (1990) 111-131.
- [19] M.F. Marji, *Numerical analysis of quasi-static crack branching in brittle solids by a modified displacement discontinuity method*, *International Journal of Solids and Structures*, 51(9) (2014) 1716-1736.
- [20] RILEM 50-FMC, *Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams*, *Materials and structures*, 18(106) (1985) 285-290.
- [21] RILEM Technical Committee 89-FMT, *Size-Effect Method for Determining Fracture Energy and Process Zone Size of Concrete*, *Materials and Structures*, 23(6) (1990) 461-465.
- [22] A. Hillerborg, *The theoretical basis of a method to determine the fracture energy $G_F$  of concrete*, *Materials and structures*, 18(4) (1985) 291-296.
- [23] Z.P. Bažant, P.A. Pfeiffer, *Determination of fracture*
- [1] S. Wang, *Micromechanics based matrix design for engineered cementitious composites*, University of Michigan, (2005).
- [2] A. Kawamata, H. Mihashi, Y. Kaneko, K. Kirikoshi, *Controlling fracture toughness of matrix for ductile fiber reinforced cementitious composites*, *Engineering fracture mechanics*, 69(2) (2002) 249-265.
- [3] J. Zhang, C.K. Leung, Y.N. Cheung, *Flexural performance of layered ECC-concrete composite beam*, *Composites science and technology*, 66(11-12) (2006) 1501-1512.
- [4] V.C. Li, *Engineered cementitious composites (ECC) material, structural, and durability performance*, in: *Concrete Construction Engineering Handbook*, CRC Press, (2008).
- [5] V.C. Li, *Integrated structures and materials design*, *Materials and Structures*, 40(4) (2007) 387-396.
- [6] W. Liu, S. Xu, Q. Li, *Experimental study on fracture performance of ultra-high toughness cementitious composites with J-integral*, *Engineering Fracture Mechanics*, 96 (2012) 656-666.
- [7] V.C. Li, *Large volume, high performance applications of fibers in civil engineering*, *Journal of Applied Polymer Science*, 83(3) (2002) 660-686.
- [8] V.C. Li, *On engineered cementitious composites (ECC)*, *Journal of advanced concrete technology*, 1(3) (2003) 215-230.
- [9] V.C. Li, S. Wang, *Microstructure variability and macroscopic composite properties of high performance fiber reinforced cementitious composites*, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 21(3) (2006) 201-206.
- [10] V.C. Li, T. Hashida, *Engineering ductile fracture in brittle-matrix composites*, *Journal of Materials Science Letters*, 12(12) (1993) 898-901.
- [11] V.C. Li, H. Horii, P. Kabele, T. Kanda, Y. Lim, *Repair and retrofit with engineered cementitious composites*, *Engineering Fracture Mechanics*, 65(2-3) (2000) 317-334.
- [12] S. Xu, Y. Zhu, *Experimental determination of fracture*



- Specimens, in, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2005).
- [31] Y. Murakami, L. Keer, Stress intensity factors handbook, vol. 3, (1993).
- [32] J. Roesler, G. Paulino, C. Gaedicke, A. Bordelon, K. Park, Fracture behavior of functionally graded concrete materials for rigid pavements, Transportation Research Record, 2037(1) (2007) 40-49.
- [33] E. Güneysi, M. Gesoglu, T. Özturan, S. İpek, Fracture behavior and mechanical properties of concrete with artificial lightweight aggregate and steel fiber, Construction and Building Materials, 84 (2015) 156-168.
- [34] M. Ghasemi, M.R. Ghasemi, S.R. Mousavi, Investigating the effects of maximum aggregate size on self-compacting steel fiber reinforced concrete fracture parameters, Construction and Building Materials, 162 (2018) 674-682.
- [35] Z.P. Bažant, E. Becq-Giraudon, Statistical prediction of fracture parameters of concrete and implications for choice of testing standard, Cement and concrete research, 32(4) (2002) 529-556.
- [36] J. Planas, M. Elices, G. Guinea, Measurement of the fracture energy using three-point bend tests: Part 2— Influence of bulk energy dissipation, Materials and Structures, 25(5) (1992) 305-312.
- [37] R.A. Einsfeld, M.S. Velasco, Fracture parameters for high-performance concrete, Cement and Concrete Research, 36(3) (2006) 576-583.
- energy from size effect and brittleness number, ACI Materials Journal, 84(6) (1987) 463-480.
- [24] Q. Yu, J.-L. Le, C.G. Hoover, Z.P. Bažant, Problems with Hu-Duan boundary effect model and its comparison to size-shape effect law for quasi-brittle fracture, Journal of engineering mechanics, 136(1) (2010) 40-50.
- [25] C.G. Hoover, Z.P. Bažant, Comparison of the Hu-Duan boundary effect model with the size-shape effect law for quasi-brittle fracture based on new comprehensive fracture tests, Journal of Engineering Mechanics, 140(3) (2014) 480-486.
- [26] ASTM C 1609/C 1609M -07. Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading), in, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2008).
- [27] BS EN 12390-3. Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens, in: Incorporating corrigendum, (2011).
- [28] ASTM C 78-08. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), in, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2008).
- [29] ASTM 496/C 496M -04. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, in, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2004).
- [30] ASTM C 39/C 39M – 03. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. M. Amirfakhrian, M. R. Esfahani, An Experimental Investigation on Fracture Parameters of Concrete Beams Made of Engineered Cementitious Composites (ECC), Amirkabir J. Civil Eng., 54(8) (2022) 2877-2894.

DOI: 10.22060/mej.2019.15465.6128



