

بررسی عملکرد مبتنی بر شکست بتن ژئوپلیمری سنگین تقویت شده با الیاف فولادی

سیدحسین قاسم زاده موسوی نژاد*

دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

کامیار فقیهی

دانشجوی دکتری عمران، سازه، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

چکیده

در مطالعه حاضر، خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمری سنگین وزن تقویت شده با الیاف فولادی شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی بررسی شد. علاوه بر این، پارامترهای شکست مطابق روش کار شکست (WFM) روش اثر اندازه (SEM) نیز بررسی شد. در این تحقیق ابتدا نمونه‌ای حاوی سنگ‌دانه‌های طبیعی فاقد الیاف مورد آزمایش قرار گرفت. سپس یک نمونه که در آن سنگ‌دانه‌های سنگین مگنتیت که از معدن آهن چاه کوه استان یزد تهیه شده است، به عنوان جایگزین کامل برای سنگ‌دانه‌های طبیعی بررسی شد. سپس به همین نمونه در کسرهای حجمی ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۲۵ و ۱/۵ درصد حجمی الیاف فولادی اضافه شده و اثرات آن بررسی شد. نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها نشان داد که افزودن الیاف فولادی با هر کسر حجمی منجر به افزایش مقاومت‌های فشاری و کششی غیرمستقیم شده است. نتایج نشان داد که انرژی شکست (G_F) حاصل از روش مکانیک شکست (WFM) در نمونه با الیاف فولادی با نسبت ۱/۵ درصد بیشتر از نمونه شاهد است. با این حال افزایش درصد الیاف فولادی منجر به افزایش انرژی شکست شده است. بررسی مقادیر اندازه مؤثر منطقه فرایند (C_f) نشان داد که در نمونه‌های با الیاف فولادی ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد، مقدار آن کمتر از نمونه شاهد و در نمونه‌های دیگر بیشتر از نمونه شاهد به دست آمده است. با وجود این افزایش درصد الیاف فولادی به طور پیوسته منجر به افزایش C_f شده است. نسبت انرژی شکست دو روش G_F/G_F برای طرح‌های مختلف در این تحقیق بین ۰/۸۱ تا ۱/۱۴ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: بتن ژئوپلیمری، الیاف فولادی، اثر اندازه، روش کار، مکانیک شکست.

* نویسنده مسئول: h.mosavi@guilan.ac.ir

۱- مقدمه

آهن در بتن بررسی کردند. بررسی‌های انجام‌شده در این تحقیق نشان داد که استفاده از بتن با سنگ‌دانه‌های بازیافتی و سرباره آهن تا حد زیادی با خواص بتن معمولی مطابقت دارد [۱۴].

سینگ و همکاران عملکرد حالت تازه بتن حاوی سرباره آهن و سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که گنجاندن سرباره آهن باعث بهبود کارایی، مقاومت فشاری و ویژگی‌های نفوذناپذیری بتن با سنگ‌دانه بتن بازیافتی شده است. همچنین در بتن تهیه شده با ۳۰ درصد سرباره آهن و ۲۵ درصد سنگ‌دانه بازیافتی مقاومت فشاری و مقاومت در برابر نفوذ آب نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است [۱۵].

ال اونی و همکاران عملکرد مکانیکی، نفوذپذیری آب و کلرید بتن ترکیبی بازیافت شده با الیاف فولادی- پلی پروپیلن را بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از الیاف فولادی منفرد یا ترکیبی منجر به بهبود عملکرد خمشی بتن با سنگ‌دانه بازیافتی شده است. همچنین مقاومت خمشی بتن با سنگ‌دانه بازیافتی تقویت‌شده با الیاف فولادی یا ترکیبی به‌طور قابل توجهی بهتر از نمونه بدون الیاف است. علاوه بر این، مقاومت فشاری و خمشی بهینه در بتن با سنگ‌دانه معمولی و بازیافتی زمانی به‌دست آمد که ۰/۸۵ درصد الیاف پلی پروپیلن و ۱۵ درصد الیاف فولادی به‌صورت ترکیبی استفاده شدند. در مورد مذکور، مقاومت خمشی بتن با سنگ‌دانه بازیافتی ۲۶ درصد بیشتر بود. همچنین استفاده از الیاف هیبریدی نسبت به الیاف فولادی و پلی پروپیلن منفرد تأثیر بیشتری بر نفوذناپذیری بتن در برابر آب دارد [۱۶].

چن و همکاران پتانسیل استفاده از نانو کربنات کلسیم را در بتن بازیافتی تقویت‌شده با الیاف پلی پروپیلن مورد بررسی قرار دادند [۱۷]. با توجه به عدم استفاده از سیمان پرتلند در تولید بتن ژئوپلیمری، این امر منجر به کاهش قابل ملاحظه میزان دی اکسید کربن تولید شده در فرایند تولید بتن می‌شود. سنگ‌دانه مگنتیت استفاده شده که از سنگ‌دانه آهنی و دارای وزن مخصوص زیادی است، به‌دلیل خلوص پایین تر از حد تجاری قابل استفاده در صنعت ذوب آهن نبوده و با توجه به ظرفیت آن‌ها در جلوگیری از تشعشعات، به‌عنوان بخشی از سنگ‌دانه‌های طبیعی در تولید بتن ژئوپلیمری سنگین مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف این تحقیق بررسی عملکرد مبتنی بر شکست بتن ژئوپلیمری سنگین وزن تقویت‌شده با الیاف فولادی می‌باشد.

واژه ژئوپلیمر ابتدا در فرانسه به‌عنوان شاخه جدیدی از مواد سیلیکات آلومینا با ساختار سه‌بعدی پیشنهاد شد [۱]. بتن ژئوپلیمری علاوه بر دارا بودن تمامی مشخصات مکانیکی بتن معمولی با سیمان پرتلند دارای ویژگی‌های مهم دیگری نیز می‌باشد که از جمله آن‌ها می‌توان به ارزان بودن، مقاوم بودن در برابر سولفات‌ها و اسیدها و حملات شیمیایی، مقاومت در برابر آتش و یا مقاومت در برابر آتش بر اساس مواد کامپوزیتی هیبریدی آلی اشاره کرد [۶-۲]. این نوع بتن دارای کاهش تولید CO₂، تکنولوژی تولید آسان، رفتار مناسب در برابر خزش و گاهی کاهش انقباض نسبت به بتن‌های معمولی می‌باشد [۹-۷].

قاسم‌زاده موسوی نژاد و همکاران اثر محلول قلیایی/بایندر و نسبت Na₂SiO₃/NaOH بر خواص شکست و شکل‌پذیری بتن ژئوپلیمر سنگین وزن مبتنی بر GGBFS در محیط عمل‌آوری شده را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت SS/SH، مولاریته و سن، انرژی شکست افزایش و شکل‌پذیری کاهش می‌یابد [۱۰].

قاسم‌زاده موسوی نژاد و همکاران نشان دادند که افزایش حجم الیاف فولادی به‌طور قابل توجهی انرژی شکست و شکل‌پذیری بتن‌های ژئوپلیمر تقویت‌شده با الیاف با کارایی فوق‌العاده را افزایش می‌دهد [۱۱]. ابو‌عیاش و همکاران تأثیر الیاف پلی پروپیلن و فولاد را بر خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمری تقویت‌شده با الیاف با کارایی فوق‌العاده بالا بررسی کردند و نشان دادند که وجود الیاف پلی پروپیلن در نمونه‌های حاوی الیاف فولادی، خواص مکانیکی آن را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، جایگزینی الیاف پلی پروپیلن با الیاف فولادی باعث کاهش مقاومت مکانیکی و افزایش دوام می‌شود [۱۲]. قرآنی و همکاران بتن ژئوپلیمری مبتنی بر سرباره/خاکستر را با الیاف فولاد، پلی پروپیلن و پلی آمید ارزیابی کردند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که تقویت توسط الیاف برخی خواص مکانیکی را بهبود می‌بخشد، اما برای برخی خواص دیگر بی‌اثر است. افزودن الیاف پلی پروپیلن و فولاد به‌طور قابل توجهی مقدار ضریب چقرمگی خمشی را بهبود بخشید، درحالی‌که این بهبود در سری ژئوپلیمرهای تقویت‌شده با الیاف پلی آمید بسیار کمتر است [۱۳].

سینگ و همکاران خواص بتن را با سنگ‌دانه‌های بازیافتی و سرباره

۲- بررسی پارامترهای شکست

۱-۲- روش کار شکست

یکی از پارامترهای مؤثر در تعیین خواص بتن، انرژی شکست آن است که با روش‌های مختلفی محاسبه می‌شود. در این تحقیق انرژی شکست برای نمونه‌ها بر اساس روش تعیین شده در رابطه ۱ به دست آمد. طبق RILEM 50-FMC [۱۸]، روش WFM^۱ (روش مکانیک شکست) روشی شناخته شده برای تخمین پارامترهای شکست است. در این روش، مقدار انرژی شکست بوده که مقدار آن با تقسیم مساحت زیر منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه ارائه شده از آزمایش خمشی سه نقطه‌ای ایجاد شده روی تیر شیاردار به صورت معادله زیر محاسبه می‌شود:

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

که در آن W_0 مساحت زیر منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه، d عمق تیر، b عرض تیر و a_0 عمق بریدگی اولیه است. حداکثر جابجایی در مرحله بعد، طول مشخصه، عنصر مهمی برای ارزیابی شکل پذیری بتن، با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$L_{ch} = \frac{EG_f}{f_t^2} \quad (2)$$

که در آن E مدول الاستیسیته، G_F انرژی شکست و f_t مقاومت کششی بتن است.

۲-۲- روش اثر اندازه

با توجه به RILEM TC89-FMC [۱۹] و بر اساس پیشنهاد بازان و کاظمی [۲۰]، روش SEM^۲ (روش اثر اندازه) به عنوان روشی دقیق برای ارزیابی پارامترهای شکست در بتن در نظر گرفته می‌شود. این روش تحت تأثیر اندازه و شکل نمونه‌ها نیست، بنابراین می‌تواند ویژگی‌های واقعی بتن را نشان دهد. در نتیجه روش SEM معایب روش WFM را ندارد. بر اساس روش SEM، استحکام اسمی به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\sigma_N = \frac{B}{\sqrt{1+\beta}} \quad (3)$$

که در آن B یک پارامتر آزمایشی است و β عدد شکنندگی است که با معادله زیر تعیین می‌شود:

$$\beta = \frac{d}{d_0} \quad (4)$$

که در آن d عمق تیر و d_0 یک ضریب تجربی است. ضریب B و d_0 را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

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

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

رفتار بتن شکل پذیر خواهد بود اگر $\beta < 0.1$ به طوری که معیارهای مقاومت را می‌توان انجام داد. رفتار بتن شکننده است اگر $\beta > 10$ باشد و به این معنی است که مکانیک شکست خطی را می‌توان در این مورد اعمال کرد. و در نهایت، مکانیک شکست غیر خطی قطعاً رفتار سازه را در صورت $\beta > 10$ تعیین می‌کند. حداکثر بار در محاسبه روش SEM از طریق آزمایش خمشی سه نقطه‌ای که بر روی تیرهای شیاردار هندسی مشابه همراه با عمق‌های مختلف اعمال می‌شود، تعیین کننده است. پارامترهای فوق با تخمین شیب (A) و تقاطع (C) معادله رگرسیون خطی به شرح زیر ارائه می‌شوند:

(۷)

$$Y = AX + C$$

که در آن:

$$X_i = d_i, Y_i = \left(\frac{bd_i}{P_i^0}\right)^2, \\ A = \frac{\sum_i (X_i - X^-)(Y_i - Y^-)}{\sum_i (X_i - X^-)^2}, \\ C = Y^- - AX^-$$

که در آن P_i^0 حداکثر بار اصلاح شده است، bd_i به ترتیب عمق و عرض هر یک از نمونه‌های تیر شکاف دار هستند. X و Y مرکز تمام نقاط داده‌ای هستند که با معادلات زیر تعیین می‌شوند:

$$X^- = \frac{1}{n} \sum_i X_i, Y^- = \frac{1}{n} \sum_i Y_i \quad (8)$$

که در آن n تعداد تست‌های انجام شده است. خواص شکست مهم روش SEM مانند انرژی شکست (G_f)، اندازه مؤثر منطقه فرآیند (C_f)، جابجایی مؤثر بحرانی باز شدن نوک ترک (δ_c) و چقرمگی شکست (K_{IC}) را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$G_f = \frac{g(a_0)}{AE} \quad (9)$$

$$C_f = \frac{g(a_0) C}{g'(a_0) A} \quad (10)$$

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

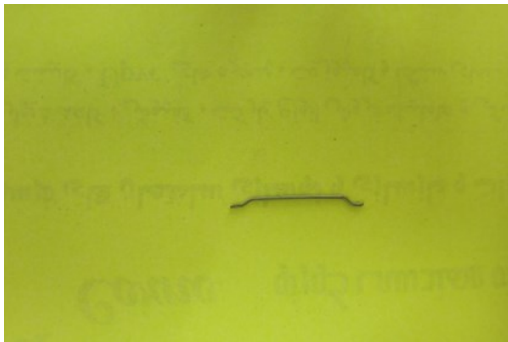
$$K_{IC} = \sqrt{EG_f} \quad (12)$$

² Size effect method

¹ Work of fracture method

جدول ۱- ترکیب شیمیایی GGBFS (%)

Compound	GGBFS
SiO ₂	35.7
Al ₂ O ₃	11
Fe ₂ O ₃	1.2
CaO	37
MgO	11
K ₂ O	0.68
Na ₂ O	0.6
MnO	1.58
Loss on ignition (L.O.I)	2.2



شکل ۱- الیاف فولادی



شکل ۲- الیاف فولادی در داخل بتن

۳-۲- طرح اختلاط

در این تحقیق ۷ مخلوط با هدف بررسی اثرات الیاف فولادی بر خصوصیات مکانیکی و پارامترهای شکست بتن ژئوپلیمر سنگین در نظر گرفته شده است (جدول ۲). در این تحقیق یک نمونه با شن و ماسه طبیعی (CtrlA) به عنوان نمونه شاهد بررسی شده است که در آن از ۸۵۹ کیلوگرم ماسه و ۹۲۴ کیلوگرم شن طبیعی استفاده شده است. همچنین در تمامی نمونه‌ها به ترتیب ۲۴۰ و ۱۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب خاکستر بادی و سرباره استفاده شد. CtrlB نیز یک نمونه با شن و ماسه مگنتیت فاقد الیاف است. منظور از CtrlA و CtrlB بررسی و مقایسه بتن با شن و ماسه طبیعی و سنگین است. در مخلوط‌های شماره ۲-۷، شن و ماسه آهن مگنتیت به عنوان جایگزینی برای شن و ماسه طبیعی استفاده شده است. در

که در آن E مدول الاستیسیته است، $g(\alpha_0)$ معادله بی بعد سرعت آزاد شدن انرژی، $g'(\alpha_0)$ مشتق از $g(\alpha_0)$ و α_0 نسبت طول ترک اولیه به عمق نمونه است. معادله $g(\alpha_0)$ را می توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$g(a) = \left(\frac{l}{d}\right) \pi a [1.5F(a)]^2 \quad (13)$$

$F(a)$ تابع برون یابی کمکی است که می توان آن را تعیین کرد

برای $l/d = 2.5$:

$$F_{2.5}(a) = \frac{1.0 - 2.5a + 4.49a^2 - 3.98a^3 + 1.33a^4}{(1-a)^{1.5}} \quad (14)$$

ضریب تغییر شیب (ω_A)، ضریب تغییر فاصله (ω_C) و عرض نسبی پیوند پراکندگی (m) همان طور که در [۲۰] ارائه شده است را می توان به صورت زیر تعیین کرد:

(۱۵)

$$\omega_a = \frac{S_{YX}}{AS_X(n-1)^{1.2}} \quad (16)$$

$$\omega_c = \frac{S_{YX}}{C(n-1)^{1.2}} \left(1 + \frac{1}{\omega_X^2}\right) \quad (17)$$

(۱۷)

$$m = \frac{\omega_{YX}}{\omega_X}$$

$$S_X^2 = \frac{1}{n-1} \sum_i (X_i - \bar{X})^2,$$

$$S_Y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_i (Y_i - \bar{Y})^2,$$

$$S_{YX}^2 = \frac{n-1}{n-2} (S_Y^2 - A^2 S_X^2),$$

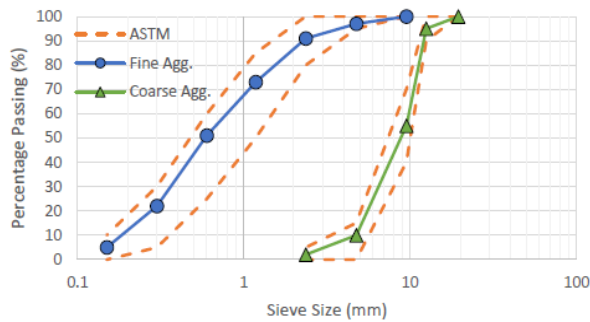
$$\omega_{YX} = \frac{S_{YX}}{\bar{Y}}, \quad \omega_X = \frac{S_X}{\bar{X}}$$

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- مصالح

برای ساخت بتن ژئوپلیمر سنگین از GGBFS با وزن مخصوص ۲۹۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب به عنوان ماده حاوی آلومینو سیلیکات استفاده شد که مشخصات شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است. الیاف فولادی انتهای قلاب شده با طول ۳۵ میلی متر، قطر ۰/۰۸ میلی متر و استحکام کششی ۱۲۰۰ مگاپاسکال به مخلوط‌ها در محتوای کسر حجمی مختلف اضافه شدند (شکل ۱). شکل ۲ بتن سنگین ژئوپلیمری حاوی الیاف فولادی را نشان می دهد.

مخلوط‌ها، از هیدروکسید سدیم (SH) و سیلیکات سدیم (SS) به ترتیب به مقدار ۱۴۲/۹ و ۵۷/۱ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شد. بنابراین نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم (SS/SH) و غلظت NaOH (مولاریته) به ترتیب ثابت و برابر با ۲٫۵ و ۱۰ بود. در شکل ۴ مصالح مورد استفاده شامل سرباره، سدیم هیدروکسید، سدیم سیلیکات نشان داده شده است. شن و ماسه سنگین نیز در شکل ۵ نمایش داده شده است.



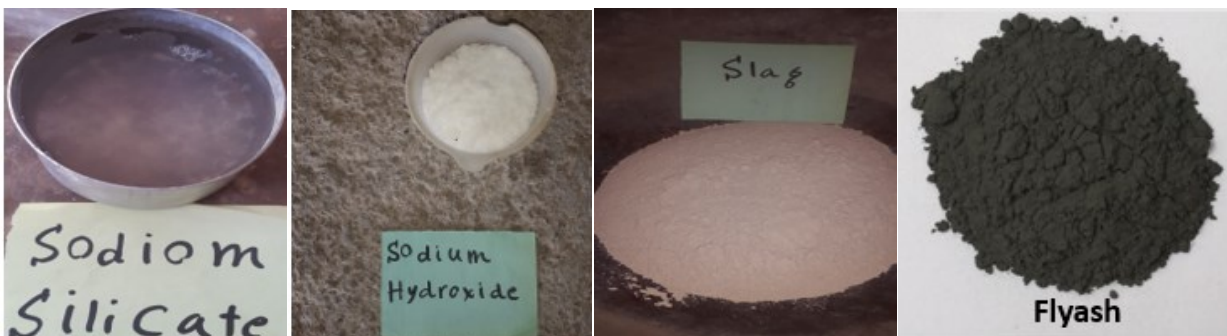
شکل ۳- نمودار دانه‌بندی برای سنگ‌دانه‌های مگنتیت

واقع نمونه CtrlA به‌عنوان نمونه کنترلی برای بررسی اثر مصالح مگنتیت در نظر گرفته می‌شود. در مخلوط با سنگ‌دانه‌های مگنتیت، حجم شن و ماسه مگنتیت در واحد بتن به ترتیب ۱۲۳۳ و ۱۴۰۰ کیلوگرم بود. سنگ‌دانه‌های آهن در این تحقیق از نوع مگنتیت (درشت‌دانه و ریزدانه) تولید شده در شرکت معدنی و صنعتی چادرملو یزد مورد استفاده قرار گرفته است. درشت‌دانه‌های مگنتیت مورد استفاده با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر و با وزن مخصوص ۴۲۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشند. مدول نرمی ریزدانه برابر ۳/۲ می‌باشد. سنگ‌دانه‌های مصرفی در هنگام ساخت بتن در حالت اشباع با سطح خشک (SSD) بودند. نمودار دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها در شکل ۳ ارائه شده است. هر دو ریزدانه و درشت‌دانه مصرفی الزامات ASTM C33 را برآورده می‌کنند. در مخلوط‌های شماره ۳ تا ۷، از الیاف فولادی با نسبت‌های ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۵/۲۶ و ۱/۵ درصد استفاده شده است. در تمامی

جدول ۲- طرح اختلاط

No	Name	BS	fly ash	(Slag)	Steel Fiber	Na ₂ SiO ₃	NaOH	(SS+SH)	(SS+SH)/BS	SS/SH	NaOH molarity	Extra Water	Sand	Gravel	RIS	RIG		
		(Kg/m ³)	(%) (Kg/m ³)	(%) (Kg/m ³)	%	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)					(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)		
1	ctrlA	400	60	240	40	160	0	142.8571	57.14286	200	0.5	2.5	10	30	859	924	0	0
2	ctrlB	400	60	240	40	160	0	142.8571	57.14286	200	0.5	2.5	10	30	0	0	1233	1400
3	S0.5	400	60	240	40	160	0.5	142.8571	57.14286	200	0.5	2.5	10	30	0	0	1233	1400
4	S0.75	400	60	240	40	160	0.75	142.8571	57.14286	200	0.5	2.5	10	30	0	0	1233	1400
5	S1	400	60	240	40	160	1	142.8571	57.14286	200	0.5	2.5	10	30	0	0	1233	1400
6	S1.25	400	60	240	40	160	1.25	142.8571	57.14286	200	0.5	2.5	10	30	0	0	1233	1400
7	S1.5	400	60	240	40	160	1.5	142.8571	57.14286	200	0.5	2.5	10	30	0	0	1233	1400

RIS=وزن شن مگنتیت RIG = وزن ماسه مگنتیت



شکل ۴- مصالح مورد استفاده



شکل ۷- نمایی از آزمایش کشش برزیلی



شکل ۵- شن و ماسه سنگین مورد استفاده



شکل ۸- نمایی از آزمایش مدول الاستیسیته

۳-۳- روش آزمایش

برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری بر اساس ASTM C109 از نمونه‌های مکعبی با ابعاد $100 \times 100 \times 100$ میلی‌متر استفاده شد [۲۱]. برای تعیین مقاومت کششی به روش برزیلی از نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر بر اساس استاندارد ASTM C496 استفاده شده است [۲۲]. اندازه‌گیری مدول الاستیسیته از نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر بر اساس استاندارد [۲۳]. نمایی از نمونه‌های تحت آزمایشات مختلف در اشکال ۶-۸ نمایش داده شده است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- ویژگی‌های مکانیکی

نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش مکانیکی شامل مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی نمونه‌های مورد مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است.

۴-۱-۱- مقاومت فشاری

شکل ۹ مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقاومت فشاری نمونه ctrlB نسبت به نمونه ctrlA، ۲/۸ درصد بیشتر است. همچنین مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف با درصدهای مختلف بدون استثنا بیشتر از نمونه شاهد (ctrlB) است. به طوری که اختلاف مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط S1.25، S1، S0.75، S0.5 و S1.5 نسبت به نمونه شاهد مزبور به ترتیب ۲/۶، ۴/۴، ۱۴/۰ و ۱۹/۵ و ۲۵/۷ درصد بیشتر است. علت افزایش مقاومت فشاری را



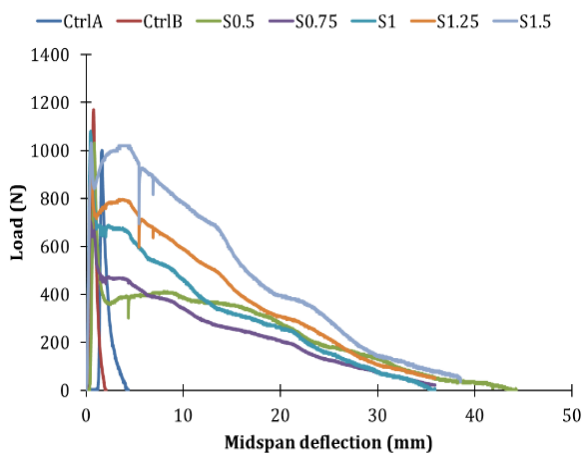
شکل ۶- نمایی از تست فشاری

۴-۲- نتایج WFM

در روش WFM، انرژی شکست (G_F) با رابطه ۱ محاسبه شده است. منحنی بار-جابجایی مخلوط‌های آزمایش شده با استفاده از روش WFM در شکل ۱۱ نشان داده شده است. شکل ۱۲ رابطه بین مخلوط‌ها و G_F را نشان می‌دهد. مقادیر انرژی شکست نیز در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۴ مشخص است، انرژی شکست تنها در نمونه S1.5 بیشتر از نمونه شاهد (ctrlB) است (۱,۲۱ درصد). در سایر نمونه‌های حاوی الیاف، انرژی شکست کمتر از نمونه شاهد حاصل شده است. همچنین افزایش درصد الیاف فولادی به‌طور پیوسته منجر به افزایش انرژی شکست شده است. افزودن ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ درصد الیاف فولادی در مقایسه با نمونه شاهد (CtrlB) به ترتیب منجر به کاهش ۲۵/۱، ۲۵/۲، ۱۳/۲ و ۱/۱ درصدی انرژی شکست شده است.

جدول ۴- مقادیر WFM

مقدار کاریدبور (L_{ch})	انرژی شکست (G_F)	نام طرح اختلاط
۴۳۷/۲۵	۲۳/۴	ctrlA
۴۵۸/۰۷	۲۸/۴	ctrlB
۴۴۵/۴۴	۲۱/۲۶	S0.5
۴۳۳/۴۵	۲۱/۲۳	S0.75
۴۴۴/۰۸	۲۴/۶۴	S1
۴۶۷/۸۵	۲۸/۰۷	S1.25
۵۳۷/۷۲	۳۴/۴۱	S1.5



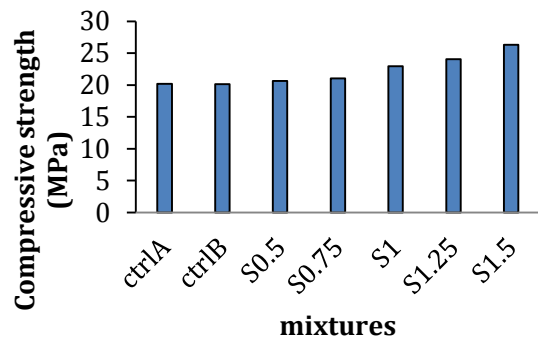
شکل ۱۱- منحنی بار-تغییر مکان وسط تیر حاصل از آزمایش WFM

می‌توان به پل زدن بین ترک‌ها که توسط الیاف فولادی ایجاد می‌شود، نسبت داد.

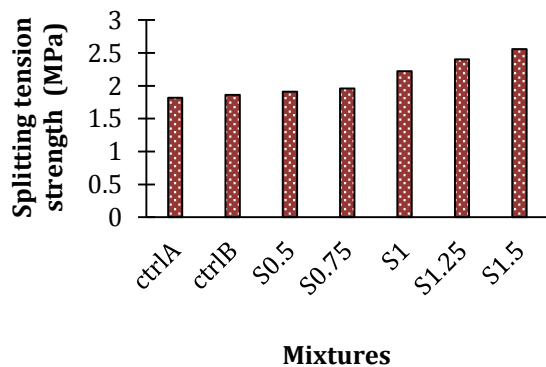
شکل (۱۰) نیز مقایسه مقاومت کششی نمونه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مقاومت کششی نمونه ctrlB نسبت به نمونه ctrlA، ۲/۰ درصد بیشتر است. اما افزودن الیاف فولادی با هر نسبتی به‌طور پیوسته منجر به افزایش مقاومت کششی در قیاس با نمونه شاهد (ctrlB) شده است. این افزایش بین ۲/۷ و ۳۷/۶ درصد متغیر است.

جدول ۳- مقادیر پارامترهای مکانیکی نمونه‌های مورد مطالعه

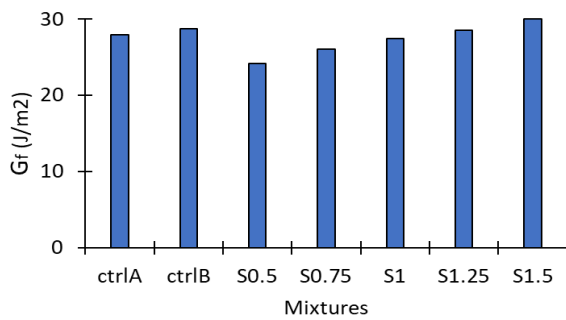
نام طرح	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)
ctrlA	۲۰/۰۲	۱/۸۲
ctrlB	۲۰/۱۳	۱/۸۶
S0.5	۲۰/۶۵	۱/۹۱
S0.75	۲۱/۰۲	۱/۹۶
S1	۲۲/۹۵	۲/۲۲
S1.25	۲۴/۰۵	۲/۴
S1.5	۲۵/۳۱	۲/۵۶



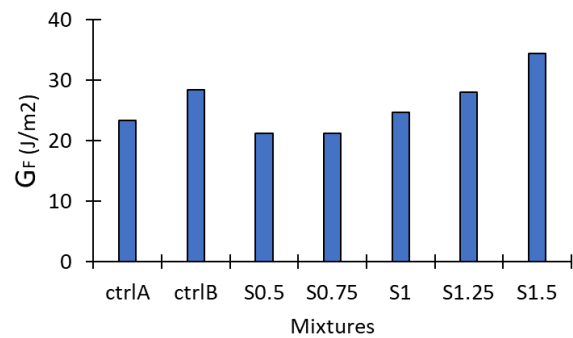
شکل ۹- مقاومت فشاری نمونه‌ها



شکل ۱۰- مقاومت کششی نمونه‌ها



شکل ۱۳- تغییرات G_f برای مخلوط‌های مختلف



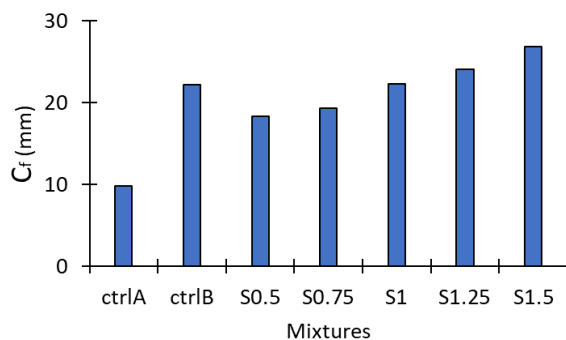
شکل ۱۲- تغییرات G_F برای مخلوط‌های مختلف

C_f نیز یک پارامتر مهم در روش SEM است که به تدریج بتن مربوط می‌شود. این مقادیر به صورت مقایسه‌ای در شکل ۱۴ نشان داده شده است. C_f برای نمونه‌های ctrlA و ctrlB به ترتیب ۹/۸۴ و ۲۲/۱۵ است. همچنین برای نمونه‌های S1، S0.75، S0.5، S1.25، و S1.5 به ترتیب ۱۸/۳، ۱۹/۳، ۲۲/۳، ۲۴/۱ و ۲۶/۹ است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مقدار C_f در نمونه‌های S0.5 و S0.75 به ترتیب ۱۷/۳ و ۱۲/۶ درصد نسبت به ctrlB کمتر است. مقدار C_f در نمونه‌های S1، S1.25، و S1.5 به ترتیب ۸/۸ و ۲۱/۳ درصد بیشتر از نمونه ctrlB است. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد که مقدار C_f با افزایش درصد الیاف فولاد همواره افزایش یافته است. افزایش درصد الیاف فولادی از ۰/۵ به ۰/۷۵، ۱، ۱/۲۵ و ۱/۵ درصد منجر به افزایش ۵/۶، ۲۱/۸، ۳۱/۵ و ۴۶/۷ درصدی C_f شده است. لذا نتیجه‌گیری می‌شود که افزایش درصد الیاف فولادی همواره منجر به افزایش تدریجی در بتن شده است. با استفاده از رگرسیون خطی رابطه بین درصد الیاف فولادی و مقادیر G_f ، C_f و K_{IC} به صورت روابط زیر پیشنهاد شده است:

$$G_f = 5.653(SF) + 21.566 \quad (1)$$

$$C_f = 8.7579(SF) + 13.442 \quad (2)$$

$$K_{IC} = 3.437(SF) + 29.537 \quad (3)$$



شکل ۱۴- تغییرات C_f برای مخلوط‌های مختلف

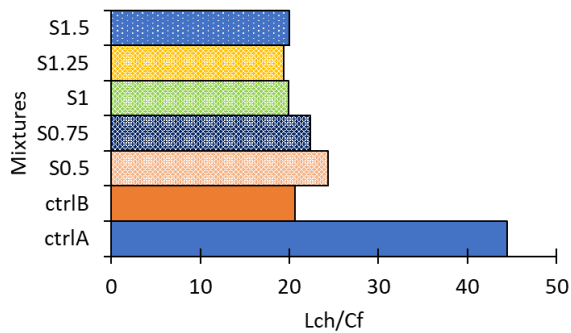
۳-۴- نتایج SEM

جدول ۵ پارامترهای مهم شکست را بر اساس روش SEM نشان می‌دهد، به عنوان مثال، انرژی شکست (G_f)، اندازه مؤثر ناحیه شکست (C_f) و چقرمگی شکست (K_{IC}) ارائه شده است.

جدول ۵- مقادیر SEM

نام طرح اختلاط	انرژی شکست (G_f)	اندازه مؤثر ناحیه شکست (C_f)	چقرمگی شکست K_{IC}
ctrlA	۲۷/۸۶	۹/۸۴	۳۳/۳۸
ctrlB	۲۸/۷۳	۲۲/۱۵	۳۳/۹
S0.5	۲۴/۱۶	۱۸/۳۲	۳۱/۰۹
S0.75	۲۶/۰۶	۱۹/۳۵	۳۲/۲۸
S1	۲۷/۳۶	۲۲/۳۲	۳۳/۰۸
S1.25	۲۸/۴۶	۲۴/۱	۳۳/۷۴
S1.5	۳۰/۰۳	۲۶/۸۹	۳۴/۶۶

شکل ۱۳ رابطه بین مخلوط‌ها و G_f را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که مقدار انرژی شکست در نمونه‌های حاوی الیاف فولادی (به جز نمونه S1.5) نسبت به نمونه شاهد متناظر (ctrlB) کمتر است. مقدار انرژی شکست در نمونه‌های S0.5، S0.75، S1 و S1.25 نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۹/۳، ۱۵/۹ و ۴/۷ درصد کمتر است. این در حالی است که انرژی شکست در نمونه S1.5 نسبت به نمونه شاهد ۴/۵ درصد بیشتر است. افزودن الیاف فولاد در درصد‌های پایین باعث نرمی مقطع و کاهش انرژی شکست و با افزایش آن مقطع به سمت تدریجی تا در نهایت در ۱.۵ درصد الیاف فولادی مصرفی مقدار انرژی شکست کمی بیشتر از نمونه کنترل شده است.



شکل ۱۷- مقادیر نسبت‌های L_{ch}/C_f برای طرح‌های مختلف

۵- نتیجه‌گیری

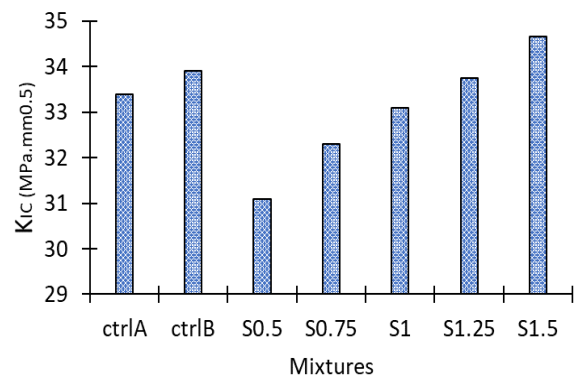
نتایج زیر از انجام این تحقیق به دست آمد:

- افزودن الیاف فولادی با درصد‌های مختلف بین ۲/۷ تا ۳۷/۶ درصد مقاومت فشاری را در مقایسه با نمونه شاهد افزایش داد.
- مقاومت کششی نمونه‌های حاوی الیاف فولادی بین ۲/۷ تا ۳۷/۶ درصد نسبت به نمونه شاهد بیشتر است.
- انرژی شکست (GF) در نمونه با الیاف فولادی با نسبت ۱/۵ درصد بیشتر از نمونه شاهد و در بقیه نمونه‌های حاوی الیاف بین ۱/۱ تا ۲۵/۱ درصد کمتر از نمونه شاهد به دست آمد.
- مقدار C_f در نمونه‌های با الیاف فولادی ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد، کمتر از نمونه شاهد و در نمونه‌های دیگر بیشتر از نمونه شاهد به دست آمده است.
- افزایش درصد الیاف فولادی به طور پیوسته منجر به افزایش C_f و GF شده است.
- نسبت G_F/G_f برای طرح‌های مختلف در این تحقیق بین ۰/۸۱ تا ۱/۱۴ به دست آمده است. این مقدار با توجه به مقدار الیاف فولادی متفاوت است.
- نسبت L_{ch}/C_f در نمونه شاهد با سنگ‌دانه‌های معمولی برابر ۴۴/۴۲ و در نمونه شاهد با سنگ‌دانه سنگین و نمونه‌های با الیاف فولادی بین ۱۹/۴ تا ۲۴/۳۱ متغیر است.

قدردانی

از مدیریت محترم گروه عمران دانشگاه گیلان به دلیل همکاری پیوسته ایشان تشکر به عمل می‌آید.

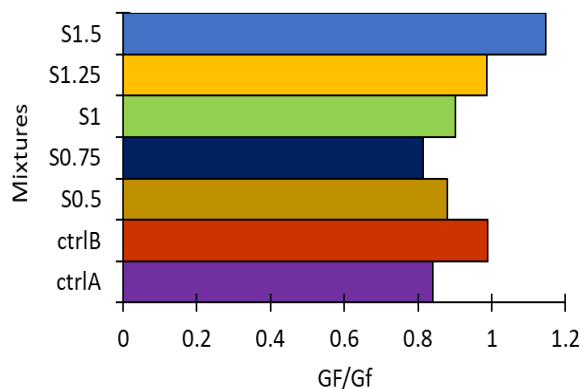
رابطه بین مقادیر K_{IC} و مخلوط‌های مختلف در شکل ۱۵ نشان داده شده است. مقدار K_{IC} که نشان‌دهنده چقرمگی بتن است، با افزایش درصد الیاف فولادی همواره افزایش یافته است. همچنین مقدار K_{IC} در نمونه S1.5 بیشتر از نمونه کنترل است. در بقیه موارد، K_{IC} در نمونه‌های حاوی الیاف کمتر از نمونه شاهد است.



شکل ۱۵- تغییرات K_{IC} برای مخلوط‌های مختلف

۴-۴- رابطه بین نتایج روش SEM و WFM

مقادیر نسبت‌های G_F/G_f برای طرح‌های مختلف در شکل ۱۶ نشان داده شده است. این نسبت در نمونه‌های مورد مطالعه در این تحقیق بین ۰/۸۱ تا ۱/۱۴ متغیر است. شکل ۱۷ مقادیر نسبت‌های L_{ch}/C_f برای طرح‌های مختلف را نشان داده است. در نمونه شاهد با سنگ‌دانه‌های معمولی این نسبت ۴۴/۴۲ و در نمونه شاهد با سنگ‌دانه سنگین و نمونه‌های با الیاف فولادی بین ۱۹/۴ تا ۲۴/۳۱ متغیر است.



شکل ۱۶- مقادیر نسبت‌های G_F/G_f برای طرح‌های مختلف

۶- مراجع

- Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 117, 103157.
- [12] Aisheh, Y. I. A., Atrushi, D. S., Akeed, M. H., Qaidi, S., & Tayeh, B. A. (2022). Influence of polypropylene and steel fibers on the mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced geopolymer concrete. *CaSEM Studies in Construction Materials*, 17, e01234.
- [13] Kuranlı, Ö. F., Uysal, M., Abbas, M. T., Cosgun, T., Niş, A., Aygörmez, Y., Canpolat, O., & Al-mashhadani, M. M. (2022). Evaluation of slag/fly ash baSEMd geopolymer concrete with steel, polypropylene and polyamide fibers. *Construction and Building Materials*, 325, 126747.
- [14] Singh, N., Singh, A., Ankur, N., Kumar, P., Kumar, M., & Singh, T. (2022). Reviewing the properties of recycled concrete aggregates and iron slag in concrete. *Journal of Building Engineering*, 105150.
- [15] Singh, N., Singh, T., Kumar, M., Singh, A., & Kumar, P. (2022). Investigating the fresh state performance of concrete containing iron slag and recycled concrete aggregates. *Materials Today: Proceedings*, 65, 1467-1477.
- [16] El Ouni, M. H., Shah, S. H. A., Ali, A., Muhammad, S., Mahmood, M. S., Ali, B., Marzouki, R., & Raza, A. (2022). Mechanical performance, water and chloride permeability of hybrid steel-polypropylene fiber-reinforced recycled aggregate concrete. *CaSEM Studies in Construction Materials*, 16, e00831.
- [18] Recommendation, R. D. (1985). Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. *Materials and structures*, 18(106), 285-290.
- [19] D'ESSAI, M., MÉ, T., & DE LA RILEM, P. (1990). Size-effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete. *Materials and structures*, 1(1), 7.
- [20] Ba, & Kazemi, M. (1990). Determination of fracture energy, process zone length and brittleness number from size effect, with application to rock and concrete. *International Journal of fracture*, 44, 111-131.
- [21] ASTM C109/C109M-20a, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. Or [50-mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.
- [22] Astm C. Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. C496/C496M-11 2011.
- [23] Astm C. Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression. *Annu B ASTM Stand* 2002;4:469.
- [1]. Davidovits, J. (1984). *Pyramids of Egypt Man-Made Stone, Myth or Fact?* symposium on Archaeometry 1984. Smithsonian Institution, Washington DC.
- [2] Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M., & Rangan, B. V. (2004). On the development of fly ash-baSEMd geopolymer concrete. *Materials Journal*, 101(6), 467-472.
- [3] Fernandez-Jimenez, A. M., Palomo, A., & Lopez-Hombrados, C. (2006). Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete. *ACI Materials Journal*, 103(2), 106.
- [4] Bakharev, T., Sanjayan, J. G., & Cheng, Y.-B. (1999). Alkali activation of Australian slag cements. *Cement and Concrete Research*, 29(1), 113-120.
- [5] Nath, P., & Sarker, P. K. (2012). Geopolymer concrete for ambient curing condition. *Proceedings of the Australasian structural engineering conference*, Perth, Australia.
- [6] Wongpa, J., Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., & Chindaprasirt, P. (2010). Compressive strength, modulus of elasticity, and water permeability of inorganic polymer concrete. *Materials & Design*, 31(10), 4748-4754.
- [7] Saghi, Hassan and Abdolrahim Mehrdadi, 2015, *Geopolymer Cement and its Application in Concrete*, Fourth National Conference on New Materials and Structures in Civil Engineering, Yasuj, Yasuj University In Persian.
- [8] Bahraini, Vahid and Ehsanollah Zeighami, 2012, *Geopolymer concretes Properties and Applications*, The First National Conference on New Materials and Structures in Civil Engineering, Kerman, Graduate University of Industrial and Advanced Technology, In Persian.
- [9] Mousavinejad, S. H. G., & Gashti, M. F. (2021). Effects of alkaline solution/binder and Na₂SiO₃/NaOH ratios on fracture properties and ductility of ambient-cured GGBFS baSEMd heavyweight geopolymer concrete. *Structures*,
- [10] Mousavinejad, S. H. G., & Sammak, M. (2022). An asSEMssment of the effect of Na₂SiO₃/NaOH ratio, NaOH solution concentration, and aging on the fracture properties of ultra-high-performance geopolymer concrete: The application of the work of fracture and size effect methods. *Structures*,
- [11] Mousavinejad, S. H. G., & Sammak, M. (2022). An asSEMssment of the fracture parameters of ultra-high-performance fiber-reinforced geopolymer concrete (UHPFRGC): The application of work of fracture and size effect methods.

Investigation of the Fracture Performance of Heavy Weight Geopolymer Concrete Reinforced with Steel Fibers

Seyed Hosein Ghasemzadeh Mousavinejad *

Associate professor, Department of civil engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

Kamyar Faghihi

Ph.D. Student, Department of civil engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

Abstract

In the present study, the mechanical properties of heavy weight geopolymer concrete reinforced with steel fibers including compressive and splitting tensile strength were investigated. In addition, fracture parameters were also investigated according to WFM and SEM methods. In this research, first, a sample containing natural aggregates without fibers was tested. Then, an example in which heavy recycled aggregates were considered as a complete substitute for natural aggregates. Then, steel fibers were added to the same sample in volume fractions of 0.5, 0.75, 1, 1.25 and 1.5% and its effects were investigated. The results obtained from the tests showed that the addition of steel fibers with any volume fraction led to an increase in indirect compressive and tensile strengths. The results showed that the fracture energy (G_F) obtained by the fracture mechanics method (WFM) in the sample with steel fibers with 1.5 percent is higher than the control sample. However, increasing the percentage of steel fibers has led to an increase in fracture energy. Examining C_f values showed that in samples with 0.5% and 0.75% steel fibers, its value is lower than the control sample and in other samples it is higher than the control sample. However, increasing the percentage of steel fibers has steadily led to an increase in C_f . The G_F/G_f ratio for different designs in this research was between 0.81 and 1.14.

Keywords: geopolymer concrete, steel fibers, size effect, work method, fracture mechanics.

* Corresponding Author: h.mosavi@guilan.ac.ir

