

مقایسه آزمایش‌های نیمه‌مخرب break-off و Pull-off برای تعیین مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف فولادی

سید حسین قاسم‌زاده موسوی نژاد*
استادیار دانشکده فنی، دانشگاه گیلان
بنیامین گنجه خسروی
دانشجو دکتری عمران - سازه، دانشگاه گیلان
جواد رزاقی
استادیار دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

چکیده

در این مطالعه آزمایش‌های نیمه‌مخرب break-off و Pull-off برای ارزیابی مقاومت بتن حاوی الیاف فولادی در محل مورد بررسی قرار گرفته است. امروزه استفاده از الیاف فولادی، بعنوان یکی از راه‌حل‌های مناسب مقابله با شکست ناگهانی بتن بسیار رواج یافته است، لذا بعنوان بتن مورد بررسی در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است. بمنظور فراهم کردن یک پایگاه آماری کامل، ۲۴ طرح اختلاط انتخاب گردید. سپس، عوامل تاثیرگذار بر خصوصیات بتن حاوی الیاف فولادی و نتایج آزمایش Break-off و Pull-off مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان می‌دهد علاوه بر مشخصات آزمایش، درصد و مشخصات الیاف فولادی تاثیر بسزایی بر خواص بتن و نتایج هر دو آزمایش دارد. نتایج نشان می‌دهد که ارزیابی مقاومت با روش‌های فوق دارای قابلیت اعتماد مناسب می‌باشند، هر چند تخمین مقاومت بتن براساس یک منحنی کالیبراسیون کلی ممکن نیست. لذا منحنی‌های کالیبراسیون مستقل برای هر بتن بمنظور تفسیر واقع‌گرایانه نتایج ارائه گردیده است.

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

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

۱- مقدمه

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 می‌باشند، 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 غیرمخرب برخوردار است. انتخاب هر یک از این روش‌ها به عواملی چون هزینه، قابلیت دسترسی، سرعت و قابلیت اعتماد به نتایج بستگی دارد. در جدول ۱ روش‌های متداول و قابلیت آنها در ارزیابی مقاومت بتن مقایسه شده‌اند [۱].

مقاومت بتن یکی از فاکتورهای کلیدی در ارزیابی و کنترل کیفیت اعضای سازه‌ای می‌باشد که به وسیله آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های استاندارد تعیین می‌گردد؛ هرچند ممکن است این نمونه‌ها معرف مشخصات و خصوصیات واقعی بتن در محل نباشد. از آنجایی که این نمونه‌ها معمولاً در سنین ۷ و ۲۸ روز آزمایش می‌شوند، آگاهی یافتن از مشکلات بتن بکار رفته با تأخیر همراه بوده و امکان تکرار آزمایش نیز وجود ندارد [۲]. امروزه تعیین مقاومت بتن در محل بدلیل تخمین واقع‌گرایانه‌تر مقاومت بتن مورد توجه قرار گرفته است [۱،۲].

جدول ۱- مقایسه آزمایش‌های نیمه‌مخرب و غیرمخرب ارزیابی مقاومت بتن [۱]

روش آزمایش	هزینه	سرعت آزمایش	میزان آسیب	خصوصیت	قابلیت اعتماد
مغزه‌گیری	بالا	کند	متوسط	متوسط	خوب
Pull-out	متوسط	سریع	کم	فقط نزدیک سطح	متوسط
مقاومت نفوذ	متوسط	سریع	کم	فقط نزدیک سطح	متوسط
Pull-off	متوسط	متوسط	کم	فقط نزدیک سطح	متوسط
Break-off	متوسط	متوسط	کم	فقط نزدیک سطح	متوسط
گسیختگی داخلی	پائین	کند	کم	فقط نزدیک سطح	متوسط
ارزیابی اولتراسونیک	پائین	کند	اصلاً	خوب	ضعیف
سختی سطح بتن	بسیار پائین	بسیار کند	غیر محتمل	روی سطح	ضعیف

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 می‌گردد، که نتیجه آن افزایش نفوذپذیری، لایه لایه شدگی سطح بتن، خوردگی آرماتورها و در نهایت کاهش خواص مکانیکی بتن می‌گردد. یک راه‌حل مناسب برای غلبه بر این مشکل استفاده از مقادیر کم الیاف جهت جلوگیری و کنترل رشد ترک و افزایش مقاومت کششی بتن می‌باشد [۶].

تحقیقات آزمایشگاهی زیادی، سودمندی استفاده از الیاف را نشان دادند. چنانکه گزارشات نشان می‌دهد افزودن ۲۰ تا ۵۰ کیلوگرم الیاف در متر مکعب بتن می‌تواند بطور قابل توجهی خصوصیات مهندسی بتن سخت شده شامل چقرمگی، مقاومت در مقابل بارهای ضربه‌ای، مقاومت کششی، مقاومت پیچشی، مقاومت در برابر لایه

با مرور اجمالی بر انواع روش‌های نیمه مخرب در ارزیابی مقاومت بتن می‌توان دریافت که کلیه آزمایش‌های ذکر شده تحت تأثیر پارامترهای مختلفی قرار دارند و در تفسیر نتایج آنها باید ملاحظه و دقت نظر ویژه‌ای بعمل آورد. در این میان در کنار آزمایش مغزه‌گیری، بنظر می‌رسد که آزمایش Break-off و Pull-off نتایج مناسبی در ارزیابی مقاومت بتن ارائه می‌کند. تحقیقات انجام شده در زمینه روش‌های فوق و عوامل موثر بر آنها و مقایسه آنها با یکدیگر تا حدودی انجام گرفته اما همچنان ضرورت ارزیابی‌های بیشتر و کامل‌تر احساس می‌شود.

در سال‌های اخیر، استفاده از بتن حاوی مقادیر الیاف فولادی گسترش یافته است [۳،۴،۵]. مقاومت کششی کم در مقایسه با مقاومت فشاری ضعف اصلی بتن می‌باشد که این رفتار شکننده موجب شکست ناگهانی و فرو ریختن سازه‌های بتنی در هنگام زلزله می‌گردد. با استفاده از آرماتورهای فولادی در جهت

دادند. نتایج تجربی آنها نشان داد که لنگر آزمایش BO انطباق مناسبی با مقاومت چسبندگی در سطح مشترک میلگرد و بتن دارد و توانایی ارزیابی آسیب در این قسمت را دارد.

۱-۲- کاربردها و مطالعات موردی آزمایش Pull-off

آزمایش Pull-off شامل سنجش نیروی لازم برای کندن قسمتی از بتن با استفاده از یک دیسک فلزی دایره‌ای شکل چسبانده شده به بتن با یک رزین اپوکسی مناسب می‌باشد.

اولین پیشرفت‌ها در زمینه آزمایش pull-off در ارزیابی مقاومت بتن در محل در دانشگاه Queens-Belfast در دهه ۱۹۷۰ شکل گرفت که منجر به ساخت اولین دستگاه تجاری با عنوان Limpet گردید [۱۷]. در همان دوران مشکلات بوجود آمده برای بتن‌های ساخته شده با سیمان پرآلومین موجب نگرانی شده بود و نیاز استفاده از آزمایش در محل برای تخمین مقاومت فشاری بتن بشدت احساس می‌شد [۱۸]. روش pull-off به عنوان نسل جدیدی از آزمایشات نیمه‌مخرب در سال ۱۹۷۴ توسط Long بررسی شد. Long در سال ۱۹۸۱ مطالعه گسترده آزمایشگاهی را توسط دانشجویان که هیچ تجربه‌ای از روش انجام آزمایشات نداشتند انجام داد و نتیجه گرفت که آزمایش Pull-off نسبت به آزمایش گسیختگی داخلی نتایج بمراتب قابل اعتمادتری ارائه می‌کند.

Bungey و Soutsos [۱۹] در سال ۲۰۰۱ آزمایشات مختلف pull-off و pull-out را در یک آزمایشگاه تحقیقات ساختمانی در انگلستان است ترتیب دادند. بتن با ترکیبات مختلف با مقاومت فشاری در محدوده ۳۷ تا ۸۵ مگاپاسکال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که هر دو روش می‌توانند تخمین قابل قبولی از مقاومت بتن در محدوده اطمینان ارائه کنند. Ramos و همکاران [۲۰] پس از یک مطالعه گسترده آماری بر روی ۵۵ نمونه مطالعاتی، آزمایش Pull-off را بطور قابل قبولی در ارزیابی چسبندگی اندود کاری و سرامیک نمای ساختمان بکار بردند.

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تاکنون مطالعه جامعی که اثر همه پارامترهای موثر بر آزمایش Break-off و Pull-off شامل مشخصات بتن و سن بتن (۱۴ تا ۹۰ روز) را در برگیرد

لايه شدگی و مقاومت در برابر ساییدگی را افزایش دهد [۸،۷،۴]. لذا بتن الیاف فولادی بدلیل مزایای ذکر شده بعنوان بتن مورد بررسی در این مطالعه انتخاب شده است.

۱-۱- کاربردها و مطالعات موردی آزمایش Break-off

در آزمایش نیمه‌مخرب Break-off (BO)، 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.

کریستیانسن^۱ 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. در آزمایش Break-off دقت $\pm 20\%$ در محدوده اطمینان $\pm 95\%$ مورد انتظار است. بنظر می‌رسد این آزمایش در مقایسه با سایر روش‌ها کمتر در دنیا مورد توجه قرار گرفته است [۹،۱].

جوآنسن [۱۰] مهمترین کاربرد این روش را تعیین مقاومت در محل بتن برای تشخیص زمان مناسب برای جداسازی قالب معرفی کرده است. همچنین به بررسی کاربرد این روش برای سنجش تغییرات مقاومت بتن در طول عمل‌آوری و شرایط آن پرداخت و در نهایت به این نتیجه دست یافت که این روش در نشان دادن تغییرات مقاومت بتن به مراتب مناسبتر از روش نمونه مکعبی می‌باشد [۱۱].

دال یورگنسن [۱۱-۱۲] 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.

نائیک و همکاران [۱۳-۱۴] یک تحلیل رگرسیون بین نتایج روش BO و نمونه استوانه‌ای صورت دادند که حاکی از ارتباط مناسب این نتایج با هم بوده است. در سال ۱۹۹۶ یک کتاب توسط بانگی و میلارد با عنوان آزمایش بتن در سازه‌ها منتشر شد که در آن روش BO مورد بررسی قرار گرفت و نشان داد در این آزمایش دقت $\pm 20\%$ در محدوده اطمینان $\pm 95\%$ مورد انتظار است [۱۵].

لین و همکاران [۱۶] کارائی آزمایش BO را برای ارزیابی کیفیت پیوستگی در سطح مشترک میلگرد و بتن را مورد بررسی قرار

¹Christiansen

بر این اساس ۲۴ طرح اختلاط مطابق جزئیات جدول ۲ پایه‌ریزی شد. تعداد ۳۶۰ نمونه سخت شده بتنی در سنین موردنظر ارزیابی شده و خصوصیات مکانیکی آنها ثبت گردید. نامگذاری طرح‌ها براساس مقدار سیمان ($C=400, 450, 500 \text{ kg/m}^3$)، مقدار وزنی الیاف فولادی ($SF=0, 26, 53, 78 \text{ kg/m}^3$)، حداکثر سائز سنگدانه ($AS=12, 25 \text{ mm}$) صورت گرفته است.

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

شماره	طرح	مقدار سیمان	درشت دانه آب			الیاف فولادی	
			ماسه	%	kg	%	kg
1	C400SF00AS12	400	160	1099	805	0	0
2	C400SF26AS12	400	160	1099	805	0.34	26.5
3	C400SF53AS12	400	160	1099	805	0.68	53
4	C400SF78AS12	400	160	1099	805	1	78
5	C450SF00AS12	450	180	1040	762	0	0
6	C450SF26AS12	450	180	1040	762	0.34	26.5
7	C450SF53AS12	450	180	1040	762	0.68	53
8	C450SF78AS12	450	180	1040	762	1	78
9	C500SF00AS12	500	200	988	724	0	0
10	C500SF26AS12	500	200	988	724	0.34	26.5
11	C500SF53AS12	500	200	988	724	0.68	53
12	C500SF78AS12	500	200	988	724	1	78
13	C400SF00AS25	400	160	1099	805	0	0
14	C400SF26AS25	400	160	1099	805	0.34	26.5
15	C400SF53AS25	400	160	1099	805	0.68	53
16	C400SF78AS25	400	160	1099	805	1	78
17	C450SF00AS25	450	180	1040	762	0	0
18	C450SF26AS25	450	180	1040	762	0.34	26.5
19	C450SF53AS25	450	180	1040	762	0.68	53
20	C450SF78AS25	450	180	1040	762	1	78
21	C500SF00AS25	500	200	988	724	0	0
22	C500SF26AS25	500	200	988	724	0.34	26.5
23	C500SF53AS25	500	200	988	724	0.68	53
24	C500SF78AS25	500	200	988	724	1	78

۲-۳- خصوصیات مکانیکی

مقاومت بتن عموماً بعنوان 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. مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی $15 \times 15 \times 15$ سانتی‌متری مطابق BS EN 12390 [۲۳] 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. برای همه ارزیابی‌ها حداقل میانگین سه نمونه از بتن مورد نظر بعنوان نتیجه گزارش شده است.

۲-۴- ملاحظات تئوری آزمایش Break-off

در دهه ۱۹۷۰ اولین پیشرفت‌ها در زمینه آزمایش BO در ارزیابی

صورت نگرفته است. در این مطالعه آزمایش Break-off و Pull-off بعنوان روش‌های نیمه‌مخرب با جزئیات بیشتر، برای اثبات کارایی کنترل کیفیت در ارزیابی مقاومت بتن در محل مورد بررسی قرار گرفته است.

هدف از مطالعه حاضر، بررسی پارامترهای موثر بر نتایج آزمایش Break-off و Pull-off شامل مقدار سیمان، حداکثر اندازه سنگدانه، سن بتن و مقدار الیاف فولادی می‌باشد. همچنین قابلیت اعتماد و دقت نتایج از جنبه آماری مورد ارزیابی قرار گرفت. به اعتقاد نویسندگان، تاکنون گزارشی از بکارگیری مدل‌های جامع رگرسیونی پیش‌بینی مقاومت در تبیین آزمایش‌های درجا با در نظر داشتن خصوصیات مختلف منتشر نشده است. لذا تکنیک مدل‌سازی رگرسیونی خطی داده‌های آزمایشگاهی جهت ارزیابی مقاومت فشاری بتن مدنظر قرار گرفت.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

در این مقاله از سیمان پرتلند تپ II [۲۱] با وزن مخصوص ۳/۱۵ و سطح مخصوص بلین ۳۱۶۵ سانتی‌متر مربع بر گرم استفاده شده است. آب بکار رفته در بتن آب آشامیدنی می‌باشد. سنگدانه‌های ریز مصرفی از نوع رودخانه‌ای و درشت دانه از نوع طبیعی شکسته با حداکثر اندازه ۱۲/۵ و ۲۵ میلیمتر با وزن مخصوص ۲/۶۵ مطابق الزامات BS882:1992 [۲۲] می‌باشد. الیاف فولادی قلابدار کم کربن با طول ۵ سانتی‌متر، قطر ۰/۸ میلیمتر و نسبت ابعاد ۶۲/۵ و چگالی ۷/۸۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب استفاده شده است.

۲-۲- طرح اختلاط

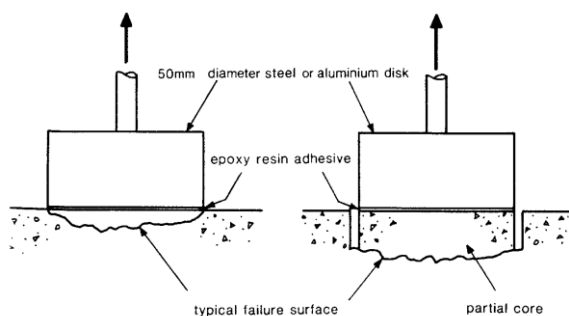
دستیابی به یک طرح اختلاط مناسب، به داشتن دانش بالا خواص بتن و تجربه کافی نیاز دارد. بمنظور فراهم کردن پایگاه جامع اطلاعات برای بررسی عوامل موثر بر خصوصیات مکانیکی بتن حاوی الیاف فولادی و تاثیر آن بر نتایج آزمایش Break-off و Pull-off سطوح متفاوتی از سیمان مصرفی، حداکثر سائز سنگدانه و درصد الیاف انتخاب گردید. مقادیر عیار سیمان ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب با نسبت آب به سیمان ثابت ۰/۴ در نظر گرفته شد. حداکثر سائز سنگدانه در دو سطح ۱۲/۵ و ۲۵ میلیمتر و الیاف مصرفی با نسبت‌های حجمی ۰، ۰/۳۳، ۰/۶۷ و ۱ درصد اختیار شد.

دال بتنی ۱۰۰ میلیمتر می‌باشد، در نتیجه ابعاد نمونه‌های مکعبی آزمایش BO ۱۵×۳۰×۳۰ سانتیمتر انتخاب گردید. همچنین برای همه ارزیابی‌ها میانگین پنج نمونه از بتن مورد نظر بعنوان نتیجه آزمایش BO گزارش گردید.

۲-۵- ملاحظات تئوری آزمایش Pull-off

یک دیسک فلزی دایره‌ای شکل به سطح آماده شده بتن با یک رزین اپوکسی مناسب که مقاومت آن از مقاومت کششی بتن بیشتر است چسبانده شده و سپس به آرامی تا زمان گسیختگی تحت کشش قرار می‌گیرد. جهت جلوگیری از اثرات خرابی سطح بتن بر نتایج آزمایش و نیز بمنظور ارزیابی چسبندگی نواحی تعمیری می‌توان از مغزه‌گیری جزئی در آزمایش استفاده کرد.

در شکل ۲ نحوه آزمایش Pull-off نشان داده شده است. دیسک مورد استفاده در آزمایش pull-off معمولاً به قطر ۵۰ تا ۷۵ میلیمتر می‌باشد که البته استفاده از دیسک ۵۰ میلیمتر فولادی متداول‌تر است.



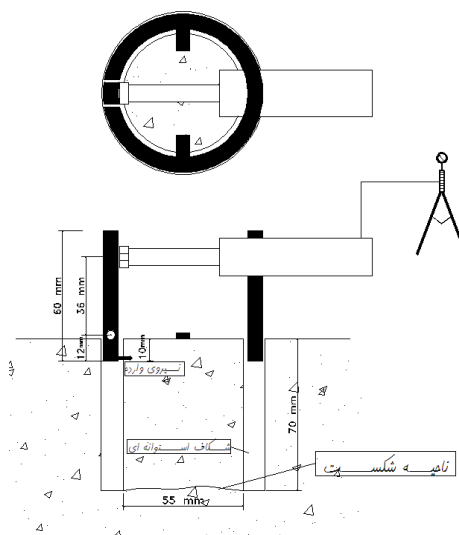
شکل ۲- نحوه آزمایش Pull-off - سطحی و با مغزه‌گیری جزئی [۱]

خرابی ناشی از آزمایش چندان شدید نیست با این حال محدودیت عمده آن زمان عمل آوری لازم برای اکثر چسب‌هاست. زمان آماده سازی سطح و چسباندن دیسک مطابق توصیه استانداردها بیشتر از ۱۵ دقیقه طول نمی‌کشد. اگرچه با پیشرفت‌هایی که در توسعه رزین اپوکسی‌ها و چسب‌های صنعتی بوجود آمده این مسئله به عنوان مشکل تلقی نمی‌شود [۲۶]. آماده کردن سطح بتن و تمیز کردن آن از آلودگی‌ها بمنظور اطمینان از چسبندگی مناسب امری ضروری است. استانداردهای مختلفی این آزمایش را تحت پوشش قرار داده‌اند که از آن جمله می‌توان ASTM C1583 [۲۷] و BS 1881:Part 207 [۲۸] برای کاربردهای این روش در

مقاومت بتن در محل در نورژ شکل گرفت که منجر به ساخت اولین دستگاه آزمایش BO گردید [۲۴]. روش BO بعنوان نسل جدیدی از آزمایش‌های نیمه مخرب در سال ۱۹۷۶ توسط جوانسن بررسی شد. سپس در آمریکا شمالی ابتدا بوسیله مالهترا در کانادا و سپس توسط نیک در آمریکا انجام شد. بعد از آن در سال ۱۹۸۰ در استاندارد انگلستان [۲۳] و در سال ۱۹۹۰ در استاندارد ASTM [۲۵] وارد شد. آزمایش BO، شکست یک نمونه بتنی استوانه‌ای در محل در یک صفحه شکست موازی با سطح تمام شده بتن می‌باشد. با توجه به رابطه (۱) تنش در سطح شکست آزمایش BO، را می‌توان به مقاومت خمشی و یا به مقاومت فشاری بتن ارتباط داد [۱۶]. در شکل ۱ نحوه آزمایش BO نشان داده شده است.

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

در حقیقت آزمایش BO معادل یک تیر طره با مقطع دایره‌ای تحت بار متمرکز در انتها آزاد آن می‌باشد. نیروهای مورد نظر آزمایش توسط یک مانومتر مکانیکی اندازه‌گیری می‌شود و سپس تنش آزمایش BO محاسبه می‌گردد. نمونه آزمایشی دارای قطر ۵۵ میلی‌متر و ارتفاع ۷۰ میلی‌متر می‌باشد. نمونه آزمایش در بتن به روش دریل کردن بتن سخت شده با استفاده از مته نمونه‌گیر در زمان آزمایش ایجاد می‌گردد. آزمایش BO به نسبت آزمایش‌های دیگر نیمه مخرب نسبتاً ساده‌تر انجام می‌شود، نتایج آن قابل تکرار بوده و به برنامه‌ریزی قبلی نیاز ندارد.



شکل ۱- نحوه آزمایش Break-off

مطابق استاندارد ASTM [۲۵] برای آزمایش BO حداقل فاصله مرکز آزمایش از لبه خارجی مقطع ۱۵۰ میلیمتر و حداقل ضخامت

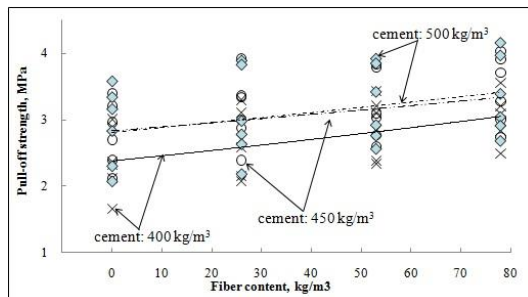
رابطه مفید ریاضی برای مشاهده رفتار و روند تغییر پاسخ است. برای ساختن مدل از نرم افزار SPSS استفاده شده است. همچنین روش Stepwise در انتخاب متغیرها بکار برده شد. این روش تنها متغیرهای مستقلی که از نظر آماری اهمیت دارند را در مدل شرکت می دهد. در واقع یک روش قدرتمند در انتخاب بهترین زیر مجموعه از متغیرهای مستقل می باشد.

۳- بررسی نتایج

۳-۱- نتایج آزمایش Break-off و Pull-off

در این قسمت، نتایج ارزیابی های انجام شده و تاثیر پارامترهای موثر بر نتایج آزمایش Break-off و Pull-off شامل مشخصات بتن، مقدار سیمان، حداکثر اندازه سنگدانه، سن بتن و همچنین تاثیر الیاف فولادی ارائه گردیده است.

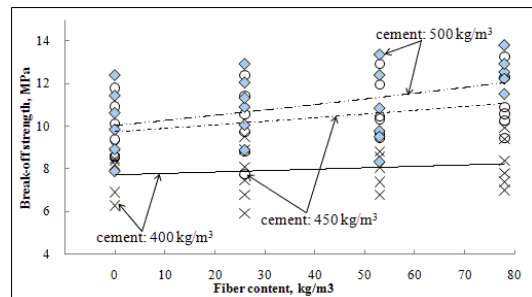
در شکل ۳ رفتار کلی مقاومت Break-off و Pull-off با مقدار الیاف فولادی برای مقادیر مختلف سیمان ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب صرف نظر از سن بتن، اندازه سنگدانه نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می شود که مقادیر متوسط مقاومت Break-off و Pull-off با افزایش مقدار سیمان افزایش می یابد. بعنوان نمونه مقادیر متوسط مقاومت Break-off بترتیب برای سیمان ۴۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب ۷/۹، ۹/۹ و ۱۰/۲ مگاپاسکال برای بتن بدون الیاف و ۸/۳، ۱۱/۱ و ۱۲/۶ مگاپاسکال برای بتن با مقدار الیاف ۱٪ و مقادیر متوسط مقاومت Pull-off بترتیب ۲/۴، ۲/۸ و ۲/۹ مگاپاسکال برای بتن بدون الیاف و ۳/۰، ۳/۴ و ۳/۴ مگاپاسکال برای بتن با مقدار الیاف ۱٪ بدست آمده است.



محل و استانداردهای [۲۹] BS EN 1542، [۲۹] ASTM D 4541، [۳۰] و [۳۱] JSCE اشاره کرد که البته شامل ضوابط و توصیه های لازم در ارزیابی چسبندگی نواحی تعمیری نیز هستند. آئین نامه ASTM C 1583 [۲۷] و JSCE [۳۱] میانگین حداقل سه آزمایش را مدنظر قرار داده اند. همچنین اکثر استانداردها لازم می دارند که بمنظور جلوگیری از تاثیر نتایج آزمایشات برهم، فاصله مرکز به مرکز دو آزمایش مجاور هم حداقل دو برابر قطر دیسک آزمایش باشد. و در حالت انجام آزمایش با مغزه گیری جزئی حداقل عمق مغزه گیری را برابر ۱۰ میلیمتر توصیه می کنند. با توجه به قطر دیسک ۵۰ میلیمتر، قطر مغزه نیز ۵۰ میلیمتر خواهد بود. بطور کلی در استانداردها رعایت محدودیت حداقل قطر مغزه به ماکزیمم سایز سنگدانه برابر ۳ توصیه شده است [۱].

۶-۲- تحلیل رگرسیونی

تحلیل رگرسیونی تکنیک آماری برای تحلیل داده های چند عاملی است که حوزه کاربرد آن بسیار می باشد. نتایج پرجاذبه آن از نظر مفهومی فرآیند ساده بکارگیری یک معادله برازش یافته است که ارتباط بین مجموعه ای از پارامترها را بیان می کند. موفقیت در تحلیل رگرسیونی نیاز به درک و تیزبینی در هر دو مقوله تئوری و مسائل عملی و کاربردی دارد و زمانی بروز می کند که تکنیک ارزیابی و بکارگیری و صحت سنجی بدرستی انجام گرفته باشد. یکی از کاربردهای مهم تحلیل رگرسیونی متغیر پاسخ و عبارتی پیش بینی پاسخ است. رگرسیون روش مطالعه ارتباط پارامترها بصورت کمی است. عبارت دیگر هدف رگرسیون خلاصه کردن داده ها بشکل یک



شکل ۳- تغییرات مقادیر مقاومت Break-off و Pull-off با مقدار الیاف برای عیارهای مختلف سیمان

فولادی نیز تاثیر زیادی بر نتایج دارد. نویل اعتقاد دارد هر چه مقدار سنگدانه بیشتر شود، آب بیشتری جذب خواهد شد و لذا تاثیر نسبت

پراکندگی زیاد نتایج شکل ۳ احتمالاً مربوط به نادیده گرفتن تاثیر سن بتن و اندازه سنگدانه است. همچنین توزیع و جهت گیری الیاف

بتن‌های حاوی الیاف نسبت به بتن بدون الیاف با افزایش سن بتن مشخص‌تر می‌شود.

افزایش مقاومت BO در نتیجه افزودن الیاف و مشارکت آنها قطعاً به مکانیزم عملکرد الیاف مربوط است. الیاف مانع گسترش و توسعه ریزترکهای داخلی بتن می‌گردد. در نتیجه باعث افزایش مقاومت خمشی می‌شود. 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 می‌باشد.

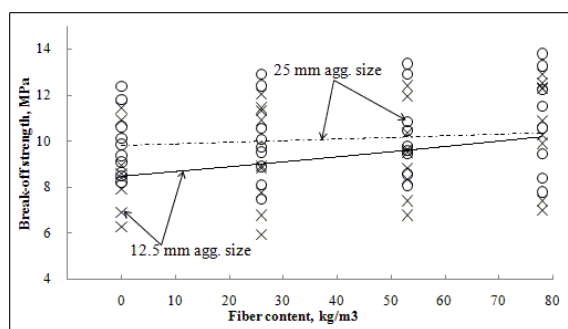
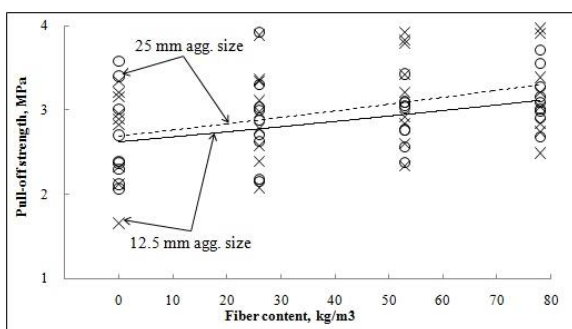
۳-۲- تفسیر نتایج

نتایج دامنه گسترده‌ای از آزمایشات نشان می‌دهد که می‌بایست منحنی‌های کالیبراسیون جداگانه‌ای بین مقاومت آزمایش‌های نیمه مخرب و مقاومت فشاری بتن در نظر گرفته شود. در شکل ۶ منحنی کالیبراسیون آزمایش Break-off و Pull-off برای بتن‌های مختلف در نظر گرفته شده است. می‌توان بیان نمود که مقادیر مقاومت Break-off و Pull-off بتن‌های بدون الیاف فولادی نسبت به بتن دارای مقادیر بیشتر الیاف فولادی کمتر باشد. در ضمن با توجه به اختلاف مشخص منحنی‌های کالیبراسیون بدلیل حضور الیاف فولادی، بنظر می‌رسد می‌بایست از منحنی‌های کالیبراسیون مختص هر بتن استفاده نمود.

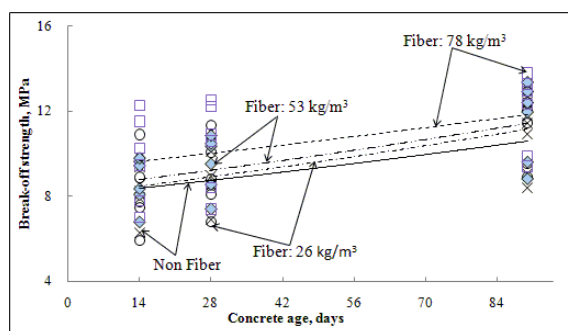
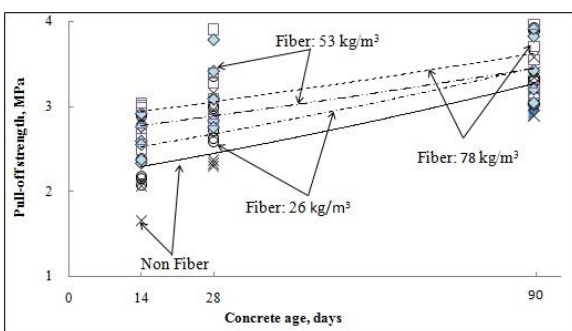
آب موثر به سیمان کاهش می‌یابد. در نتیجه هرچه مقدار سنگدانه‌ها بیشتر شود، جمع شدگی و آب انداختن کمتر می‌گردد و خسارت کمتری به پیوستگی بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها وارد می‌شود [۳۲].

در شکل ۴ رفتار کلی مقاومت Break-off و Pull-off با مقدار الیاف فولادی برای دو اندازه حداکثر سنگدانه ۱۲/۵ و ۲۵ میلیمتر، صرفنظر از سن بتن و مقدار سیمان داده شده است. بطور کلی می‌توان بیان نمود که مقادیر مقاومت Break-off و Pull-off برای سنگدانه بزرگتر، بیشتر می‌باشد. همچنین براساس نتایج بدست آمده، مقدار متوسط مقاومت Break-off و Pull-off برای بتن‌های بدون الیاف با سنگدانه ۲۵ میلیمتر بترتیب ۱۵٪ و ۴٪ بزرگتر از بتن‌های بدون الیاف حاوی سنگدانه ۱۲/۵ میلیمتر می‌باشد. این مقدار برای بتن حاوی ۱٪ الیاف فولادی بترتیب فقط ۱٪ و ۷٪ بزرگتر می‌باشد. شایان ذکر است پراکندگی زیاد نتایج ناشی از نادیده گرفتن اثرات سن بتن، مقدار سیمان و مقادیر متفاوت الیاف می‌باشد.

تاثیر سن بتن بر رفتار کلی تغییرات مقاومت‌های Break-off و Pull-off با مقدار الیاف فولادی صرفنظر از مقدار حداکثر سنگدانه و مقدار سیمان در شکل ۵ نشان داده شده است. با مقایسه نتایج آزمایش مشاهده می‌شود که افزایش نسبت مقاومت Pull-off



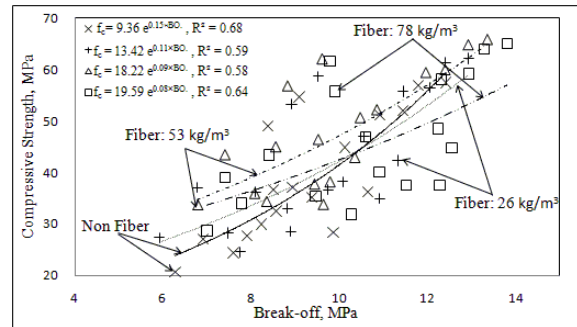
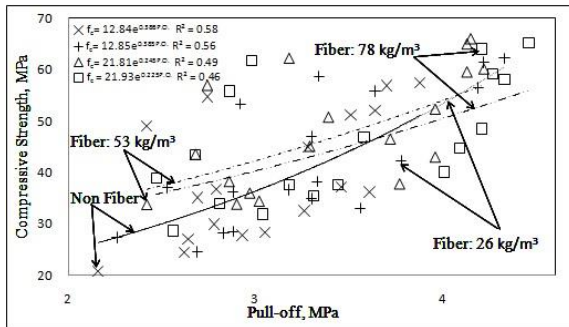
شکل ۴- تغییرات مقادیر مقاومت Break-off و Pull-off با مقدار الیاف برای دو اندازه سنگدانه مختلف



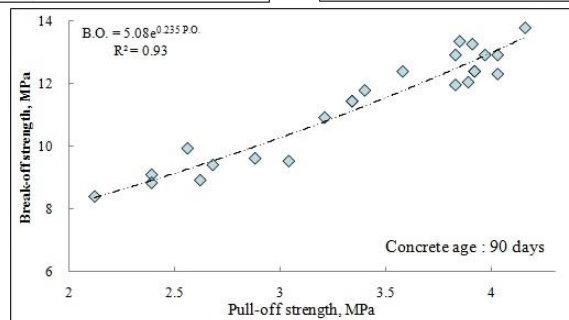
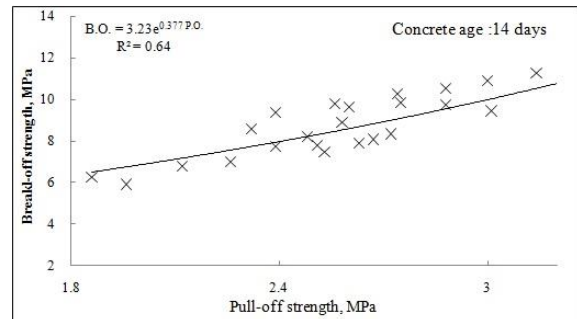
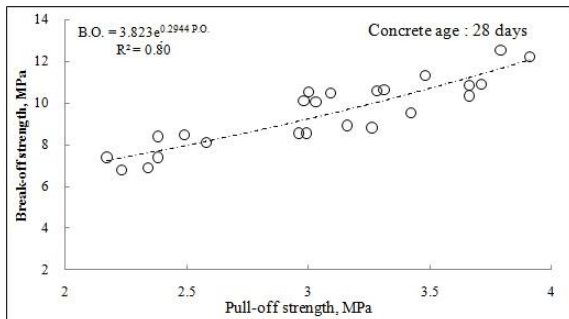
شکل ۵- تغییرات مقادیر مقاومت Break-off و Pull-off با سن بتن برای مقادیر مختلف الیاف

می‌شود. در شکل ۷ منحنی کالیبراسیون نتایج آزمایش Break-off و Pull-off نسبت یکدیگر در سنین مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سن همبستگی نتایج افزایش می‌یابد.

همانطور که پیشتر بحث شد، مزیت وجود الیاف در بتن ناشی از مکانیزم مسلح کنندگی و تقویت کنندگی الیاف است، چرا که انرژی قابل توجهی در فرآیند بیرون کشیدگی آنها پراکنده و تلف



شکل ۶- مقایسه منحنی های کالیبراسیون برای بتن های مختلف با مقادیر مختلف الیاف فولادی



شکل ۷- مقایسه منحنی های کالیبراسیون مقاومت آزمایش Break-off و Pull-off برای سنین مختلف

آزمایش نیمه مخرب (fb-fp)، سن آزمایش (T) بعنوان متغیرهای مستقل ورودی مدلهای رگرسیونی مرتبط باشد. ضریب رگرسیون استاندارد شده میزان همبستگی خالص یا اثر مستقیم هر یک از متغیرها بر روی متغیر وابسته بدون تاثیر دیگر متغیرها را نشان می‌دهد. بدین ترتیب فرمول معادله رگرسیون استاندارد بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$Y' = \sum_1^k B_i Z_i \quad (2)$$

بر مبنای توضیحات ارائه شده مدل رگرسیون چند متغیره براساس داده‌های آزمایش بترتیب مطابق روابط ۳ و ۴ برای پیش‌بینی مقاومت فشاری بصورت زیر بدست آمده است:

۳-۲-۱- مدل‌سازی عددی

بدلیل نبود یک رابطه تئوری دقیق مابین ارتباط نتایج آزمایش‌های نیمه مخرب و مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف فولادی، مدل جامع رگرسیونی در تبیین این آزمایش با در نظر داشتن خصوصیات مختلف صورت گرفته است.

زمانی که تعداد زیادی از متغیرهای مستقل ورودی وجود دارد، می‌بایست بهترین ترکیب از آنها در پیش‌بینی خروجی بکار گرفته شود. با توجه به نتایج آزمایشگاهی صورت گرفته می‌توان انتظار داشت که مقاومت فشاری بتن (fc) با مقدار سیمان (C)، مقدار الیاف فولادی (F)، حداکثر اندازه سنگدانه (da)، مقاومت

مقایسه آزمایش‌های نیمه مخرب break-off و Pull-off...

افزایش می‌یابد. بنابراین شاخص R^2 باید تعدیل شود. مطابق رابطه (۵) R^2_{adj} بعنوان ضریب تعیین تعدیل یافته، تحلیل گری را که متغیر غیر ضروری وارد مدل می‌کند، جریمه می‌کند و در صورت اضافه شدن عبارات غیر ضروری به مدل کاهش می‌یابد. علاوه بر شاخص R^2_{adj} ، برای مقایسه عملکرد پیش‌بینی مدل‌های استخراج شده، مطابق روابط (۶) الی (۸) از شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطی^۲ (RMSE)، مقدار اعتبار^۳ (VAF) و متوسط قدرمطلق خطاهای نسبی^۴ (MAPE) استفاده شده است.

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{n-1}{n-p} \times (1 - R^2) \quad (۵)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n (y - y')^2} \quad (۶)$$

$$VAF = \left[1 - \frac{\text{var}(y-y')}{\text{var}(y)} \right] \times 100 \quad (۷)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_i^n \left| \frac{y-y'}{y} \right| \times 100 \quad (۸)$$

در روابط فوق y' ، p و n به ترتیب بیانگر مقدار مشاهده شده، مقدار پیش‌بینی، تعداد پارامترهای مدل و تعداد نمونه‌ها می‌باشد. در جدول (۵) مقادیر محاسبه شده این شاخص‌ها برای مدل‌های خطی نشان داده شده است. براساس این جدول، دقت مدل‌های ارائه شده به نوعی تایید می‌شود، چرا که حدود ۸۰٪ تغییرات متغیر پاسخ با مدل‌های برازش شده می‌تواند بیان شود. همچنین روشن است که روش Break-off نتایج دقیقتری در مقایسه با روش Pull-off ارائه کرده‌اند.

جدول ۵- ارزیابی آماری مدل‌های پیش‌بینی

Linear Regression	R^2_{adj}	RMSE	MAPE	VAF(%)
Break-off	0.920	3.37	6.64	92
Pull-off	0.857	3.24	6.45	93

در شکل ۸ عملکرد بسیار مناسب مدل رگرسیونی نشان داده شده است. این شکل توانایی پیش‌بینی بالای هر دو آزمایش را اثبات می‌کند. همانطور که در شکل مشهود است مقادیر واقعی و پیش‌بینی مقاومت فشاری در نزدیکی خط برابری^۵ متراکم شده‌اند.

$$f_c = 9.668 + 0.285 \times T + 0.085 \times F + 0.299 \times da + 1.29 \times f_b \quad (۳)$$

$$f_c = -3.890 + 0.267 \times T + 0.022 \times C + 0.063 \times F + 0.440 \times da + 5.114 \times f_p \quad (۴)$$

جداول ۳ و ۴ اهمیت ضرایب رگرسیونی در تبیین مقاومت فشاری بتن، مقادیر ضرایب رگرسیونی استاندارد شده، t-value و همچنین sig(p)-value را نشان می‌دهد.

جدول ۳- اهمیت ضرایب رگرسیون Break-off

model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
B ₀	9.668	2.336	-	4.139	0
T	0.285	0.015	0.776	18.61	0
F	1.293	0.272	0.209	4.754	0
da	0.085	0.015	0.204	5.74	0
Fb	0.299	0.069	0.154	4.371	0
Excluded Variable					
C	-	-	-0.02	-0.31	0.756

جدول ۴- اهمیت ضرایب رگرسیون Pull-off

model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
B ₀	-3.890	4.783	-	-0.813	0.042
T	0.267	0.020	0.727	13.332	0.000
C	0.022	0.011	0.074	2.062	0.043
F	0.063	0.018	0.152	3.595	0.001
da	0.440	0.065	0.226	6.736	0.000
Fp	5.114	1.361	0.237	3.756	0.000

مقادیر t و sig(p) بیانگر نشانه‌ای از اهمیت متغیر پیشگویی کننده است. مقادیر بزرگ قدرمطلق t-value و مقادیر کوچک P-value (کوچکتر از سطح معناداری ۰/۰۵) نشان می‌دهد که متغیر مستقل پیش‌بینی کننده تاثیر زیادی بر متغیر پاسخ دارد. اگر مقدار P-value بزرگتر از ۰/۰۵ نتیجه شود، این متغیر مستقل از مدل خارج شده و تحلیل رگرسیونی بر مبنای متغیرهای مستقل باقیمانده انجام می‌گیرد.

۳-۲-۲- ارزیابی عملکرد مدل رگرسیونی پیش‌بینی مقاومت

ارزیابی عملکرد مدل‌ها بخش مهمی از تحلیل رگرسیونی چند متغیره بحساب می‌آید. بطور کلی ضریب تعیین چند متغیره R^2 بین مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شاخص خوبی برای کنترل عملکرد پیش‌بینی مدل می‌باشد. مقادیر بالاتر R^2 بمعنی همبستگی بهتر و بیشتر نتایج پیش‌بینی مدل با نتایج آزمایشگاهی است. وقتی متغیر جدیدی به مدل اضافه می‌شود R^2

⁴ Mean Absolute Percentage Error

⁵ Line of equality

¹ Adjusted

²Root Mean Square Error

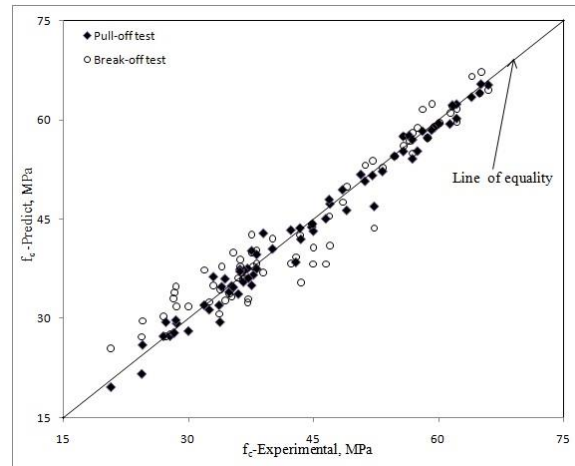
³ Values Account For

شرایط آزمایشگاهی مطلوب و با استفاده از منحنی کالیبراسیون معتبر بعید است که در محدوده اطمینان ۹۵٪ به دقتی بهتر از ۱۵٪± در تخمین مقاومت فشاری بتن دست یافت.

۵- مقادیر بالاتر ضریب تغییرات ممکن است ناشی از ناهمگنی ذاتی بتن بویژه در حضور الیاف فولادی باشد، زیرا تضمین شرایط توزیع همگن و قرارگیری مناسب جهت الیاف در مخلوط بتن عملاً غیرممکن است.

۵- مراجع

- [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] Li VC. Large volume, high-performance applications of fibers in civil engineering. Journal of Applied Polymer Science. 2002 Jan 18;83(3):660-86.
- [4] Aydin A., Self compactability of high volume hybrid fiber reinforced concrete. Construction and Building Materials. 2007 Jun 30;21(6):1149-54.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Neville A. M., Properties of concrete, 4th ed., John Wiley and Sons, Inc., New York, 1996, 844p.
- [10] 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.
- [11] 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.



شکل ۸- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با مقادیر پیش‌بینی

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله آزمایش‌های Pull-off و Break-off مورد بررسی قرار گرفت. لذا جنبه‌های مختلف آزمایش مورد ارزیابی واقع گردید و نتایج زیر حاصل شد.

۱- بطور کلی، برای نسبت آب به سیمان ثابت، مقادیر میانگین مقاومت Break-off و Pull-off با افزایش عیار سیمان افزایش می‌یابد.

۲- همچنین اندازه ماکزیمم سنگدانه در دو محدوده ۱۲/۵ میلیمتر و ۲۵ میلیمتر مورد بررسی نشان می‌دهد که مقادیر مقاومت Break-off و Pull-off برای سنگدانه بزرگتر، بیشتر می‌باشد. این مقدار برای آزمایش Break-off در بتن فاقد الیاف فولادی تاثیر مشهودتری نسبت به بتن حاوی الیاف فولادی دارد بطوریکه در بتن حاوی ۱٪ الیاف فولادی با سنگدانه ۲۵ میلیمتر فقط یک درصد بیشتر از مقدار نظیر آن برای بتن با سنگدانه ۱۲/۵ میلیمتر می‌باشد.

۳- روند کلی بهبود مقاومت Break-off و Pull-off با سن، مشابه بتن‌های مختلف می‌باشد. همچنین، افزایش نسبت مقاومت هر دو آزمایش در بتن حاوی الیاف فولادی نسبت به مقدار نظیر برای بتن فاقد الیاف با افزایش سن بتن، مشاهده می‌شود.

۴- ضریب تغییرات مقاومت Break-off در این تحقیق در محدوده ۴٪ الی ۱۱٪ بدست آمده است. نتایج ارزیابی‌ها حاکی از آن است که قابلیت اعتماد این روش در ارزیابی مقاومت مناسب می‌باشد، گرچه کاربرد قابل قبولی برای تخمین مقاومت بتن براساس یک منحنی کالیبراسیون کلی و عمومی وجود ندارد. فاکتورهای تاثیرگذار بر کالیبراسیون متعدّدند. بنابراین حتی در

- [27] ASTM C1583. Tensile strength of concrete surfaces and bond strength or tensile strength of concrete repair and overlay materials by pull-off method. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- [28] BS 1881: Part 207 Recommendations for the assessment of concrete strength by near-to-surface tests. British Standards Institution, London.
- [29] BS EN 1542. Products and systems for the repair of concrete structures –Test methods– Measurements of bond strength by pull-off. British Standards Institution, London.
- [30] ASTM D4541. Standard test method for pull-off strength of coating using portable adhesion testers. American Society for Testing and Materials; 2002.
- [31] JSCE-E 545. Test method for direct pull-off strength of continuous fibre sheets with concrete. Tokyo, Japan: Concrete Library of JSCE, Japan Society of Civil Engineers; 2000.
- [32] Alyousif, A., Design and Testing of Fiber Reinforced Self Compacting Concrete. PhD diss., Eastern Mediterranean University (EMU), 2010.
- [12] Dahl-Jorgensen E. Break-Off and Pull-Out 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.
- [13] Hassaballah, A., Evaluation of In-Place Crushed Aggregates Concrete by the Break-Off Method, M.S. thesis, Department of Civil Engineering and Mechanics, University of Wisconsin–Milwaukee, December 1987.
- [14] Naik, Tarun, Salameh Z, and Hassaballah A., Evaluation of In-Place Strength of Concrete By The Break-Off Method. Proceedings of the NDT&E for Manufacturing and Construction Conference, University of Illinois, Urbana-Champaign, IL. 1988.
- [15] Bungey JH, Grantham MG, Millard S. Testing of concrete in structures. Crc Press; 2006 Sep 27.
- [16] 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.
- [17] Bungey J. H, Madandoust R. Factors influencing pull-off tests on concrete. Mag. Conc. Res. 1992;44(158):21-30.
- [18] 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.
- [19] Bungey JH, Soutsos MN. Reliability of partially-destructive tests to assess the strength of concrete on site. Constr Build Mater 2001;15(2–3):81–92.
- [20] Ramos N. M. M., Simões M. L., Delgado J.M.P.Q., Freitas V.P. de, Reliability of the pull-off test for in situ evaluation of adhesion strength, Construction and Building Materials 31(2012)86–93.
- [21] ASTM C 150, (2004). Standard Specification for Portland Cement, American Standards for Testing and Materials.
- [22] BS 882:(1992), Specification for aggregates from natural sources for concrete, London: BSI.
- [23] British Standard, B.S. 1881, Part 201, 1986, 17.
- [24] Johansen R. In Situ strength Evaluation of Concrete The Break-off Method. Concrete International. 1979 Sep 1;1(09):45-51.
- [25] ASTM C 1150 (1992) Standard test method for the break-off number of concrete, vol 04.02. Annual Book of ASTM Standards
- [26] Long A.E., Henderson, G.D., Montgomery F.R., Why assess the properties of near-surface concrete?, Construction and Building Materials 15 (2001) 65-79.

Comparison of Break-off and Pull-off test results for determining compressive strength of steel fiber reinforced concrete

S.H Ghasemzadeh Mosavinejad *

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

Benyamin Ganjeh Khosravi

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

Javad Razzaghi

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

Abstract

Here, the efficiency of the non-destructive Break-Off (BO) and Pull-off tests 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 Break-Off and Pull-off tests and 216 standard cube tests were carried out in this investigation. Then, effective parameters of SFRC and Break-Off and Pull-off tests results were evaluated. The studies showed that volumetric percentage and features of steel fibers had a significant influence on concrete properties as well as Break-Off and Pull-off tests 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 non-destructive tests 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 Break-Off and Pull-off strengths. 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 while the average value of Pull-off strength for 25 mm aggregate concrete was more than the corresponding value for 12.5 mm aggregate size. Moreover, the improving trend the Break-Off and Pull-off strengths with age is observed to be similar for all different concretes. In addition to, conventional numerical regression model was developed in this study. Statistical indices were used to compare the efficiency and accuracy of model. The result of this study has confirmed the accuracy of linear regression model for non-destructive tests.

Keywords: Break-off test, Pull-off test, Steel Fiber, Non-destructive, regression model.

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