

بررسی اثر روش های مختلف مکانیک شکست بر پارامترهای شکست بتن توانمند بدون الیاف و حاوی الیاف ترکیبی

علیرضا حسینی محراب

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

سید مهدی امیرفخریان

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

منصور قلعه نوی *

استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

چکیده

پیچیدگی روابط و ارایه روش های گوناگون از چالش های اصلی این علم مکانیک شکست بتن می باشد. این چالش ها منجر به محدودیت کاربرد عملی این علم در بررسی و تحلیل سازه های بتنی شدند. در نتیجه بررسی و مقایسه پارامترهای مختلف این روش ها بر رفتار شکست بتن های مختلف از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش، شش روش پر کاربرد علم مکانیک شکست نظیر روش کار شکست، روش اثر اندازه، روش اثر مرزی، روش منحنی تنش - تغییر مکان، روش پیشنهادی استاندارد ASTM E1290 و مدل شکست بوور جهت بررسی دو معیار اصلی مکانیک شکست شامل انرژی شکست و چقرمگی شکست در بتن توانمند (بدون الیاف و تقویت شده با الیاف ترکیبی) با یکدیگر مقایسه و بررسی شدند. نتایج نشان می دهند که پاسخ های انرژی و چقرمگی شکست در تمامی این روش ها با افزودن الیاف به بتن توانمند افزایش یافتند. در این میان، فاکتور چقرمگی شکست حاصل از روش ASTM E1290 کمترین مقدار افزایش به مقدار ۶/۸٪ را به ازای افزودن الیاف در بتن توانمند نشان داده است. هر دو روش کار شکست و منحنی تنش - تغییر مکان نتایج انرژی شکست مناسب تری را برای بتن توانمند الیاف دار نشان دادند. در مقایسه با سایر روش ها، دو روش اثر اندازه و اثر مرزی جهت تعیین انرژی شکست بتن توانمند بدون الیاف به علت دقت بالا، سادگی و عدم وابستگی پارامترها به ابعاد نمونه ها مناسب ترند. همچنین، نسبت پارامترهای چقرمگی شکست در سه روش اثر اندازه، اثر مرزی و پیشنهادی ASTM تقریباً برابر با ۱/۲ است.

واژه های کلیدی: مکانیک شکست، انرژی شکست، بتن توانمند، چقرمگی شکست، اثر اندازه.

* نویسنده مسئول: Ghalehnovi@um.ac.ir

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، بررسی رفتار شکست اعضای بتنی به‌عنوان یکی از مباحث مهم در طراحی و تحلیل سازه‌های خاص بتنی نظیر سازه‌های بلند، نیروگاه‌های هسته‌ای، سدها، تونل‌ها و پل‌ها تبدیل شده است [۱]. همچنین، استفاده از علم مکانیک شکست به‌عنوان یکی از مؤثرترین رویکردها جهت مطالعه پایداری سازه‌ها، گسترش ترک، چقرمگی و اثر اندازه در بتن‌های توانمند در نظر گرفته شده است [۲-۴].

معیارهای سنتی و متداول طراحی دیگر قادر به توجیه شکست عضوهای سازه‌ای در تنش‌های خیلی کمتر از مقاومت نهایی نیستند و این درحالی است که یکی از دلایل اصلی انهدام سازه‌ها گسترش ترک‌ها و نقص‌های اولیه موجود در بتن است [۵]. در حقیقت این ترک‌های اولیه در اثر عوامل گوناگونی از قبیل معایب ساخت و بارهای وارده در اندازه‌ها و شکل‌های مختلفی در سازه‌ها ظاهر می‌شوند. بنابراین استفاده از علم مکانیک شکست که قابلیت بررسی نحوه ترک خوردن اعضای بتنی، پاسخ سازه ترک خورده تحت بارهای اعمالی و انهدام سازه در اثر گسترش ترک‌های اولیه را دارا است، پیشنهاد شده است [۶].

پژوهش‌های متعددی استفاده از علم مکانیک شکست را جهت بررسی رفتار شکست و طراحی سازه‌های مختلف بتنی پیشنهاد کردند [۷-۱۱]. در هر حال، این رویکرد هنوز با چالش‌ها و محدودیت‌های مختلفی در طراحی سازه‌های بتنی روبرو است. این محدودیت‌ها شامل پیچیدگی روابط و عدم وجود روشی مشخص هستند [۱۲].

تاکنون، روش‌های گوناگونی در زمینه مکانیک شکست ارائه شدند. این روش‌ها به پاسخ‌های متفاوتی منتهی می‌شوند که این موضوع منجر به سردرگمی و عدم کاربرد عملی مکانیک شکست در طراحی بیشتر سازه‌های بتنی می‌شود [۵].

در این میان، روش‌های آزمایشگاهی مختلفی نظیر روش کار شکست^۱، روش اثر اندازه^۲، روش اثر مرزی^۳، روش منحنی تنش-تغییر مکان^۴ و روش پیشنهادی استاندارد ASTM در پژوهش‌های زیادی جهت بررسی خواص شکست بتن مورد استفاده قرار گرفتند [۱۳].

در سال‌های اخیر، برخی از پژوهش‌ها سعی در تعیین روابط و نسبت‌هایی میان این روش‌ها پرداخته‌اند.

حسینی محراب و همکاران [۱۲] در پژوهشی آزمایشگاهی-تحلیلی نشان دادند که دو روش کار شکست و منحنی تنش-تغییر مکان جهت بررسی رفتار شکست بتن‌های سبک و پرمقاومت الیاف‌دار مناسب هستند. همچنین، آن‌ها نتیجه گرفتند که روش اثر اندازه برای بررسی بتن‌های سبک و پرمقاومت بدون الیاف به پاسخ‌های دقیق‌تری منتهی می‌شوند [۱۲].

کاظمی و همکاران [۱۴] نتیجه گرفتند که روش کار شکست جهت بررسی خواص شکست بتن‌های پرمقاومت حاوی الیاف فولاد و روش اثر اندازه جهت بررسی بتن‌های پرمقاومت بدون الیاف مناسب هستند.

قاسمی و همکاران [۱۵] گزارش کردند که روش کار شکست در مقایسه با روش اثر اندازه به نتایج بهتری در بتن‌های خودمتراکم الیافی منتهی می‌شود. بنکاردینو^۵ و همکاران [۱۶] نشان دادند که روش منحنی تنش-تغییر مکان جهت بررسی بتن‌های الیافی نسبت به روش کار شکست مناسب‌تر است.

تاکنون، پژوهش‌های متعددی در زمینه بررسی خواص شکست بتن با رویکرد مکانیک شکست صورت گرفته است. با این وجود، تحقیقات اندکی جهت مطالعه و مقایسه این روش‌های متفاوت انجام شده است. بنابراین، در این پژوهش آزمایشگاهی اثر شش روش متداول مکانیک شکست نظیر روش کار شکست، روش اثر اندازه، روش اثر مرزی، روش منحنی تنش-تغییر مکان، روش پیشنهادی ASTM و مدل مکانیک شکست بُور^۶ بر روی بتن توانمند بررسی و مقایسه شدند.

۲- روش‌های مکانیک شکست

دو پارامتر انرژی شکست (G) و چقرمگی شکست (K) از معیارهای اساسی علم مکانیک شکست هستند. به مقدار انرژی لازم جهت رشد ترک در واحد سطح، انرژی شکست گفته می‌شود. چقرمگی شکست نیز به مقاومت مصالح در برابر گسترش ترک تعریف می‌شود [۱۲].

^۴ Stress-displacement curve method

^۵ Bencardino

^۶ Bower's fracture mechanics model

^۱ Work of fracture method

^۲ Size effect method

^۳ Boundary effect method

۱-۲- روش کار شکست (WFM)

دهنده دهانه تیر، L طول تیر، m جرم نمونه و g شتاب گرانشی هستند. سپس برازش خطی^۵ $(Y = AX + C)$ بر طبق دو مختصات $Y = (b.d/P_0)^2$ و $X = d$ باید صورت گیرد. در این برازش پارامتر b نشان دهنده ی پهنای تیر و d معرف عمق تیر است. در ادامه، شیب خط (A) و عرض از مبدأ (C) از طریق این برازش خطی محاسبه می شوند. در نهایت پارامترهای انرژی شکست اولیه (G_{fSEM}) و چقرمگی شکست (K_{ICSEM}) از طریق رابطه های زیر قابل محاسبه هستند:

$$G_{fSEM} = \frac{g(\alpha)}{A \times E} \quad (۳)$$

$$K_{ICSEM} = \sqrt{E \times G_{fSEM}} \quad (۴)$$

که در آن پارامتر α برابر با نسبت طول ترک اولیه (a) به عمق تیر (d) است. فاکتور $g(\alpha)$ تابع هندسه عضو است و مطابق با استاندارد RILEM TC-89 FMT [۱۹] محاسبه می شود.

۳-۲- روش اثر مرزی^۶ (BEM)

روش اثر مرزی (BEM) نیز مشابه با روش SEM اثر اندازه نمونه ها بر مقاومت بتن را در نظر می گیرد و توسط هو و دوآن^۷ معرفی شد [۲۰]. در این روش، اثر اندازه بر مقاومت سازه ها در فرآیند شکست بتن به تعاملات بین مرز سازه و منطقه صدمه دیده نوک ترک نسبت داده می شود. علاوه بر این، اثر اندازه ترک بر مقاومت سازه به عنوان یک انتقال هموار بین دو حد اصلی برآورد می شود. در حد اول، جایی که طول ترک به صفر نزدیک می شود، مقاومت اسمی نمونه (σ_N) برابر با مقاومت کششی است و حضور نوک ترک لبه ای نادیده گرفته می شود. در حد دوم، جایی که طول ترک بزرگ است، مقاومت اسمی (σ_n) در نوک ترک لبه ای اتفاق می افتد و براساس مکانیک شکست خطی الاستیک توصیف می شود. رابطه میان این دو پارامتر مقاومت اسمی σ_n و σ_N به شرح زیر است:

$$\sigma_N = A(\alpha)\sigma_n \quad (۵)$$

$$A(\alpha) = (1 - \alpha)^2 \quad (۶)$$

در این رابطه α برابر با نسبت طول ترک اولیه (a) بر عمق تیر (d)

این روش نخستین بار توسط هیلبرگ^۱ و همکاران بر پایه مدل ترک چسبنده جهت تعیین انرژی شکست کل (G_{FWFM}) پیشنهاد شده است [۵]. همانطور که ذکر گردید G_{FWFM} به مقدار انرژی لازم جهت ایجاد ترک در واحد سطح گویند [۵]. در این روش G_{FWFM} با فرض اینکه جذب انرژی فقط در ناحیه گسترش شکست^۲ روی می دهد با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

(۱)

در این رابطه w_t نشان دهنده انرژی شکست مصرف شده است و معادل مساحت زیر منحنی نمودار بار- تغییر مکان است. همچنین، پارامترهای b ، d و a به ترتیب بیانگر پهنای تیر، عمق تیر و طول شکاف اولیه هستند. این روش مطابق با استاندارد RILEM TC-50 FMC [۱۷] است.

۲-۲- روش اثر اندازه^۳ (SEM)

مهم ترین دلیل استفاده از مکانیک شکست در طراحی سازه های بتنی، قابلیت در نظر گرفتن اثر اندازه نمونه ها است. در حقیقت، یکی از بزرگترین مشکل ها در طراحی سازه های بتنی استفاده از خواص مکانیکی نمونه های با ابعاد کوچک در عضوهای سازه ای با ابعاد بزرگ است [۵]. در نتیجه، روش اثر اندازه (SEM) بر طبق مدل ترک الاستیک مؤثر توسط بازانت^۴ و کاظمی معرفی شد [۱۸]. این روش مطابق با استاندارد RILEM TC-89 FMT است [۱۹]. در روش SEM تیرهای شکاف دار با هندسه متشابه و اندازه متغیر تحت آزمایش خمش سه نقطه ای قرار می گیرند. همچنین، تنها دو پارامتر نظیر بار حداکثر اعمال شده و ضریب ارتجاعی بتن برای محاسبه پارامترهای شکست لازم هستند. گام های این روش به شرح زیر هستند:

در ابتدا بار حداکثر اصلاح شده (P_0) مطابق با رابطه زیر مشخص می گردد:

$$P_0 = P_P + \frac{2S - L}{2S} mg \quad (۲)$$

در این رابطه، P_P برابر با بار حداکثر اعمال شده بر نمونه، S نشان

^۵ Linear regression

^۶ Boundary effect method

^۷ Hu and Duan

^۱ Hillerborg

^۲ Fracture process zone

^۳ Size effect method

^۴ Bazant

خطی تنش در طول ترک به صورت زیر به دست می آید:

$$\sigma = \frac{3PS}{2b(d-a)^2} \quad (15)$$

در این رابطه a, b, S, P و d به ترتیب بار اعمالی، دهانه تیر، پهنای تیر، عمق تیر و عمق شکاف اولیه است. سپس، G_{FSDCM} مطابق با مساحت زیر منحنی تنش - تغییر مکان تا تغییر مکان مشخصه (δ_{lim}) بنا به رابطه زیر به دست می آید:

$$G_{FSDCM} = \int_{\delta=0}^{\delta=\delta_{lim}} \sigma d\delta \quad (16)$$

تغییر مکان مشخصه δ_{lim} بر طبق استانداردهای مختلف و نظریه های کنترل ترک تعیین می شود. در این پژوهش δ_{lim} تا ۱۰ میلیمتر اندازه گیری شد. این روش تقریباً مشابه با WFM است با این تفاوت که انرژی شکست کل آن نسبت به WFM بسیار بیشتر است. در کل این روش برای بتن های با تغییر شکل زیاد که امکان اندازه گیری δ_{lim} نیست، پیشنهاد شده است زیرا با آن می توان در تغییر مکان های کمتر، مقدار جذب انرژی بیشتری را به دست آورد [۱۲]. این روش توانایی اندازه گیری انرژی شکست کل نمونه های خاص بتنی که حاوی تغییر شکل های زیاد و رفتار کرنش - سخت شوندگی هستند را دارا است.

۲-۵- روش پیشنهادی ASTM

این روش مطابق با استاندارد کمیته ASTM E1290 جهت اندازه گیری چقرمگی شکست ارتجاعی، خطی در حالت کرنش - صفحه ای مصالح فلزی ارایه شده است [۲۱]. بعدها این روش جهت تعیین چقرمگی شکست مصالح بتنی مورد استفاده قرار گرفت [۲۲]. در این روش چقرمگی شکست (K_{ICASTM}) از رابطه زیر به دست می آید:

$$K_{ICASTM} = \frac{YP}{bd^{1/2}} \quad (17)$$

پارامترهای رابطه ۱۷ مطابق با پارامترهای تعریف شده در روابط قبل هستند. در این رابطه Y برای $S = 2.5d$ به صورت زیر به دست می آید:

$$Y = 15\sqrt{\pi} \left(\frac{a}{d}\right)^{\frac{1}{2}} \times \frac{\left(1 - 2.5\frac{a}{d} + 4.49\left(\frac{a}{d}\right)^2 - 3.98\left(\frac{a}{d}\right)^3 + 1.33\left(\frac{a}{d}\right)^4\right)}{4\left(1 - \frac{a}{d}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (18)$$

است. سپس، چقرمگی شکست (K_{ICBEM}) به شرح زیر به دست می آید:

$$K_{ICBEM} = \sigma_N F(\alpha) \sqrt{\pi a} \quad (7)$$

که در آن a طول ترک اولیه است و $F(\alpha)$ فاکتور هندسی عضو است که به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$F(\alpha) = \frac{1 - 2.5\alpha + 4.49\alpha^2 - 3.98\alpha^3 + 1.33\alpha^4}{(1 - \alpha)^{1.5}} \quad (8)$$

بنا به رابطه پیشین، مقاومت اسمی (σ_n) به صورت زیر به دست می آید:

$$\sigma_n = \frac{K_{IC}}{A(\alpha)F(\alpha)\sqrt{\pi a}} = \frac{f_t}{\sqrt{\frac{B(\alpha).a}{a_{\infty}^*}}} \quad (9)$$

که در آن فاکتور f_t و a_{∞}^* به ترتیب مقاومت کششی و طول ترک مرجع هستند. بنابراین، فاکتور σ_n براساس رابطه ۱۰ قابل محاسبه است:

$$\sigma_n = \frac{f_t}{\sqrt{1 + \frac{a_e}{a_{\infty}^*}}} \quad (10)$$

در این رابطه a_e طول ترک مؤثر است و برابر است:

$$a_e = B(\alpha).a \quad (11)$$

$$B(\alpha) = \left[\frac{A(\alpha).F(\alpha)}{1.12} \right]^2 \quad (12)$$

با در نظر گرفتن روابط پیشین پارامتر a_{∞}^* عبارت است از:

$$a_{\infty}^* = \frac{1}{1.12^2 \pi} \left(\frac{K_{IC}}{f_t} \right)^2 \quad (13)$$

در انتها دو فاکتور a_{∞}^* و f_t از طریق برازش خطی دو پارامتر σ_n و a_e قابل محاسبه هستند. در نهایت با داشتن این دو فاکتور به سادگی می توان چقرمگی شکست را از رابطه ۷ به دست آورد. با در نظر گرفتن ضریب ارتجاعی و چقرمگی شکست، انرژی شکست اولیه (G_{fBEM}) به صورت زیر به دست می آید:

$$G_{fBEM} = \frac{(K_{ICBEM})^2}{E} \quad (14)$$

۲-۴- روش منحنی تنش - تغییر مکان (SDCM)

دیگر روش پر کاربرد در علم مکانیک شکست روش منحنی تنش - تغییر مکان (SDCM) در وسط دهانه تیر است. در این روش انرژی شکست کل (G_{FSDCM}) تیرهای تحت خمش سه نقطه ای به دست می آید [۱۳]. تنش خمشی متعاقب با بارهای اعمالی با فرض توزیع

۶-۲- روش مدل شکست بُور (BFM)

استفاده شد. مشخصات فنی این فوق روان کننده در جدول ۲ شرح داده شد. در این پژوهش از الیاف ترکیبی ریز (الیاف معمولی پلی پروپیلن) و الیاف درشت (ماکروسنتتیک پلی پروپیلن) تهیه شده از شرکت ژیکواوا استفاده شد (شکل ۲). خواص فنی این دو الیاف در جدول ۳ به نمایش درآمده است.

مدل مکانیک شکست بُور یک رویکرد خاص در زمینه مکانیک جامدات است که تمرکز ویژه‌ای بر رشد ترک در مصالح دارد. این روش در ابتدا توسط آلن فرانسیس بُور جهت بررسی شکست در مصالح کامپوزیتی و سرامیکی معرفی شد و بعدها در زمینه بتن گسترش یافت [۲۲]. در این روش چقرمگی شکست (K_{IBFM}) مطابق با رابطه ۱۹ به دست می‌آید:

$$K_{IBFM} = \frac{4P}{b} \sqrt{\frac{\pi}{d}} \left(1.6 \left(\frac{a}{d} \right)^{\frac{1}{2}} - 2.6 \left(\frac{a}{d} \right)^{\frac{3}{2}} + 12.3 \left(\frac{a}{d} \right)^{\frac{5}{2}} - 21.2 \left(\frac{a}{d} \right)^{\frac{7}{2}} + 21.8 \left(\frac{a}{d} \right)^{\frac{9}{2}} \right) \quad (19)$$

که در آن P ، b ، d و a نشان دهنده بار وارده بر تیر، عرض تیر، ارتفاع تیر و طول شکاف می‌باشند.

۳- طراحی و ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

۳-۱- مشخصات مصالح

از سیمان پرتلند تیپ ۲، تهیه شده از شرکت سیمان شرق مشهد استفاده شد. ضریب نرمی این سیمان برابر ۳۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. همچنین، مقاومت نهایی ۲۸ روزه ملات این نوع سیمان برابر ۴۹/۵ مگاپاسکال است. درشت‌دانه استفاده شده در این پژوهش از نوع سنگدانه معمولی با حداکثر اندازه دانه‌بندی ۱۲/۵ میلیمتر و وزن مخصوص ۲/۶۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. ریزدانه مورد استفاده از نوع ماسه رودخانه دو بار شور با حداکثر اندازه ۵ میلیمتر، ضریب نرمی ۳/۲ و وزن مخصوص ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. میکروسیلیس با وزن مخصوص ۲/۲۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب نیز به عنوان چسباننده^۱ در کنار سیمان استفاده شد. مشخصات شیمیایی سیمان و میکروسیلیس در جدول ۱ شرح داده شدند. دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های ریز و درشت در شکل ۱ نشان داده شدند.

همچنین، از فوق روان کننده کربوکسیلاتی تهیه شده از شرکت بتن شیمی زرین با وزن مخصوص ۱/۰۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب

۲-۳- طرح اختلاط و آماده سازی بتن

در این پژوهش دو طرح اختلاط بتن توانمند بدون الیاف (NR-HPC)^۲ و بتن توانمند حاوی الیاف ترکیبی (FR-HPC)^۳ شامل ۲۵٪ حجمی الیاف ریز پلی پروپیلن و ۷۵٪ حجمی الیاف درشت ماکروسنتتیک، مورد بررسی قرار گرفتند. این دو طرح اختلاط بتن توانمند در جدول ۴ نشان داده شدند.

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی مصالح مصرفی (%)

نوع اکسید	سیمان [۲۳]	میکروسیلیس [۲۴]
SiO ₂	۲۱/۰	۹۳/۶
Al ₂ O ₃	۴/۶	۱/۳
Fe ₂ O ₃	۳/۹	۰/۳
CaO	۶۲/۵	۰/۴۹
MgO	۲/۹	۰/۹۷
SO ₃	۲/۰	۰/۱
Na ₂ O	۰/۵	۰/۳۱
K ₂ O	۰/۴۵	۱/۰۱
L.O.I	۱/۴	-
SiC	-	۰/۵
C	-	۰/۳
P ₂ O ₅	-	۰/۱۶

جدول ۲- مشخصات فنی فوق روان کننده [۲۵].

مشخصات فنی	واحد	فوق روان کننده
حالت فیزیکی	-	مایع
رنگ	-	قهوه‌ای روشن
یون کلر	-	ندارد
PH	-	۴ ± ۰/۰۵
وزن مخصوص	g/cm ³	۱/۰۵ ± ۰/۰۵

^۱ Binder

^۲ Not fiber-reinforced high-performance concrete

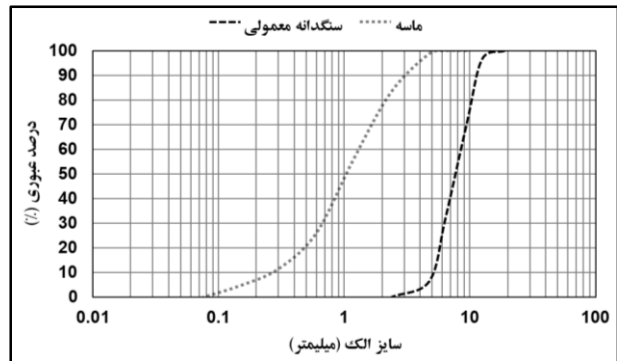
^۳ Fiber-reinforced high-performance concrete

پس از آن حدود ۸۰٪ درصد آب اختلاط به مخلوط اضافه شد و اختلاط به مدت ۵ دقیقه ادامه یافت. در ادامه باقی آب اختلاط (۲۰٪ آب باقیمانده) به همراه فوق روان کننده کربوکسیلاتی به صورت تدریجی در مدت ۲ دقیقه به مخلوط اضافه شدند. در نهایت اختلاط به مدت ۸ دقیقه ادامه یافت تا مخلوط همگن و یکنواختی حاصل شود. به این نکته باید توجه داشت که در اختلاط بتن توانمند حاوی الیاف، الیاف ترکیبی در مدت زمانی که سنگدانه‌ها مخلوط می شدند به آنها اضافه شدند و اختلاط به مدت زمان ۲ دقیقه بیشتر ادامه یافت. پس از ریختن بتن در قالب‌ها، نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب‌ها خارج گشته و بنا به حفظ شرایط کارگاهی، کلیه نمونه‌ها در آب به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شدند. در شکل ۳ این گام‌ها نشان داده شدند.

۳-۳- روش آزمایش

سه تیر شکاف‌دار با ابعاد $140 \times 140 \times 380$ (طول $\times$ ارتفاع $\times$ عرض) میلیمتر تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای با طول شکاف a برابر با 0.2 عمق تیر d جهت بررسی پارامترهای شکست روش‌های WFM، SDCM و ASTM ساخته شدند (شکل ۴). در ادامه سه تیر شکاف‌دار تحت خمش سه نقطه‌ای با هندسه مشابه ولی با سه اندازه مختلف با اندازه مشخصه d (ارتفاع) جهت بررسی خواص شکست روش SEM مطابق با استاندارد RILEM TC-89 [۱۹] ساخته شدند (شکل ۵). در اینجا d برابر ۷۰، ۱۴۰ و ۲۸۰ میلیمتر است. تمام تیرهای شکاف‌دار دارای عرض ثابت b به اندازه ۷۰ میلیمتراند. نسبت طول به عمق L/d ، نسبت دهانه به عمق S/d و نسبت طول شکاف به عمق تیر a/d به ترتیب برابر با ۲/۱۵، ۲/۵ و ۰/۲ هستند. در این تیرها نیز پهنای شکاف ۳ میلیمتر در نظر گرفته شده است.

جهت بررسی فاکتورهای شکست در روش BEM، سه تیر خمش سه نقطه‌ای با هندسه یکسان به ابعاد $70 \times 140 \times 380$ ساخته شدند. در این تیرها سه نسبت مختلف a/d برابر با ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۶ با پهنای ثابت در نظر گرفته شدند (شکل ۶). جهت حفظ شرایط آزمایشگاهی یکسان، بارگذاری مطابق با استاندارد RILEM TC-89 [۱۹] صورت پذیرفت، بدین صورت که بار حداکثر در مدت ۵ دقیقه بر کلیه نمونه‌ها اعمال شد.



شکل ۱- دانه‌بندی سنگدانه‌ها



شکل ۲- الیاف: (الف) پلی‌پروپیلن معمولی (ب) ماکروستتیک.

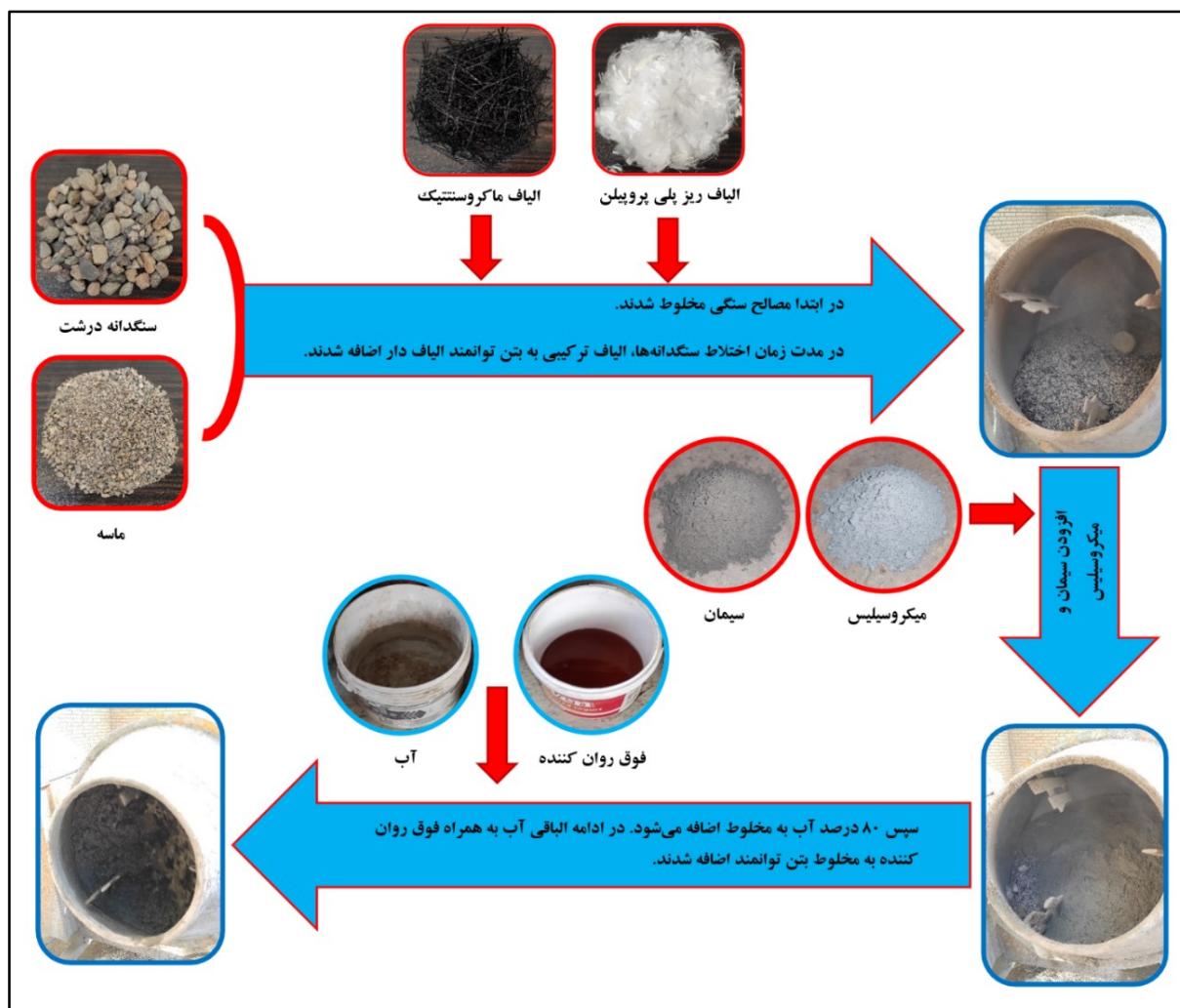
جدول ۳- مشخصات فنی الیاف مصرفی [۲۴].

مشخصات فنی	واحد	پلی‌پروپیلن	ماکروستتیک
قطر	mm	۰/۳۵	۰/۸
طول	mm	۱۲	۴۰
نقطه ذوب	°C	۱۷۰-۱۶۰	۱۷۰-۱۵۰
نقطه احتراق	°C	-	۳۵۰
وزن مخصوص	g/cm ³	۰/۹۱	۰/۹۲
مقاومت کششی	MPa	۳۳۸	۴۰۰
مدول الاستیسیته	GPa	۱۵۵۰	۶

روش ساخت بتن توانمند بدین صورت است که ابتدا سنگدانه‌های ریز و درشت در مخلوط گن به مدت ۵ دقیقه مخلوط شدند. سپس سیمان و میکروسیلیس به مخلوط اضافه و ۳ دقیقه مخلوط شدند.

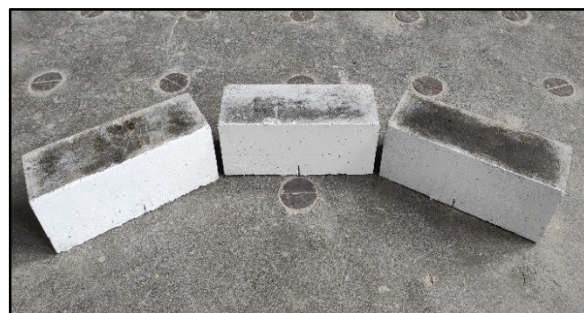
جدول ۴- طرح های اختلاط بتن بر حسب (kg/m³).

طرح اختلاط	سیمان	میکروسیلیس	سنگدانه		آب	فوق روان کننده	نسبت آب به سیمان	الیاف	
			معمولی	ماسه				پلی پروپیلن	ماکرو سنتتیک
NR-HPC	۵۸۵	۶۵	۸۵۰	۷۵۰	۱۸۲	۷/۵	۰/۲۸	۰	۰
FR-HPC	۵۸۵	۶۵	۸۵۰	۷۵۰	۱۸۲	۷/۵	۰/۲۸	۲/۲۸	۶/۹



شکل ۳- گام های ساخت بتن توانمند.

همچنین نمونه های استوانه ای با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلیمتر جهت تعیین مقاومت فشاری مطابق با استاندارد BS EN 12390 [۲۶] ساخته شدند. مقاومت شکافت کششی بر نمونه های استوانه با ابعاد ۱۵۰×۳۰۰ (ارتفاع × قطر) مطابق با استاندارد ASTM C469 [۲۷] و ضریب ارتجاعی نیز بر استوانه های با ابعاد ۱۵۰×۳۰۰ بر طبق استاندارد ASTM 496 [۲۸] انجام شدند. این نمونه ها در شکل ۷ نشان داده شدند.



شکل ۴- تیرهای خمشی شکاف دار.

که جهت بررسی خواص شکست بتن‌ها استفاده شدند در قسمت پیوست در جدول‌های پ-۱ الی ۴- شرح داده شدند. همچنین برآزش خطی دو روش SEM و BEM در قسمت پیوست در شکل‌های پ-۱ و ۲- نشان داده شدند. در ادامه، به بررسی و مقایسه دو معیار اصلی خواص مکانیک شکست نظیر انرژی شکست و چقرمگی شکست در این روش‌های مختلف پرداخته می‌شود.

جدول ۵- نتایج خواص مکانیکی.

خواص مکانیکی	واحد	NR-HPC	FR-HPC
مقاومت فشاری	MPa	۵۸/۶	۷۲/۲
مقاومت کششی	MPa	۴/۵۴	۵/۷۵
ضریب ارتجاعی	GPa	۳۸/۷	۴۱/۱

۴-۱- بررسی و مقایسه انرژی شکست

همانطور که در قسمت‌های پیشین اشاره شد انرژی شکست یکی از مهم‌ترین معیارها جهت تعیین رفتار شکست مصالح بتنی است. انرژی شکست به مقدار انرژی لازم جهت ایجاد ترک در واحد سطح گفته می‌شود [۵ و ۶]. در ادامه نتایج انرژی شکست، نظیر انرژی شکست کل (G_{FWFM}) روش WFM، انرژی شکست کل (G_{SDCM}) روش SDCM، انرژی شکست اولیه (G_{fSEM}) حاصل از روش SEM و انرژی شکست اولیه (G_{fBEM}) حاصل از روش BEM که نشان دهنده جذب انرژی هستند، در جدول ۶ نشان داده شدند. منحنی بار- تغییر مکان تیرهای $140 \times 140 \times 380$ میلیمتر شکاف‌دار به ترتیب در شکل ۶ نشان داده شدند.

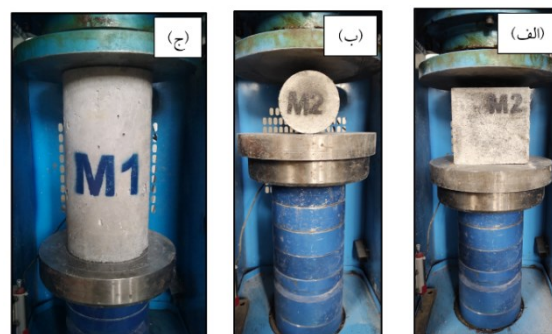
مطابق با جدول ۶، پارامترهای انرژی شکست با افزودن الیاف به صورت ترکیبی به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. الیاف به علت مکانیزم پلی^۱ و اتصال مناسب با خمیر سیمان از رشد و گسترش ترک به مقدار قابل توجهی جلوگیری می‌کند. این مکانیزم منجر به افزایش بارپذیری بتن قبل از ترک خوردگی و افزایش قابل توجه شکل‌پذیری بتن پس از ترک خوردگی می‌شود که در نهایت افزایش جذب انرژی را به همراه دارد [۱۴ و ۱۵]. این نکته قابل توجه است که نقش اصلی الیاف در کنترل ترک پس از اولین ترک خوردگی است که به اصطلاح به آن رفتار پس از بارحداکثر^۲ گویند [۱۲].



شکل ۵- تیرهای ساخته شده در روش SEM.



شکل ۶- تیرهای ساخته شده در روش BEM.



شکل ۷- سایر نمونه‌های ساخته شده: (الف) نمونه‌های فشاری، (ب) کششی و (ج) ارتجاعی.

۴- نتایج

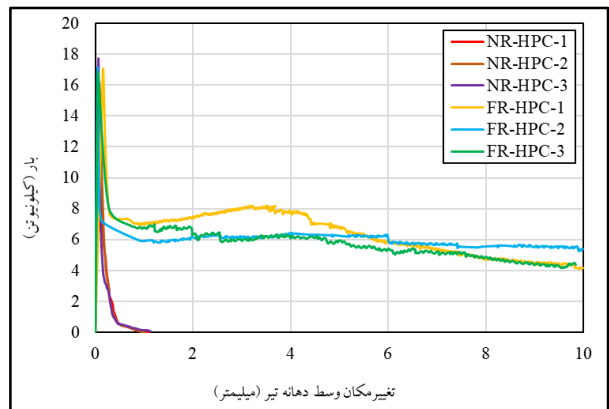
نتیجه‌های خواص مکانیکی (میانگین) بتن توانمند بدون الیاف (NR-HPC) و بتن توانمند حاوی الیاف ترکیبی (FR-HPC) در جدول ۵ شرح داده شدند. سایر مقادیر مربوط به تیرهای شکاف‌دار

² Post-peak behavior

¹ Bridging mechanism

جدول ۶- نتایج انرژی شکست.

پارامتر	واحد	NR-HPC	FR-HPC
G_{FWFM}	N/m	۱۲۹/۹	۳۶۵۳/۱
G_{FSDCM}	N/m	۸۵۲/۸	۲۶۵۰۸/۹
G_{fSEM}	N/m	۴۴/۸	۵۹/۱
G_{fBEM}	N/m	۴۳/۱	۵۷/۲



شکل ۸- منحنی بار- تغییر مکان تیرهای شکاف دار.

همانطور که مشاهده می شود نتایج انرژی شکست دو روش SEM و BEM به علت نادیده گرفتن رفتار پس از ترک خوردگی به پاسخ های کمتری در مقایسه با سایر روش ها منتهی شدند. بنابراین این دو روش جهت بررسی رفتار شکست بتن های الیاف دار مناسب نیستند. این نتیجه در پژوهش های پیشین نیز گزارش شده است [۱۲ و ۱۴].

از آنجا که عملکرد اصلی الیاف پس از ترک خوردگی نمونه بتنی است، دو روش WFM و SDCM به دلیل در نظر گرفتن کل مساحت زیر نمودار بار- تغییر مکان برای بررسی انرژی شکست بتن های توانمند حاوی الیاف مناسب ترند. از طرفی در شکل ۶ مشاهده می شود که بتن توانمند حاوی الیاف ترکیبی (FR-HPC) رفتار کرنش نرم شوندگی^۱ از خود نشان داده و در تغییر مکان ۱۰ میلیمتر به مقدار ثابت و قابل چشم پوشی رسیده است. در این صورت تغییر مکان ۱۰ میلیمتر را می توان به عنوان تغییر مکان نهایی (δ_{lim}) در نظر گرفت. در نتیجه می توان گفت که انرژی شکست حاصل از روش WFM جهت بررسی رفتار شکست این بتن مناسب تر است.

دیگر پارامتر مهم در این بحث، نسبت انرژی شکست کل به انرژی

شکست اولیه (G_F/G_f) است [۲۹ و ۳۰]. این نسبت به دو دلیل توسط پژوهش های متعددی پیشنهاد شده است: در ابتدا اینکه انرژی شکست اولیه (G_f) نسبت به انرژی شکست کل (G_F) ساده تر اندازه گیری می شود. ثانیاً، تعیین G_F به علت حساسیت برخی از سازه ها به شکست با خطا همراه است که بهتر است آن را از طریق G_f به دست آورد [۳۱]. نسبت این پارامترهای جذب انرژی در جدول ۷ آورده شدند. مطابق جدول ۷ مشاهده می شود که نسبت این پارامترها با افزودن الیاف به صورت ترکیبی در مخلوط بتن به مقدار قابل توجهی افزایش یافتند. این افزایش مشخص کننده این نکته است که در مقایسه با ظرفیت بارپذیری بتن، الیاف بر رفتار پس از ترک خوردگی بتن اثر گذاری خیلی بیشتری دارد. بنابراین می توان مجدد به این نکته اشاره داشت که استفاده از روش WFM با در نظر گرفتن رفتار پس از ترک خوردگی نمونه ها نتایج بهتری را حاصل می شود. این در حالی است که رفتار پس از ترک خوردگی در بتن توانمند بدون الیاف بسیار ناچیز تر از بتن توانمند الیاف دار است. در مقابل از آنجا که رفتار پس از ترک خوردگی انواع گوناگون بتن های بدون الیاف نسبت به نوع الیاف دار آن ها قابل چشم پوشی است، می توان گفت که دو روش SEM و BEM به علت سادگی در انجام آزمایش ها و دقت بالای آن ها توسط پژوهشگران متعددی پیشنهاد شده است [۱۲ و ۱۴]. چنین نتیجه ای در این پژوهش در بتن توانمند بدون الیاف نیز دیده می شود. همانطور که در جدول ۷ مشاهده می شود، نسبت G_F حاصل از روش WFM به G_f حاصل از دو روش SEM و BEM در بتن NR-HPC در مقایسه با این نسبت در بتن FR-HPC ناچیز است. در نتیجه، استفاده از دو روش SEM و BEM که دارای دقت مناسب، عدم وابستگی پارامترها به اندازه نمونه ها و سادگی در آزمایش ها هستند، جهت اندازه گیری خواص شکست، نظیر انرژی شکست، مناسب تر هستند.

جدول ۷- نسبت پارامترهای انرژی شکست.

پارامتر	NR-HPC	FR-HPC
G_{FWFM}/G_{fSEM}	۲/۹	۶۱/۸۱
G_{FWFM}/G_{fBEM}	۳/۰۱	۶۳/۸۷
G_{FSDCM}/G_{FWFM}	۶/۵۶	۷/۲۶

^۱ Strain-softening behavior

۴-۲- بررسی و مقایسه چقرمگی شکست

دیگر معیار مهم در بررسی خواص شکست مصالح بتنی چقرمگی شکست است. این معیار به ضریب شدت تنش نیز شهرت دارد و نشان دهنده‌ی قابلیت مصالح بتنی در تحمل ترک است [۱۲]. نتایج چقرمگی شکست شامل چقرمگی شکست (K_{ICSEM}) روش SEM، چقرمگی شکست (K_{ICBEM}) روش BEM، چقرمگی شکست (K_{ICASTM}) روش پیشنهادی ASTM E1290 و چقرمگی شکست (K_{ICBFM}) روش بُور در جدول ۸ نشان داده شدند.

جدول ۸- نتایج چقرمگی شکست.

پارامتر	واحد	NR-HPC	FR-HPC
K_{ICSEM}	MPa√mm	۴۱/۷	۴۹/۳
K_{ICBEM}	MPa√mm	۴۰/۸	۴۸/۵
K_{ICASTM}	MPa√mm	۲۶/۷	۲۹
K_{ICBFM}	MPa√mm	۴۵	۴۹

جدول ۸ نشان می‌دهد که افزودن الیاف به صورت ترکیبی از الیاف ریز و درشت منجر به افزایش چقرمگی شکست حاصل از هر چهار مدل شده است. پارامترهای K_{ICSEM} ، K_{ICBEM} ، K_{ICASTM} و K_{ICBFM} به ترتیب به مقدار ۱۸/۲۲٪، ۱۸/۸۷٪، ۸/۶۱٪ و ۸/۸۹٪ افزایش داشتند. مهم‌ترین دلیل این افزایش در چقرمگی شکست، نقش الیاف ترکیبی در مهارسازی ملات سیمان اطراف، محدود کردن پیدایش ترک‌های ریز، جلوگیری از رشد ترک‌های درشت و تأخیر در گسیختگی نمونه‌های بتنی است. در حقیقت الیاف با ایجاد اتصال مناسب با خمیر سیمان و ایجاد شبکه منسجم در بتن توزیع یکنواخت‌تر تنش را در تمام سطح بتن به دنبال دارد. همچنین، الیاف به علت عملکرد پُلی (مکانیزم پُلی) در دو طرف ترک از رشد و گسترش آن جلوگیری می‌کند [۱۴ و ۱۵].

مطابق با جدول ۸ مشاهده می‌شود که نتایج چقرمگی شکست (K_{ICASTM}) حاصل از روش پیشنهادی کمیته ASTM نسبت به سه روش دیگر کمتر است. این در حالی است که پاسخ‌های این سه روش SEM، BEM و BFM به یکدیگر نزدیک‌ترند. بنابراین استفاده از این سه روش نسبت به روش ASTM مناسب‌ترند. این نکته نیز قابل ذکر است که روش BFM به تعداد نمونه کمتری نیاز

دارد و سرعت عمل بیشتری در به‌دست آوردن چقرمگی شکست دارد. در هر حال، از آنجا که دو روش SEM و BEM از دقت بالایی برخوردارند و پاسخ‌های آن‌ها وابستگی به ابعاد نمونه‌ها ندارند استفاده از آن‌ها در بتن‌های توانمند با و بدون الیاف بر روش BFM ارجحیت دارد. تنها تفاوت دو روش SEM و BEM نسبت به هم تفاوت‌های این دو در بحث‌های مربوط به نظریه‌های مربوطه و تفاوت‌ها در رفتار مصالح بتنی است.

روش SEM به بررسی چگونگی اثر اندازه یک نمونه بتنی بر خواص شکست آن می‌پردازد. این روش بر این اساس است که نمونه‌های بزرگتر به دلیل احتمال بیشتر مواجه شدن با نقص‌ها یا عیوب، تمایل به نشان دادن سختی شکست کمتری دارند. اثر اندازه عموماً با استفاده از قوانین مقیاس‌گذاری که خواص شکست را به اندازه نمونه مرتبط می‌کند، مشخص می‌شود. اما روش BEM به روابط بین نوک ترک و مرزهای نمونه می‌پردازد. این روش چگونگی اثرگذاری مرزها (مانند لبه‌های یک صفحه یا سطح یک تیر) بر توزیع تنش و انتشار ترک را در بتن بررسی می‌کند. در نتیجه، برای بتن‌ها با اندرکنش مرزی قابل توجه، روش BEM ممکن است به پاسخ‌های دقیق‌تری منتهی شود. در مقابل، برای بتن‌هایی که اثر اندازه نمونه‌ها بر رفتار شکست آن‌ها غالب است، روش SEM مناسب‌تر خواهد بود. مطابق با پژوهش‌های گذشته، در مقایسه با بتن‌های حاوی الیاف، ابعاد و اندازه نمونه‌ها اثرگذاری بیشتری بر خواص شکست بتن‌های تُرد (بدون الیاف) دارد [۱۲]. در این صورت، روش اثر اندازه جهت بررسی چقرمگی شکست بتن توانمند بدون الیاف ممکن است بهتر باشد. از طرفی از آنجا که الیاف در بتن منجر به ایجاد ساختار شبکه‌ای در ساختار بتن و توزیع یکنواخت‌تر تنش در سطح آن می‌شود، بتن‌های تقویت شده با الیاف دارای اندرکنش‌های مرزی بیشتری نسبت به بتن‌های بدون الیاف هستند [۳۲]. همچنین، وجود الیاف منجر به افزایش شکل‌پذیری و کاهش اثر اندازه نمونه‌ها بر خواص شکست بتن می‌شود [۱۲]. در نتیجه، روش BEM می‌تواند گزینه مناسبی برای بررسی چقرمگی شکست بتن‌های توانمند حاوی الیاف باشد. دلیل کمتر بودن پاسخ چقرمگی شکست حاصل از روش BEM نسبت به SEM ممکن است بدلیل وجود ترک‌های ریزی باشد که بواسطه مرزها محدود شدند و منجر به تمرکز تنش‌های بیشتری در بتن می‌شوند.

کل زیر منحنی بار- تغییر مکان جهت تعیین انرژی شکست در این دو روش در نظر گرفته می شود.

• دقت دو روش SEM و BEM جهت تعیین کردن انرژی شکست بتن توانمند بدون الیاف مناسب است. همچنین انرژی شکست حاصل از این دو روش وابستگی به ابعاد و اندازه نمونه های بتنی ندارد.

• مقایسه نسبت های انرژی شکست کل به انرژی شکست اولیه (G_F/G_f) در دو بتن توانمند بدون الیاف و با الیاف نشان می دهد که در مقایسه با افزایش ظرفیت بارپذیری ناشی از افزودن الیاف، اثر اصلی الیاف بر رفتار پس از ترک خوردگی بتن توانمند بوده است.

• در مقایسه با سایر روش ها، چقرمگی شکست حاصل از روش پیشنهادی استاندارد ASTM به پاسخ های کمتری در مقایسه با سایر روش ها منتهی شده است. چقرمگی شکست به دست آمده از این روش تقریباً ۴۰٪ از سایرین روش ها در بتن توانمند کمتر است.

• پاسخ های چقرمگی شکست سه روش SEM، BEM و BFM برای بتن توانمند بدون الیاف و با الیاف تقریباً برابر هستند. نسبت این پاسخ ها به پاسخ روش ASTM تقریباً برابر ۱/۷ است. بنابراین هر سه روش برای محاسبه چقرمگی شکست بتن توانمند با و بدون الیاف مناسب هستند. البته یکسری تفاوت ها و ویژگی های موجود در این سه روش منجر به برتری یکی بر دیگری می شود. به عنوان مثال، روش SEM به علت در نظر گرفتن بحث اثر اندازه نمونه برای بتن توانمند بدون الیاف و روش BEM به علت در نظر گرفتن شرایط مرزی برای بتن توانمند حاوی الیاف مناسب تر هستند. در مقابل، روش BFM از سادگی آزمایش و سرعت بالای بیشتری جهت محاسبه چقرمگی شکست برخوردار است.

• در مجموع از میان این شش روش ارایه شده برای بتن توانمند بدون الیاف و بتن توانمند تقویت شده با الیاف ترکیبی، روش SEM به دلیل دقت بالا در اندازه گیری انرژی و چقرمگی شکست، سادگی پروسه آزمایش، احتمال خطای کم و عدم وابستگی پارامترهای آن به ابعاد و اندازه نمونه ها از الویت بیشتری برخوردار است.

روابط بین هر یک از پارامترهای چقرمگی شکست در جدول ۹ آورده شده است. همانطور که در جدول ۹ مشاهده می شود نسبت این پارامترها در بتن توانمند بدون الیاف (NR-HPC) در بازه ی ۱/۵ الی ۱/۷ می باشد. همچنین، در بتن توانمند تقویت شده با الیاف ترکیبی (FR-HPC) این بازه تقریباً ثابت و برابر با ۱/۷ است. بنابراین می توان هر یک از این پارامترها را نسبت به هم با درصدی خطا برای بتن های توانمند بدون الیاف و با الیاف پیش بینی کرد.

جدول ۹- نسبت پارامترهای چقرمگی شکست.

پارامتر	NR-HPC	FR-HPC
$K_{IC SEM}/K_{IC ASTM}$	۱/۵۶	۱/۷
$K_{IC BEM}/K_{IC ASTM}$	۱/۵۳	۱/۶۷
$K_{IC BFM}/K_{IC ASTM}$	۱/۶۹	۱/۶۹

۵- نتایج

در این پژوهش به بررسی پارامترها و خواص شکست بتن توانمند بدون الیاف و حاوی الیاف ترکیبی (پلی پروپیلن و ماکروسنتتیک) تحت اثر شش روش مختلف مکانیک شکست نظیر روش کار شکست (WFM)، روش اثر اندازه (SEM)، روش اثر مرزی (BEM)، روش منحنی تنش- تغییر مکان (SDCM)، روش پیشنهادی ASTM E1290 و روش مدل شکست بُور (BFM) پرداخته شده است. در ادامه نتیجه های این بررسی آورده شدند:

• معیارهای انرژی و چقرمگی شکست در بتن توانمند با افزودن الیاف ترکیبی به مقدار قابل توجهی افزایش یافتند. به عنوان مثال، انرژی شکست و چقرمگی شکست حاصل از روش SEM به ترتیب به مقدار ۳۱/۹٪ و ۱۸/۲٪ افزایش یافتند. بیشترین افزایش در انرژی شکست مربوط به روش SDCM است که تقریباً ۳۱ برابر شده است و دلیل اصلی آن در نظر گرفتن رفتار پس از ترک خوردگی در محاسبه انرژی شکست است.

• در مقایسه با سایر روش ها، دو روش WFM و SDCM جهت بررسی انرژی شکست بتن توانمند حاوی الیاف ترکیبی مناسب تر هستند. دلیل اصلی این موضوع این است که اثر اصلی الیاف بر رفتار پس از ترک خوردگی در طول محاسبه مساحت

پیوست

جدول پ-۱- مساحت کل زیر نمودار بار- تغییر مکان تیرهای

شکاف دار $۱۴۰ \times ۱۴۰ \times ۳۸۰$.

پارامتر	واحد	NR-HPC	FR-HPC
w_{t1}	N.m	۲/۳۵	۶۳/۴۱
w_{t2}	N.m	۲/۵۳	۶۰/۲۱
w_{t3}	N.m	۱/۲۳	۴۸/۲۲

جدول پ-۲- بار اصلاح شده اعمال شده بر تیرهای با هندسه

متشابه SEM.

اندازه ارتفاع	بار اصلاحی	واحد	NR-HPC	FR-HPC
۷۰ میلیمتر	P_{01}	N	۴۹۹۱/۶	۵۳۴۳/۹
	P_{02}	N	۴۷۴۲/۴	۵۲۶۱/۲
	P_{03}	N	۴۵۴۲/۷	۵۷۹۳/۹
۱۴۰ میلیمتر	P_{01}	N	۷۹۳۰/۷	۹۷۴۹/۹
	P_{02}	N	۸۳۵۸/۳	۹۶۰۳/۳
	P_{03}	N	۸۵۵۱/۴	۹۸۸۹/۷
۲۸۰ میلیمتر	P_{01}	N	۱۴۰۴۵/۴	۱۵۹۵۹/۳
	P_{02}	N	۱۴۲۶۷/۷	۱۶۴۰۹/۹
	P_{03}	N	۱۳۸۷۱/۳	۱۶۷۲۴/۹

جدول پ-۳- بار اصلاح شده اعمال شده بر تیرهای با شکاف

متغیر BEM.

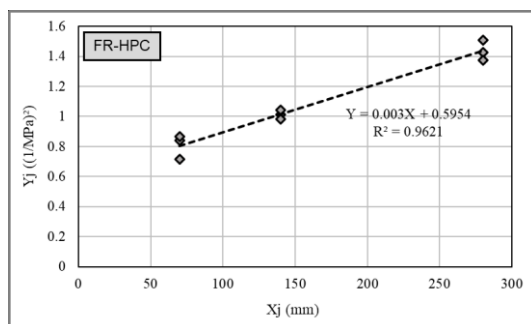
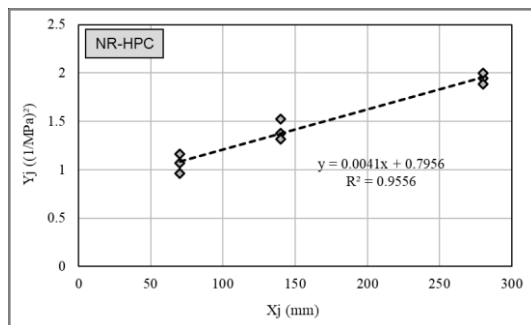
طول شکاف	بار اصلاحی	واحد	NR-HPC	FR-HPC
۸۴ میلیمتر	P_{01}	N	۲۲۷۱/۶	۲۶۳۸/۶
	P_{02}	N	۲۱۸۶/۲	۲۶۸۳/۲
	P_{03}	N	۲۲۹۲/۸	۲۵۹۸/۸
۲۸ میلیمتر	P_{01}	N	۷۹۲۸/۸	۹۷۴۹/۹
	P_{02}	N	۸۳۵۸	۹۶۰۳/۳
	P_{03}	N	۸۵۵۱	۹۸۸۹/۷
۱۴ میلیمتر	P_{01}	N	۱۱۱۹۱/۸	۱۲۴۱۷/۳
	P_{02}	N	۱۰۴۸۱	۱۲۶۰۰
	P_{03}	N	۱۰۹۶۴/۱	۱۲۸۹۲/۱

جدول پ-۴- حداکثر بار اعمال شده بر تیرهای شکاف دار

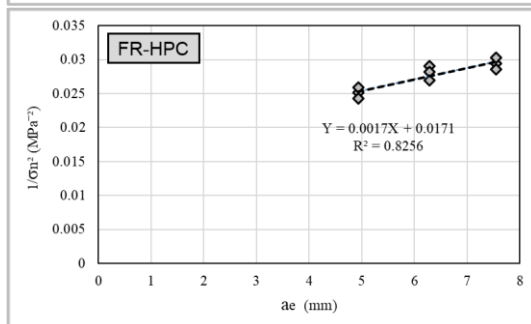
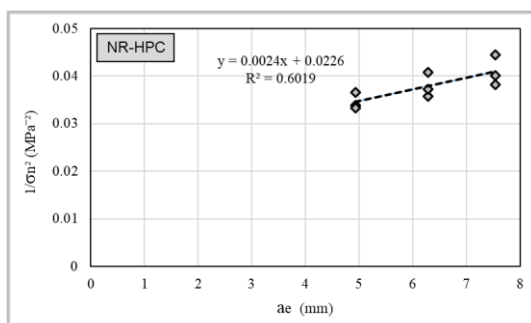
$۱۴۰ \times ۱۴۰ \times ۳۸۰$.

حداکثر بار وارده	واحد	NR-HPC	FR-HPC
P_1	N	۱۵۵۹۰	۱۷۰۶۰
P_2	N	۱۶۱۴۰	۱۷۱۶۰
P_3	N	۱۷۳۷۰	۱۹۲۳۰

شکل پ-۱- برازش خطی تیرهای شکاف دار در SEM.



شکل پ-۲- برازش خطی تیرهای شکاف دار در BEM.



۶- مراجع

- Esfahani M.R. Fracture Characteristics of Three Various Concrete Composites Containing Polypropylene Fibers Through Five Fracture Mechanics Methods. *Materials Testing*, 2023; 65 (1): 10-32.
- [13] Xie C., Cao M., Khan M., Yin H. and Guan J. Review on Different Testing Methods and Factors Affecting Fracture Properties of Fiber Reinforced Cementitious Composites. *Construction and Building Materials*, 2020.
- [14] Ghasemi M., Ghasemi M.R. and Mousavi S.R. Studying the Fracture Parameters and Size Effect of Steel Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete. *Construction and Building Materials*, 2019; 201: 447-460.
- [15] Kazemi M.T., Golsorkhtabar H., Beygi M.H.A. and Gholamitabar M. Fracture Properties of Steel Fiber Reinforced High Strength Concrete Using Work of Fracture and Size Effect Methods. *Construction and Building Materials*, 2017; 142: 482-489.
- [16] Bencardino F., Rizzuti L., Spadea G. and Swamy R.N. Experimental Evaluation of Fiber Reinforced Concrete Fracture Properties. *Composites*, 2010; 41: 17-24.
- [17] RILEM FMC-50. Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams. *Mater Struct* 1985.
- [18] Bazant Z.P. and Kazemi M.T. Determination of Fracture Energy, Process Zone Length and Brittleness Number from Size Effect, with Application to Rock and Concrete. *International Journal of Fracture* 1990; 44: 111-131.
- [19] RILEM TC-89 FMT. Size-Effect Method for Determining Fracture Energy and Process Zone Size of Concrete. *Materials and Structures*, 1990.
- [20] Hu X. and Duan K., Mechanism Behind the Size Effect Phenomenon. *Journal of Engineering Mechanics*, 2010; 136: 60-68.
- [21] ASTM E1290. Standard test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement; 2008
- [22] Anandan S., Islam S. and Abad Khan R. Effect of Steel Fibre Profile on the Fracture Characteristics of Steel Fibre Reinforced Concrete Beams, *Journal of Engineering Research*, 2019; 7 (2): 105-124.
- [23] Shargh Cement Company; <https://www.sharghcement.ir>. 2024.
- [24] Zhikava Chemical Industries; <https://www.zhikava.com>. 2024.
- [25] Beton Shimi Zarin Company; <https://www.betonbs.com>. 2024.
- [26] BS EN 12390. Testing Hardened Concrete. Method of Determination of Compressive Strength
- [1] Bažant Z.P. and Planas J. *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasi-Brittle Materials*. CRC Press, United States of America, 1998.
- [2] Lee S.J., Hong Y., Eom A.H. and Won J. P. Effect of Steel Fibres on Fracture Parameters of Cementitious Composites. *Composite Structures*, 2018; 204 (15): 658-663.
- [3] Mousavi S.M., Ranjbar M.M. and Madandoust R. Combined Effects of Steel Fibers and Water to Cementitious Materials Ratio on the Fracture Behavior and Brittleness of High Strength Concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019; 216: 106517.
- [4] Pirooznia A. and Moradloo A.J. Investigation of Size Effect and Smeared Crack Models in Ordinary and Dam Concrete Fracture Tests. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020; 226: 106863
- [۵] اصفهانی، محمدرضا. مکانیک شکست بتن. چاپ دوم. تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۶.
- [6] Shah S.P., Swartz S.E. and Ouyang C. *Fracture Mechanics of Concrete: Applications of Fracture Mechanics to Concrete, Rock, and Other Quasi-Brittle Materials*. John Wiley & Sons, United States of America, 1995
- [7] Karamloo M., Mazloom M. and Payganeh G. Influences of Water to Cement Ratio on Brittleness and Fracture Parameters of Self-Compacting Lightweight Concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 2016.
- [8] Hosseini Mehrab A. and Esfahani M.R. Experimental Study on Size Effect and Fracture Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Lightweight Aggregate Concrete. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2022; 66 (4): 1278-1293.
- [9] Karamloo M., Mazloom M. and Payganeh G. Effects of Maximum Aggregate Size on Fracture Behaviors of Self-Compacting Lightweight Concrete. *Construction and Building Materials*, 2016; 123: 508-515.
- [10] Sadrmomtazi A., Lotfi-Omran O. and Nikbin I.M. Influence of Cement Content and Maximum Aggregate Size on the Fracture Parameters of Magnetite Concrete Using WFM, SEM and BEM. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020.
- [11] Guneyisi E., Gesoglu M., Ozturan T. and Ipek S. Fracture Behavior and Mechanical Properties of Concrete with Artificial Lightweight Aggregate and Steel Fiber. *Construction and Building Materials*, 2015; 84: 156-168.
- [12] Hosseini Mehrab A., Amirfakhrian S. and

of Concrete Cubes. (BS, Part 3) British Standards Institution; 2009.

[27] ASTM C 496. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. American Standards for Testing and Materials; 2011.

[28] ASTM C469. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. American Society of Testing and Materials; 2004.

[29] Bazant Z.P. and Becq-Giraudon E. Statistical Prediction of Fracture Parameters of Concrete and Implications for Choice of Testing Standard. Cement and Concrete Research, 2002; 32: 529-556.

[30] Guinea G.V., Planas J. and Elices M. Measurement of the Fracture Energy Using Three-Point Bend Tests: Part 1 Influence of Experimental Procedures. Materials and Structures, 1992; 25: 212-218.

[31] Rahmani E., Sharbatdar M.K. and Beygi M.H.A. The Effect of Water-to-Cement Ratio on The Fracture Behaviors and Ductility of Roller Compacted Concrete Pavement (RCCP), Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020; 109: 102753.

[32] Kazemi F., Shafighfard T. and Yoo D.Y. Data-Driven Modeling of Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Concrete: A Critical Review, Archives of Computational Methods in Engineering, 2024; 31: 2049-2078.

Investigating the Impacts of Various Fracture Mechanics Approaches on the Fracture Parameters of High-Performance Concrete

Alireza Hosseini Mehrab

M. Sc., Civil Engineering Faculty, Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad.

Syedmahdi Amirfakhrian

M. Sc., Civil Engineering Faculty, Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad.

Mansour Ghalehnovi *

Professor, Civil Engineering Faculty, Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad.

Abstract

The complexity of relationships and the presentation of various methods are among the main challenges of fracture mechanics of concrete. These challenges have limited the practical application of this science in examining and analyzing concrete structures. As a result, examining and comparing the various parameters of these methods on the fracture behavior of different concretes is very important. In this research, six widely used methods of fracture mechanics, such as work-of-fracture method (WFM), size effect method (SEM), boundary effect method (BEM), stress-displacement curve method (SDCM), the proposed ASTM E1290 standard method, and the Bower fracture model (BFM), were compared and analyzed to examine two main criteria of fracture mechanics, including fracture energy and fracture toughness in high-performance concrete (without fibers and reinforced with hybrid fibers). The results show that the fracture energy and fracture toughness responses in all these methods increased with the addition of fibers to high-performance concrete. Among these, the fracture toughness factor obtained from the ASTM E1290 method showed the smallest increase, at 6.8%, with the addition of fibers to high-performance concrete. Both WFM and SDCM showed more suitable fracture energy results for hybrid fiber-reinforced high-performance concrete. Compared to other methods, SEM and BEM are more suitable for determining the fracture energy of high-performance concrete without fibers due to their high accuracy, simplicity, and lack of parameter dependency on sample dimensions. Additionally, the fracture toughness parameter ratios in the SEM, BEM, BFM, and ASTM are approximately equal to 1.7.

Keywords: Fracture mechanics, Fracture energy, High-performance concrete, Fracture toughness, Size-effect.

* Corresponding Author: Ghalehnovi@um.ac.ir

