



تاثیر نسبت فعال کننده به چسب بر پارامترهای شکست بتن ژئوپلیمری سبک بر پایه خاکستر بادی

محمد رضا عباسی زرگله^۱، موسی مظلوم^{۲*}، مجتبی جعفری صمیمی^۱، محمد حسن رامشت^۱

۱- دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران، ایران
۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۸
بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۲۶
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۱۲/۰۹

کلمات کلیدی:

بتن ژئوپلیمری
بتن ژئوپلیمری سبک
پارامتر شکست
عمل آوری دمای بالا

خلاصه: بتن متنوع‌ترین و یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی است. برای ساخت بتن به مقدار زیادی سیمان پرتلند نیاز است. تولید سیمان پرتلند همراه با تولید مقدار زیادی دی اکسید کربن است که جو را آلوده می‌کند. علاوه بر آن مقدار زیادی انرژی نیز برای تولید سیمان پرتلند مصرف می‌شود. از این رو، یافتن یک ماده جایگزین برای سیمان پرتلند اجتناب ناپذیر است. بتن ژئوپلیمری یک ماده ساختمانی نوآورانه است که از اثر شیمیایی مولکول‌های معدنی تولید می‌شود. حذف سیمان پرتلند یکی از مزیت‌های بزرگ استفاده از بتن ژئوپلیمری است. به همین دلیل برای شناخت انواع بتن ژئوپلیمری، مطالعه بر روی اجزای مختلف سازنده آن و تاثیر آن‌ها بر پارامترهای شکست اهمیت دارد. در این مقاله نتایج آزمایش‌های پارامترهای شکست بتن ژئوپلیمری سبک بر پایه خاکستر بادی کلاس C (Lightweight Fly ash C class-based Geopolymer Concrete) ارائه می‌شود. این آزمایش‌ها شامل آزمایش خمش سه نقطه‌ای بر روی ۳۶ تیر با نسبت فعال کننده به چسب متفاوت است. همچنین آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی بر روی بتن سخت شده پس از گذشت ۲۴ ساعت عمل‌آوری انجام شد. در این آزمایش‌ها سه طرح مخلوط با نسبت فعال کننده به چسب ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ در نظر گرفته شد. با تغییر نسبت فعال کننده به چسب از ۰/۶ به ۰/۴، مقاومت فشاری از $18/9 \text{ MPa}$ به $28/4 \text{ MPa}$ ، چقرمگی از $19/04 \text{ MPa mm}^3$ به $14/07 \text{ MPa mm}^3$ ، انرژی شکست از $17/31 \text{ N/m}$ به $20/98 \text{ N/m}$ و طول ناحیه فرایند شکست از $17/31 \text{ mm}$ به $20/98 \text{ mm}$ تغییر یافت.

۱- مقدمه

متصل می‌کند تا بتن ژئوپلیمری را بسازد. نیروگاه‌های زغال سنگ در سراسر جهان مقدار قابل توجهی خاکستر بادی را به عنوان یک محصول جانبی تولید می‌کنند که می‌تواند به طور مؤثر در بتن ژئوپلیمری برای کمک به کاهش رد اثر کربن ناشی از تولید بتن، استفاده شود.

یک عضو در یک سازه ممکن است مستعد یک یا چند نوع خرابی باشد. شکست را می‌توان به عنوان فرآیند جداسازی (یا تکه تکه شدن) یک جامد به دو یا چند قسمت، تحت تأثیر یک تنش تعریف کرد. ترک در تمام سازه‌های بتن مسلح و غیرمسلح وجود دارد. ترک‌ها اغلب به عنوان متمرکز کننده تنش در بسیاری از موارد عمل می‌کنند و با افزایش میزان بار تمرکز تنش به وقوع می‌پیوندد و ترک‌ها گسترش یافته و نهایتاً باعث تخریب سازه می‌شوند. سیمان ژئوپلیمری به عنوان یک ماده شبه شکننده به عنوان جایگزینی برای سیمان پرتلند مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۰-۱۳]. برای تقویت

نام ژئوپلیمر توسط پروفیسور فرانسوی دیویدوویتس در سال ۱۹۷۸ برای نشان دادن طیف وسیعی از مواد مشخص شده توسط شبکه مولکول‌های معدنی به کار گرفته شد [۱-۳]. ژئوپلیمر یک چسب جایگزین نوظهور برای بتن است که در تهیه آن از مواد فرعی صنایع استفاده می‌کنند. یک ماده پایه که غنی از سیلیسیم (Si) و آلومینیوم (Al) است با یک محلول قلیایی واکنش داده و چسب ژئوپلیمر تولید می‌شود.

مواد پایه، مانند خاکستر بادی [۵ و ۴]، متاکائولن [۶] و سرپاره کوره بلند آهن‌گذاری [۷] را می‌توان برای ساخت ژئوپلیمر استفاده کرد. خاکستر بادی مخلوط با سرپاره کوره بلند [۸] و خاکستر پوسته برنج [۹] نیز به عنوان ماده پایه برای ژئوپلیمر استفاده شده است. محصول واکنش یک پلیمر معدنی است که سنگدانه‌ها را به یکدیگر

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mazloom@sru.ac.ir



ماتریس ژئوپلیمر می‌توان از الیاف استفاده کرد. استفاده از الیاف می‌تواند به طور مؤثر شکل‌پذیری را افزایش دهد [۱۸-۱۲ و ۱۰]، که شبیه به کامپوزیت‌های سیمانی است [۱۹-۱۷]. ویژگی‌های شکست بتن تحت تأثیر خواص مواد مانند مقاومت، ترکیبات مخلوط و انواع سنگدانه‌های مورد استفاده، قرار می‌گیرد.

توسعه مدل بنیادی برای یک ماده به پارامترهای شکست آن نیاز دارد. پارامترهای شکست یک ماده برای توصیف تشکیل و انتشار ترک‌ها در مواد استفاده می‌شود. مسیر ترک درون یک ماده مرکب مانند بتن به تعامل مکانیکی بین سنگدانه‌ها و ماتریس چسب بستگی دارد. انرژی شکست یک ماده مرکب به انحراف مسیر ترک از یک صفحه ترک ایده‌آل بستگی دارد [۲۱ و ۲۰]. از آنجایی که چسب در بتن ژئوپلیمری با بتن حاوی سیمان پرتلند معمولی (بتن معمولی) (OPC) متفاوت است، اثر تعامل بین سنگدانه‌ها و چسباننده ژئوپلیمری باید بررسی شود. بنابراین، مطالعه پارامترهای شکست بتن ژئوپلیمری برای درک رفتار شکست آن ضروری است.

به عنوان یک ماده نسبتاً جدید، تحقیقات گسترده در مورد خواص مختلف سیمان ژئوپلیمری برای اطمینان از مناسب بودن آن برای کاربردهای سازه‌های مورد نیاز است، که در این راستا توجه به مشخصات شکست از اهمیت حیاتی برخوردار است [۲۲]. در این زمینه می‌توان به بررسی تأثیر عوامل مختلف مثل نسبت محلول فعال‌کننده به چسب، تأثیر دما، تأثیر اندازه و نوع سنگدانه‌ها، تأثیر نسبت‌های مختلف ترکیب مواد و ... اشاره کرد.

نتایج مطالعات اخیر پتانسیل استفاده از بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی عمل‌آوری حرارتی شده را به عنوان مصالح ساختمانی نشان داده است. تحقیقات در حال انجام بر روی بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی، چندین ویژگی کوتاه مدت و بلند مدت را مورد مطالعه قرار داد. نشان داده شد که بتن ژئوپلیمری عمل‌آوری حرارتی شده دارای خواص مقاومت فشاری بالا، جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن و خزش کم و مقاومت خوب در برابر سولفات و اسید است [۲۳ و ۷]. مشخص شد که بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن معمولی چسبندگی بالاتری با فولاد تقویت‌کننده و مقاومت کششی شکافتی نسبتاً بالاتری دارد [۲۵، ۲۴ و ۸]. تیرها و ستون‌های بتنی ژئوپلیمری تا حد شکست، آزمایش شدند و عملکرد مشابه یا بهتری را در مقایسه

با اعضای بتنی معمولی نشان دادند [۲۶، ۲۱ و ۲۰]. بتن ژئوپلیمری عمل‌آوری حرارتی شده پس از قرار گرفتن در معرض حرارت با دمای بالا تا ۸۰۰ درجه سلسیوس، استحکام پسماند بالاتری نسبت به استوانه‌های بتن معمولی نشان داد [۲۶]. تأثیر دمای عمل‌آوری بر مقاومت فشاری ژئوپلیمر FA-RHBA توسط نظری و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [۲۷]. FA با RHBA در سه سطح جایگزینی ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ جایگزین شد. پس از دوره آماده‌سازی، نمونه‌های ژئوپلیمر به مدت ۳۶ ساعت در دمای ۹۰-۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. آن‌ها در این تحقیق به این نتیجه رسیدند که دمای بهینه عمل‌آوری برای همه مخلوط‌ها ۸۰ درجه سلسیوس است. بنابراین، بتن ژئوپلیمری عمل‌آوری حرارتی شده به عنوان یک ماده ایده‌آل برای اعضای سازه‌های بتنی پیش‌ساخته در نظر گرفته می‌شود.

پان و همکاران [۲۸]، رفتارهای شکست بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی کلاس F عمل‌آوری شده در دمای بالا را با بتن معمولی مقایسه کردند. آن‌ها دریافتند که با توجه به مقاومت فشاری مشابه، انرژی شکست بتن معمولی حدود ۲۴٪ بزرگتر و طول مشخصه آن تقریباً سه برابر بیشتر از بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی کلاس F است، که نشان می‌دهد بتن معمولی شکل‌پذیری بیشتری نسبت به FFGC نشان می‌دهد. سارکر و همکاران [۲۹] همچنین خواص شکست بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی کلاس F عمل‌آوری شده در دمای بالا را گزارش کردند. آن‌ها دریافتند که شاخه‌های نزولی منحنی‌های بار-جابجایی نمونه‌های بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی کلاس F تندتر و صفحات شکست نرم‌تر از نمونه‌های بتن معمولی با مقاومت فشاری مشابه بودند، که نشان می‌دهد بتن معمولی شکل‌پذیری بیشتری نسبت به نمونه بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی کلاس F از خود نشان می‌دهد، که با نتایج تحقیق پان و همکاران [۲۸] همخوانی دارد.

گزارش‌های مربوط به رفتار شکست بتن ژئوپلیمری عمل‌آوری شده در محیط در ادبیات فنی کمیاب است. نات و سارکر [۳۰] خواص شکست بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره/خاکستر بادی کلاس F (SFGC) را که در دمای محیط عمل‌آوری شده بود، بررسی کردند و دریافتند که بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره/خاکستر بادی کلاس F در مقایسه با بتن معمولی هم‌تای خود، انرژی شکست بالاتری به

شده (ACGHWGC)^۲ نشان دادند که با افزایش نسبت فعال کننده به چسب (Al/Bi)^۳ از ۰/۶۵ به ۰/۸۵، انرژی شکست و همچنین چقرمگی شکست کاهش مییابد و شکل پذیری افزایش مییابد.

این مقاله نتایج تحقیق آزمایشگاهی در مورد تأثیر نسبت فعال کننده به چسب بر پارامترهای شکست بتن ژئوپلیمری سبک بر پایه خاکستر بادی کلاس C را تشریح می کند. به منظور انجام این کار، آزمایش‌هایی روی نمونه تیرهای شکافدار با استفاده از روش اثر اندازه (SEM)^۴ و بر اساس توصیه نامه‌های رایلم [۳۶]، انجام شده است. علاوه بر این، پارامترهای مکانیکی شامل مدول الاستیسیته، مقاومت کششی و مقاومت فشاری تعیین شده است.

۲- روش اثر اندازه (SEM)

روش اثر اندازه (SEM) که اولین بار توسط بازانت و کاظمی [۳۷] پیشنهاد شد، در توصیه نامه رایلم [۳۶] نیز به عنوان یک روش دقیق و مطلوب توصیه شده است. روش اثر اندازه پارامترهای شکست را مستقل از اندازه و شکل نمونه‌ها به دست می‌دهد و ویژگی ذاتی بتن را نشان می‌دهد. بر اساس قانون اثر اندازه، رابطه (۱) ارتباط غیرخطی بین تنش اسمی شکست و ابعاد نمونه‌های تیرهای مشابه هندسی را نشان می‌دهد:

$$\sigma_N = \frac{Bf_t}{\sqrt{1+\beta}} \quad (1)$$

که در آن B یک پارامتر تجربی و β عدد تردی^۵ است که با رابطه (۲) تعیین می‌شود:

$$\beta = \frac{d}{d_0} \quad (2)$$

که در آن d عمق تیر و d₀ یک ضریب تجربی است.

دست می‌آورد. علاوه بر این، انحراف قبل از شکست نهایی نمونه بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره/ خاکستر بادی کلاس F کمی بزرگتر بود، که ممکن است نشان دهد بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره/ خاکستر بادی کلاس F عملآوری شده در دمای محیط، انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به همتای بتن معمولی خود دارد. نات و سارکر [۳۰] بیان کردند که خواص شکست بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره/ خاکستر بادی کلاس F که در دمای محیط عمل‌آوری می‌شود تحت تأثیر نسبت‌های مخلوط قرار می‌گیرد. مطالعه انجام شده بر روی خواص شکست بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره (SGC)^۱ که در دمای محیط عمل‌آوری شده است [۳۱]، نشان می‌دهد که انرژی شکست بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره بزرگتر از همتای بتن معمولی آن است. علت این موضوع آن است که ناحیه انتقال بین خمیر و سنگدانه همگن‌تر و متراکم‌تر است. مقادیر طول مشخصه کوچکتر بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره نسبت به بتن معمولی نشان داد که بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره تردتر از همتای بتن معمولی خود است.

دینگ و همکاران [۳۱] اثرات پارامترهای مواد از جمله غلظت قلیایی، مدول فعال کننده قلیایی، نسبت جرم سرباره به خاکستر بادی و نسبت فعال کننده به چسب بر روی خواص شکست بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره/ خاکستر بادی کلاس F در دمای محیط عمل‌آوری شده را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که، انرژی شکست بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره/ خاکستر بادی کلاس F با افزایش غلظت قلیایی، مدول فعال کننده قلیایی و همچنین نسبت سرباره به خاکستر بادی افزایش می‌یابد، در حالی که با افزایش نسبت فعال کننده به چسب، کاهش می‌یابد. علاوه بر این، طول مشخصه بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره/ خاکستر بادی کلاس F با افزایش مقاومت فشاری، بدون توجه به نسبت مخلوط کاهش می‌یابد. لی و همکاران [۳۲] به این نتیجه رسیدند که با افزایش محتوای GGBFS و نسبت مایع قلیایی به چسبنده، پارامترهای شکست ACGGC بهبود می‌یابد. زوهوا و همکاران [۳۳] دریافتند که مایع/نسبت جامد می‌تواند انحلال مواد خام را تسریع کند. یائو و همکاران [۳۴] نشان دادند که نسبت مایع به جامد بالاتر دوره ژئوپلیمریزاسیون را افزایش می‌دهد. موسوی‌نژاد و فلاح‌کار [۳۵] اخیراً در تحقیقی که بر روی خواص بتن ژئوپلیمری سنگین بر پایه خاکستر کوره بلند ریز آسیاب شده عمل‌آوری محیطی

2 - Ambient-cured ground granulated based heavyweight geopolymer concrete

3 - Alkaline solution to binder ratio

4 - Size Effect Method

5 - Brittleness number

1 - Slag-based Geopolymer Concrete

شدن نوک ترک (δ_c) و چقرمگی شکست (K_{IC}) و E مدول الاستیسیته توسط رابطه‌های (۷)، (۸)، (۹) و (۱۰)، به ترتیب:

$$G_f = \frac{g(\alpha_0)}{AE} \quad (7)$$

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

$$\delta_c = \frac{8K_{IC}}{E} \times \sqrt{\frac{C_f}{2\pi}} \quad (9)$$

$$K_{IC} = \sqrt{EG_f} \quad (10)$$

که در این روابط، ($g(\alpha_0)$) نرخ آزادسازی انرژی بدون بعد و ($g'(\alpha_0)$) مشتق ($g(\alpha_0)$) و ($d/a_0 = \alpha$) طول نسبی ترک اولیه است. ($g(\alpha_0)$) از رابطه (۱۱) تعیین می‌شود.

$$g(\alpha) = \left(\frac{1}{d}\right)^2 \pi \alpha [1.5F(\alpha)]^2 \quad (11)$$

($F(\alpha)$) تابع برونابی کمکی است که برای $1/d=2.5$ از رابطه (۱۲) به دست می‌آید:

$$F_{2.5}(\alpha) = \frac{1 - 2.5\alpha + 4.49\alpha^2 - 3.98\alpha^3 + 1.33\alpha^4}{(1-\alpha)^{1.5}} \quad (12)$$

۳- برنامه آزمایش ۳-۱- مواد

در این تحقیق از خاکستر بادی کلاس C به عنوان ماده پایه در ساخت بتن استفاده شده است. مطابق استاندارد ASTM C618 خاکستر بادی مورد استفاده در بتن، دارای دو کلاس F و C می‌باشد

عدد تردی (β) در سه محدوده مختلف تعریف شده است. برای $0/1 \leq \beta \leq 10$ ، مقاومت اسمی مقدار ثابتی دارد و معیار مقاومت باید اعمال شود. در این محدوده بتن رفتار شکل‌پذیری بیشتری از خود نشان دهد. برای $10 \leq \beta \leq 100$ ، مکانیک شکست غیرخطی رفتار بتن را تعیین می‌کند. در نهایت، برای $\beta \geq 100$ ، بتن از مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM) پیروی می‌کند. در این محدوده β ، بتن شکننده‌تر است.

در روش اثر اندازه ویژگی‌های شکست به سادگی با حداکثر بارهای تعیین شده از آزمایش خمش سه نقطه‌ای انجام شده بر روی تیرهای شکافدار مشابه هندسی با اندازه‌های مختلف و نسبت‌های مساوی طول شکاف اولیه به عمق نمونه محاسبه می‌شود.

این پارامترها با محاسبه شیب (A) و عرض از مبدا (C) طبق رابطه (۳) تعیین می‌شوند:

$$Y = AX = C \quad (3)$$

که در آن:

$$X_i = d_i, y_i = \left(\frac{bd_i}{P_i}\right)^2 \quad (4)$$

که در آن P_i ، d_i و b به ترتیب حداکثر بار تصحیح شده، عمق و عرض هر یک از نمونه‌های تیر شکافدار هستند. ضرایب B و d_0 را می‌توان از رابطه‌های (۵) و (۶) تعیین کرد:

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

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

در روش اثر اندازه، پارامترهای اصلی شکست شامل انرژی شکست اولیه (G_f)، اندازه مؤثر منطقه فرایند (C_p)، جابه‌جایی مؤثر بحرانی باز

جدول ۱. مشخصات شیمیایی خاکستر بادی

Table 1. Chemical characteristics of fly ash

محتوای شیمیایی	میزان درصد	رواداری
SiO ₂	۳۵/۰۰	±۱/۵۰
Al ₂ O ₃	۱۶/۰۰	±۱/۲۰
Fe ₂ O ₃	۱/۰۰	±۰/۴۰
CaO	۳۸/۰۰	±۱/۵۰
MgO	۸/۵۰	±۱/۰۰
SO ₃	۲/۳۰	±۰/۳۰
K ₂ O	۰/۵۰	±۰/۱۰
Na ₂ O	۰/۴۰	±۰/۱۰

نشان داده شده است. نقاط حداقل و حداکثر در منحنی دانه‌بندی مطابق با استاندارد ASTM C331 [۴۰] می‌باشد.

۳-۲- نسبت های اختلاط

به منظور ارزیابی تاثیر نسبت محلول فعال کننده به چسب، بر پارامترهای شکست بتن، یک برنامه آزمایشی شامل سه طرح اختلاط، مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شده است.

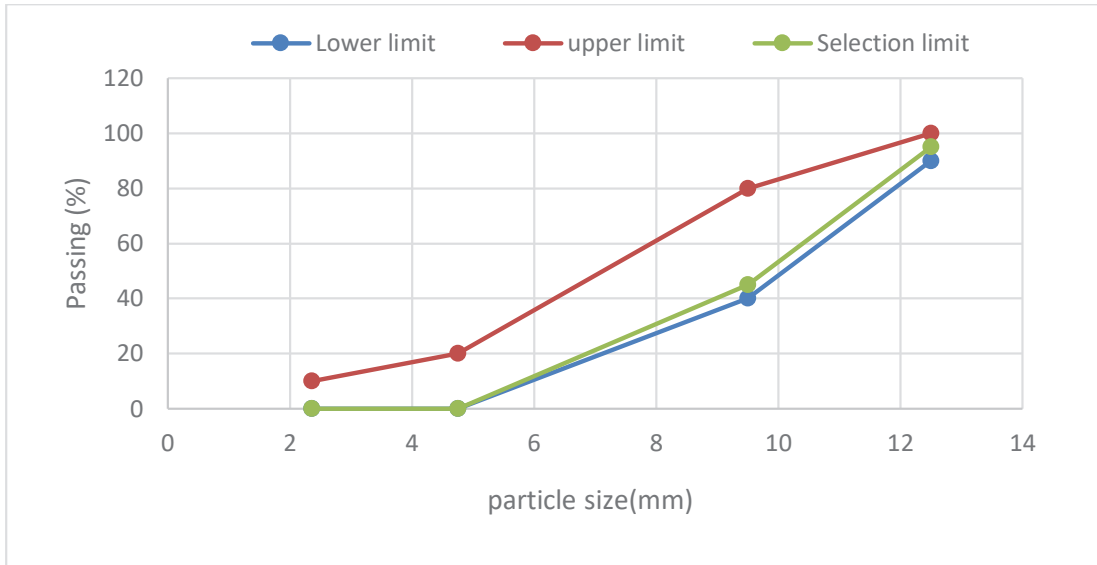
۴- تعیین پارامترهای شکست با استفاده از روش اثر اندازه (SEM)

در این تحقیق، برای هر طرح اختلاط، ۱۲ نمونه تیر شکافدار با چهار اندازه مختلف ساخته شد و توسط دستگاه سروو الکترو کنترل یونیورسال I50-STM در مرکز پژوهش متالورژی رازی (RMRC)^۱ مورد آزمایش قرار گرفتند. بر اساس توصیه‌نامه رایلم بارگذاری با نرخ ثابت به گونه‌ای انجام شد که حداکثر بارها در ۵ دقیقه به نمونه اعمال شود [۳۶]. ابعاد نمونه‌ها بر اساس معیارهایی که در توصیه‌نامه رایلم ارائه شده است، انتخاب شد [۳۶]. ابعاد و پیکربندی تیرهای مورد استفاده در روش اثر اندازه در جدول ۳ و شکل ۲ نشان داده شده است. تمامی نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت نگهداری در قالب، از قالب خارج شده و پس از یک روز عمل آوری در آون در دمای ۸۰ درجه سلسیوس مورد آزمایش قرار گرفتند. برای هر طرح اختلاط،

که در خاکستر کلاس F مجموع میزان سیلیسیم اکسید، آلومینیم اکسید و آهن اکسید کمتر از ۷۰٪ نیست. همچنین در خاکستر کلاس C نیز مجموع اکسیدهای یاد شده، کمتر از ۵۰٪ نمی‌باشد [۳۸]. مشخصات آنالیز شیمیایی ماده ی خاکستر بادی کلاس C توسط آنالیز اشعه ی ایکس (XRD) (توسط شرکت آسه سیمان سبز (ACE GREENCEMENT CO)) انجام گرفته است. نتایج این آنالیز در جدول ۱ شرح داده شده است:

برای ساخت بتن‌های ژئوپلیمری از محلول سدیم هیدروکسید (NaOH) با غلظت ۱۰ مولار که ۲۴ ساعت پیش از استفاده، از ترکیب آب مقطر و سدیم هیدروکسید جامد با درجه خلوص ۹۹ درصد تولیدی شرکت نیرو کلر و محلول سدیم سیلیکات با مدول (نسبت SiO_۲ به Na_۲O) ۲/۳۳ تولیدی شرکت لیا سیلیس قزوین استفاده شده است. ترکیب سدیم سیلیکات و محلول سدیم هیدروکسید با نسبت (NaOH/Na_۲SiO_۲) ۱/۳۳ به عنوان محلول فعال کننده قلیایی استفاده شد. در این مطالعه، سنگدانه‌های لیکا از نوع سازه‌ای با حداکثر اندازه ۱۲/۵ میلیمتر و وزن مخصوص ۶۷۰ کیلوگرم بر متر مکعب، تولید شده در شرکت لیکای ایران برای تولید نمونه‌های بتن ژئوپلیمری سبک بر پایه خاکستر بادی کلاس C مورد استفاده قرار گرفت و سنگدانه‌های ریز ماسه با مدول نرمی ۲/۸ که بر اساس استاندارد ASTM C۱۳۶ [۳۹] تعیین شده، استفاده شد.

منحنی توزیع اندازه ذرات برای دانه‌های لیکای مورد استفاده که بر اساس استاندارد ASTM C۱۳۶ [۳۹] تعیین شده، در شکل ۱



شکل ۱. محدوده‌ی دانه‌بندی مجاز و موجود برای اندازه اسمی ۱۲/۵ میلی‌متر

Fig. 1. Permissible and available grading range for a nominal size of 12.5 mm

جدول ۲. طرح اختلاط‌های مورد استفاده

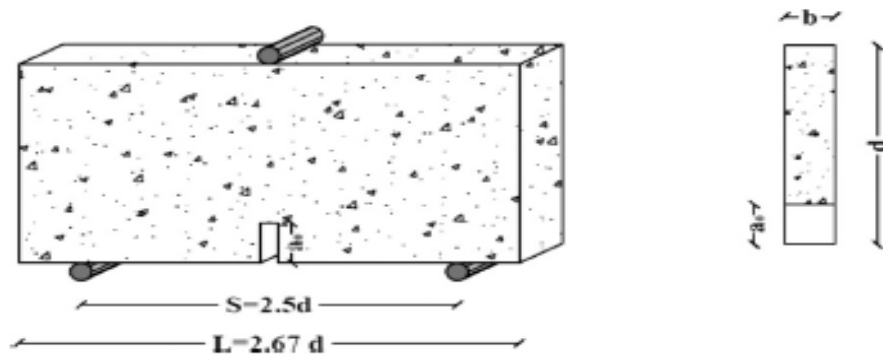
Table 2. Scheme of used mixtures

نام طرح	کد طرح	FA (kg/m ³)	Na ₂ SiO ₃ (kg/m ³)	NaOH (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	لیکا (kg/m ³)
A1	LWFCGC1	۵۶۲	۱۲۷/۲	۹۷/۸	۴۳۱	۴۱۵
A2	LWFCGC2	۴۵۰	۱۲۷/۲	۹۷/۸	۴۷۲	۴۵۴
A3	LWFCGC3	۳۷۵	۱۲۷/۲	۹۷/۸	۴۹۹	۴۸۰

جدول ۳. ابعاد نمونه تحت آزمایش خمشی سه نقطه‌ای در روش اثر اندازه (SEM)

Table 3. Sample dimensions under three-point bending test by size effect method (SEM)

L/d	s/d	a ₀ /d	طول نمونه (L) mm	طول دهانه (s) mm	طول شکاف (a ₀) mm	ضخامت (b) mm	ارتفاع (d) Mm
۲/۶۷	۲/۵	۰/۲	۱۰۱/۷	۹۵/۲	۷/۶	۳۸/۱	۳۸/۱
۲/۶۷	۲/۵	۰/۲	۲۰۳/۴	۱۹۰/۵	۱۵/۲	۳۸/۱	۷۶/۲
۲/۶۷	۲/۵	۰/۲	۴۰۶/۹	۳۸۱	۳۰/۵	۳۸/۱	۱۵۲/۴
۲/۶۷	۲/۵	۰/۲	۸۱۳/۸	۷۶۲	۶۱	۳۸/۱	۳۰۴/۸



شکل ۲. پیکربندی تیرهای شکافدار در روش اثر اندازه (SEM)

Fig. 2. Configuration of slotted beams by size effect method (SEM)



(ب)



(الف)

شکل ۳- الف- نمونه‌های طرح اختلاط A1 ب- نمونه با $d = 304.8 \text{ mm}$ تحت آزمایش خمش

Fig. 3-a- Samples of mixing plan A1 (b)- Sample with $d=304.8 \text{ mm}$ under bending test

در شکل ۳-الف، نمونه‌های مربوط به کد طرح LWFCGCl که با طرح اختلاط A1 ساخته شده‌اند، نشان داده شده است. در این تصویر ۱۲ نمونه مربوط به آزمایش خمش سه نقطه‌ای، سه نمونه مکعبی به برای انجام آزمایش مقاومت فشاری و ۶ نمونه استوانه‌ای برای انجام آزمایش‌های مقاومت کششی و مدول الاستیسیته نشان داده شده است. در شکل ۳-ب، یکی از نمونه‌های مربوط به کد طرح LWFCGCl با $d = 304.8 \text{ mm}$ در حال آزمایش خمش سه نقطه‌ای نشان داده شده است.

سه نمونه مکعبی با ابعاد $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر مکعب و شش نمونه استوانه استاندارد با ابعاد 150×300 میلی‌متر مربع ساخته شد، در جریان ساخت، نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت نگهداری در قالب، از قالب خارج شده و به مدت ۲۴ ساعت در آون در دمای 80°C درجه سلسیوس عمل آوری شد. برای تعیین مدول الاستیسیته، مقاومت کششی و فشاری به ترتیب مطابق استانداردهای ASTM C469 [۴۱]، ASTM C496 [۴۲] و BS EN 12390 [۴۳] مورد آزمایش قرار گرفت.

جدول ۴. حداکثر بار اصلاح شده

Table 4. Modified maximum load

کد طرح	fc (MPa)	E(GPa)	فعال کننده /چسب	ارتفاع d (mm)	بار اصلاح شده تیرها (N)		
					سری ۱	سری ۲	سری ۳
LWFCGC1	۲۸/۴	۱۷/۲۸	۰/۴	۳۸/۱	۷۰۵	۶۹۹	۷۳۰
				۷۶/۲	۱۴۶۱	۱۴۲۸	۱۵۱۰
				۱۵۲/۴	۲۳۶۷	۲۳۸۳	۲۴۴۲
				۳۰۴/۸	۳۸۴۹	۳۸۱۰	۳۸۶۵
LWFCGC2	۲۳/۶	۱۴/۴۷	۰/۵	۳۸/۱	۶۷۵	۶۱۵	۶۳۶
				۷۶/۲	۱۰۲۹	۱۰۱۸	۱۰۷۹
				۱۵۲/۴	۱۹۶۳	۱۸۵۱	۱۸۷۹
				۳۰۴/۸	۳۲۴۶	۳۲۸۵	۳۲۵۵
LWFCGC3	۱۸/۹	۱۱/۴۳	۰/۶	۳۸/۱	۴۲۸	۴۰۲	۴۵۵
				۷۶/۲	۷۹۶	۸۱۴	۷۶۳
				۱۵۲/۴	۱۵۶۵	۱۵۳۶	۱۵۸۵
				۳۰۴/۸	۲۴۸۹	۲۵۰۱	۲۴۷۹

۵- تجزیه و تحلیل نتایج

از طریق ماتریس و بخشی در امتداد رابطها عبور می کنند. بنابراین، انرژی شکست کاهش می یابد و شکل پذیری افزایش می یابد. مقادیر d_0 , B , ω_A , ω_C و m و پارامترهای شکست شامل انرژی شکست اولیه (G_p)، اندازه مؤثر منطقه فرایند (C_p)، چقرمگی شکست (K_{IC}) و جابهجایی مؤثر بحرانی باز شدن نوک ترک (δ_c) در جدول ۵ نشان داده شده اند.

دقت نتایج روش اثر اندازه در صورتی قابل قبول است که مقادیر شاخص های آماری شامل ضریب تغییرات شیب خط رگرسیون (ω_A)، ضریب تغییرات مقطع (ω_C) و عرض نسبی نوار پراکندگی (m) به ترتیب از ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۲ تجاوز نکرده باشد [۳۳]. همانطور که در جدول ۵ مشاهده می شود، شاخص های آماری (ω_A ، ω_C و m) معیارها را برآورده کرده اند.

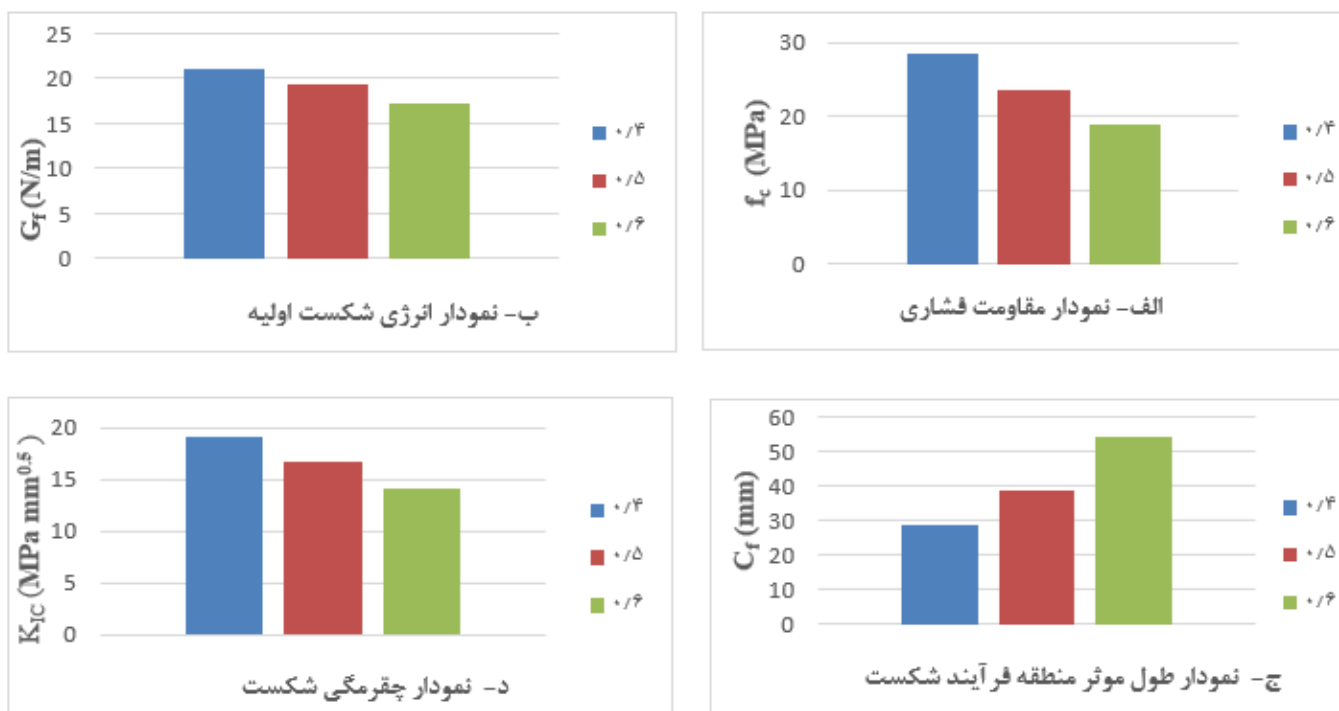
مقادیر مقاومت فشاری، انرژی شکست اولیه (G_p)، اندازه مؤثر منطقه فرایند شکست (C_p) و چقرمگی شکست (K_{IC}) برای نسبت های مختلف فعال کننده به چسب (Al/Bi) در شکل ۴ نشان داده شده اند. همه پارامترهای شکست بر اساس توصیه نامه رایلم [۳۶] با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی محاسبه می شوند. نمونه ای از تحلیل رگرسیون خطی برای طرح اختلاط شماره LWFCGC1 در شکل ۵ نشان داده شده است.

حداکثر بارهای اصلاح شده برای تمام نمونه های تیر شکاف دار مورد استفاده در روش اثر اندازه در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که کاهش نسبت فعال کننده به چسب (Al/Bi) منجر به افزایش بارهای شکست می شود. در مورد بتن های معمولی با کاهش نسبت آب به سیمان نیز بارهای شکست افزایش می یابد. این امر مبین تشابه نقش فعال کننده در بتن ژئوپلیمری با آب در بتن معمولی و چسب در بتن ژئوپلیمری با سیمان در بتن معمولی است. با افزایش نسبت فعال کننده به چسب (Al/Bi): اولاً، تخلخل خمیر ژئوپلیمر افزایش یافته و فشردگی آن کاهش می یابد [۴۴-۴۶]. ثانیاً، مقدار آب کل، تعداد یون های هیدروکسیل و نیز کاتیون های آن ها (مانند Na + و Si +۴) در سیستم افزایش می یابد. این ها مانع از فرآیند ژئوپلیمریزاسیون می شوند و باعث می شوند محتوای کمتری از ژل N-A-S-H با ریزساختار ضعیف تشکیل شود [۴۵ و ۴۴] و ثالثاً، انقباض ناشی از خشک شدگی خمیر ژئوپلیمر افزایش می یابد که منجر به ایجاد ریزترک های بیشتر در خمیر سخت شده می شود [۴۶]. بر این اساس، به دلیل ایجاد تخلخل و ریزترک های بیشتر در خمیر و همچنین کیفیت پایین تر خمیر ژئوپلیمر، در نسبت بالاتر Al/Bi، یک شکست بین دانه ای رخ می دهد. در این مورد، ترک ها تا حدی

جدول ۵. پارامترهای شکست روش اثر اندازه (SEM)

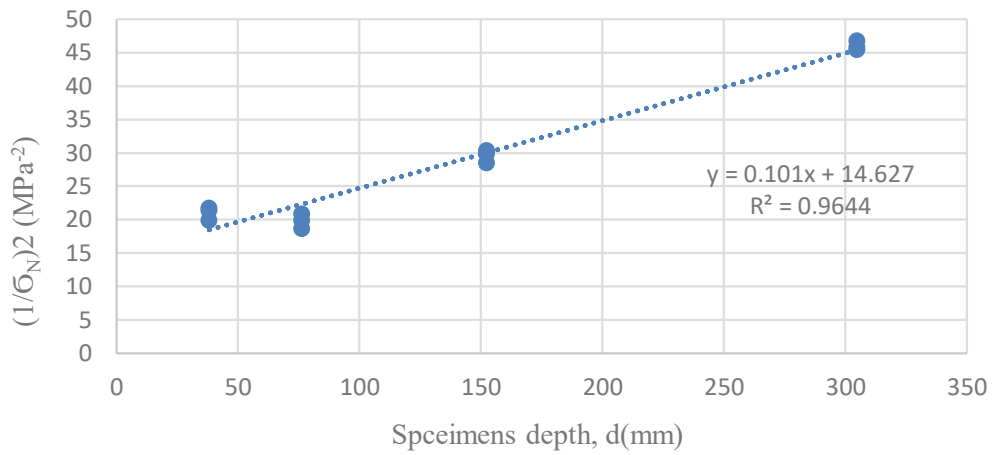
Table 5. Fracture parameters of the size effect method (SEM)

سری	فعال کننده /چسب	G_f (N/m)	C_f (mm)	d_0 (mm)	B (MPa)	K_{IC} (MPa mm ^{0.5})	δ_c (mm)	ω_A	ω_C	m
LWFCGC1(A1)	۰/۴	۲۰/۹۸	۲۹/۰۷	۱۴۴/۸۵	۰/۵۹	۱۹/۰۴	۰/۰۲۰۴	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۱
LWFCGC2(A2)	۰/۵	۱۹/۳۳	۳۸/۷۶	۱۹۳/۱۷	۰/۴۵	۱۶/۷۳	۰/۰۲۸۵	۰/۰۸۷	۰/۰۸	۰/۱۲۲
LWFCGC3(A3)	۰/۶	۱۷/۳۱	۵۴/۱۲	۲۶۹/۷۳	۰/۳۲	۱۴/۰۷	۰/۰۴۲۴	۰/۰۱۰۲	۰/۰۶۸	۰/۱۱۷



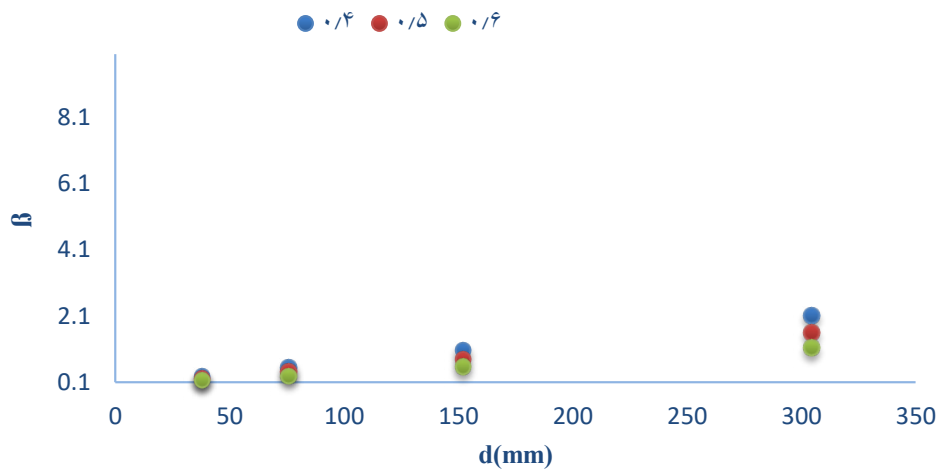
شکل ۴. پارامترهای شکست LWFCGC در نسبت‌های مختلف فعال کننده به چسب

Fig. 4. Fracture parameters of LWFCGC at different ratios of activator to binder



شکل ۵. رگرسیون خطی برای طرح اختلاط شماره LWFCGC1

Fig. 5. Linear regression for LWFCGC1 mixing plot

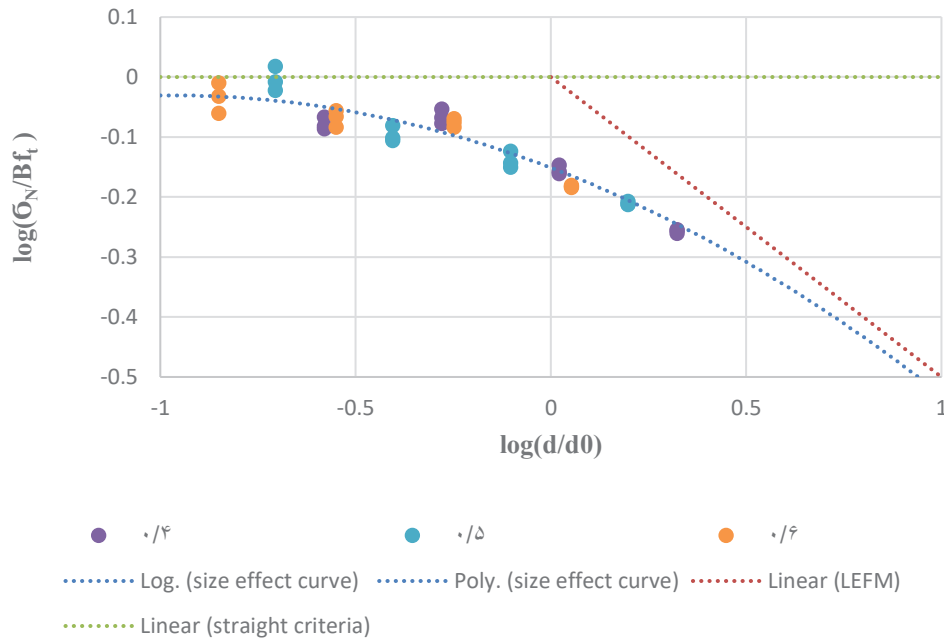


شکل ۶. تغییر β با عمق تیرها برای LWFCGC با نسبت‌های مختلف Al/Bi

Fig. 6. Variation of β with beam depth for LWFCGC with different Al/Bi ratios

معیارهای مکانیک شکست غیرخطی (NLFM) قرار دارند. علاوه بر این، واضح است که β با افزایش عمق نمونه‌ها و نسبت فعال کننده به چسب (Al/Bi) افزایش می‌یابد.

در شکل ۶، مقادیر عدد شکنندگی (β) در برابر عمق نمونه‌های تیر (d) برای نسبت‌های مختلف نسبت فعال کننده به چسب (Al/Bi) نمایش داده شده است. بدیهی است که تمام مقادیر β در محدوده



شکل ۷. منحنی اثر اندازه برای مخلوط‌های LWFCGC با نسبت‌های مختلف Al/Bi

Fig. 7. Size effect curve for LWFCGC mixtures with different Al/Bi ratios

۷ می‌توان دریافت که تنش اسمی با افزایش عمق تیر کاهش می‌یابد و در همان عمق با کاهش نسبت فعال کننده به چسب (Al/Bi) کاهش می‌یابد.

۶- مقایسه بین پارامترهای شکست

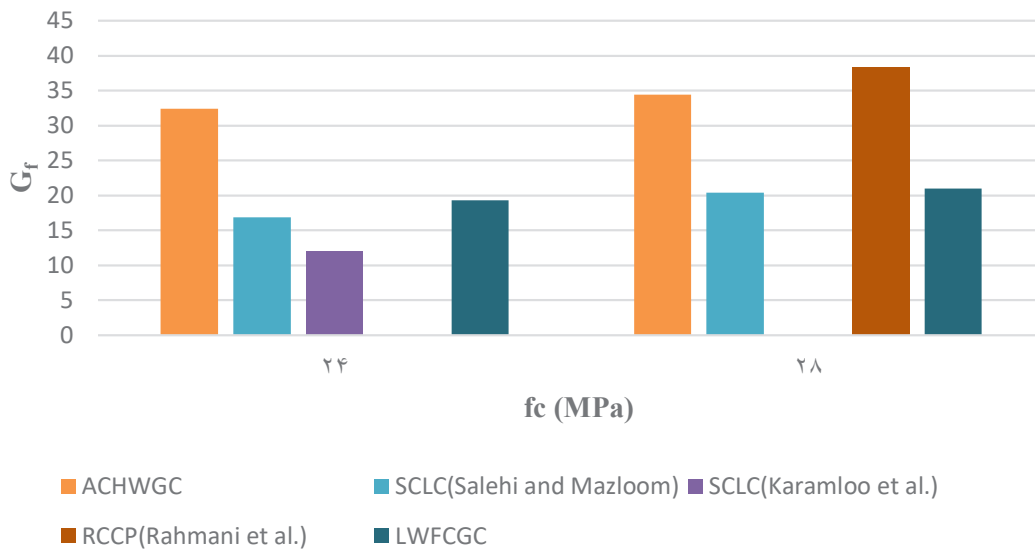
برای مقایسه خواص شکست بتن ژئوپلیمری سبک بر پایه خاکستر بادی کلاس C (LWFCGC) با سایر انواع بتن، از مقایسه پارامترهای شکست به دست آمده از طریق روش اثر اندازه برای بتن‌های در یک رده مقاومتی استفاده شد. پارامترهای شکست LWFCGC و ACGHWGC و OPC که توسط محققان در مطالعات قبلی به دست آمده است، در شکل‌های ۸ و ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که بتن ژئوپلیمری سبک بر پایه خاکستر بادی کلاس C (LWFCGC) نسبت به بتن سبک خودتراکم (SCLC) [۴۷ و ۴۸] انرژی شکست اولیه و چقرمگی شکست بالاتر دارد. انرژی شکست اولیه و چقرمگی شکست LWFCGC از بتن ژئوپلیمری سنگین بر پایه خاکستر کوره بلند عملآوری محیطی شده (ACGHWGC) [۳۵] و بتن غلطکی (RCCP) [۴۹] پایینتر است. نتایج نشان می‌دهد که LWFCGC تردتر از SCLC، RCCP و ACGHWGC است.

شکل ۷ منحنی اثر اندازه را برای مخلوط‌های LWFCGC با نسبت‌های مختلف فعال کننده به چسب (Al/Bi) نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج آزمایشگاهی نزدیک یا روی منحنی به دست آمده بر اساس رابطه اثر اندازه قرار دارند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نتایج تجربی با مقادیر پیش‌بینی شده توسط قانون اثر اندازه تطابق خوبی دارند. با توجه به قانون اثر اندازه رابطه (۱)، تنش اسمی به اندازه سازه بستگی دارد و با افزایش عمق تیر کاهش می‌یابد.

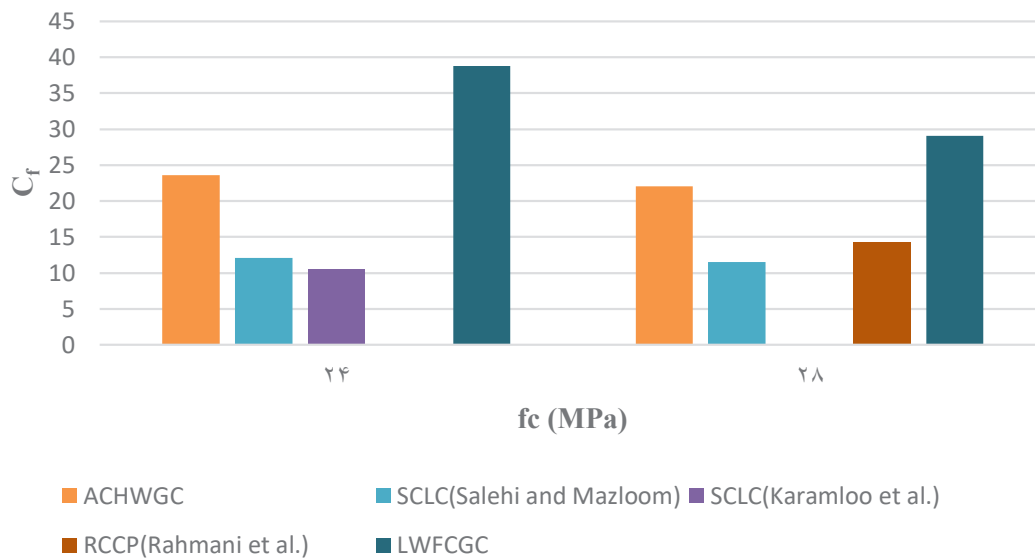
مجانب‌های رابطه (۱)، یک خط افقی است که معیارهای مقاومت (یا تنش محدود؛ به عنوان مثال $\sigma_N = B$ برای d کوچک) و یک خط مستقیم با شیب -0.5 است که نشان دهنده شرایط مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM) است (یعنی $\sigma_N \propto d^{-0.5}$ برای d بزرگ). بر اساس داده‌های به دست آمده می‌توان بیان کرد که برای نمونه‌های تیر با اندازه بزرگ‌تر با نسبت فعال کننده به چسب (Al/Bi) کمتر، یک جابه‌جایی از چپ به راست رخ می‌دهد و معیارهای طراحی به معیار LEFM نزدیک می‌شوند.

برعکس، برای تیرهای کوچک‌تر با نسبت فعال کننده به چسب (Al/Bi) بالاتر، یک جابه‌جایی از راست به چپ رخ می‌دهد و معیارهای طراحی به معیار مقاومت نزدیک می‌شوند. با توجه به شکل



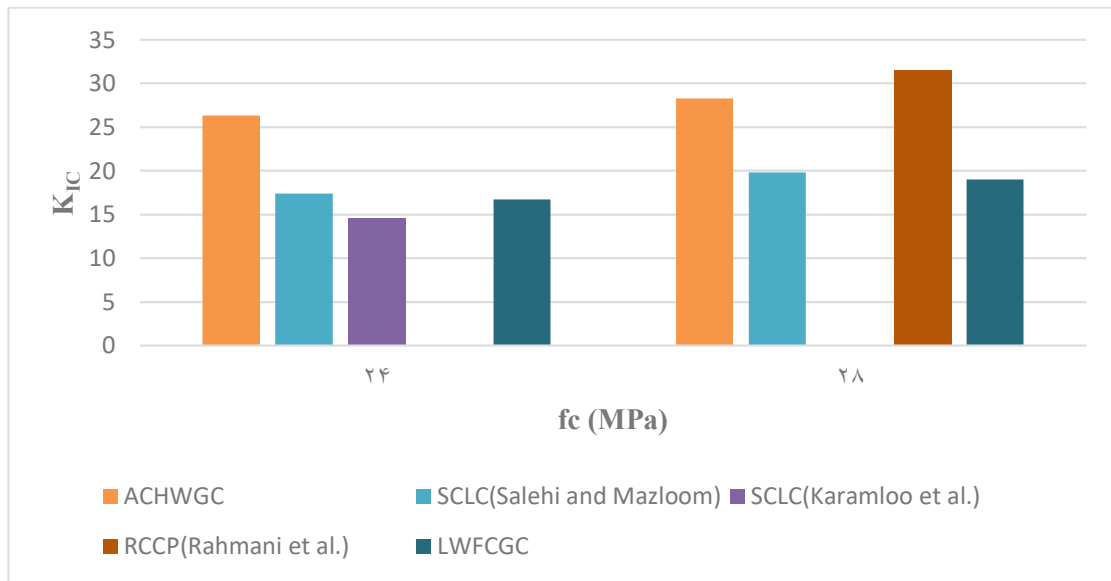
شکل ۸. انرژی شکست اولیه (G_f) برای بتن‌های مختلف

Fig. 8. Initial fracture energy (G_f) for different concretes



شکل ۹. اندازه مؤثر منطقه فرایند (C_p) برای بتن‌های مختلف

Fig. 9. Effective size of process area (C_p) for different concretes



شکل ۱۰. چقرمگی شکست (K_{IC}) برای بتن‌های مختلف

Fig. 10. Fracture toughness (K_{IC}) for different concretes

۳- در تمام نمونه‌ها با افزایش مقاومت فشاری f_c از MPa $۱۸/۹$ به $۲۸/۴$ MPa، از G_f $۱۷/۳۱$ N/m به $۲۰/۹۸$ N/m افزایش و چقرمگی شکست K_{IC} از $۲۰/۹۸$ MPa mm^{3/2} به $۱۹/۰۴$ MPa mm^{3/2} افزایش یافت و طول ناحیه‌ی توسعه‌ی شکست C_f از $۱۹/۰۴$ mm به $۲۹/۰۷$ mm کاهش می‌یابد. در نتیجه هر چه مقاومت فشاری بیشتر باشد، انرژی شکست و همچنین تردی بیشتر خواهد شد.

منابع

- [1] J. Davidovits, "Pyramids of Egypt Man-Made Stone, Myth or Fact?" symposium on Archaeometry Smithsonian Institution, Washington DC, (1984).
- [2] J. Davidovits, Geopolymer chemistry and applications, Geopolymer Institute, 2008.
- [3] J. Davidovits, What is a geopolymer? Introduction, Institute Geopolymere, Saint-Quentin, France, Accessed on January, 29 (2010).
- [4] D. Hardjito, S.E. Wallah, D.M. Sumajouw, B.V. Rangan, On the development of fly ash-based geopolymer concrete, Materials Journal, 101(6) (2004) 467-472.

۷- نتیجه گیری

در مقاله حاضر، اثرات نسبت فعال کننده به چسب (Al/Bi) بر پارامترهای شکست بتن ژئوپلیمری سبک بر پایه خاکستر بادی کلاس C (LWFCGC) با استفاده از روش اثر اندازه (SEM) مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج اصلی به شرح زیر خلاصه می‌شود:

۱- با افزایش نسبت فعال کننده به چسب (Al/Bi) از $۰/۴$ به $۰/۶$ ، انرژی شکست G_f از $۲۰/۹۸$ N/m به $۱۷/۳۱$ N/m تغییر کرد و $۱۷/۵$ ٪ کاهش یافت. چقرمگی شکست K_{IC} از $۱۹/۰۴$ MPa mm^{3/2} به $۱۴/۰۷$ MPa mm^{3/2} کاهش یافت و ۲۶ ٪ کاهش را نشان داد. در حالی که طول ناحیه‌ی توسعه‌ی شکست C_f از $۲۹/۰۷$ mm به $۵۴/۱۲$ mm افزایش یافت و $۸۶/۱$ ٪ افزایش را نشان داد. این بدان معنی است که با افزایش نسبت فعال کننده به چسب (Al/Bi)، مشابه آنچه در افزایش نسبت آب به سیمان در بتن‌های معمولی مشاهده می‌شد، انرژی شکست کاهش می‌یابد و شکل‌پذیری بیشتر می‌شود.

۲- با افزایش نسبت فعال کننده به چسب (Al/Bi) از $۰/۴$ به $۰/۶$ ، مقاومت فشاری f_c از $۲۸/۴$ MPa به $۱۸/۹$ MPa کاهش یافت. $۳۳/۴$ ٪ کاهش تغییر می‌یابد و میزان مدول الاستیسیته E نیز از $۱۷/۲۸$ GPa به $۱۱/۴۳$ GPa کاهش یافت که معادل ۳۴ ٪ کاهش است.

- Materials, 131 (2017) 552-563.
- [16] Y. Ding, Y.-L. Bai, Fracture properties and softening curves of steel fiber-reinforced slag-based geopolymer mortar and concrete, *Materials*, 11(8) (2018) 1445.
- [17] Y. Ding, J.-t. Yu, K.-Q. Yu, S.-l. Xu, Basic mechanical properties of ultra-high ductility cementitious composites: From 40 MPa to 120 MPa, *Composite structures*, 185 (2018) 634-645.
- [18] Y. Ding, K.-Q. Yu, J.-t. Yu, S.-l. Xu, Structural behaviors of ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC) beams subjected to bending-experimental study, *Construction and Building Materials*, 177 (2018) 102-115.
- [19] K. Yu, L. Li, J. Yu, Y. Wang, J. Ye, Q. Xu, Direct tensile properties of engineered cementitious composites: A review, *Construction and Building Materials*, 165 (2018) 346-362.
- [20] B. Sabir, S. Wild, M. Asili, On the tortuosity of the fracture surface in concrete, *Cement and concrete research*, 27(5) (1997) 785-795.
- [21] F. Wittmann, Crack formation and fracture energy of normal and high strength concrete, *Sadhana*, 27(4) (2002) 413-423.
- [22] Y. Ding, C.-J. Shi, N. Li, Fracture properties of slag/fly ash-based geopolymer concrete cured in ambient temperature, *Construction and Building Materials*, 190 (2018) 787-795.
- [23] D. Sumajouw, D. Hardjito, S. Wallah, B. Rangan, Flexural Behaviour Fly Ash Based Geopolymer Concrete Beams, *Proceedings of the 22nd Biennial conference of the Concrete Institute of Australia*, 6(1) (2005) 77-86.
- [24] E. Chang, P. Sarker, N. Lloyd, B. Rangan, Shear behaviour of reinforced fly ash-based geopolymer concrete beams, in: *Proceedings of the 23rd Biennial Conference of the Concrete Institute of Australia*, 2007, pp. 679-688.
- [25] P.K. Sarker, Analysis of geopolymer concrete columns, *Materials and structures*, 42(6) (2009) 715-724.
- [26] P. Sarker, T. de Meillon, Geopolymer concrete after exposure to high temperature heat, *Recent Developments*
- [5] A.M. Fernandez-Jimenez, A. Palomo, C. Lopez-Hombrados, Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete, *ACI Materials Journal*, 103(2) (2006) 106 - 112.
- [6] J. Davidovits, High-alkali cements for 21st century concretes, *Special Publication*, 144 (1994) 383-398.
- [7] T. Bakharev, J.G. Sanjayan, Y.-B. Cheng, Alkali activation of Australian slag cements, *Cement and Concrete Research*, 29(1) (1999) 113-120.
- [8] P. Nath, P.K. Sarker, Geopolymer concrete for ambient curing condition, in: *Australasian structural engineering conference*, 2012, pp. 225.
- [9] J. Wongpa, K. Kiattikomol, C. Jaturapitakkul, P. Chindaprasirt, Compressive strength, modulus of elasticity, and water permeability of inorganic polymer concrete, *Materials & Design*, 31(10) (2010) 4748-4754.
- [10] N. Lee, H.-K. Lee, Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature, *Construction and Building Materials*, 47 (2013) 1201-1209.
- [11] A.M. Rashad, Properties of alkali-activated fly ash concrete blended with slag, *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, 10(1) (2013) 57-64.
- [12] P. Nath, P.K. Sarker, Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition, *Construction and Building materials*, 66 (2014) 163-171.
- [13] Y. Ding, J.-G. Dai, C.-J. Shi, Mechanical properties of alkali-activated concrete subjected to impact load, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(5) (2018) 04018068.
- [14] B. Nematollahi, J. Sanjayan, F.U. Ahmed Shaikh, Tensile strain hardening behavior of PVA fiber-reinforced engineered geopolymer composite, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(10) (2015) 04015001.
- [15] B. Nematollahi, J. Sanjayan, J. Qiu, E.-H. Yang, Micromechanics-based investigation of a sustainable ambient temperature cured one-part strain hardening geopolymer composite, *Construction and Building*

- process zone length and brittleness number from size effect, with application to rock and concrete, *International Journal of fracture*, 44(2) (1990) 111-131.
- [38] ASTM C618, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, ASTM international, 2013.
- [39] ASTM C136. Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, (2005).
- [40] ASTM C331, Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete, ASTM International, 2017.
- [41] ASTM C469, Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression, *Annual Book of ASTM standards*, 4 (2002).
- [42] ASTM C496, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, *Annual Book of ASTM Standard*, American Society for Testing and Materials, (2011).
- [43] BS EN 12390, Testing hardened concrete, Compressive Strength of Test Specimens, BS EN, (2009) 12390-12393.
- [44] C. Ruiz-Santaquiteria, J. Skibsted, A. Fernández-Jiménez, A. Palomo, Alkaline solution/binder ratio as a determining factor in the alkaline activation of aluminosilicates, *Cement and Concrete Research*, 42(9) (2012) 1242-1251.
- [45] W.K. Part, M. Ramli, C.B. Cheah, An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products, *Construction and Building Materials*, 77 (2015) 370-395.
- [46] M. Chi, Effects of the alkaline solution/binder ratio and curing condition on the mechanical properties of alkali-activated fly ash mortars, *Science and Engineering of Composite Materials*, 24(5) (2017) 773-782.
- [47] M. Karamloo, M. Mazloom, G. Payganeh, Influences of water to cement ratio on brittleness and fracture parameters of self-compacting lightweight concrete, *Engineering Fracture Mechanics*, 168 (2016) 227-241.
- in *Structural Engineering*, in A. Zingoni (ed.), *Mechanics and Computation*, Millpress, Rotterdam, The Netherlands, (2007) 1566-1571.
- [27] A. Nazari, A. Bagheri, S. Riahi, Properties of geopolymer with seeded fly ash and rice husk bark ash, *Materials Science and Engineering: A*, 528(24) (2011) 7395-7401.
- [28] Z. Pan, J.G. Sanjayan, B.V. Rangan, Fracture properties of geopolymer paste and concrete, *Magazine of concrete research*, 63(10) (2011) 763-771.
- [29] P.K. Sarker, R. Haque, K.V. Ramgolam, Fracture behaviour of heat cured fly ash based geopolymer concrete, *Materials & Design*, 44 (2013) 580-586.
- [30] P. Nath, P.K. Sarker, Fracture properties of GGBFS-blended fly ash geopolymer concrete cured in ambient temperature, *Materials and Structures*, 50(1) (2017) 1-12.
- [31] Y. Ding, J.-G. Dai, C.-J. Shi, Fracture properties of alkali-activated slag and ordinary Portland cement concrete and mortar, *Construction and Building Materials*, 165 (2018) 310-320.
- [32] Q. Li, L. Cai, Y. Fu, H. Wang, Y. Zou, Fracture properties and response surface methodology model of alkali-slag concrete under freeze-thaw cycles, *Construction and Building Materials*, 93 (2015) 620-626.
- [33] Z. Zuhua, Y. Xiao, Z. Huajun, C. Yue, Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer, *Applied clay science*, 43(2) (2009) 218-223.
- [34] X. Yao, Z. Zhang, H. Zhu, Y. Chen, Geopolymerization process of alkali-metakaolinite characterized by isothermal calorimetry, *Thermochimica Acta*, 493(1-2) (2009) 49-54.
- [35] S.H.G. Mousavinejad, M.F. Gashti, Effects of alkaline solution/binder and Na₂SiO₃/NaOH ratios on fracture properties and ductility of ambient-cured GGBFS based heavyweight geopolymer concrete, *Structures*, 32 (2021) 2118-2129.
- [36] RILEM FMT-89, Fracture mechanics of concrete—test methods, Size-effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete, *Materials and Structures*, 23 (1990) 461-465.
- [37] Ba, M. Kazemi, Determination of fracture energy,

- [49] A.M. Al Bakri, H. Kamarudin, M. Bnhussain, A. Rafiza, Y. Zarina, Effect of $\text{Na}^2/\text{SiO}^3/\text{NaOH}$ Ratios and NaOH Molarities on Compressive Strength of Fly-Ash-Based Geopolymer, *ACI Materials Journal*, 109(5) (2012) 503.
- [48] E. Rahmani, M.K. Sharbatdar, M. Beygi, The effect of water-to-cement ratio on the fracture behaviors and ductility of Roller Compacted Concrete Pavement (RCCP), *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 109 (2020) 102753.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. R. Abbasi Zargaleh, M. Mazloom, M. Jafari Samimi, M. H. Ramesht, Effect of alkaline solution to binder ratio on the fracture parameters of lightweight geopolymer concrete based on fly ash, Amirkabir J. Civil Eng., 55(3) (2023) 723-738.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21003.7594

