

ارزیابی پارامترهای موثر بر نتایج آزمایش break-off برای تعیین مقاومت بتن حاوی الیاف فولادی

بنیامین گنجه خسروی^۱، سید حسین قاسم‌زاده موسوی نژاد^{۲*}، جواد رزاقی^۳

۱- دانشجوی دکتری عمران-سازه، دانشگاه گیلان

۲- استادیار دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

۳- استادیار دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

*h.mosavi@guilan.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۶/۱۰/۰۹]

تاریخ دریافت: [۹۵/۰۹/۱۹]

چکیده

در این مطالعه آزمایش نیمه مخرب break-off برای ارزیابی مقاومت بتن حاوی الیاف فولادی در محل بررسی شده است. بتن حاوی الیاف فولادی بدلیل مزایای آن در افزایش چقرمگی و مقاومت بتن به ویژه کششی و خمشی، در این مطالعه انتخاب شده است. به منظور فراهم کردن یک پایگاه آماری کامل و جامع، ۲۴ طرح اختلاط با مقادیر مختلف عیار سیمان ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب با نسبت آب به سیمان ثابت ۰/۴، بیشینه اندازه سنگدانه ۱۲/۵ و ۲۵ میلی‌متر و الیاف فولادی با نسبت‌های حجمی ۰، ۰/۳۳، ۰/۶۷ و ۱ درصد در سنین مختلف ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز انتخاب شد. سپس، عوامل تاثیرگذار بر ویژگی‌های بتن حاوی الیاف فولادی و همچنین نتایج آزمایش Break-off ارزیابی شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد علاوه بر مشخصات آزمایش، درصد و مشخصات الیاف فولادی تاثیر زیادی بر خواص بتن و نتایج آزمایش Break-off دارد. نتایج حاکی از آن است که ارزیابی مقاومت با روش فوق دارای قابلیت اعتماد مناسب است، هر چند تخمین مقاومت بتن براساس یک منحنی کالیبراسیون کلی ممکن نیست. از اینرو منحنی‌های کالیبراسیون مستقل برای هر بتن با درصدهای متفاوت الیاف بمنظور تفسیر واقع‌گرایانه نتایج ارائه شده است.

واژگان کلیدی: آزمایش break-off، مقاومت بتن، الیاف فولادی، آزمایش نیمه‌مخرب.

۱- مقدمه

مشکلات بتن بکار رفته با تاخیر همراه بوده و امکان تکرار آزمایش نیز وجود ندارد [2]. همچنین عواملی چون نوع نمونه، اندازه نمونه، نوع قالب، شرایط عمل‌آوری، تراکم، پرداخت سطوح نهایی بتن و تغییرات اتفافی حادث در نوع و مقدار مصالح مصرفی در اختلاط بتن از جمله عواملی است که براساس آن می‌توان ادعا نمود نمونه‌های استاندارد بطور کامل معرف مشخصات و ویژگی‌های واقعی بتن بکار رفته نیستند.

روش‌های مختلفی برای ارزیابی و تعیین مقاومت بتن بکار برده می‌شود. متداول‌ترین آزمایش‌ها تهیه نمونه‌های مکعبی یا استوانه‌ای است که طبق استاندارد به صورت ایده‌آل متراکم و عمل‌آوری می‌شوند و نتایج آن مستقیماً بعنوان مقاومت بالقوه بتن در نظر گرفته می‌شود [1, 2]. از آنجایی که این نمونه‌ها معمولاً در سنین ۷ و ۲۸ روز آزمایش می‌شوند، آگاهی یافتن از

عوامل فوق بر ضرورت ارزیابی مقاومت بتن در محل تاکید می‌نماید و بدین منظور روش‌های مختلفی ابداع شده‌اند که می‌توان آنها را در دو گروه عمده غیرمخرب و نیمه مخرب ارزیابی نمود. آزمایش‌های نیمه‌مخرب با خسارت جزئی بر عضو مورد بررسی همراه است، هر چند آسیب جزئی وارد شده بر عملکرد سازه تأثیری ندارند. در این آزمایش‌ها با توجه به اینکه پارامتری که اندازه‌گیری می‌شود با مقاومت بتن مرتبط می‌باشد از قابلیت اعتماد بالاتری نسبت به روش‌های غیر-مخرب برخوردار است.

در آزمایش نیمه‌مخرب (BO) Break-off، مانومتر مکانیکی به موازات سطح تمام شده نمونه بتنی باری را به مغزه جزئی استوانه‌ای بتنی وارد کرده و باعث گسیختگی در قسمت کف نمونه مغزه می‌شود. کریستیانسن¹ و دیگران نشان دادند که عواملی چون نسبت آب به سیمان، سن بتن، شرایط نگهداری و نوع سیمان می‌تواند بر نتایج آزمایش در ارزیابی مقاومت بتن موثر باشد [1, 3].

جوانسن [4] مهمترین کاربرد این روش را تعیین مقاومت در محل بتن برای تشخیص زمان مناسب برای جداسازی قالب معرفی کرده است. جوانسن [5] یک مقاله پیرامون کاربرد روش BO برای سنجش مقاومت فشاری دال بتنی بکار رفته در روسازی باند فرودگاه منتشر کرد. بایفرس [6] با مطالعه روش BO برای نمونه‌های با نسبت آب به سیمان متفاوت، اندازه سنگدانه متفاوت، مناسب بودن روش BO برای سنجش مقاومت بتن را گزارش نمود.

دال یورگنسن [7, 8] دو گزارش پیرامون کاربردهای روش BO منتشر ساخت. در این مطالعات، کاربرد روش را در آزمایش مقاومت گیرش اپوکسی و بتن بررسی کرده و نیز پاسخ آزمایش را با آزمایش Pull-out برای نمونه‌های مشابه بررسی نمود. کارلسون [9] یک مقاله پیرامون آزمایش BO منتشر نمود که به شش بخش مجزا تقسیم شده بود و در پایان بدین نتیجه رسید که این روش در آینده به عنوان یکی از بهترین روش‌های سنجش مقاومت بتن در محل پذیرفته خواهد شد.

لین و همکاران [10] کارایی آزمایش BO را برای ارزیابی کیفیت پیوستگی در سطح مشترک میلگرد و بتن را بررسی کردند. نتایج تجربی آنها نشان داد که لنگر آزمایش BO هماهنگی مناسبی با مقاومت چسبندگی در سطح مشترک میلگرد و بتن دارد و توانایی ارزیابی آسیب در این قسمت را دارد.

در سال‌های اخیر، استفاده از بتن حاوی مقادیر الیاف فولادی گسترش یافته است [11, 12, 13]. مقاومت کششی کم در مقایسه با مقاومت فشاری ضعف اصلی بتن است که این رفتار شکننده موجب شکست ناگهانی و فرو ریختن سازه‌های بتنی در هنگام زلزله می‌شود. با استفاده از آرماتورهای فولادی در جهت نیروهای کششی می‌توان این مشکل را برطرف نمود. اما جهت نیروهای کششی در بسیاری از مواقع بطور دقیق مشخص نیست. همچنین در بتن تازه بدلیل جمع‌شدگی ابعاد بتن کاهش یافته که منجر به ایجاد ترک‌هایی در بتن می‌شود، که نتیجه آن افزایش نفوذپذیری، و در نهایت کاهش خواص مکانیکی بتن می‌شود. یک راه‌حل مناسب برای غلبه بر این مشکل استفاده از مقادیر کم الیاف برای جلوگیری و کنترل رشد ترک و افزایش مقاومت کششی بتن است [14].

پژوهش‌های آزمایشگاهی زیادی، سودمندی استفاده از الیاف را نشان دادند. چنانکه گزارش‌ها نشان می‌دهد افزودن ۲۰ تا ۵۰ کیلوگرم الیاف در متر مکعب بتن می‌تواند ویژگی‌های مهندسی بتن سخت شده شامل چقرمگی، مقاومت کششی، مقاومت پیچشی، مقاومت در برابر لایه لایه شدگی و مقاومت در برابر ساییدگی را افزایش دهد [12, 15, 16]. پس بتن الیاف فولادی بدلیل مزایای ذکر شده به عنوان بتن مورد بررسی در این مطالعه انتخاب شده است.

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تاکنون مطالعه جامعی که اثر همه پارامترهای موثر بر آزمایش BO شامل مشخصات بتن و سن بتن (۱۴ تا ۹۰ روز) را در برگیرد صورت نگرفته است. در این مطالعه آزمایش BO به عنوان یکی از روش‌های نیمه مخرب با جزئیات بیشتر، برای اثبات کارایی کنترل کیفیت در ارزیابی مقاومت بتن در محل بررسی شده است. هدف از این مطالعه، بررسی پارامترهای موثر بر نتایج آزمایش BO شامل مقدار سیمان، بیشینه اندازه سنگدانه، سن

تحت بار متمرکز در انتها آزاد آن است. نیروهای موردنظر آزمایش توسط یک مانومتر مکانیکی اندازه‌گیری می‌شود و سپس تنش آزمایش BO محاسبه می‌شود. نمونه آزمایشی دارای قطر ۵۵ میلی‌متر و ارتفاع ۷۰ میلی‌متر است. نمونه آزمایش در بتن به روش دریل کردن بتن سخت شده با استفاده از مته نمونه‌گیر در زمان آزمایش ایجاد می‌شود.

۳- خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده

مقاومت بتن بیشتر به عنوان با ارزش‌ترین خاصیت آن در طراحی سازه در نظر گرفته می‌شود، زیرا یک تصویر کلی از کیفیت بتن بدست می‌دهد، همچنین مقاومت با ساختار هیدراته شده سیمان رابطه مستقیم دارد.

در این مقاله، تاثیر پارامترهای موثر شامل مقدار سیمان، مقدار الیاف فولادی، بیشینه اندازه سنگدانه و سن بتن بر روی مجموعه وسیعی از نمونه‌ها بررسی کامل شده است. دستیابی به طرح اختلاط مناسب نیازمند دانش بالا در مورد خواص بتن و تجربه کافی است. به منظور فراهم کردن پایگاه جامع اطلاعات برای بررسی عوامل موثر بر ویژگی‌های مکانیکی بتن حاوی الیاف فولادی و تاثیر آن بر نتایج آزمایش BO سطوح متفاوتی از سیمان مصرفی، بیشینه سایز سنگدانه و درصد الیاف انتخاب شد. بر این اساس مقادیر عیار سیمان ۴۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب با نسبت آب به سیمان ثابت ۰/۴ در نظر گرفته شد. بیشینه سایز سنگدانه در دو سطح ۱۲/۵ و ۲۵ میلی‌متر و الیاف فولادی مصرفی با نسبت‌های حجمی ۰، ۰/۳۳، ۰/۶۷ و ۱ درصد اختیار شد. در نتیجه ۲۴ طرح اختلاط مطابق جزئیات جدول (۱) پایه‌ریزی شد. تعداد ۳۶۰ نمونه سخت شده بتنی در سنین موردنظر ارزیابی شده و ویژگی‌های مکانیکی آنها ثبت شد. مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متری مطابق BS EN 12390 [19] در سنین ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز ارزیابی شده است. نمونه‌ها پس از یک روز نگهداری در محیط آزمایشگاه، در شرایط مرطوب تا سن مورد نظر عمل‌آوری شده‌اند.

مطابق استاندارد ASTM [18] برای آزمایش BO کمینه فاصله مرکز آزمایش از لبه خارجی مقطع ۱۵۰ میلی‌متر و کمینه

بتن و بطور خاص مقدار الیاف فولادی است.

۲- ملاحظات تئوری آزمایش Break-off

در دهه ۱۹۷۰ اولین پیشرفت‌ها در زمینه آزمایش BO در ارزیابی مقاومت بتن در محل در نروژ شکل گرفت که منجر به ساخت اولین دستگاه آزمایش BO شد. در همان دوران مشکلات بوجود آمده برای بتن‌های ساخته شده با سیمان پرتلومین موجب نگرانی شده بود و نیاز استفاده از آزمایش در محل برای تخمین مقاومت فشاری بتن بشدت احساس می‌شد [2]. روش BO به عنوان نسل جدیدی از آزمایش‌های نیمه مخرب در سال ۱۹۷۶ توسط جوانسن بررسی شد. سپس در آمریکا شمالی ابتدا به وسیله مالهترا در کانادا و سپس توسط نیک در امریکا انجام شد. بعد از آن در سال ۱۹۸۰ در استاندارد انگلستان [17] و در سال ۱۹۹۰ در استاندارد ASTM [18] وارد شد. آزمایش BO، شکست یک نمونه بتنی استوانه‌ای در محل در یک صفحه شکست موازی با سطح تمام شده بتن است. با توجه به رابطه (۱) تنش در سطح شکست آزمایش BO، را می‌توان به مقاومت خمشی و یا به مقاومت فشاری بتن ارتباط داد [10].

$$f_{BO} = \frac{M}{S}, \quad M = P_{BO} \times h \quad (1)$$

شکل ۱. چگونگی آزمایش Break-off

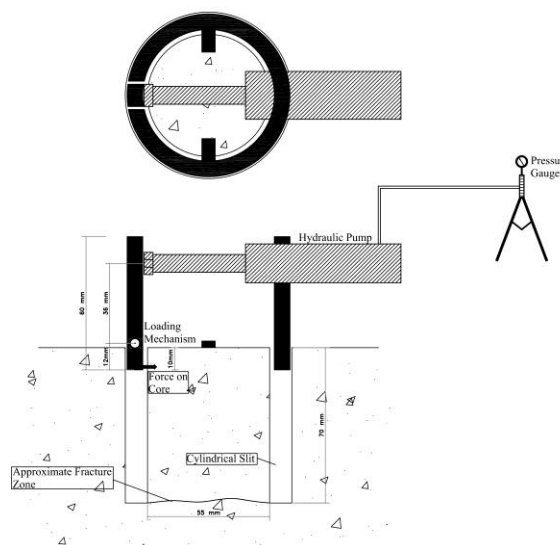


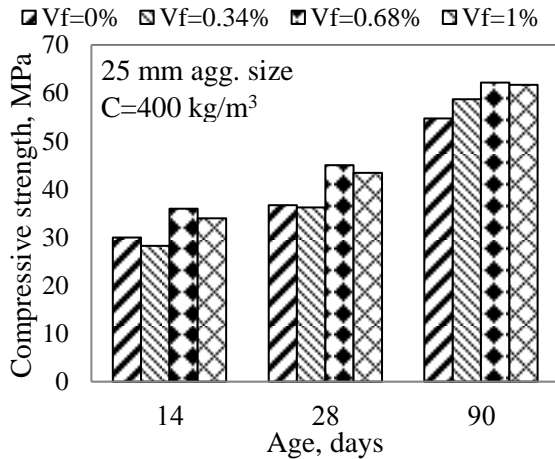
Fig. 1. Schematic diagram of a break-off test procedure

در شکل (۱) چگونگی آزمایش BO نشان داده شده است. درحقیقت آزمایش BO معادل یک تیر طره با مقطع دایره‌ای

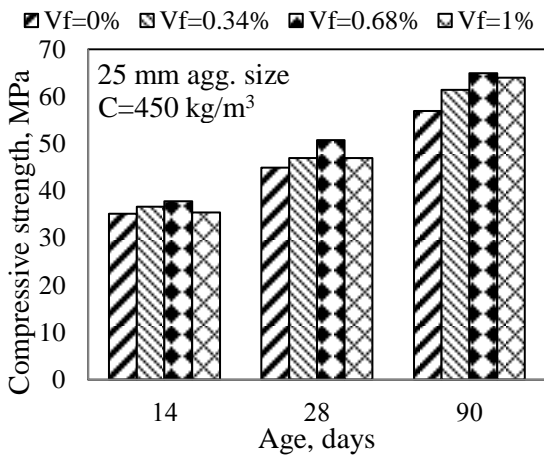
عنوان نمونه مطابق شکل (۲) الف و ب و در نسبت حجمی الیاف ۰/۶۸٪، مقادیر مقاومت فشاری برای سنگدانه‌های ۱۲/۵ و ۲۵ میلی‌متر به ترتیب ۴۳/۵ و ۴۵/۰ مگاپاسکال در سن ۲۸ روز بدست آمده است.

شکل ۲. تاثیر سن بتن بر تغییرات مقاومت فشاری برای نسبت‌های حجمی

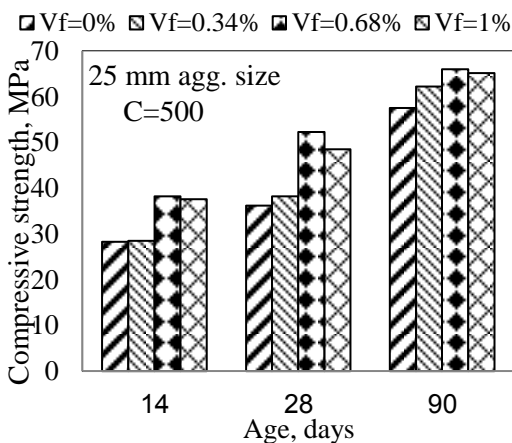
مختلف الیاف با اندازه‌های مختلف سنگدانه



(ب)



(د)



(و)

ضخامت دال بتنی ۱۰۰ میلی‌متر است، در نتیجه ابعاد نمونه‌های مکعبی آزمایش BO ۱۵×۳۰×۳۰ سانتی‌متر انتخاب شد. همچنین برای همه ارزیابی‌ها میانگین پنج نمونه از بتن مورد نظر به عنوان نتیجه آزمایش BO گزارش شد. نامگذاری طرح‌ها براساس مقدار سیمان ($C=400, 450, 500 \text{ kg/m}^3$)، مقدار وزنی الیاف فولادی ($SF=0, 26, 53, 78 \text{ kg}$)، بیشینه سایز سنگدانه ($AS=12, 25 \text{ mm}$) صورت گرفته است.

جدول ۲. جزئیات طرح‌های اختلاط (kg/m^3)

Mix	Cement (kg/m ³)	Water (kg)	Gravel (kg)	Sand (kg)	Steel Fibre %	
					%	kg
C400SF00AS12	400	160	1099	805	0	0
C400SF26AS12	400	160	1099	805	0.34	26.5
C400SF53AS12	400	160	1099	805	0.68	53
C400SF78AS12	400	160	1099	805	1	78
C450SF00AS12	450	180	1040	762	0	0
C450SF26AS12	450	180	1040	762	0.34	26.5
C450SF53AS12	450	180	1040	762	0.68	53
C450SF78AS12	450	180	1040	762	1	78
C500SF00AS12	500	200	988	724	0	0
C500SF26AS12	500	200	988	724	0.34	26.5
C500SF53AS12	500	200	988	724	0.68	53
C500SF78AS12	500	200	988	724	1	78
C400SF00AS25	400	160	1099	805	0	0
C400SF26AS25	400	160	1099	805	0.34	26.5
C400SF53AS25	400	160	1099	805	0.68	53
C400SF78AS25	400	160	1099	805	1	78
C450SF00AS25	450	180	1040	762	0	0
C450SF26AS25	450	180	1040	762	0.34	26.5
C450SF53AS25	450	180	1040	762	0.68	53
C450SF78AS25	450	180	1040	762	1	78
C500SF00AS25	500	200	988	724	0	0
C500SF26AS25	500	200	988	724	0.34	26.5
C500SF53AS25	500	200	988	724	0.68	53
C500SF78AS25	500	200	988	724	1	78

Table 2. concrete mixture details

تاثیر سن بتن بر تغییرات مقاومت فشاری برای نسبت‌های حجمی مختلف الیاف و با در نظر گرفتن اندازه‌های ۱۲ و ۲۵ میلی‌متر سنگدانه در شکل (۲) نشان داده شده است. همچنین این تاثیر برای مقادیر مختلف سیمان در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش سن بتن مقادیر مقاومت فشاری افزایش می‌یابد که کاملاً متناظر با توسعه فرآیند هیدراتاسیون است. با کمی دقت در نتیجه‌گیری و براساس شکل می‌توان گفت که تاثیر سن بتن برای سنگدانه ۲۵ میلی‌متر مشهودتر است. به ویژه این تاثیر در درصد‌های بیشتر الیاف نمود بیشتری دارد.

مشابه با نتایج نیک‌بین و همکاران [20]، V_u و همکاران [26] مقاومت فشاری با افزایش اندازه سنگدانه افزایش می‌یابد. به

نواحی انتقال بزرگتری متاثر می‌شود و احتمالاً این موضوع که ناشی از کاهش اندازه سنگدانه است می‌تواند منجر به پایین‌تر بودن مقاومت فشاری شود.

نتایج V_u و همکاران [21] نشان داد که برای یک مقدار ثابت نسبت آب به سیمان مقاومت بتن در آزمایش فشاری با افزایش اندازه درشت دانه افزایش می‌یابد. آنها بیان کردند که این پدیده می‌تواند به واسطه درگیری فیزیکی سنگدانه توضیح داده شود. چرا که می‌تواند بر مقاومت فشاری و انرژی شکست بتن مشارکت کند و این عملکرد احتمالاً برای سنگدانه‌های بزرگتر قابل توجه‌تر است. همچنین نشان دادند که افزایش مقاومت شکل گرفته می‌تواند به بهبود اسکلت و ساختار بتن نسبت داده شود.

همچنین می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر مقاومت فشاری به مقدار الیاف بکار رفته وابستگی زیادی دارد. با ارزیابی روند تغییرات مقاومت فشاری با سن بتن، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش نسبت حجمی الیاف بکار رفته، مقادیر مقاومت فشاری بدست آمده با افزایش همراه بوده است. این رفتار برای عیارهای مختلف سیمان مشابه و همچنین برای سنگدانه‌های کوچکتر مشخص‌تر است. به عنوان نمونه مطابق شکل (۲ ج) افزایش نسبت حجمی الیاف از صفر تا یک درصد، مقادیر فشاری در سن ۲۸ روز از ۳۲/۵ مگاپاسکال به ۴۰/۱ مگاپاسکال افزایش داشته است و مقادیر متناظر مطابق شکل (۲ د) بترتیب ۴۴/۹ و ۴۶/۹ مگاپاسکال می‌باشد. بعبارت دیگر با افزایش نسبت حجمی الیاف از صفر تا ۱ درصد مقادیر مقاومت فشاری به ترتیب برای سنگدانه‌های ۱۲/۵ و ۲۵ میلی‌متر افزایشی برابر ۲۳/۳٪ و ۴/۵٪ را در سن ۲۸ روز تجربه کرده‌اند.

پارامتر فاکتور الیاف یا شاخص تقویت کنندگی الیاف تغییرات مقاومت فشاری بتن‌های حاوی الیاف نسبت به بتن بدون الیاف را نشان می‌دهد. این فاکتور به وسیله پژوهشگران مختلفی برای تعیین اثر ترکیبی و همزمان حجم الیاف مصرفی و نسبت ابعاد آن بر ویژگی‌های بتن پذیرفته شده است [22, 23, 24]. در مطالعات پیشین نسبت حجمی الیاف V_f و نسبت ابعاد آن l/d دو پارامتر مهم در ارزیابی عملکرد بتن حاوی الیاف فولادی بشمار آمده‌اند که به شدت نتایج مقاومت فشاری را تحت تاثیر

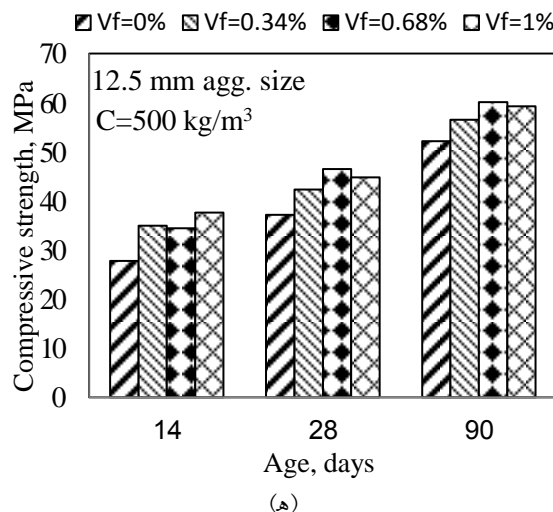
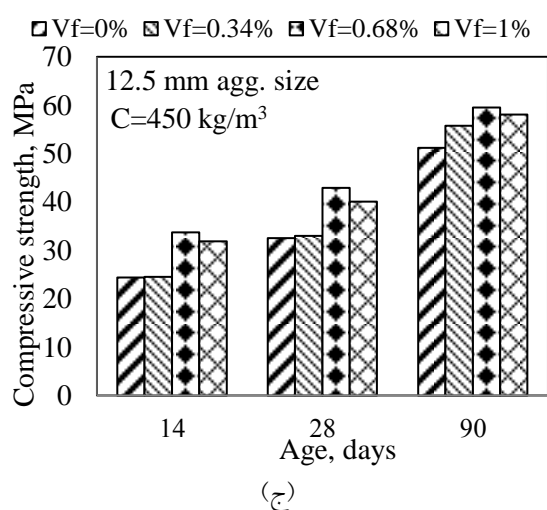
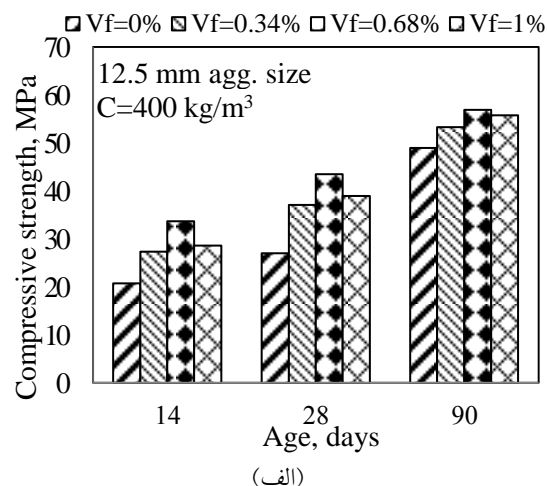


Fig. 2. Variation of the CS versus concrete age with various steel fiber for different aggregate sizes

با کاهش اندازه سنگدانه سطح مخصوص افزایش می‌یابد و سهم ناحیه انتقال^۱ نیز افزایش می‌یابد، بنابراین مقاومت بتن توسط

1 Transition zone

درصد، مقادیر مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز از ۴۳/۵ مگاپاسکال به ۳۹/۰ مگاپاسکال کاهش داشته است و مطابق شکل (۲ ب) مقادیر متناظر به ترتیب ۴۵/۰ و ۴۳/۴ مگاپاسکال است.

۴- نتایج آزمایش Break-off

در این قسمت، نتایج ارزیابی‌های انجام شده و تاثیر پارامترهای موثر بر نتایج آزمایش BO شامل مشخصات بتن، مقدار سیمان، بیشینه اندازه سنگدانه و سن بتن و همچنین تاثیر الیاف فولادی ارائه شده است.

در ادامه نتایج اندازه گیری‌ها به صورت مجزا با تاکید ویژه بر ویژگی‌های و پارامترهای ارزیابی، شامل مشخصات بتن ارائه و بحث شدند.

در شکل (۳) رفتار کلی مقاومت BO با مقدار الیاف فولادی برای مقادیر مختلف سیمان ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب با چشم‌پوشی از سن بتن، اندازه سنگدانه نشان داده شده است. با توجه به شکل می‌توان گفت که مقادیر متوسط مقاومت BO با افزایش مقدار سیمان افزایش می‌یابد و مقادیر مقاومت BO بتن‌های بدون الیاف فولادی نسبت به بتن دارای مقادیر بیشتر الیاف فولادی کمتر است. بعنوان نمونه مقادیر متوسط مقاومت BO بترتیب برای سیمان ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب ۷/۹، ۹/۹، ۱۰/۲ مگاپاسکال برای بتن بدون الیاف و ۸/۳، ۱۱/۱، ۱۲/۶ مگاپاسکال برای بتن با مقدار الیاف ۱٪ بدست آمده است.

شکل ۳. تغییرات مقادیر مقاومت Break-off با مقدار الیاف برای عیارهای

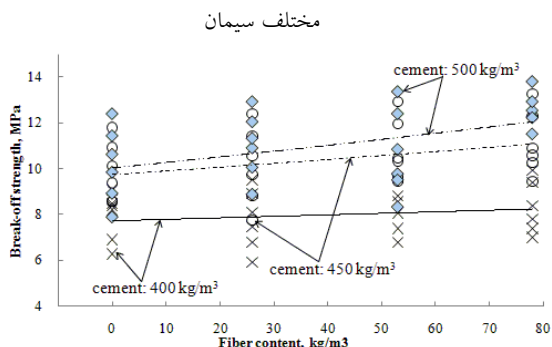


Fig. 3. Variation of Break-off strength values relative to fibers fraction for different cement contents

قرار می‌دهد. شواهد متناقض قابل توجهی از تاثیر الیاف بر مقاومت فشاری به ازای یک فاکتور الیاف مشخص وجود دارد. مشابه برخی از پژوهش‌های گذشته یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که نسبت مقاومت‌ها با افزایش مقدار شاخص تقویت الیاف بهبود می‌یابد [25, 26, 27, 28].

عمل مسلح‌کنندگی که توسط الیاف فراهم می‌شود را می‌توان از زهر دو جنبه میکرو و ماکرو بررسی نمود. در مقیاس میکرو، الیاف از گسترش ریز ترکها جلوگیری می‌کند که منجر به مقاومت فشاری بیشتر می‌شود. در مقیاس ماکرو، افزایش الیاف قابلیت جذب انرژی را به همراه دارد در واقع هدف اصلی و اولیه افزودن الیاف بهبود قابلیت و ظرفیت جذب انرژی بعد از ترک محسوب می‌شود. توانایی الیاف در کنترل رشد ریز ترکها به تعداد الیاف، شکل پذیری و چسبندگی با ماتریس مرتبط است. گرچه بنظر می‌رسد تعداد بیشتر الیاف احتمالاً در محدود کردن ریز ترکها موثرتر باشد اما از سویی افزودن الیاف بدلیل افزایش خلل و فرج ناشی از آن می‌تواند منجر به بروز آشفته‌گی و اغتشاش در ماتریس بتن هم شود. خلل و فرج می‌تواند به مثابه نقص و آسیب در جایی که ریز ترکها شروع می‌شوند تلقی شود. این موضوع ممکن است اینگونه توضیح داده شود که الیاف موازی با جهت بارگذاری می‌تواند مانند خلل و فرج عمل کند، همچنانکه حفرهای اضافی نیز ممکن است با حضور الیاف بوجود آیند. بنابراین تاثیر الیاف بر مقاومت فشاری را می‌توان تعادل دو وضعیت پل زدن الیاف روی ترکها و افزایش خلل و فرج ایجاد شده توسط آنها در نظر گرفت [29, 30].

همچنین کاهش مقاومت می‌تواند ناشی از کاهش کارایی بتن در حضور درصد بالاتر الیاف باشد. به عبارت دیگر افزایش الیاف منجر به کاهش کارایی بتن شده که این موضوع کاهش تراکم بتن را به همراه دارد. همچنین این نتیجه بدست آمد که روش بتن ریزی می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر توزیع و جهت‌گیری الیاف و در نتیجه ویژگی‌های مکانیکی بتن داشته باشد [31].

بر این اساس با افزایش درصد الیاف تا ۰/۶۸٪ مقاومت فشاری روندی افزایشی داشته و اضافه نمودن مقدار الیاف به ۱٪ موجب کاهش مقاومت فشاری بتن شده است. بعنوان مثال مطابق شکل (۲ الف) افزایش نسبت حجمی الیاف از ۰/۶۸ به ۱

شکل ۵. تغییرات مقادیر مقاومت Break-off با سن بتن برای مقادیر

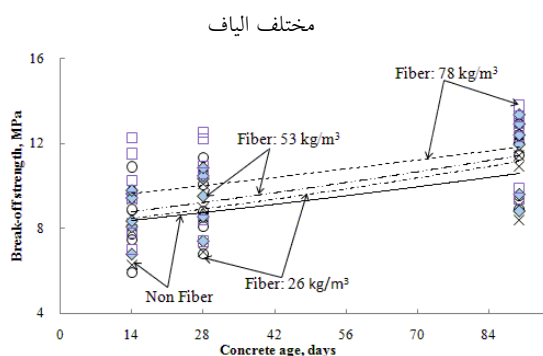


Fig. 5. variations of break-off strength versus concrete age and fibre fractions

افزایش مقاومت BO در نتیجه افزودن الیاف و مشارکت آنها به طور قطع به ساز و کار عملکرد الیاف مربوط است. الیاف مانع گسترش و توسعه ریزترکهای داخلی بتن می شود. در نتیجه باعث افزایش مقاومت خمشی می شود. همچنین شکل الیاف قلاب دار استفاده شده در بهبود چسبندگی ماتریس و الیاف و نیز بعنوان عامل مهم و موثر در افزایش مقاومت خمشی مورد توجه است.

آزمایش BO موجب گسیختگی بتن در خمش می شود. بنابراین رابطه بین مقاومت BO و مقاومت فشاری می تواند ناشی از فاکتورهایی که رابطه بین مقاومت خمشی و فشاری را تحت تاثیر قرار می دهند، باشد. در ضمن افزایش نسبت مقاومت BO بتن های حاوی الیاف فولادی نسبت به سن بتن واضحتر است.

ضریب تغییرات مقاومت Break-off در این پژوهش در محدوده ۴٪ الی ۱۱٪ بدست آمده است. مقادیر بیشتر مربوط به بتن های حاوی درصد بیشتر الیاف به ویژه در سنین کمتر است. نتایج نشان می دهد که قابلیت اعتماد این روش در ارزیابی مقاومت مناسب است، چرا که ضریب تغییرات نتیجه شده در هر گروه از بتن های این آزمایش کمتر از ۱۱ درصد بوده است. باید توجه داشت که حتی در شرایط ایده آل با منحنی کالیبراسیون خاص، دقتی بیش از $\pm 15\%$ در محدوده اطمینان ۹۵٪ برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن مورد انتظار نیست.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله آزمایش نیمه مخرب Break-off بررسی شد. و جنبه های مختلف آزمایش مورد ارزیابی، و نتایج زیر حاصل

شایان ذکر است پراکندگی زیاد نتایج شکل (۳) احتمالاً مربوط به نادیده گرفتن تاثیر سن بتن و اندازه سنگدانه است. همچنین توزیع و جهت گیری الیاف فولادی نیز تاثیر زیادی بر نتایج دارد. نویل اعتقاد دارد هرچه مقدار سنگدانه بیشتر شود، آب بیشتری جذب خواهد شد پس تاثیر نسبت آب موثر به سیمان کاهش می یابد. در نتیجه هرچه مقدار سنگدانه ها بیشتر شود، جمع شدگی و آب انداختن کمتر می شود و خسارت کمتری به پیوستگی بین خمیر سیمان و سنگدانه ها وارد می شود. بهمین صورت تغییرات حرارتی ناشی از حرارت هیدراتاسیون کمتر خواهد بود [28].

در شکل (۴) رفتار کلی مقاومت BO با مقدار الیاف فولادی برای دو اندازه بیشینه سنگدانه ۱۲/۵ و ۲۵ میلی متر، صرف نظر از سن بتن و مقدار سیمان داده شده است. بطور کلی می توان بیان نمود که مقادیر مقاومت BO برای سنگدانه بزرگتر، بیشتر است. همچنین براساس نتایج بدست آمده در این مطالعه، مقدار متوسط مقاومت BO برای بتن های بدون الیاف با سنگدانه ۲۵ میلی متر ۱۵٪ بزرگتر از بتن های بدون الیاف حاوی سنگدانه ۱۲/۵ میلی متر است. این مقدار برای بتن حاوی یک درصد الیاف فولادی فقط ۱٪ بزرگتر است. شایان ذکر است پراکندگی زیاد نتایج ناشی از نادیده گرفتن آثار سن بتن، مقدار سیمان و مقادیر متفاوت الیاف است.

شکل ۴. تغییرات مقادیر مقاومت Break-off با مقدار الیاف برای دو اندازه

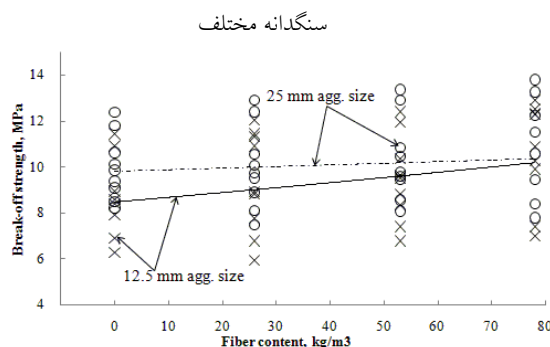


Fig. 4. break-off strength versus fibers fraction for two aggregates sizes

تاثیر سن بتن بر رفتار کلی تغییرات مقاومت های BO با مقدار الیاف فولادی با چشم پوشی از مقدار بیشینه سنگدانه و مقدار سیمان در شکل (۵) نشان داده شده است.

شد.

۷- مراجع

References

- ۱- بطورکلی برای نسبت آب به سیمان ثابت، مقادیر میانگین مقاومت BO با افزایش عیار سیمان افزایش می‌یابد.
- ۲- همچنین اندازه ماکزیمم سنگدانه در دو محدوده ۱۲/۵ میلی‌متر و ۲۵ میلی‌متر بررسی شده نشان می‌دهد که مقادیر مقاومت BO برای سنگدانه بزرگتر، بیشتر است. این مقدار در بتن فاقد الیاف فولادی تاثیر مشهودتری نسبت به بتن حاوی الیاف فولادی دارد بطوری که در بتن حاوی یک درصد الیاف فولادی با سنگدانه ۲۵ میلی‌متر فقط یک درصد بیشتر از مقدار نظیر آن برای بتن با سنگدانه ۱۲/۵ میلی‌متر است.
- ۳- مزیت وجود الیاف در بتن ناشی از سازوکار مسلح کنندگی و تقویت کنندگی الیاف است، چرا که انرژی قابل توجهی در فرآیند بیرون کشیدگی آنها پراکنده و تلف می‌شود. ذکر این نکته ضروریست که بیشینه نیروی شکست و انرژی جذب شده در فرآیند شکست به پارامترهای متعددی شامل ویژگی‌های مکانیکی، مشخصات هندسی الیاف، توزیع و جهت‌گیری مناسب الیاف و ویژگی‌های بتن وابستگی کامل دارد.
- ۴- روند کلی بهبود مقاومت BO با سن، مشابه بتن‌های مختلف است. همچنین، افزایش نسبت مقاومت BO در بتن حاوی الیاف فولادی نسبت به مقدار نظیر برای بتن فاقد الیاف با افزایش سن بتن، مشاهده می‌شود.
- همچنین یک منحنی کالیبره خاص برای بتن با مقادیر مختلف الیاف فولادی باید توسعه داده شود.
- ۵- ضریب تغییرات مقاومت Break-off در این پژوهش در محدوده ۴٪ الی ۱۱٪ بدست آمده است. نتایج ارزیابی‌ها حاکی از آن است که قابلیت اعتماد این روش در ارزیابی مقاومت مناسب است، گرچه کاربرد قابل قبولی برای تخمین مقاومت بتن براساس یک منحنی کالیبراسیون کلی و عمومی وجود ندارد.
- همچنین مقادیر بالاتر ضریب تغییرات ممکن است ناشی از ناهمگنی ذاتی بتن به ویژه در حضور الیاف فولادی باشد، زیرا تضمین شرایط توزیع همگن و قرارگیری مناسب برای الیاف در مخلوط بتن غیرممکن است.
- [1] Bungey J. H., Millard S. G., Grantham M.G., Testing of concrete in structures, 4th ed., Taylor & Francis, London and New York, 2006, 352p.
- [2] Long AE, Murray AMcC. The pull-off partially destructive test for concrete. In: Malhotra VM, editor. Proc. Int. Conf. on In-Situ/Non-Destructive Testing of Concrete, Ottawa, Canada, October. ACI SP-82, 1984:327-350.
- [3] Neville A. M., Properties of concrete, 4th ed., John Wiley and Sons, Inc., New York, 1996, 844p.
- [4] Johansen R., a new method for determination of in-place concrete strength of form removal, 1st Eur. Colloq. on Construction Quality Control, Madrid, Spain, 1976.
- [5] Johansen R. In Situ strength Evaluation of Concrete The Break-off Method. Concrete International. 1979 Sep 1;1(09):45-51.
- [6] Byfors, Jan. Plain concrete at early ages. No. 80. Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1980.
- [7] Dahl-Jorgensen E, Johansen R. General and specialized use of the break-off concrete strength testing method. Special Publication. 1984 Sep 1;82:293-308.
- [8] Dahl-Jorgensen E. Break-Off and Pull-Off Methods for Testing Epoxy-Concrete Bonding Strength. Project No. 160382, The Foundation of Scientific and Industrial Research of the Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway, 1982.
- [9] Carlsson M, Eeg IR, Jahren P. Field experience in the use of the "break-off tester". Special Publication. 1984 Sep 1;82:277-92.
- [10] Lin Y, Lin YF, Hsiao C. Evaluation of bond quality at the interface between steel bar and concrete using the small-dimension break-off test. Materials and Structures. 2010 Jun 1;43(5):583-95.
- [11] Li VC. Large volume, high-performance applications of fibers in civil engineering. Journal of Applied Polymer Science. 2002 Jan 18;83(3):660-86.
- [12] Aydin A,. Self compactability of high volume hybrid fiber reinforced concrete. Construction and Building Materials. 2007 Jun 30;21(6):1149-54.
- [13] Xu Z, Hao H, Li HN,. Mesoscale modelling of fibre reinforced concrete material under compressive impact loading. Construction and Building Materials. 2012 Jan 31;26(1):274-88.
- [14] Khalaj G, Nazari A,. Modeling split tensile strength of high strength self compacting concrete incorporating randomly oriented steel fibers and SiO₂ nanoparticles. Composites Part B: Engineering. 2012 Jun 30;43(4):1887-92.
- [15] Luccioni B, Ruano G, Isla F, Zerbino R, Giaccio G. A simple approach to model SFRC. Construction and Building Materials. 2012 Dec 31;37:111-24.
- [16] Xu Z, Hao H, Li HN. Mesoscale modelling of dynamic tensile behaviour of fibre reinforced concrete with spiral fibres. Cement and Concrete Research. 2012 Nov 30;42(11):1475-93.
- [17] British Standard, B.S. 1881, Part 201, 1986, 17.
- [18] ASTM C 1150 (1992) Standard test method for the

- [25] Aslani, F, Nejadi S., Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers: Compressive and tensile strengths, moduli of elasticity and rupture, compressive stress-strain curve, and energy dissipated under compression. *Composites Part B: Engineering* 53 (2013): 121-133.
- [26] Güneysi, E., Combined effect of steel fiber and metakaolin incorporation on mechanical properties of concrete. *Composites Part B: Engineering* 56 (2014): 83-91.
- [27] AL-Ameeri A., The effect of steel fiber on some mechanical properties of self compacting concrete. *American Journal of civil engineering* (2013): 102-110.
- [28] Alyousif, A., Design and Testing of Fiber Reinforced Self Compacting Concrete. PhD diss., Eastern Mediterranean University (EMU), 2010.
- [29] Martinie, L., Roussel, N., Simple tools for fiber orientation prediction in industrial practice. *Cement and Concrete research* 41.10 (2011): 993-1000.
- [30] Zerbino, R., et al. On the orientation of fibres in structural members fabricated with self compacting fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites* 34.2 (2012): 191-200.
- [31] Ghavidel, R., Madandoust, R., Ranjbar, M., reliability of pull-of test for steel fiber reinforced self-compacting concrete." *Measurement* 73 (2015): 628-639.
- break-off number of concrete, vol 04.02. Annual Book of ASTM Standards
- [19] EN, BS. 12390-3. Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens 19 (2009).
- [20] Nikbin, I. M., M. H. A. Beygi, M. T. Kazemi, J. Vaseghi Amiri, E. Rahmani, S. Rabbanifar, and M. Eslami. A comprehensive investigation into the effect of aging and coarse aggregate size and volume on mechanical properties of self-compacting concrete. *Materials & Design* 59 (2014): 199-210.
- [21] Vu, Xuan Hong, Laurent Daudeville, and Yann Malecot. Effect of coarse aggregate size and cement paste volume on concrete behavior under high triaxial compression loading. *Construction and Building Materials* 25.10 (2011): 3941-3949.
- [22] El-Dieb, A. S., Reda Taha, MM., Flow characteristics and acceptance criteria of fiber-reinforced self-compacted concrete (FR-SCC). *Construction and Building Materials* 27.1 (2012); 585-596.
- [23] Khayat, K., Schutter, D., Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete. State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 228-MPS (2013); Vol. 14, springer.
- [24] Madandoust, R., Ranjbar, M., Ghavidel, R., Shahabi, F., Assessment of factors influencing mechanical properties of steel fiber reinforced self-compacting concrete. *Materials & Design* 83 (2015): 284-294.

Evaluation of effective parameters on Break-off test results for determining strength of steel fiber reinforced concrete

Benyamin Ganjeh Khosravi¹, S.H Ghasemzadeh Mosavinejad^{2*}, Javad Razzaghi³

1- PhD. Student, Civil Engineering, Faculty of Civil , Engineering, Guilan University, Rasht, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Guilan University, Rasht, Iran

3- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Guilan University, Rasht, Iran

*h.mosavi@guilan.ac.ir

Abstract:

Here, the efficiency of the non-destructive Break-Off (BO) test was investigated for assessing the in-place compressive strength of steel fiber reinforced concrete (SFRC). SFRC was studied due to its advantages in increasing toughness and tensile and flexural strength in particular. To provide a through and comprehensive database, 24 mix designs were selected with cement contents of 400, 450 and 500 kg/m³ with constant water/cement ratio of 0.4 for all mixes, two maximum aggregate sizes of 12.5 and 25 mm along with steel fiber volume fractions of 0%, 0.33%, 0.67% and 1% for ages of 14, 28 and 90 days. A total of 360 BO tests were carried out in this investigation. Then, effective parameters of SFRC and BO test results were evaluated. In the BO method, the force required to break off an in-place concrete cylinder of 55 mm in diameter and 70 mm long, is related to the compressive strength of the concrete from a predetermined calibration curve developed for concrete mix. The studies showed that volumetric percentage and features of steel fibers had a significant influence on concrete properties as well as BO test results. According to the experimental results it could be generally concluded that the influencing factors, namely, SFRC properties due to presence of steel fibers and BO test significantly affect the results as follows:

Generally, for a constant W/C ratio, it can be concluded that raising the cement content increase the mean values of BO strength. It can be stated that the maximum aggregate size within the range of 12.5–25 mm has a negligible effect on the BO test results for SFRC with 1% steel fiber volume fractions as the average value of BO strength for 25 mm aggregate concrete was significantly more than the corresponding value for 12.5 mm aggregate size for plain concrete. Moreover, the improving trend the BO strength with age is observed to be similar for all different concretes. Furthermore, increase of BO strength of SFR concretes respect to corresponding plain value is observed as concrete grows older.

In addition, results showed that strength estimation based on a single general calibration curve is not feasible. Therefore, a specific calibration curve for each SFRC should be represented for a realistic assessment and interpretation of results. The coefficient of variation of the BO strength was in range of 4– 11%. The higher values are for concretes with higher amounts of fibers, especially at early ages. The reliability of the method seems to be good in which the coefficient of variation for each group of BO tests are below 11%. It should be noted that even under ideal conditions with a specific calibration it is unlikely that 95% confidence limits of better than $\pm 15\%$ can be achieved for an absolute prediction of concrete compressive strength. The findings show that higher values are not only due to the lack of precision of the test procedure, but also due to the intrinsic heterogeneity of granular materials like concrete, particularly in presence of higher amounts of fibers.

Keywords: Break-off test, strength, Steel Fiber, Partially destructive.