

بررسی تأثیر نوع و حداکثر اندازه سبکدانه بر خصوصیات شکست بتن سبک خودتراکم با استفاده از مدل تأثیر مرز

علی صدر ممتازی

استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

حامد پوراحمدی صفت عربانی *

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

چکیده

تأثیر نوع و حداکثر اندازه سبکدانه مصرفی بر خصوصیات شکست بتن سبک خودتراکم بررسی شد. برای این منظور ۹ مخلوط بتن سبک خودتراکم حاوی سبکدانه‌های اسکوریا و لیکا، در سه دسته‌بندی ۱۰۰ درصد اسکوریا - ۰ درصد لیکا، ۵۰ درصد اسکوریا - ۵۰ درصد لیکا و ۰ درصد اسکوریا - ۱۰۰ درصد لیکا و حداکثر اندازه سبکدانه ۹/۵، ۱۲/۵ و ۱۹ میلی‌متر تدارک دیده شد. خصوصیات شکست به روش تأثیر مرز و با استفاده از تیرهای مشابه هندسی با نسبت ثابت عمق شکاف به عمق تیر تعیین گردید. نتایج نشان داد که با افزایش حداکثر اندازه سبکدانه انرژی شکست به طور متوسط ۶/۶ درصد کاهش می‌یابد. همچنین چقرمگی شکست و مقاومت کششی حاصل از روش تأثیر مرز نیز با افزایش d_{max} بطور متوسط به ترتیب ۳/۸ و ۷/۳ درصد کاهش نشان دادند و طول ترک مرجع کمتر از ۸ درصد افزایش نشان داد. با جایگزینی سبکدانه لیکا با اسکوریا، مقدار انرژی شکست، چقرمگی شکست و مقاومت کششی حاصل از روش تأثیر مرز به ترتیب به طور متوسط ۲۰/۱، ۱۹/۱ و ۳۶/۹ درصد افزایش یافتند و طول ترک مرجع بطور متوسط ۲۴/۴ درصد کاهش نشان داد. تمام نمونه‌ها در محدوده مکانیک شکست غیر خطی قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی: مکانیک شکست، بتن سبک خودتراکم، روش تأثیر مرز، اسکوریا، لیکا.

* نویسنده مسئول: h_pourahmadi@yahoo.co.uk

۱- مقدمه

بتن خودتراکم سبک سازه‌ای (LWSCC) ماده مرکبی^۱ است که در آن سنگ‌دانه‌های درشت سبک و سنگ‌دانه‌های ریز معمولی در خمیری با روانی بسیار بالا قرار می‌گیرند. این بتن می‌تواند بدون جداشدگی و آب انداختن، قالب‌های پیچیده را پر کرده و از میان آرماتورهای متراکم جریان یابد [۱، ۲]. در مواد مرکب، رفتار کلی ماده، به اجزای تشکیل دهنده آن و برهم کنش‌های بین آن‌ها بستگی دارد [۳]. به دلیل تفاوت در خصوصیات ظاهری و مقاومت سبک‌دانه‌ها و سنگ‌دانه‌های معمولی، رفتار شکست بتن‌های حاوی سبک‌دانه و بتن‌های معمولی متفاوت از یکدیگر خواهد بود [۴]. در بتن سبک خودتراکم، علاوه بر تاثیر انواع مختلف سبک‌دانه‌های درشت مورد استفاده در بتن، استفاده از حجم بالای مواد پودری بسیار ریز و مقادیر زیاد فوق‌روان‌کننده‌ها، ممکن است نگرانی‌هایی را در مورد تفاوت‌های رفتاری بین این نوع بتن با بتن معمولی، بتن خودتراکم و بتن سبک در میان پژوهشگران ایجاد کند. این تفاوت‌ها در پارامترهای اختلاط ممکن است منجر به تغییراتی در الگوی ترک خوردگی و در نتیجه رفتار مکانیکی و شکست بتن سبک خودتراکم در مقایسه با بتن معمولی و بتن خودتراکم با سنگ‌دانه‌های معمولی شود. در این راستا، تحقیقات زیادی در سراسر جهان برای روشن شدن اثرات مقدار سنگ‌دانه، حداکثر اندازه سنگ‌دانه، نسبت آب به مواد چسباننده، حجم خمیر سیمان، افزودنی‌ها، فوق‌روان‌کننده‌ها، ذرات فوق‌ریز و ریزساختار بتن بر خواص شکست و الگوی ترک خوردگی انواع بتن انجام شده است [۱، ۵-۱۵]. تحقیقات پیشین در خصوص رفتار شکست بتن نشان داده است که خواص ناحیه انتقال^۲ (ITZ) به‌طور قابل توجهی به خصوصیات سنگ‌دانه‌ها مانند استحکام، شکل، بافت سطحی و اندازه بستگی دارد [۱۶-۱۸].

در بتن خودتراکم با سنگ‌دانه‌های معمولی با افزایش نسبت آب به مواد چسباننده انرژی شکست کاهش می‌یابد [۱۳، ۱۹] و روند مشابهی نیز برای بتن سبک خودتراکم با سبک‌دانه لیکا [۵] و بتن سبک خودتراکم حاوی آب مغناطیسی [۱۰، ۱۱] گزارش شده است.

با افزایش حداکثر اندازه سنگ‌دانه مصرفی از ۹/۵ به ۱۹ میلی‌متر،

انرژی شکست بتن خودتراکم معمولی افزایش می‌یابد [۱۴]، در حالی که در بتن خودتراکم حاوی الیاف فولادی [۲۰]، با افزایش اندازه سنگ‌دانه از ۹/۵ تا ۱۲/۵ میلی‌متر انرژی شکست افزایش می‌یابد و پس از آن با افزایش اندازه سنگ‌دانه از ۱۲/۵ به ۱۹ میلی‌متر انرژی شکست کاهش نشان می‌دهد.

کرملو و همکاران [۱] در بررسی بتن سبک خودتراکم با سبک‌دانه لیکا مشاهده نمودند که انرژی اولیه شکست و طول ناحیه صدمه دیده با افزایش حداکثر اندازه سنگ‌دانه مصرفی از ۹/۵ به ۱۹ میلی‌متر افزایش می‌یابد. از سوی دیگر سیم و همکاران [۲۱] بیان داشتند در صورتی که حداکثر اندازه سبک‌دانه‌های مصرفی، بزرگتر از ۸ میلی‌متر باشد، تاثیر حداکثر اندازه سبک‌دانه‌ها بر انرژی کلی شکست و طول ناحیه صدمه دیده، ناچیز خواهد بود. این یافته‌ها نشان می‌دهند که سبک‌دانه‌های مختلف ممکن است ویژگی‌های شکست بتن را به صورت‌های متناقضی تغییر دهند و تحقیقات بیشتری در این زمینه مورد نیاز می‌باشد. با وجود تحقیقات قابل توجه صورت گرفته در مورد خصوصیات بتن سبک خودتراکم، هنوز روابط بین ویژگی‌های سبک‌دانه و خصوصیات بتن سبک خودتراکم از برخی جهات بطور کامل درک نشده است [۲۲].

انواع سبک‌دانه‌های مورد استفاده در بتن که هر یک خواص مختص به خود را دارند، خصوصیات شکست بتن سبک خودتراکم را تحت تاثیر قرار می‌دهند، بنابراین مطالعه تاثیر نوع، مقدار و حداکثر اندازه سبک‌دانه مصرفی در بتن سبک خودتراکم می‌تواند به درک همه‌جانبه عملکرد سازه‌ای این بتن کمک نماید. علیرغم پذیرش گسترده بتن سبک خودتراکم و تحقیقات گسترده در مورد ویژگی‌های مکانیکی آن، مطالعات اندکی در مورد پارامترهای شکست آن انجام شده است، که اکثریت آنها بر روی سبک‌دانه لیکا متمرکز شده‌اند و مطالعات بر روی خصوصیات شکست بتن سبک خودتراکم حاوی اسکوریا، در صورت وجود، بسیار نادر است. به این منظور، در این پژوهش اثر حداکثر اندازه سبک‌دانه (۹/۵، ۱۲/۵ و ۱۹ میلی‌متر) و اثر نوع و مقدار سبک‌دانه (بررسی نتایج جایگزینی سبک‌دانه اسکوریا با لیکا، در سه دسته‌بندی ۱۰۰ درصد اسکوریا - ۰ درصد لیکا، ۵۰ درصد اسکوریا - ۵۰ درصد لیکا و ۰ درصد اسکوریا - ۱۰۰ درصد لیکا)

^۱ composite material

^۲ interfacial Transition Zone

$$\sigma_n = \frac{K_{IC}}{A(\alpha) \cdot Y(\alpha) \cdot \sqrt{\pi} \cdot a}$$

$$= \frac{f_t}{\sqrt{\frac{(A(\alpha) \cdot Y(\alpha))^2}{1.12} \cdot a}}$$

$$= \frac{f_t}{\sqrt{\frac{1}{\pi \cdot (1.12)^2} \cdot \left(\frac{K_{IC}}{f_t}\right)^2}}$$

$$= \frac{f_t}{\sqrt{\frac{B(\alpha) \cdot a}{a_{\infty}^*}}}$$

الف

(۳)

یا

$$\sigma_n = \frac{f_t}{\sqrt{\frac{a_e}{a_{\infty}^*}}}$$

ب

ترک معادل a_e و $B(\alpha)$ که برای سادگی روابط (۳-الف و ب) ارائه شده‌اند از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$a_e = B(\alpha) \cdot a = \left(\frac{(1-\alpha)^2 \cdot Y(\alpha)}{1.12}\right)^2 \cdot a \quad (۴)$$

$$B(\alpha) = \left(\frac{A(\alpha) \cdot Y(\alpha)}{1.12}\right)^2$$

همچنین، در روابط (۳-الف و ب)، f_t مقاومت کششی و a_{∞}^* طول ترک مرجع می‌باشد که از رابطه (۵) قابل محاسبه است:

$$a_{\infty}^* = 0.25 \left(\frac{K_{IC}}{f_t}\right)^2 \quad (۵)$$

پارامتر هندسی $Y(\alpha)$ که در معادلات (۲) تا (۴) مورد استفاده قرار گرفته است، همان پارامتر $F(\alpha)$ معرفی شده در *RILEM TC 89-FMT* [۲۵] می‌باشد؛ که برای نسبت طول دهانه به ارتفاع تیر برابر با ۲/۵، از رابطه (۶) بدست می‌آید. برای سایر نسبت‌های طول به ارتفاع مقطع نیز می‌توان از روابط موجود در مرجع نامبرده استفاده کرد.

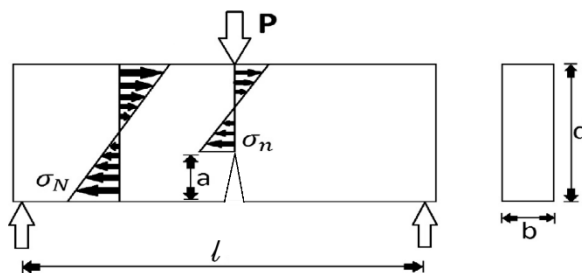
$$Y(\alpha) = \frac{1.0 - 2.5\alpha + 4.49\alpha^2 - 3.98\alpha^3 + 1.33\alpha^4}{(1-\alpha)^{3/2}} \quad (۶)$$

بنابراین ترک معادل a_e را می‌توان برای هر نسبت α محاسبه نمود. معادله (۳-ب) تنها در صورت اعمال معیار K_{IC} یا $a_e/a_{\infty}^* \gg 1$ صحیح می‌باشد و در حالت کلی، شکست شبه‌ترد برای نمونه‌های کوچک را می‌توان بصورت زیر بیان نمود:

بر خصوصیات شکست بتن سبک خودتراکم مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- تعیین پارامترهای شکست

روش‌های مختلفی برای تعیین پارامترهای شکست بتن وجود دارد. یکی از بهترین این روش‌ها، روش تأثیر مرز^۱ (*BEM*) می‌باشد که توسط هو و دوآن^۲ [۲۳، ۲۴] ارائه شده است. ایشان با بررسی اندرکنش بین *FPZ* و نزدیکترین مرز نمونه (تأثیر مرز) نشان دادند که وجود ناحیه صدمه دیده (*FPZ*)، عامل اصلی شکست شبه‌ترد، و انتقال از حالت شکست با معیار مقاومت^۳ به شکست با معیار چقرمگی^۴ می‌باشد. این انتقال، حتی در صورت ثابت بودن اندازه مشخصه نمونه‌های مورد بررسی نیز می‌تواند رخ دهد؛ یعنی اندازه نمونه، عامل تعیین‌کننده برای اثر اندازه نخواهد بود. به عبارت دیگر، اندازه نمونه تنها زمانی رفتار شکست را تحت تأثیر قرار می‌دهد که فاصله *FPZ* تا نزدیک‌ترین مرز نمونه را تغییر دهد.



شکل ۱- مقطع دارای ترک لبه‌ای کوچک تحت خمش سه‌نقطه‌ای [۲۳]

در یک تیر تحت خمش سه نقطه‌ای (شکل ۱)، در حالت کلی، $\sigma_n \neq \sigma_N$ بوده و توسط رابطه زیر به یکدیگر مرتبط می‌باشند:

$$\sigma_N = A(\alpha) \cdot \sigma_n = (1-\alpha)^2 \cdot \sigma_n \quad (۱)$$

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

در رابطه فوق، $\alpha = a/d$ ، طول نسبی ترک اولیه می‌باشد. اگر معیار چقرمگی (K_{IC}) مکانیک شکست الاستیک خطی (*LEFM*) اعمال شود، مقاومت اسمی σ_N و K_{IC} با یکدیگر مرتبط هستند:

$$K_{IC} = \sigma_N \cdot Y(\alpha) \cdot \sqrt{\pi} \cdot a \quad (۲)$$

مقاومت اسمی σ_n را می‌توان از روابط (۱) و (۲) بدست آورد:

^۴ Toughness-dominant fracture

^۵ Equivalent crack

^۱ Boundary Effect Method

^۲ Hu and Duan

^۳ Strength-dominant fracture

لیکا می‌باشد. اسکوریا از معدن قروه کردستان تهیه شد و لیکای مورد استفاده از کارخانه لیکای ایران خریداری گردید. هر دوی این سبک‌دانه‌ها ضوابط *ASTM C330* [۲۷] را تامین می‌نمایند.

جدول ۱- جزئیات دانه‌بندی ماسه مصرفی

نام الک	سایز الک (mm)	ASTM C33		درصد عبوری ماسه مصرفی
		حد پایین	حد بالا	
۴	۴/۷۵	۹۵	۱۰۰	۹۶/۷۷
۸	۲/۳۶	۸۰	۱۰۰	۸۲/۱۶
۱۶	۱/۱۸	۵۰	۸۵	۶۰/۱۰
۳۰	۰/۶	۲۵	۶۰	۳۶/۲۴
۵۰	۰/۳	۵	۳۰	۱۵/۴۶
۱۰۰	۰/۱۵	۰	۱۰	۳/۶۵

چگالی در حالت اشباع با سطح خشک برای اسکوریا و لیکا طبق استاندارد *ASTM C127* [۲۸] به ترتیب 1580 و 1125 Kg/m^3 و جذب آب ۲۴ ساعته آن‌ها به ترتیب $15/1$ و $13/8$ درصد تعیین شد. همچنین جذب آب نیم‌ساعته اسکوریا و لیکا به ترتیب $10/2$ و $8/6$ درصد به دست آمد. با توجه به اینکه یکی از اهداف این پژوهش بررسی تاثیر نوع سبک‌دانه مصرفی بر مشخصات بتن سبک خودتراکم می‌باشد، لازم است برای قابل مقایسه بودن نتایج، مصالح مصرفی از دانه‌بندی یکسان برخوردار باشند. به همین منظور هریک از سبک‌دانه‌های اسکوریا و لیکا بر اساس اندازه آن‌ها جداسازی گردیدند. سبک‌دانه‌ها با استفاده از الک‌های استاندارد به چهار گروه $12/5$ تا 19 میلیمتر، $9/5$ تا $12/5$ میلیمتر، $4/75$ تا $9/5$ میلیمتر، $2/63$ تا $4/75$ میلیمتر تقسیم‌بندی و نگهداری شدند. در هنگام ساخت مخلوط‌های بتن، ترکیبی از این سبک‌دانه‌های جداسازی شده مطابق جدول ۲ مورد استفاده قرار گرفت تا الزامات *ASTM C330* [۲۷] را تامین نماید.

میکرو سیلیس مورد استفاده محصول شرکت فروآلیاژ ایران بوده که وزن مخصوص آن 2200 Kg/m^3 می‌باشد این افزودنی معدنی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان، بصورت ده درصد وزنی سیمان مصرفی در کلیه مخلوط‌های بتنی مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش از سنگ آهک مش ۴۰۰ (عبوری از الک ۳۸ میکرون) محصول کارخانه آروشا در قم با وزن مخصوص 2700 Kg/m^3 استفاده شده است. فوق روان‌کننده مورد استفاده در این پژوهش، با نام تجاری *FARCO PLAST P10N*

$$\sigma_n = \frac{f_t}{\sqrt{1 + \frac{a_e}{a_{\infty}^*}}} \quad (7)$$

معادله (۷) را می‌توان بصورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{1}{\sigma_n^2} = \frac{1}{f_t^2} + \frac{1}{f_t^2} \frac{a_e}{a_{\infty}^*} \quad (8)$$

بر اساس معادله فوق و تحلیل رگرسیون خطی نتایج حاصل از آزمایش می‌توان مقادیر f_t و a_{∞}^* را بدست آورد و در نهایت مقدار K_{IC} را بر اساس a_{∞}^* تعیین نمود.

همانطور که ذکر شد، به عقیده هو و دوان [۲۳] مکانیسم واقعی اثر اندازه ظاهری بر شکست شبه‌ترد، به دلیل تغییر در اندازه عضو نیست. به عبارت دیگر، اندازه سازه تنها در صورتی بر رفتار شکست تاثیر می‌گذارد که باعث تغییر در فاصله *FPZ* تا نزدیک‌ترین مرز آزاد نمونه شود. بنابراین ایشان روابط روش تاثیر مرز را برای بررسی نمونه‌های با اندازه ثابت، اما با طول ترک‌های متفاوت ارائه نمودند. با این حال هو و دوان اظهار داشتند که از روابط روش تاثیر مرز می‌توان برای بررسی نمونه‌های با اندازه مشابه که در آن‌ها نسبت $\alpha = a_0/d$ ثابت باشد، استفاده نمود. بنابراین در این مطالعه، از نمونه‌های دارای اندازه مشابه در دو بعد (با نسبت‌های ۱، ۲، ۴ و ۸) و نسبت ثابت عمق شکاف به عمق تیر و برابر با $0/2$ که طبق دستورالعمل دستورالعمل *RILEM TC89-FMT* [۲۵] ساخته شده‌اند برای تعیین خصوصیات شکست نمونه‌ها استفاده شده است.

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- مصالح مصرفی و طراحی مخلوط‌ها

در این پژوهش، سیمان پرتلند تپ دو محصول کارخانه صنایع سیمان گیلان سبز (دپلمان) مورد استفاده قرار گرفته است. ریزدانه مورد استفاده در ساخت مخلوط‌های این پژوهش، ماسه طبیعی بوده و از سبک‌دانه‌ها به عنوان درشتدانه (شن) استفاده شده است. ماسه طبیعی رودخانه‌ای مورد استفاده از شرکت تولیدی کانال پیش ساخته، لوله و قطعات بتنی گیلان تهیه گردید. وزن مخصوص اشباع با سطح خشک طبق استاندارد *ASTM C128* [۲۶] برابر با 2615 Kg/m^3 و درصد جذب آب آن $2/4$ تعیین گردید. جزئیات مربوط به دانه‌بندی ماسه مصرفی در جدول ۱ ارائه شده است. درشت‌دانه مصرفی در این پژوهش شامل دو سبک‌دانه اسکوریا و

محصول شرکت شیمی ساختمان است که از نسل سوم فوق ریزه‌ها و بر پایه تکنولوژی پلی کربکسیلات اتر می‌باشد. این محصول مطابق با استاندارد *ASTM C494* [۲۹]، از نوع *F* بوده در صد کل چسباننده مصرفی در بتن توصیه شده است. و میزان مصرف این فوق روان کننده بسته به مقدار سیمان مصرفی، ریزی دانه‌های سیمان و برخی پارامترهای دیگر، بین ۰/۱ تا ۱/۶

جدول ۲- دانه‌بندی سبک‌دانه‌های مصرفی

حداکثر اندازه سبک‌دانه (میلیمتر)						اندازه الک (میلیمتر)
۱۹		۱۲/۵		۹/۵		
ASTM C330	درصد عبوری مصرفی	ASTM C330	درصد عبوری مصرفی	ASTM C330	درصد عبوری مصرفی	
۱۰۰-۹۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۹
---	۷۰	۱۰۰-۹۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۲/۵
۵۰-۱۰	۴۰	۸۰-۴۰	۵۰	۱۰۰-۸۰	۱۰۰	۹/۵
۱۵-۰	۱۰	۲۰-۰	۱۰	۴۰-۵	۱۰	۴/۷۵
---	۰	۱۰-۰	۰	۲۰-۰	۰	۲/۳۶

جدول ۳- مخلوط‌های بتن سبک خودتراکم مورد بررسی

S0-L100-D19-W40	S0-L100-D12.5-W40	S0-L100-D9.5-W40	S50-L50-D19-W40	S50-L50-D12.5-W40	S50-L50-D9.5-W40	S100-L0-D19-W40	S100-L0-D12.5-W40	S100-L0-D9.5-W40	ترکیبات
۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	سیمان (Kg/m ³)
۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	میکروسیلیس (Kg/m ³)
۶۵۰	۶۵۰	۶۵۰	۶۵۰	۶۵۰	۶۵۰	۶۵۰	۶۵۰	۶۵۰	ماسه (Kg/m ³)
۰	۰	۰	۹۸/۴	۱۲۳	۲۴۶	۱۹۷/۲	۲۴۶/۵	۴۹۳	اسکوریا (Kg/m ³) (۹/۵-۲/۳۶)
۰	۰	۰	۷۳/۸	۱۲۳	۰	۱۴۷/۹	۲۴۶/۵	۰	اسکوریا (Kg/m ³) (۱۲/۵-۹/۵)
۰	۰	۰	۷۳/۸	۰	۰	۱۴۷/۹	۰	۰	اسکوریا (Kg/m ³) (۱۹-۱۲/۵)
۱۴۰/۴	۱۷۵/۵	۳۵۱	۷۰	۸۷/۵	۱۷۵	۰	۰	۰	لیکا (Kg/m ³) (۹/۵-۲/۳۶)
۱۰۵/۳	۱۷۵/۵	۰	۵۲/۵	۸۷/۵	۰	۰	۰	۰	لیکا (Kg/m ³) (۱۲/۵-۹/۵)
۱۰۵/۳	۰	۰	۵۲/۵	۰	۰	۰	۰	۰	لیکا (Kg/m ³) (۱۹-۱۲/۵)
۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	پودر سنگ آهک (Kg/m ³)
۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	آب (Kg/m ³)
۵/۰۰	۵/۱۵	۵/۱۵	۵/۲۵	۵/۵۰	۵/۵۰	۵/۷۵	۵/۷۵	۵/۹۰	فوق روان کننده (Kg/m ³)
۴۴۰	۴۴۰	۴۴۰	۴۴۰	۴۴۰	۴۴۰	۴۴۰	۴۴۰	۴۴۰	حجم خمیر (liters/m ³)
۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	آب به چسباننده (وزنی)
۰/۸۳	۰/۸۳	۰/۸۳	۰/۸۳	۰/۸۳	۰/۸۳	۰/۸۳	۰/۸۳	۰/۸۳	آب به پودر (حجمی)
۱۹۰۲	۱۸۹۸	۱۸۹۸	۱۹۷۱	۱۹۷۰	۱۹۷۳	۲۰۴۵	۲۰۴۶	۲۰۵۰	وزن مخصوص (Kg/m ³)
۷۴	۷۳	۷۱	۷۵	۷۴	۷۰	۷۴	۷۲	۷۰	جریان اسلامپ (cm)
۲/۸	۳/۳	۴/۰	۳/۶	۴/۳	۴/۷	۴/۳	۴/۹	۵/۴	زمان T50 (s)
۰/۹۵	۰/۹۳	۰/۹۰	۰/۹۴	۰/۹۲	۰/۸۸	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۲	جعبه L شکل (h ₂ /h ₁)
۹/۵	۱۱/۴	۱۳/۲	۱۳/۸	۱۴/۲	۱۷/۴	۱۸/۹	۱۹/۶	۲۲/۵	قیف V شکل (s)

جدول ۴- ابعاد تیرهای ساخته شده برای بررسی خصوصیات شکست

حداکثر اندازه سنگ‌دانه	عمق تیر d (mm)	عرض تیر b (mm)	طول تیر L (mm)	طول دهانه l (mm)	عمق شکاف a ₀ (mm)
	۳۰		۸۰	۷۵	۶
۹/۵	۶۰	۳۰	۱۶۰	۱۵۰	۱۲
	۱۲۰		۳۲۰	۳۰۰	۲۴
	۲۴۰		۶۴۰	۶۰۰	۴۸
	۴۰		۱۰۷	۱۰۰	۸
۱۲/۵	۸۰	۴۰	۲۱۴	۲۰۰	۱۶
	۱۶۰		۴۲۷	۴۰۰	۳۲
	۳۲۰		۸۵۴	۸۰۰	۶۴
	۶۰		۱۶۰	۱۵۰	۱۲
۱۹	۱۲۰	۶۰	۳۲۰	۳۰۰	۲۴
	۲۴۰		۶۴۰	۶۰۰	۴۸
	۴۸۰		۱۲۸۰	۱۲۰۰	۹۶

۴- نتایج و بحث

نتایج بارهای اوج اصلاح شده تیرهای شکاف دار ساخته شده در جدول ۵ ارائه شده است. همچنین عوامل هندسی مربوط به روش تاثیر مرز و طول ترک معادل برای نمونه‌های مورد بحث در جدول ۶ نشان داده شده است. برای تعیین خصوصیات اصلی شکست از تحلیل رگرسیون استفاده شد. شکل ۲ یک نمونه از نمودار تحلیل رگرسیون خطی مربوط به نمونه‌های ساخته شده از مخلوط *SI100* در جدول ۷ ارائه شده است. پارامترهای اصلی شکست بدست آمده با استفاده از مدل تاثیر مرز در جدول ۸ قابل مشاهده است. همان‌طور که در جدول ۸ و شکل ۳ ملاحظه می‌شود، مقدار انرژی شکست (*G_f*) با افزایش حداکثر اندازه سبک‌دانه از ۹/۵ تا ۱۹ میلیمتر به طور متوسط ۶/۶ درصد کاهش می‌یابد. مشابه این روند برای چقرمگی شکست (*K_{IC}*) و مقاومت کششی حاصل از روش تاثیر مرز (*f_t*) نیز مشاهده می‌گردد، و *K_{IC}* و *f_t* نیز با افزایش *d_{max}* بطور متوسط به ترتیب ۳/۸ و ۷/۳ درصد کاهش نشان می‌دهند (شکل ۴ و شکل ۵). این مشاهدات بر خلاف روند تغییرات گزارش شده برای بتن معمولی، بتن خودتراکم با سنگ‌دانه‌های معمولی، بتن پرمقاومت و بتن سنگین می‌باشد. صدر ممتازی و همکاران [۳۳]

۹ مخلوط بتن سبک خودتراکم برای بررسی تاثیر نوع و حداکثر اندازه سبک‌دانه مصرفی بر خصوصیات بتن سبک خودتراکم تدارک دیده شد که جزئیات مخلوط‌ها به همراه خصوصیات حالت تازه آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، سه دسته‌بندی برای مقدار سبک‌دانه (۱۰۰٪ اسکوریا - ۵۰٪ اسکوریا، ۵۰٪ لیکا - ۱۰۰٪ لیکا) به منظور بررسی تاثیر نوع و مقدار سبک‌دانه در نظر گرفته شده است. بر اساس ترکیبات موجود در هر مخلوط، به هر کدام از مخلوط‌ها یک نام اختصاری اختصاص داده شده است. به عنوان مثال مخلوط *S50-L50-D12.5-W40* حاوی ۵۰٪ اسکوریا، ۵۰٪ لیکا، با حداکثر اندازه سنگ‌دانه ۱۲/۵ میلیمتر و نسبت آب به چسباننده ۰/۴ می‌باشد.

۳-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها و روش انجام آزمایش‌ها

نحوه ساخت مخلوط‌ها، خصوصیات حالت تازه مخلوط‌های بتن سبک خودتراکم مورد بررسی، و همچنین خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی شکافت به روش برزلی و ضریب ارتجاعی به تفصیل در مرجع [۳۰] مورد بررسی قرار گرفته است. مقاومت فشاری مخلوط‌ها مربوط به نمونه مکعبی $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ می‌باشد که بر اساس استاندارد *BS EN 12390-3* [۳۱] در سن ۲۸ روز تعیین شده است، و مدول الاستیسیته مخلوط‌ها در سن ۲۸ روز بر اساس استاندارد *ASTM C469* [۳۲] و با آزمایش بر روی سه نمونه اشباع با سطح خشک استوانه‌ای $150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ بدست آمده است. برای تعیین خصوصیات شکست هر یک از مخلوط‌های بتن سبک خودتراکم مورد بررسی، از تیرهای مشابه هندسی، با چهار اندازه مختلف استفاده شد. در مخلوط‌های حاوی درشتدانه با حداکثر اندازه ۹/۵ mm، ۱۲/۵ mm و ۱۹ mm، عرض تیرها به ترتیب ۳۰، ۴۰ و ۶۰ میلیمتر می‌باشد. ابعاد تیرها در جدول ۴ نشان داده شده است.

نسبت عمق شکاف به عمق (*a₀/d*) کلیه تیرها برابر با ۰/۲ می‌باشد. شکاف وسط طول تیر، در هنگام بتن‌ریزی و با قرار دادن ورق به ضخامت ۳ میلیمتر در قالب، ایجاد شد. کلیه تیرهای شکاف دار با استفاده از دستگاه یونیورسال دارای سیستم سروو الکتریک و ظرفیت *KN 150* تحت آزمایش خمش ۳ نقطه‌ای با تغییر مکان ثابت قرار گرفتند و بار اوج تیرها ثبت گردید.

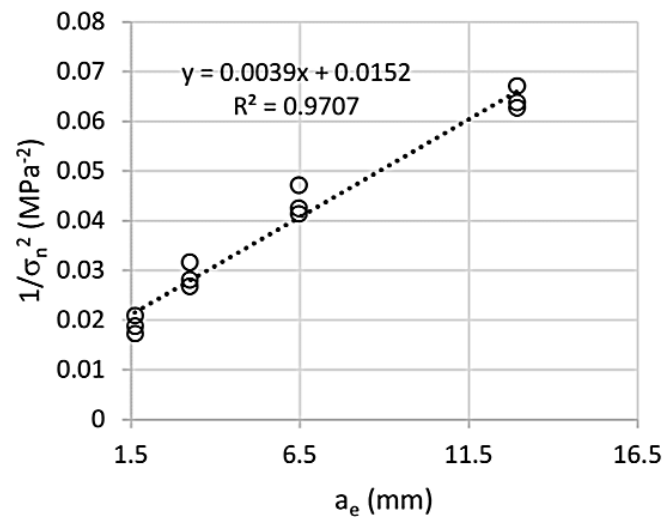
برای بتن سنگین به ترتیب ۶۷ و ۳۰ درصد افزایش در Gf و KIC [۳۴] و بتن خودتراکم با سنگدانه معمولی [۱۴] نیز افزایش انرژی حاصل از روش تأثیر مرز را با افزایش حداکثر سنگدانه مصرفی از شکست (Gf) و چقرمگی شکست (KIC) حاصل از روش اثر اندازه، ۱۲/۵ به ۲۵ میلیمتر، گزارش نموده‌اند. همچنین برای بتن پرمقاومت با افزایش حداکثر اندازه سبکدانه گزارش شده است.

جدول ۵- مقادیر بار اوج اصلاح شده تیرها

نام مخلوط	مقاومت فشاری (MPa)	ارتفاع تیر، d (mm)	بار اوج اصلاح شده، P_0 (N)		
			تیر ۱	تیر ۲	تیر ۳
S100-L0-D9.5-W40	۴۹/۷	۳۰	۱۱۰۹	۱۰۷۱	۱۱۴۳
		۶۰	۱۷۸۶	۱۹۱۵	۱۸۵۹
		۱۲۰	۲۹۵۹	۳۰۸۴	۲۹۰۸
		۲۴۰	۵۰۱۸	۴۸۴۶	۴۷۷۴
S100-L0-D12.5-W40	۴۷/۳	۴۰	۱۸۲۶	۱۸۹۹	۱۸۷۵
		۸۰	۲۹۱۵	۲۸۳۶	۲۷۲۲
		۱۶۰	۴۶۴۴	۴۴۶۷	۴۷۰۹
		۳۲۰	۷۵۷۹	۷۲۲۱	۷۴۶۷
S100-L0-D19-W40	۴۶/۳	۶۰	۳۶۸۶	۳۹۳۷	۳۸۲۷
		۱۲۰	۵۷۶۷	۵۴۲۷	۵۵۵۹
		۲۴۰	۸۲۸۳	۸۳۷۱	۸۶۲۱
		۴۸۰	۱۳۸۷۷	۱۳۳۰۲	۱۳۹۶۱
S50-L50-D9.5-W40	۴۲/۲	۳۰	۹۸۵	۱۰۵۵	۱۰۲۱
		۶۰	۱۶۳۹	۱۶۸۷	۱۵۹۲
		۱۲۰	۲۷۶۱	۲۷۱۷	۲۵۹۳
		۲۴۰	۴۵۶۶	۴۳۶۴	۴۴۷۶
S50-L50-D12.5-W40	۴۰/۹	۴۰	۱۷۶۸	۱۸۰۹	۱۷۰۶
		۸۰	۲۴۵۳	۲۶۲۵	۲۵۰۲
		۱۶۰	۴۱۳۴	۴۲۸۲	۴۳۵۱
		۳۲۰	۶۶۸۹	۷۰۲۳	۶۹۰۸
S50-L50-D19-W40	۴۰/۶	۶۰	۳۷۸۱	۳۶۹۸	۳۵۹۴
		۱۲۰	۴۹۱۳	۵۱۳۲	۵۰۶۱
		۲۴۰	۷۶۱۲	۷۸۸۲	۷۸۱۴
		۴۸۰	۱۳۰۹۸	۱۲۹۷۲	۱۲۵۱۱
S0-L100-D9.5-W40	۳۲/۴	۳۰	۸۴۲	۸۸۸	۸۷۳
		۶۰	۱۳۸۹	۱۴۱۲	۱۳۴۶
		۱۲۰	۲۲۸۳	۲۳۶۷	۲۳۵۱
		۲۴۰	۳۹۳۱	۳۸۹۴	۴۰۰۳
S0-L100-D12.5-W40	۳۳/۰	۴۰	۱۳۳۱	۱۳۹۹	۱۲۷۸
		۸۰	۲۳۱۳	۲۴۶۳	۲۴۰۵
		۱۶۰	۳۵۹۳	۳۶۸۴	۳۷۴۹
		۳۲۰	۶۲۸۷	۶۰۶۴	۵۹۷۲
S0-L100-D19-W40	۳۲/۴	۶۰	۲۸۲۹	۳۱۰۶	۳۰۰۷
		۱۲۰	۴۶۰۳	۴۵۱۷	۴۳۹۲
		۲۴۰	۶۹۱۹	۶۶۲۸	۶۸۸۲
		۴۸۰	۱۱۱۸۶	۱۱۶۳۷	۱۱۵۲۸

جدول ۶- عوامل هندسی و طول ترک معادل تیرها

a_e	$B(\alpha)$	$F(\alpha)$	a_0/d	عمق تیر، d (mm)	نام مخلوط
۱/۶۲	۰/۲۶۹۴	۰/۹۰۸۲	۰/۲	۳۰	S100-L0-D9.5-W40
۳/۲۳				۶۰	S50-L50-D9.5-W40
۶/۴۶				۱۲۰	S0-L100-D9.5-W40
۱۲/۹۳				۲۴۰	
۲/۱۵	۰/۲۶۹۴	۰/۹۰۸۲	۰/۲	۴۰	S100-L0-D12.5-W40
۴/۳۱				۸۰	S50-L50-D12.5-W40
۸/۶۲				۱۶۰	S0-L100-D12.5-W40
۱۷/۲۴				۳۲۰	
۳/۲۳	۰/۲۶۹۴	۰/۹۰۸۲	۰/۲	۶۰	S100-L0-D19-W40
۶/۴۶				۱۲۰	S50-L50-D19-W40
۱۲/۹۳				۲۴۰	S0-L100-D19-W40
۲۵/۸۶				۴۸۰	



شکل ۲- نمودار تحلیل رگرسیون خطی برای تیرهای ساخته شده از مخلوط S100-L0-D9.5-W40

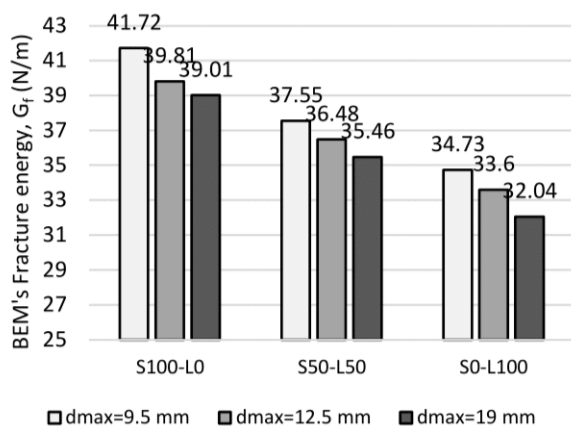
جدول ۷- نتایج تحلیل رگرسیون کلیه تیرهای مورد بررسی

R^2	C (MPa ⁻²)	A (mm ⁻¹ MPa ⁻²)	نام مخلوط
۰/۹۷۰۷	۰/۰۱۵۲	۰/۰۰۳۹	S100-L0-D9.5-W40
۰/۹۷۲۰	۰/۰۱۶۸	۰/۰۰۴۲	S100-L0-D12.5-W40
۰/۹۶۴۷	۰/۰۱۷۷	۰/۰۰۴۳	S100-L0-D19-W40
۰/۹۴۶۳	۰/۰۱۹۵	۰/۰۰۴۶	S50-L50-D9.5-W40
۰/۹۵۹۱	۰/۰۲۰۶	۰/۰۰۴۸	S50-L50-D12.5-W40
۰/۹۹۵۰	۰/۰۲۲۴	۰/۰۰۵۰	S50-L50-D19-W40
۰/۹۵۴۷	۰/۰۲۸۹	۰/۰۰۵۶	S0-L100-D9.5-W40
۰/۹۷۰۶	۰/۰۳۰۷	۰/۰۰۵۸	S0-L100-D12.5-W40
۰/۹۵۱۹	۰/۰۳۳۸	۰/۰۰۶۱	S0-L100-D19-W40

جدول ۸- پارامترهای اصلی شکست حاصل از روش تأثیر مرز

نام مخلوط	f_c (MPa)	E (GPa)	f_t (MPa)	a_{∞}^* (mm)	K_{IC} (MPa.mm ^{0.5})	G_f (N/m)
S100-L0-D9.5-W40	۴۹/۷	۲۴/۰۵۶	۸/۱۱	۳/۸۸	۳۱/۶۸	۴۱/۷۲
S100-L0-D12.5-W40	۴۷/۳	۲۳/۷۵۳	۷/۷۱	۴/۰۳	۳۰/۷۵	۳۹/۸۱
S100-L0-D19-W40	۴۶/۳	۲۳/۷۲۹	۷/۵۱	۴/۱۶	۳۰/۴۲	۳۹/۰۱
S50-L50-D9.5-W40	۴۲/۲	۲۲/۵۹۶	۷/۱۷	۴/۱۹	۲۹/۱۳	۳۷/۵۵
S50-L50-D12.5-W40	۴۰/۹	۲۲/۴۵۰	۶/۹۶	۴/۲۸	۲۸/۶۲	۳۶/۴۸
S50-L50-D19-W40	۴۰/۶	۲۲/۴۱۵	۶/۶۸	۴/۵۲	۲۸/۱۹	۳۵/۴۶
S0-L100-D9.5-W40	۳۴/۲	۲۰/۲۴۸	۵/۸۹	۵/۱۵	۲۶/۵۲	۳۴/۷۳
S0-L100-D12.5-W40	۳۳/۰	۲۰/۱۸۸	۵/۷۱	۵/۲۹	۲۶/۰۴	۳۳/۶۰
S0-L100-D19-W40	۳۲/۴	۲۰/۱۰۱	۵/۴۴	۵/۵۳	۲۵/۳۸	۳۲/۰۴

انرژی اولیه شکست (G_f) حاصل از روش اثر اندازه را با افزایش حداکثر اندازه سبکدانه‌ها از ۹/۵ به ۱۹ میلی‌متر گزارش نمودند. در جدول ۸ و شکل ۳ تا شکل ۵ همچنین مشاهده می‌شود که با جایگزینی سبکدانه لیکا با اسکوریا، مقدار انرژی شکست (G_f)، چقرمگی شکست (K_{IC}) و مقاومت کششی حاصل از روش تأثیر مرز (f_t) به ترتیب به‌طور متوسط ۲۰/۱، ۱۹/۱ و ۳۶/۹ درصد افزایش می‌یابد.



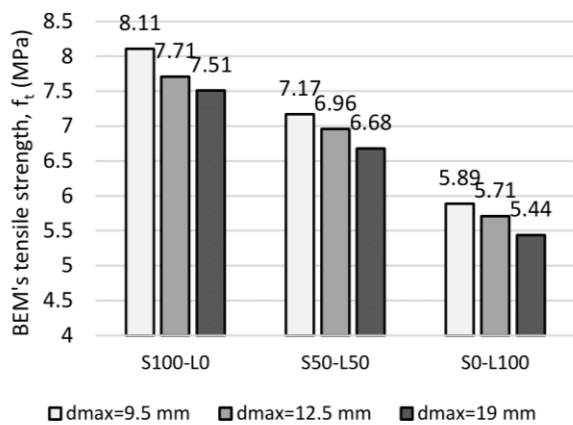
شکل ۳- تغییرات انرژی شکست G_f در مقابل حداکثر اندازه سبکدانه مصرفی

تحقیقات نشان داده است که یک رابطه قوی بین مقاومت فشاری و انرژی شکست در انواع مختلف بتن وجود دارد [۱۳، ۳۷]، و همان‌طور که در جدول ۸ مشاهده می‌شود و در مرجع [۳۰] برای خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های مورد استفاده در این پژوهش

دلیل این روند در بتن با سنگدانه‌های معمولی، کاهش مقاومت ناحیه انتقال و در نتیجه، بیرون کشیده شدن سنگدانه‌های درشت تر می‌باشد که منجر به افزایش ناهمواری سطح شکست و افزایش ابعاد فراکتال می‌شود [۱۴]. اما تحقیقات پیشین نشان داده است که، ماتریس سیمانی و ناحیه انتقال، ضعیف‌ترین نقاط در بتن سبک [۳۵] و بتن سبک خودتراکم [۵] نیستند؛ بلکه سبکدانه‌ها هستند. سبکدانه‌ها عموماً ساختاری متخلخل دارند و افزایش انرژی شکست و چقرمگی شکست با کاهش اندازه سبکدانه‌های مصرفی در بتن سبک خودتراکم را می‌توان ناشی از این حقیقت دانست که طبق اثر اندازه آماری، کاهش اندازه سبکدانه مصرفی باعث کاهش احتمال وجود نقص در سبکدانه‌ها، و در نتیجه کاهش عیوب داخلی سازه بتنی و افزایش یکپارچگی آن می‌گردد. برنهارت^۱ و همکاران [۳۶] نشان دادند که مقاومت سبکدانه‌ها، با کاهش اندازه آن‌ها به صورت نمایی افزایش می‌یابد. در تمام نمونه‌های تیر شکاف‌دار بررسی شده در این پژوهش مشاهده گردید که یک ترک منفرد که از میان سبکدانه‌ها می‌گذرد، مود حاکم بر شکست می‌باشد؛ و افزایش اندازه سبکدانه‌ها تأثیری بر مود شکست نمونه‌ها ندارد. در همین راستا، سیم و همکاران [۲۱] در بررسی انرژی کلی شکست (G_f) بتن سبک مشاهده نمودند که در صورتی که حداکثر اندازه سبکدانه‌های مصرفی، بزرگتر از ۸ میلی‌متر باشد، تأثیر حداکثر اندازه سبکدانه‌ها بر انرژی شکست، ناچیز خواهد بود. با این حال، کرملو و همکاران [۱] در بررسی بتن سبک خودتراکم حاوی لیکا، تا ۸۶ درصد افزایش در

¹ Bernhardt

بعلاوه، تاثیر قفل و بست¹ و پل زدن² سنگ دانه‌ها می‌تواند باعث انحراف بیشتر و چند شاخه شدن مسیر ترک گردد. در مقابل، در بتن‌های حاوی سبک‌دانه، سبک‌دانه‌ها ضعیف‌ترین اجزا هستند (در مقایسه با ماتریس سیمانی و ناحیه انتقال)، و تنها یک ترک که از میان سبک‌دانه‌ها می‌گذرد، مود حاکم بر شکست نمونه‌های تیر شکاف‌دار می‌باشد. این امر می‌تواند توضیح دهنده تفاوت در تغییرات تردی بتن با تغییرات حداکثر اندازه سنگ‌دانه، در بتن‌های حاوی سبک‌دانه و بتن‌های با سنگ‌دانه معمولی باشد.

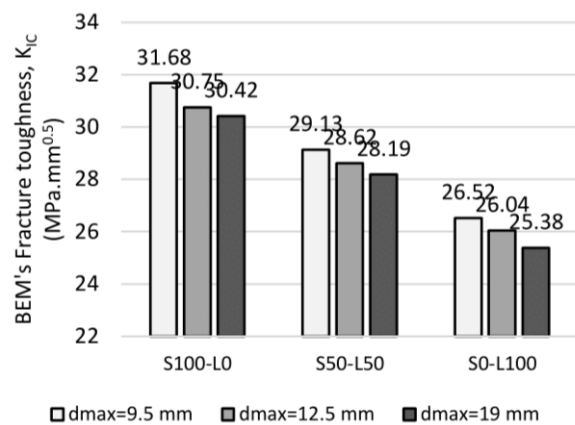


شکل ۵- تغییرات مقاومت کششی حاصل از روش تاثیر مرز در مقابل حداکثر اندازه سبک‌دانه مصرفی

با جایگزینی سبک‌دانه لیکا با اسکوریا، مقدار طول ترک مرجع (a_{∞}^*) بطور متوسط ۲۴/۴ درصد کاهش نشان داد (شکل ۶)، که به این معناست که تردی بتن سبک خودتراکم با افزایش مقدار اسکوریا افزایش می‌یابد.

در شکل ۷ تغییرات نسبت a_e/a_{∞}^* در برابر a_e نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تمام نمونه‌ها در محدوده مکانیک شکست غیر خطی قرار دارند. در شکل ۸ نتایج تجربی حاصل از محاسبه پارامترهای شکست نمونه‌های روش اثر اندازه با استفاده از مدل تاثیر مرز بر روی منحنی این مدل برآزش شده‌اند. مشاهده می‌شود که داده‌های تجربی با مقادیر پیش‌بینی شده در مدل تاثیر مرز مطابقت دارند. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش حداکثر اندازه سبک‌دانه‌های مصرفی، رفتار تیرها به معیار مکانیک شکست الاستیک خطی (*LEFM*) نزدیک می‌شود.

مورد بحث قرار گرفته است، مقاومت فشاری بتن‌های سبک خودتراکم حاوی اسکوریا بیشتر از بتن‌های سبک خودتراکم حاوی لیکا می‌باشد؛ که دلیل آن نیز به چگالی بیشتر و در نتیجه خصوصیات مکانیکی بهتر اسکوریا در مقایسه با لیکا [۳۸، ۳۹] نسبت داده شد. بنابراین ممکن است افزایش انرژی شکست، چقرمگی شکست، و مقاومت کششی حاصل از روش تاثیر مرز با افزایش مقدار اسکوریا در مخلوط‌ها را نیز به همین صورت تفسیر نمود. علاوه بر این، می‌توان افزود که سطح ویژه سنگ‌دانه‌های اسکوریا بیشتر از سبک‌دانه لیکا می‌باشد، که می‌تواند منجر به پیوند بهتر سنگ‌دانه‌ها و خمیر سیمان گردد. تیز گوشه بودن و زبری سطح اسکوریا نیز به بهبود این پیوند کمک می‌نماید.



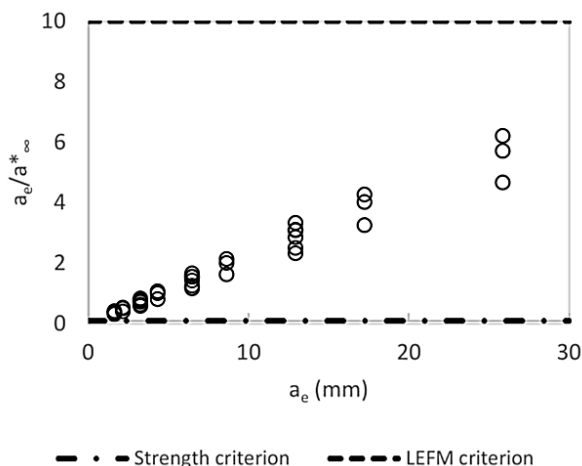
شکل ۴- تغییرات چقرمگی شکست K_{IC} در مقابل حداکثر اندازه سبک‌دانه مصرفی

طول ترک مرجع (a_{∞}^*) با افزایش حداکثر اندازه سبک‌دانه مصرفی از ۹/۵ به ۱۹ میلیمتر به‌طور متوسط کمتر از ۸ درصد افزایش نشان می‌دهد (شکل ۶). این میزان از تغییرات می‌تواند در مقایسه با سایر انواع بتن اندک در نظر گرفته شود. به عنوان مثال، صدر ممتازی و همکاران [۳۳] بیش از ۴۳ درصد افزایش در a_{∞}^* را برای بتن سنگین با افزایش حداکثر اندازه سنگ‌دانه از ۱۲/۵ به ۲۵ میلیمتر گزارش نمودند. در بتن با سنگ‌دانه معمولی، افزایش در حداکثر اندازه سنگ‌دانه باعث تشکیل ناحیه صدمه دیده بزرگتری در مقابل ترک می‌گردد. این امر به دلیل تضعیف ناحیه انتقال (*ITZ*) در بتن حاوی سنگ‌دانه‌های درشت‌تر می‌باشد [۱۴].

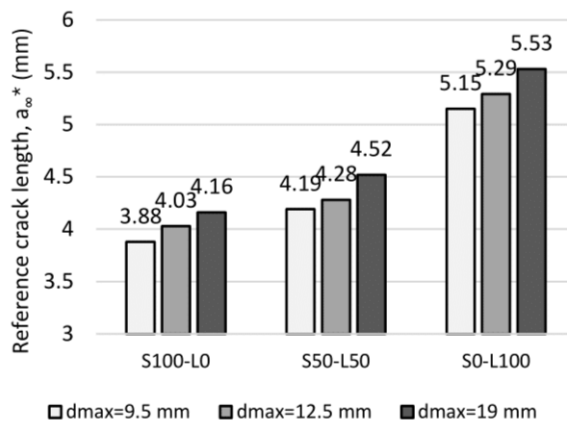
² Bridging

¹ Interlocking

می‌توان گفت، در حالتی که در روش تأثیر مرز از نمونه‌های تیر با اندازه مختلف و نسبت عمق شکاف به عمق تیر یکسان استفاده شود، نتایج منحنی مدل تأثیر مرز، علاوه بر اندازه سنگدانه‌های مصرفی، تحت تأثیر ابعاد نمونه‌ها نیز قرار دارد. همچنین در شکل ۸ می‌توان دید که با افزایش مقدار اسکوریا در مخلوط‌ها، رفتار بتن سبک خودتراکم به معیار مکانیک شکست الاستیک خطی میل می‌نماید.

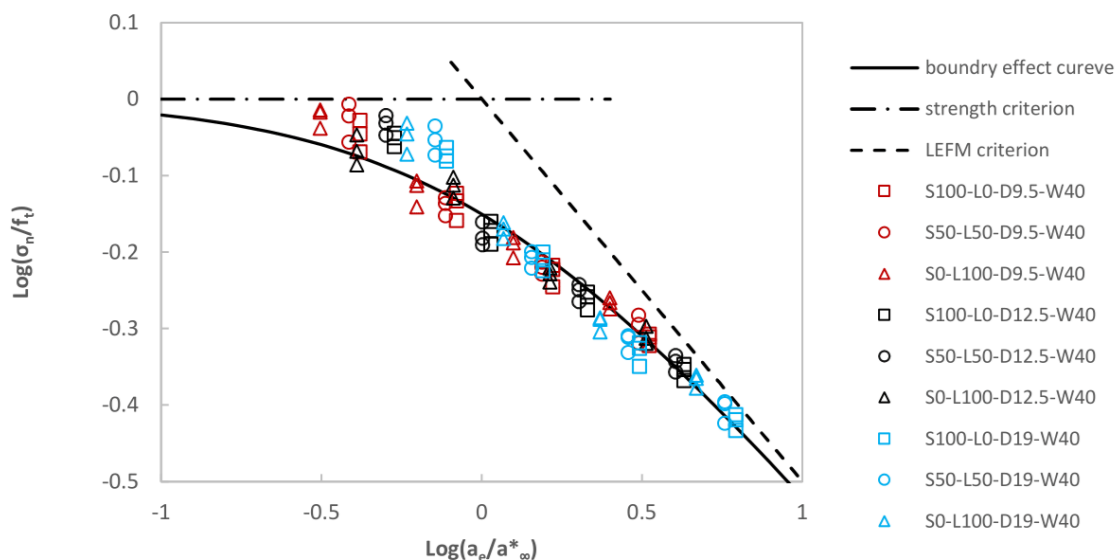


شکل ۷- تغییرات a_e/a_∞^* در مقابل a_e



شکل ۶- تغییرات طول ترک مرجع در مقابل حداکثر اندازه سبک‌دانه مصرفی

از روند تغییرات a_∞^* پیش‌بینی می‌شد که با افزایش d_{max} رفتار تیرها به معیار مقاومت نزدیک شوند، اما باید توجه داشت که در نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش، بعد مشخصه نمونه‌ها (عمق تیر (d)) و در نتیجه، مقدار (a_e) با افزایش اندازه سبک‌دانه‌های مصرفی افزایش یافته است؛ و همان‌طور که پیشتر بحث شد، تغییرات a_∞^* با افزایش d_{max} اندک می‌باشد. بنابراین، افزایش d_{max} منجر به افزایش نسبت



شکل ۸- منحنی مدل تأثیر مرز برای کلیه نمونه‌های تیر شکاف‌دار مورد بررسی

مقدار سبک‌دانه (بررسی نتایج جایگزینی سبک‌دانه اسکوریا با لیکا، در سه دسته‌بندی ۱۰۰ درصد اسکوریا - ۰ درصد لیکا، ۵۰ درصد اسکوریا - ۵۰ درصد لیکا و ۰ درصد اسکوریا - ۱۰۰ درصد لیکا) بر خصوصیات شکست بتن سبک خودتراکم حاوی سبک‌دانه اسکوریا و لیکا، اثر

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش با هدف بررسی پارامترهای موثر بر خصوصیات شکست بتن سبک خودتراکم حاوی سبک‌دانه اسکوریا و لیکا، اثر حداکثر اندازه سبک‌دانه (۹/۵، ۱۲/۵ و ۱۹ میلیمتر) و اثر نوع و

(LWSCC) as Repair Overlays," *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, vol. 5, pp. 101-113, 2017.

[3] H. Wei, Y. Liu, T. Wu, and X. Liu, "Effect of Aggregate Size on Strength Characteristics of High Strength Lightweight Concrete," *Materials*, vol. 13, p. 1314, 2020.

[4] X. Zhao, H. Wei, T. Wu, T. Zhang, and W. Ren, "Analysis of fracture mechanism and fracture energy prediction of lightweight aggregate concrete," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 303, p. 110142, 2024/06/05/ 2024.

[5] M. Karamloo, M. Mazloom, and G. Payganeh, "Influences of water to cement ratio on brittleness and fracture parameters of self-compacting lightweight concrete," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 168, pp. 227-241, 2016/12/01/ 2016.

[6] M. Karamloo, M. Mazloom, and G. Payganeh, "Effect of size on nominal strength of self-compacting lightweight concrete and self-compacting normal weight concrete: A stress-based approach," *Materials Today Communications*, vol. 13, pp. 36-45, 2017/12/01/ 2017.

[7] H. Salehi and M. Mazloom, "Experimental and numerical studies of crack propagation in self-compacting lightweight concrete," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 18, pp. 144-155, 2018.

[8] O. Afzali-Naniz and M. Mazloom, "Fracture behavior of self-compacting semi-lightweight concrete containing nano-silica," *Advances in Structural Engineering*, vol. 22, pp. 2264-2277, 2019.

[9] H. Salehi and M. Mazloom, "Opposite effects of ground granulated blast-furnace slag and silica fume on the fracture behavior of self-compacting lightweight concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 222, pp. 622-632, 2019/10/20/ 2019.

[10] H. Salehi and M. Mazloom, "Effect of magnetic field intensity on fracture behaviours of self-compacting lightweight concrete," *Magazine of Concrete Research*, vol. 71, pp. 665-679, 2019.

[11] H. Salehi and M. Mazloom, "An experimental investigation on fracture parameters and brittleness of self-compacting lightweight concrete containing magnetic field treated water," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 19, pp. 803-819, 2019/09/01 2019.

[12] O. Afzali-Naniz, M. Mazloom, and M. Karamloo, "Effect of nano and micro SiO₂ on brittleness and fracture parameters of self-compacting lightweight concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 299, p. 124354, 2021/09/13/ 2021.

بررسی گردید. بر این اساس، نتایج حاصله را می توان به شرح ذیل خلاصه نمود:

- انرژی شکست (G_f) با افزایش حداکثر اندازه سبک دانه از ۹/۵ تا ۱۹ میلیمتر به طور متوسط ۶/۶ درصد کاهش یافت. همچنین چقرمگی شکست (K_{IC}) و مقاومت کششی حاصل از روش تاثیر مرز (f_t) نیز با افزایش d_{max} بطور متوسط به ترتیب ۳/۸ و ۷/۳ درصد کاهش نشان دادند.

- با جایگزینی سبک دانه لیکا با اسکوریا، مقدار انرژی شکست (G_f)، چقرمگی شکست (K_{IC}) و مقاومت کششی حاصل از روش تاثیر مرز (f_t) به ترتیب به طور متوسط ۲۰/۱، ۱۹/۱ و ۳۶/۹ درصد افزایش یافتند.

- طول ترک مرجع (a_{∞}^*) با افزایش حداکثر اندازه سبک دانه مصرفی از ۹/۵ به ۱۹ میلیمتر به طور متوسط کمتر از ۸ درصد افزایش نشان داد.

- با جایگزینی سبک دانه لیکا با اسکوریا، مقدار طول ترک مرجع (a_{∞}^*) بطور متوسط ۲۴/۴ درصد کاهش نشان داد.

- تمام نمونه ها در محدوده مکانیک شکست غیر خطی قرار دارند. - در حالتی که در روش تاثیر مرز از نمونه های تیر با اندازه مختلف و نسبت عمق شکاف به عمق تیر یکسان استفاده شود، نتایج منحنی مدل تاثیر مرز، علاوه بر اندازه سنگدانه های مصرفی، تحت تاثیر ابعاد نمونه ها نیز قرار خواهد داشت، به همین دلیل علی رغم انتظاری که از مشاهده روند تغییرات طول ترک مرجع (a_{∞}^*) می رفت، با افزایش حداکثر اندازه سبک دانه های مصرفی، رفتار تیرها در روی منحنی مدل تاثیر مرز به معیار مکانیک شکست الاستیک خطی ($LEFM$) نزدیک شد.

- با افزایش مقدار اسکوریا در مخلوطها، رفتار بتن سبک خودتراکم به معیار مکانیک شکست الاستیک خطی میل می نماید.

۶- مراجع

[1] M. Karamloo, M. Mazloom, and G. Payganeh, "Effects of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 123, pp. 508-515, 2016/10/01/ 2016.

[2] H. Pourahmadi Sefat Arabani, A. SadrMomtazi, M. A. Mirgozar Langaroudi, R. Kohani Khoshkbijari, and M. Amooie, "Durability of Self-compacting Lightweight Aggregate Concretes

- vol. 15, p. 200107, 2022/11/01/ 2022.
- [23] X. Hu and K. Duan, "Size effect: Influence of proximity of fracture process zone to specimen boundary," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 74, pp. 1093-1100, 2007/05/01/ 2007.
- [24] X. Hu and K. Duan, "Mechanism behind the size effect phenomenon," *Journal of engineering mechanics*, vol. 136, pp. 60-68, 2010.
- [25] S. P. Shah, "Size-effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete," *Materials and Structures*, vol. 23, pp. 461-465, 1990.
- [26] ASTM-C128-07, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2007.
- [27] ASTM-C330/C330M-23, Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023.
- [28] ASTM-C127-07, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2007.
- [29] ASTM-C494-19, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.
- [30] A. Sadrmomtazi and H. Pourahmadi Sefat Arabani, "On Fresh and Hardened Properties of Lightweight Self-Compacting Concrete," *International Journal of Engineering*, vol. 38, pp. 867-884, 2025.
- [31] BS-EN-12390-3:2019, Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens: British Standard Institution, 2019.
- [32] ASTM-C469/C469M-14e1, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014.
- [33] A. Sadrmomtazi, O. Lotfi-Omran, and I. M. Nikbin, "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*, vol. 107, p. 102482, 2020/06/01/ 2020.
- [34] S. M. Mousavi, M. M. Ranjbar, and R. Madandoust, "Investigation Of Effective Parameters On Fracture Mechanical Properties Of High Strength Concrete (in Persian)," PhD Thesis, Department of Civil Engineerin, Guilan University, 2019.
- [35] H. Z. Cui, T. Y. Lo, S. A. Memon, and W. Xu, "Effect of lightweight aggregates on the mechanical properties and brittleness of lightweight aggregate concrete," *Construction and Building Materials*, [13] M. H. Beygi, M. T. Kazemi, I. M. Nikbin, and J. V. Amiri, "The effect of water to cement ratio on fracture parameters and brittleness of self-compacting concrete," *Materials & Design*, vol. 50, pp. 267-276, 2013/09/01/ 2013.
- [14] M. H. Beygi, M. T. Kazemi, I. M. Nikbin, J. V. Amiri, S. Rabbanifar, and E. Rahmani, "The influence of coarse aggregate size and volume on the fracture behavior and brittleness of self-compacting concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 66, pp. 75-90, 2014.
- [15] I. M. Nikbin, M. R. Davoodi, H. Fallahnejad, S. Rahimi, and F. Farahbod, "Influence of Mineral Powder Content on the Fracture Behaviors and Ductility of Self-Compacting Concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 28, p. 04015147, 2016.
- [16] I. M. Nikbin and M. Golshekan, "The effect of expanded polystyrene synthetic particles on the fracture parameters, brittleness and mechanical properties of concrete," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 94, pp. 160-172, 2018/04/01/ 2018.
- [17] G. Giaccio and R. Zerbino, "Failure Mechanism of Concrete: Combined Effects of Coarse Aggregates and Strength Level," *Advanced Cement Based Materials*, vol. 7, pp. 41-48, 1998/03/01/ 1998.
- [18] G. V. Guinea, K. El-Sayed, C. G. Rocco, M. Elices, and J. Planas, "The effect of the bond between the matrix and the aggregates on the cracking mechanism and fracture parameters of concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 32, pp. 1961-1970, 2002/12/01/ 2002.
- [19] W. S. Alyhya, M. S. Abo Dhaheer, M. M. Al-Rubaye, and B. L. Karihaloo, "Influence of mix composition and strength on the fracture properties of self-compacting concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 110, pp. 312-322, 2016/05/01/ 2016.
- [20] M. Ghasemi, M. R. Ghasemi, and S. R. Mousavi, "Investigating the effects of maximum aggregate size on self-compacting steel fiber reinforced concrete fracture parameters," *Construction and Building Materials*, vol. 162, pp. 674-682, 2018/02/20/ 2018.
- [21] J.-I. Sim, K.-H. Yang, E.-T. Lee, and S.-T. Yi, "Effects of Aggregate and Specimen Sizes on Lightweight Concrete Fracture Energy," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 26, pp. 845-854, 2014/05/01 2014.
- [22] S. K. Adhikary, D. K. Ashish, H. Sharma, J. Patel, Ž. Rudžionis, M. Al-Ajamee, et al., "Lightweight self-compacting concrete: A review," *Resources, Conservation & Recycling Advances*,

vol. 35, pp. 149-158, 2012/10/01/ 2012.

[36] M. Bernhardt, H. Tellesbø, H. Justnes, and K. Wiik, "Mechanical properties of lightweight aggregates," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 33, pp. 2731-2743, 2013/11/01/ 2013.

[37] A. Sadrmomtazi, O. Lotfi-Omran, and I. M. Nikbin, "On the fracture parameters of heavy-weight magnetite concrete with different water-cement ratios through three methods," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 219, p. 106615, 2019/10/01/ 2019.

[38] Y. Askari Dolatabad, R. Kamgar, and M. Jamali Tazangi, "Effects of Perlite, Leca, and Scoria as Lightweight Aggregates on Properties of Fresh and Hard Self-Compacting Concretes," *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 18, pp. 633-647, 10/15 2020.

[39] İ. B. Topçu and T. Uygunoğlu, "Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete (SCLC)," *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 1286-1295, 2010/07/01/ 2010.

Investigation of the influence of type and maximum size of lightweight aggregates on the fracture characteristics of lightweight self-compacting concrete by means of the boundary effect model

Ali Sadrmomtazi

Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

Hamed Pourahmadi Sefat Arabani *

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

Abstract

The influence of type and maximum size of lightweight aggregate on the fracture characteristics of lightweight self-compacting concrete (LWSCC) was investigated. For this purpose, nine mixtures of LWSCCs containing scoria and LECA were prepared in three classifications: 100% scoria - 0% LECA, 50% scoria - 50% LECA, and 0% scoria - 100% LECA, with maximum aggregate sizes of 9.5, 12.5, and 19 mm. Fracture characteristics were determined by means of the boundary effect method (BEM) using the geometrically similar notched beams with a constant notch-to-beam depth ratio. The results showed that the fracture energy decreased by an average of 6.6% with increasing maximum aggregate size. Moreover, the fracture toughness and tensile strength obtained from BEM also decreased by an average of 3.8% and 7.3%, respectively, with increasing d_{max} , while the reference crack length increased by less than 8%. By replacing LECA with scoria, the fracture energy, fracture toughness, and tensile strength obtained from BEM increased by an average of 20.1%, 19.1%, and 36.9%, respectively, and the reference crack length decreased by an average of 24.4%. All samples were in the nonlinear fracture mechanics region.

Keywords: Fracture mechanics, Lightweight self-compacting concrete, boundary effect method, Scoria, LECA.

* Corresponding Author: h_pourahmadi@yahoo.co.uk

