

روش pull-off برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن خود تراکم مسلح با الیاف فولادی با بکارگیری پارامترهای بدون بعد

کمیل مومنی*؛ رضا قویدل^۲؛ رحمت مدندوست^۳

۱. استادیار فنی - دپارتمان مهندسی عمران - آموزشکده فنی امام صادق (ع) - دانشگاه فنی و حرفه ای استان گیلان - ایران
۲. مدرس گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد لشت نشا
۳. دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان

* kmomeni@tvu.ac.ir

تاریخ دریافت ۹۹/۰۲/۰۱ تاریخ پذیرش ۹۹/۰۶/۲۷

چکیده

در این مطالعه تجزیه و تحلیل آماری در مورد پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن خود تراکم مسلح به الیاف فولادی (SFRSCC) بر اساس نتایج آزمون pull-off با استفاده از مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی ارائه شده است. برای این منظور، یک برنامه آزمایشی گسترده شامل مقادیر مختلف سیمان و اندازه سنگدانه همراه با الیاف فولادی در مقادیر ۰، ۳۰، ۵۰ و ۸۰ کیلوگرم در متر مکعب انجام شد. دیسک‌های آلومینیومی و فولادی با قطر ۵۰ میلی‌متر و ۷۰ میلی‌متر با ضخامت‌های مختلف بکار گرفته شد. علاوه بر این، اثر عمق مغزه‌گیری جزئی بر مقاومت pull-off مورد بررسی قرار گرفت. آثار خواص SFRSCC و پارامترهای آزمون در معادلات پیشنهادی به صورت متغیرهای بدون بعد گنجانده شده است. نتایج نشان داد که هر دو مدل رگرسیون خطی و غیرخطی از توانایی بالایی به عنوان ابزاری قابل اطمینان برای پیش‌بینی مقاومت فشاری SFRSCC بر اساس آزمون pull-off برخوردار هستند. در مدل رگرسیون خطی چندگانه برای پیش‌بینی مقاومت فشاری SFRSCC برای دیسک آلومینیومی، تاثیرگذارترین پارامتر، عامل F/C بوده و عامل d_a/D دارای کمترین تاثیر بوده است و برای دیسک فولادی، موثرترین پارامتر، F/C بوده و کمترین تاثیر مربوط به عامل d_a/D بوده است. با این حال، دقیق‌ترین نتایج از معادلات غیرخطی در مقایسه با مدل‌های خطی حاصل شده است.

واژگان کلیدی: بتن خود تراکم؛ الیاف فولادی؛ آزمون pull-off؛ مقاومت فشاری؛ مدل‌های رگرسیون

۱- مقدمه

الیاف به ماتریس سیمانی ترد فراهم می‌کند [1-4]. استفاده از SFRSCC در دهه‌های گذشته به طور مداوم افزایش یافته است. بنابراین، دلیل قابل بحثی وجود دارد که آزمایش درجا بتن حاوی الیاف فولادی از اهمیت بیشتری برخوردار شود. انگیزه اصلی مربوط به صنایع وابسته به بتن است که به سیستم‌های مدیریت کیفیت علاقه‌مند هستند، به عنوان نمونه

امروزه در بیشتر موارد ثابت شده است که استفاده از الیاف فولادی در بتن می‌تواند به طور قابل توجهی بسیاری از خصوصیات مهندسی آن را افزایش دهد، اگرچه در مواردی کاهش یا بی تاثیر بودن وجود آنها نیز دیده شده است. بتن خود تراکم تقویت شده با الیاف فولادی (SFRSCC) مزایای فناوری بتن خود تراکم (SCC) را با مزایای افزودن

روش pull-off برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن خود تراکم... در طول تولید بتن و ساخت عناصر بتنی، کیفیت بدست آمده برحسب انحراف از یک کیفیت مورد تقاضا و نیز پراکندگی خواص مواد باید شناخته شود. علاوه بر این، همیشه نیاز به روش‌های آزمون برای اندازه‌گیری ویژگی‌های بتن درجا برای ارزیابی شرایط موجود وجود داشته است. همچنین، باید در نظر داشت که داده‌های گردآوری شده از طریق ارزیابی‌های آزمایشگاهی در مقایسه با داده‌های میدانی به دلایل مختلف از جمله عدم یکنواختی مواد و تفاوت در تراکم، ریختن، عمل‌آوری و عوامل انسانی می‌تواند به طور قابل توجهی متفاوت باشد [5]. آزمایش مغزه‌های بتنی برش خورده از بتن سخت، یک روش کاملاً ثابت شده است که ارزیابی مقاومت بتن درجا را در سطح قابل اطمینانی ارائه می‌دهد، اما سرعت این روش کم، هزینه‌اش زیاد بوده و باعث آسیب می‌شود [5]. به طور کلی، روش‌های غیر مخرب یا تا حدودی مخرب آسیب سطحی کم یا ناچیزی ایجاد می‌کنند و بیشتر آنها ساده و سریع استفاده می‌شوند که در آنها می‌توان مناطق وسیعی را به طور منظم بررسی کرد [6]. با این حال، برای تفسیر نتایج آنها باید توجه ویژه‌ای منظور شود. روش‌های نیمه مخرب که برخی از ویژگی‌های مقاومتی بتن را اندازه‌گیری می‌کنند، معمولاً بهترین انتخاب به شمار می‌روند [6] چراکه به طور کلی به جزئیات کمتری برای تخمین مقاومت نیاز دارند. با این وجود، باید در نظر داشت که در دسترس بودن و قابلیت اطمینان همبستگی‌های پارامترها و دقت مورد نیاز از پیش بینی‌های مقاومت ممکن است از عوامل مهم در انتخاب مناسب‌ترین روش‌ها برای استفاده باشد. آزمایش pull off بتن برای تخمین مقاومت بتن در اواسط سال ۱۹۷۰ در دانشگاه بلفاست و کوینز انجام شد و قابلیت اطمینان آن مورد ارزیابی قرار گرفت و منجر به ساخت اولین دستگاه تجاری با عنوان Limpet شد. آزمون pull-off یا بیرون کشیدگی، یک آزمایش بتن کارگاهی برای ارزیابی مقدار نیروی کششی مورد نیاز برای کشیدن دیسک چسبیده به سطح بتن بارزین اپوکسی یا پلی استر مناسب که مقاومت آن از مقاومت کششی بتن بیشتر است می‌باشد. به این دیسک فلزی دالی نیز گفته می‌شود. بتن دارای دالی به آرامی تا زمان گسیختگی تحت

کمیل مومنی و همکاران
کشش قرار می‌گیرد تا اینکه در نهایت سازوکار کشش کامل شود. این اندازه‌گیری ممکن است با استفاده از کالیبراسیون متناسب با بتن با در نظر گرفتن عوامل تأثیرگذار به مقاومت فشاری تبدیل شود تا برآورد قابل اعتمادی از مقاومت درجا بدست آید. این روش همچنین برای ارزیابی مقاومت پیوند تعمیرات سطحی مناسب است. این آزمایش ساده و سریع انجام می‌شود و برای اجتناب از آرماتور نیازی به برنامه ریزی قبلی ندارد [7-11]. استانداردهای مختلفی این آزمایش را تحت پوشش قرار داده‌اند که از آن جمله می‌توان ASTM C1583 و BS 1881:Part 207 برای کاربردهای این روش در محل و استانداردهای BS EN 1542 ، ASTM D 4541 و JSCE اشاره کرد که البته شامل ضوابط و توصیه‌های لازم در ارزیابی چسبندگی نواحی تعمیراتی نیز هستند. آئین نامه ASTM C158 و JSCE میانگین حداقل سه آزمایش را مدنظر قرار داده‌اند. همچنین بیشتر استانداردها لازم می‌دارند که به منظور جلوگیری از تأثیر نتایج آزمایش‌ها برهم، فاصله مرکز به مرکز دو آزمایش مجاور هم حداقل دو برابر قطر دالی آزمایش باشد و در حالت انجام آزمایش با مغزه‌گیری جزئی حداقل عمق مغزه‌گیری را برابر ۱۰ میلی‌متر توصیه می‌کنند. با توجه به قطر دیسک ۵۰ میلی‌متر، قطر مغزه نیز ۵۰ میلی‌متر خواهد بود. به طور کلی در استانداردها رعایت محدودیت حداقل قطر مغزه به ماکزیمم سایز سنگ دانه برابر ۳ توصیه شده است. این روش آزمون پیشنهادی، تنش کششی را به سیستم ترکیبی اعمال می‌کند که درستی بتن موجود برای تعمیر و یا مقاومت پیوند بین لایه‌ای و یا مقاومت کششی مواد تعمیراتی را ارزیابی می‌کند. تنش کششی در این آزمون، محل گسیختگی و مقدار تنش گسیختگی را نیز مشخص می‌کند. همچنین، روش آزمون ممکن است برای ارزیابی قدرت چسبندگی مواد چسبنده استفاده شود. انجام آزمون‌های کششی Pull-off در کارگاه شامل مواد، تجهیزات و عملیات خطرناکی است و بهتر است که کاربر قبل از اقدام، موارد ایمنی مناسب را رعایت نماید. در شکل (۱) نمایی از آزمایش pull-off نشان داده شده است [12]. آزمون pull-off تحت تأثیر پارامترهای زیادی قرار دارد. در حقیقت، نه تنها

قطر سنگدانه، تاثیر درصد الیاف، معادلات تجربی خطی و غیرخطی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری SFRSCC ایجاد شده است. به منظور دستیابی به مدل‌های پیش‌بینی قابل اعتمادتر، پارامترهای تأثیرگذار ذکر شده در اشکال بدون بعد در نظر گرفته شده اند که تاکنون در این زمینه گزارشی ارائه نشده است. همچنین، نتایج تجزیه و تحلیل داده‌ها و عملکرد مدل‌ها مورد بحث واقع شده است. در نهایت، نتایج معادلات پیشنهادی با نتایج بدست آمده از گزارشات پیشین مقایسه شده است.

شکل ۱: نمایی از آزمایش Pull-off

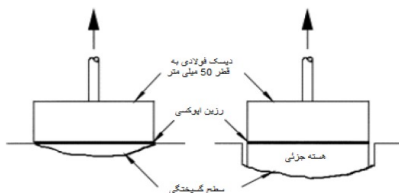


Fig. 1. View of the pull-off test

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مواد مصرفی

۲-۱-۱- سیمان: سیمان مصرفی در این پژوهش، سیمان پرتلند تیپ ۲ ساخته شده توسط کارخانه سیمان گیلان- دیلمان دارای سطح مخصوص بلین (gr/cm^2) ۳۱۶۵ است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان مورد استفاده، در جدول (۱) ارائه شده است.

ویژگی‌های SFRSCC از جمله: عیار و نوع سیمان، مقدار سنگدانه و بیشینه اندازه آن، سن بتن و مقدار الیاف بکار رفته و ویژگی‌های آن، همچنین پارامترهای عملی و هندسی آزمون شامل جنس دیسک، قطر و ضخامت دیسک و همچنین مغزه‌گیری جزئی ممکن است در مقادیر اندازه‌گیری شده آزمون pull-off تاثیر گذار باشد.

بنابراین، برای در نظر گرفتن همه این عوامل بکارگیری مدل‌های جامع‌تر و دقیق‌تر برای پیش‌بینی مقاومت بتن ضروری است. به طور کلی می‌توان اظهار داشت که اشکال اصلی در استفاده از آزمایش‌های غیرمخرب یا نیمه‌مخرب این است که برای تخمین، یک رابطه همبستگی قابل اعتماد بین اندازه‌گیری‌های درجا و مقاومت بتن مورد نیاز است، در حالی که در بسیاری از موارد چنین رابطه‌ای را نمی‌توان به راحتی تعمیم داد [14]. با این حال، برنامه‌های با طراحی مناسب اغلب می‌تواند منجر به ارائه مدلی صحیح از عملکرد سیستم شوند. به چنین مدل‌های تعیین شده آزمایشی، مدل‌های تجربی گفته می‌شود [14]. باید در نظر داشت که برخی از کمبودها در فرمول‌های تجربی کاربردهای آنها را محدود می‌کند. بیشتر فرمول‌های تجربی از لحاظ ابعادی یکدست نیستند و این می‌تواند به ضرر وابستگی واحد منجر شود. این امر شناسایی مقادیر مهم فیزیکی را در یک فرمول تجربی خاص دشوار می‌کند [15]. با این حال، اگر همه پارامترهای مهم تأثیرگذار شناخته شده باشند، باید ترجیحا فرمول پیش‌بینی را به صورت بدون بعد تعیین کرد. در این مقاله، بر اساس داده‌های تجربی به دست آمده از آزمایش‌های گسترده که با در نظر گرفتن تأثیر جنس دیسک، تأثیر قطر دیسک، تأثیر

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی سیمان مورد استفاده

خصوصیات شیمیایی							خصوصیات فیزیکی					مصالح	
L.O.I	C ₃ A	C ₃ S	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	وزن مخصوص	نرمی	
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$\frac{\text{cm}^2}{\text{gr}}$	
۰/۵۵	۷/۱	۵۲/۷	۰/۵۱	۰/۲۵	۰/۸۵	۰/۸	۶۴/۸۶	۳/۹۵	۴/۸۵	۲۲/۴۵	۳۱۵۰	۳۱۶۵	سیمان

Table 1 - Chemical compounds of cement used

شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مصالح درشت دانه

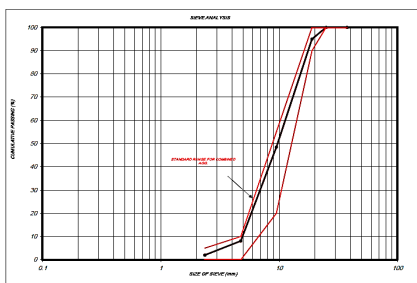


Fig. 2. Ficoarse aggregate gradation curves

شکل ۳. منحنی دانه‌بندی مصالح ریز دانه

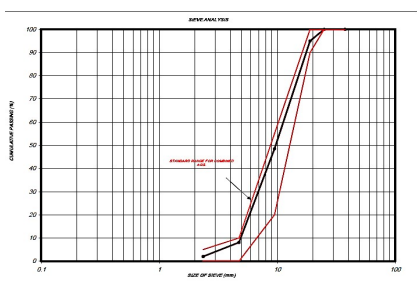


Fig. 3. fine aggregate gradation curves

۲-۲- نسبت اختلاط

به منظور ارزیابی ویژگی‌های SFRSCC که می‌تواند بر آزمون pull-off تأثیر بگذارد، دو سطح عیار سیمان ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم در متر مکعب در نظر گرفته شد. نسبت آب به سیمان (W/C) در تمام مخلوط‌های مورد مطالعه ۰/۴۵ ثابت نگه داشته شد. برای هر سطح، دو اندازه حداکثر سنگدانه ۱۰ و ۲۰ میلی متری حاوی الیاف فولادی ۰، ۳۰، ۵۰ و ۸۰ کیلوگرم در متر مکعب (با نسبت‌های حجمی (Vf) ۰، ۰/۳۸، ۰/۶۴ و ۱ درصد) در نظر گرفته شد. نسبت مخلوط ۱۶ مخلوط در جدول (۲) آورده شده است. نامگذاری هر مخلوط از سه عدد تشکیل شده است که از چپ به راست بیانگر، عیار سیمان، مقدار وزن الیاف فولادی در حجم مخلوط و حداکثر اندازه سنگدانه است. به عنوان نمونه، مخلوط M-۱۰-۵۰-۴۰۰، طرح اختلاطی است که در آن، عیار سیمان ۴۰۰ کیلوگرم در متر مکعب، مقدار الیاف فولادی برابر ۵۰ کیلوگرم در متر مکعب مخلوط و حداکثر اندازه سنگدانه برابر ۱۰ میلی متر است

روش pull-off برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن خود تراکم...

۱- ۲- آب: مطابق نظر اکثر آیین‌نامه‌ها، آب مصرفی در تهیه بتن‌های مورد نظر، آب شرب بوده است.

۲-۱- ۳- سنگدانه

۱- ۳- ۱- مصالح درشت دانه (شن): در این مطالعه، سنگدانه‌های درشت از مصالح طبیعی شکسته شده با بیشترین اندازه‌های قطر ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر و وزن مخصوص ۲.۶۵ و دانه‌بندی پیوسته تهیه شده است. میزان جذب آب آن برابر ۱/۰۱ درصد است. نمودار دانه‌بندی این مصالح در شکل (۲) ارائه شده است.

۲- ۳- ۱- مصالح ریزدانه (ماسه): مصالح ریزدانه شامل ماسه رودخانه‌ای، با مدول نرمی ۲/۹۲ و وزن مخصوص ۲/۶۵ بوده است. نمودار دانه‌بندی این مصالح در شکل (۳) ارائه شده است. بتن با روانی بالا مانند بتن‌های خود تراکم معمولاً به دوز بالای فوق روان کننده نیاز دارد. به طور کلی، برای حل مشکل لزجت در این نوع بتن‌ها از دو روش استفاده از مواد افزودنی معدنی یا عامل اصلاح کننده ویسکوزیته استفاده می‌شود [17، 18]. در این تحقیق روش استفاده از مواد افزودنی معدنی انتخاب شد.

۲- ۳- ۱- ۳- فوق روان کننده: برای افزایش جریان پذیری مخلوط‌ها از مخلوط کاهنده شدید آب پلی کربوکسیلیک اتر (HRWRA) با چگالی بین ۱/۰۱ - ۱/۱۳ گرم در سانتی‌متر مکعب (در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد) استفاده شد. مقادیر فوق روان کننده به منظور حفظ قطر پخش شدگی جریان اسلامپ برای همه مخلوط‌ها در محدوده ۶۵۰ ± ۵۰ میلی متر تنظیم شد

۲- ۳- ۱- ۴- الیاف: الیاف فولادی قلابدار و کم کربن با طول ۵۰ میلی متر به قطر ۰/۸ میلی متر و نسبت ابعاد ۶۲/۵ و چگالی ۷/۸۵ گرم در سانتی متر مکعب به مخلوط اضافه شدند.

۲- ۳- ۱- ۵- پودر آهک: پودر سنگ آهک بسیار ریز موجود (> ۱۵۰ میلی متر) با وزن مخصوص ۲/۷ به عنوان افزودنی افزایش دهنده ویسکوزیته برای حفظ مقدار لزجت در حالت تازه استفاده شد.

جدول ۲. طرح اختلاط بتن های SCC مورد آزمایش

جزئیات مخلوط	سیمان (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	پودر سنگ آهک (kg/m ³)	مصالح ریز دانه (kg/m ³)	مصالح درشت دانه (kg/m ³)	Admixtures (HRWRA) (kg/m ³)	مقدار الیاف		Mortar volume (m ³ /m ³)	Aggregate volume (m ³ /m ³)
							فلادی (kg/m ³)	(%)		
M-400-00-10	400	180	120	1014	606	3.6	-	0	0.734	0.611
M-400-30-10	400	180	120	1014	606	3.7	30	0.38	0.734	0.611
M-400-50-10	400	180	120	1014	606	3.9	50	0.64	0.734	0.611
M-400-80-10	400	180	120	1014	606	4	80	1	0.734	0.611
M-500-00-10	500	225	110	916	546	2.6	-	0	0.77	0.552
M-500-30-10	500	225	110	916	546	2.7	30	0.38	0.77	0.552
M-500-50-10	500	225	110	916	546	2.8	50	0.64	0.77	0.552
M-500-80-10	500	225	110	916	546	2.9	80	1	0.77	0.552
M-400-00-20	400	180	120	994	626	3.7	-	0	0.727	0.611
M-400-30-20	400	180	120	994	626	3.9	30	0.38	0.727	0.611
M-400-50-20	400	180	120	994	626	3.9	50	0.64	0.727	0.611
M-400-80-20	400	180	120	994	626	4.1	80	1	0.727	0.611
M-500-00-20	500	225	110	900	565	2.6	-	0	0.764	0.553
M-500-30-20	500	225	110	900	565	2.8	30	0.38	0.764	0.553
M-500-50-20	500	225	110	900	565	2.8	50	0.64	0.764	0.553
M-500-80-20	500	225	110	900	565	3	80	1	0.764	0.553

LP: Limestone
Powder

HRWRA: high-range water-reducing admixture

Table 2. The proportions of the SCC mixtures

۲-۴- آزمایش های انجام گرفته

پس از اختلاط، ویژگی های کارایی مخلوط های SCC از طریق اندازه گیری قطر جریان اسلامپ، زمان جریان اسلامپ برای رسیدن به مقدار ۵۰ سانتی متر بتن (T50) و آزمون حلقه J مطابق روش توصیه شده توسط EFNARC [19] و نیز شاخص چشمی پایداری (VSI) مطابق با ACI 237R-07 [20] ارزیابی شد. ویژگی های تازه در محدوده ۶۰۰-۷۰۰ میلی متر برای قطر جریان اسلامپ ۳/۵-۳/۲ ثانیه برای T50 و ۵۵۰-۶۲۰ میلی متر برای آزمون حلقه J بدون جداشدگی در مجاورت لبه های پخش شدگی و شاخص پایداری چشمی ۱ و

۲-۳- آماده سازی نمونه ها

برای هر مخلوط، دو دال بتنی SFRSCC 1400 × 1450 × 150 میلی متر در قالب های چوبی که ابتدا کمی روغن کاری شده بودند ساخته شد. پس از ۲۴ ساعت این دال ها قالب گیری شده و به مدت ۶ روز زیر گونی مرطوب نگهداری شدند. پس از سن ۷ روزگی، دال ها در معرض شرایط آزمایشگاهی کنترل نشده قرار گرفتند. برای ارزیابی نیروی pull-off از تجهیزات Proceq DYNA Z15 با بیشینه نیروی کششی ۱۶ کیلو نیوتن استفاده شده است.

شکل ۴. موقعیت قرارگیری دیسک‌ها با ویژگی‌های مختلف برای آزمایش‌های pull-off در سنین مختلف

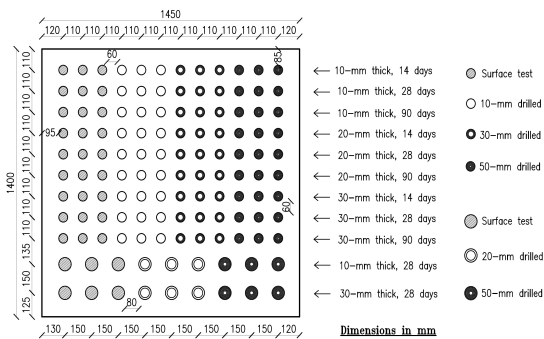


Fig. 4. Positions of pull-off tests for different discs and ages

جدول ۳. جزئیات آزمون pull-off

Disc			Test type	Test age, days	
Diameter, mm	Thickness, mm	Material			
50	10, 20 and 30	Aluminum	Surface	14, 28 and 90	
			Partial core, 10 mm	14, 28 and 90	
			Partial core, 30 mm	14, 28 and 90	
			Partial core, 50 mm	14, 28 and 90	
	10, 20 and 30	Steel	Surface	14, 28 and 90	
			Partial core, 10 mm	14, 28 and 90	
			Partial core, 30 mm	14, 28 and 90	
			Partial core, 50 mm	14, 28 and 90	
	70	10 and 30	Aluminum	Surface	28
				Partial core, 20 mm	28
				Partial core, 50 mm	28
		10 and 30	Steel	Surface	28
Partial core, 20 mm				28	
Partial core, 50 mm				28	

Table 3. Details of pull-off test

روش pull-off برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن خود تراکم...

۱.۵ بدست آمد. بنابراین، می‌توان اظهار داشت که تمام مخلوط‌های بتن را می‌توان به عنوان SCC در نظر گرفت. آزمون‌های pull-off مطابق با توصیه‌های کلی توصیف شده در استانداردها [21-23] انجام شد. دیسک‌های آلومینیوم و فولادی با قطر ۵۰ میلی‌متر با ضخامت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر به همراه دیسک‌های آلومینیوم و فولادی با قطر ۷۰ میلی‌متر و با ضخامت‌های ۱۰ و ۳۰ میلی‌متر ارزیابی شد. برای تعیین تأثیر عمق مغزه‌گیری جزئی بر مقاومت pull-off، سه عمق مختلف ۱۰، ۳۰ و ۵۰ میلی‌متر برای قطر ۵۰ میلی‌متر و دو عمق مختلف ۲۰ و ۵۰ میلی‌متر برای دیسک‌های قطر ۷۰ میلی‌متر انتخاب شد. طرح شماتیک دال‌ها شامل ابعاد و موقعیت قرارگیری دیسک‌ها با ویژگی‌های مختلف برای آزمایش‌های pull-off در سنین مختلف در شکل (۴) نشان داده شده است. می‌توان اشاره کرد که BS 1881: قسمت ۲۰۷ [21] الزام می‌دارد که فاصل مرکز به مرکز آزمایش‌ها حداقل دو برابر قطر دیسک‌ها باشد که در طراحی آزمایش‌ها منظور شده است. همچنین، لازم به ذکر است که حداقل مقادیر میانگین سه آزمایش معتبر pull-off در این مطالعه به عنوان نتیجه در نظر گرفته شده است. در صورت آزمایش ناموفق، آزمایش متناظر بلافاصله در موقعیت مناسب روی دال تکرار شد. ترکیبی از جنس و ضخامت دیسک، عمق مغزه‌گیری جزئی و سن مورد نظر برای آزمایش‌ها در جدول (۳) خلاصه شده است.

مقاومت فشاری مخلوط‌های مختلف بتن بر اساس مکعب ۱۵۰ میلی‌متر در ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روز مطابق با BS EN 12390 [24] تعیین شد. نمونه‌های ساخته شده در یک محفظه 22 ± 2 درجه سانتیگراد با گونی مرطوب پوشانده شدند و طبق ASTM C192 به مدت ۱ روز در اتاق قرار گرفتند [25]. پس از خارج کردن نمونه‌ها از قالب، شرایط نگهداری نمونه‌ها مطابق همان دال‌های بتنی منظور شد. برای هر مخلوط، حداقل مقادیر متوسط سه آزمایش به عنوان نتیجه در نظر گرفته شده است

۳- مدل سازی آماری

مانده (n-k) را می توان به عنوان (n-k) کمیت بدون بعد و مستقل از "گروه های Pi" بیان کرد. پارامترهای موجود در معادله ۱ را می توان در پارامترهای بدون بعد زیر گروه بندی کرد که می تواند به صورت رابطه کلی زیر تبیین شود:

$$\psi \left(\frac{f_c}{f_p}, \frac{F}{C}, \frac{\sqrt{F}d_a}{\sqrt{f_p T}}, \frac{d_a}{D}, \frac{t}{D}, \frac{h}{D} \right) = 0 \quad (2)$$

or

$$\frac{f_c}{f_p} = \psi_1 \left(\frac{F}{C}, \frac{\sqrt{F}d_a}{\sqrt{f_p T}}, \frac{d_a}{D}, \frac{t}{D}, \frac{h}{D} \right)$$

مدل های ریاضی به طور آزمایشی بکار گرفته شدند تا در برآورد مقاومت فشاری SFRSCC استفاده شوند. نیز می توان از مدل غیرخطی بر اساس توابع چند جمله ای، کسری، نمایی و غیره و یا ترکیبی از آنها استفاده کرد. گرچه ممکن است از پیش دانستن عبارتی که تأثیر متغیر(های) مستقل بر پدیده پاسخ را به بهترین وجه توصیف می کند ارزشمند باشد. این عبارت را می توان از طریق یک فرایند تکراری، با آزمایش معادلات مختلف تا زمانی که یکی از آنها کاملاً قادر به بیان مناسب روند مدل شده باشد، تعریف کرد. تصمیمات نهایی در مورد بهترین فرم ها پس از ارزیابی همه مدل های انتخاب شده گرفته می شود. مطابق الگوریتم بیان شده و در یک فرآیند تکراری ترکیبی از متغیرها فرمول های پیش بینی غیرخطی مربوط به دیسک های آلومینیوم و فولادی به شرح زیر بدست آمده است:

دیسک آلومینیومی:

$$\frac{f_c}{f_p} = a_1 + \left\{ \left(\frac{1 + a_2 \frac{F}{C} + a_3 \frac{\sqrt{F}d_a}{\sqrt{f_p T}}}{a_5 + a_6 \frac{F}{C} + a_7 \frac{\sqrt{F}d_a}{\sqrt{f_p T}}} \right)^{a_4} \times \left(\frac{d_a}{D} \right)^{a_8} \right\} \times \left[1 + \frac{a_9 + a_{10} \left(\frac{t}{D} \right)^{a_{11}}}{1 + a_{12} \left(\frac{h}{D} \right)^{a_{13}}} + a_{14} \left(\frac{h}{D} \right)^{a_{15}} \left(1 + a_{16} \frac{t}{D} \right) \right] \quad (3)$$

دیسک فولادی:

$$\frac{f_c}{f_p} = a_1 + \left\{ \left(\frac{a_2 + a_3 \frac{F}{C} + a_4 \frac{\sqrt{F}d_a}{\sqrt{f_p T}}}{1 + a_5 \frac{F}{C} + a_6 \frac{\sqrt{F}d_a}{\sqrt{f_p T}}} \right)^{a_7} \right\} \times \left[\frac{h}{D} \times \left(\frac{t}{D} \right)^{a_9} + \frac{a_{10} + a_{11} \left(\frac{t}{D} \right)}{1 + a_{12} \left(\frac{h}{D} \right)^{a_{13}}} + a_{14} \left(\frac{h}{D} \right)^{a_{15}} \left(1 + a_{16} \frac{t}{D} \right) \right] \quad (4)$$

فعالیت عمده در آمار، ساخت مدل های آماری است که می تواند جنبه های مهم موضوع مطالعه را با درجاتی از واقع بینی منعکس کند. به طور خاص، هدف از تحلیل رگرسیون ساخت مدل های ریاضی است که روابطی را که ممکن است بین متغیرها وجود داشته باشد توصیف یا توضیح دهد [25]. با توجه به عدم تدوین دقیق نظری همبستگی بین نتایج pull-off و مقاومت فشاری SFRSCC، به نظر می رسد که تنها روش قابل تصور این است که بصورت یک ابزار تجربی بر اساس روش های مختلف رگرسیون مورد استفاده قرار گیرد. اگرچه، نتایج ممکن است به طور قابل توجهی تحت تأثیر بسیاری از عوامل مانند تجهیزات و روش آزمایش و همچنین مشخصات بتن قرار گیرد. این پژوهش آثار SFRSCC از جمله عیار سیمان (C)، مقدار الیاف فولادی (F)، حداکثر اندازه سنگدانه (da) و همچنین ویژگی های آزمون pull-off شامل قطر دیسک (D) و ضخامت (t) و همچنین آثار عمق مغزه گیری جزئی (h) بر مقاومت فشاری را در نظر گرفته است. به عبارت دیگر، نمونه ها شامل این پارامترها و همچنین مقاومت pull-off (f_p) و سن بتن (T) به عنوان متغیرهای مستقل و مقاومت فشاری (f_c) به عنوان متغیر پاسخ (وابسته) استفاده می کنند. می توان اظهار داشت که زمانی که تعداد زیادی از متغیرهای مستقل وجود دارد، یافتن بهترین ترکیب از این متغیرها برای پیش بینی متغیر وابسته از اهمیت خاصی برخوردار است. معادلات پیشنهادی با انجام تجزیه و تحلیل رگرسیون خطی و غیر خطی در هر پایگاه داده برای دو نوع جنس دیسک یعنی آلومینیوم و فولادی بدست آمده است. بنابراین، انتظار می رود f_c به طور ملموسی با متغیرهای F, C, d_a , D, t, h, T و f_p با رابطه ای کلی به فرم معادله ۱ مرتبط باشد:

$$\phi(C, F, d_a, D, t, h, T, f_p, f_c) = 0 \quad (1)$$

طبق قضیه آنالیز ابعادی pi باکینگهام، هر پدیده فیزیکی باید از نظر تئوری به معادله ای شامل پارامترهای بدون بعد تقلیل یابد. اگر k تعداد ابعاد اساسی مورد نیاز برای توصیف n متغیر باشد، آنگاه k متغیر اصلی وجود دارد و متغیرهای باقی

که ثابت‌های معادله هستند. از نظر نویسندگان، مطالعه‌ای که تأثیر همه این پارامترها به طور همزمان بر آزمایش pull-off بررسی کرده باشد انجام نشده است.

۴- نتایج و بحث

هدف اصلی در این مطالعه ایجاد یک مدل قابل اعتماد برای پیش بینی مقاومت فشاری SFRSCC از نظر پارامترهای مناسب است. این روش مبتنی بر ترکیبی از ویژگی‌های بتن و پارامترهای عملی آزمون pull-off با نگاهی ویژه به تفسیر بهتر نتایج آزمون درجا است. باید بیان کرد که تجزیه و تحلیل رابطه بین مقاومت pull-off و مقاومت فشاری، پراکندگی زیادی را برای دو نوع مختلف جنس دیسک نشان می‌دهد. بنابراین، دو مدل مشخص در نظر گرفته شده است: آلومینیومی و فولادی. به طور کلی، ضریب تعیین بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده شاخص خوبی برای بررسی عملکرد پیش‌بینی مدل است. هر چه مقدار R^2 بیشتر باشد به این معنی است که بین مقادیر اندازه‌گیری آزمایشی و مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از مدل‌های توسعه یافته همبستگی مناسب‌تری وجود دارد. از آنجایی که با افزایش متغیرهای مستقل، مقدار R^2 بیشتر خواهد شد. بنابراین مقدار R^2 باید تعدیل شود (R^2_{adj}). علاوه بر این در این مطالعه، شاخص‌های (RMSE) Root Mean Square Values، Account For (VAF) و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) نیز برای مقایسه عملکرد قابلیت پیش‌بینی مدل‌ها محاسبه شدند.

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{n-1}{n-p} (1 - R^2) \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y - y')^2} \quad (6)$$

$$VAF = \left[1 - \frac{\text{var}(y - y')}{\text{var}(y)} \right] \times 100 \quad (7)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y - y'}{y} \right| \times 100 \quad (8)$$

که y ، y' ، n ، p به ترتیب مقدار واقعی، پیش‌بینی شده، تعداد پارامترهای مدل و تعداد نمونه‌ها هستند.

۴-۱- مدل خطی

متغیر پاسخ y ممکن است به k متغیرها رگرسیونی مرتبط

باشد. این مدل $y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon$ را مدل رگرسیون

خطی چندگانه با k متغیرها رگرسیونی می‌نامند. این مدل یک

ابر صفحه را در فضای k بعدی متغیرهای رگرسیونی توصیف

می‌کند. روش حداقل مربعات به طور معمول برای تخمین

ضرایب رگرسیون $\beta_i, i=0,1,\dots,k$ ، در یک مدل

رگرسیون خطی چندگانه استفاده می‌شود [13]. برای ساخت

مدل از SPSS (بسته آماری علوم اجتماعی) استفاده شد. از

روش گام به گام استفاده شد که فقط متغیرهای مستقل آماری

معنی‌دار را در مدل نگه می‌دارد. در حقیقت، رگرسیون گام به

گام ابزاری محکم برای انتخاب بهترین مدل‌های زیرمجموعه

است، یعنی بهترین ترکیب متغیرهای مستقل که با محاسبات

قابل ملاحظه‌ای کمتر از آنچه برای همه رگرسیون‌های ممکن

مورد نیاز است، متناسب با متغیر وابسته است. [13، 25] یک

مسئله مهم در استفاده از این روش، سطح معنی داری α

است، تا بتوان از آن در آزمون‌های ارزیابی اهمیت متغیرهای

پیش‌بینی کننده استفاده کرد. مدل رگرسیون خطی چندگانه

برای پیش‌بینی مقاومت فشاری SFRSCC برای دیسک

آلومینیومی بر اساس پارامترهای بدون بعد یعنی

$\frac{h}{D}$ ، $\frac{F}{C}$ and $\frac{t}{D}$ ، $\frac{d_a}{D}$ ، $\frac{\sqrt{F} d_a}{\sqrt{f_p T}}$ ، به صورت زیر است:

$$\frac{f_c}{f_p} = 15.232 - 20.767 \times \frac{F}{C} - 7.133 \times \frac{t}{D} + 0.840 \times \frac{h}{D} + 0.698 \times \frac{d_a}{D} \quad (9)$$

اهمیت ضرایب رگرسیون برای برآورد مقاومت فشاری

در جدول (۳) ذکر شده است که همچنین ضرایب رگرسیون

استاندارد Beta، مقدار t (در سطح اطمینان ۹۵٪) و $\text{Sig}(p)$

را نشان می‌دهد.

مقادیر t و $\text{Sig}(p)$ نشانه تقریبی تأثیر هر متغیر

پیش‌بینی کننده است که در آن یک مقدار t بزرگ و مقدار p

کوچک (> 0.05) نشان می‌دهد که یک متغیر پیش‌بینی تأثیر

زیادی بر مقدار متغیر وابسته دارد. باید در نظر گرفت که اگر

مقدار p بیش از $\alpha = 0.05$ پیدا شود، متغیر مستقل مورد

بررسی از مدل حذف شده و تحلیل رگرسیون با استفاده از

مقادیر ضرایب رگرسیون استاندارد به ترتیب $\frac{F}{C}$ ، $\frac{t}{D}$ و $\frac{h}{D}$ هستند.

جدول ۵. اهمیت ضرایب رگرسیون: دیسک فولادی

Steel disc	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
β_0	14.351	0.106	-	135.178	0.000
$\frac{F}{C}$	-20.482	0.517	-0.756	-39.645	0.000
$\frac{t}{D}$	-4.684	0.209	-0.428	-22.432	0.000
$\frac{h}{D}$	0.251	0.092	0.052	2.712	0.007
Excluded Variables					
$\frac{\sqrt{F}d_a}{\sqrt{f_p T}}$	-	-	-0.005	-0.223	0.823
$\frac{d_a}{D}$	-	-	0.033	1.724	0.085

Table 5. Significance of Regression Coefficients: Steel disc

۵-۲- مدل های غیرخطی

مسئله اصلی یافتن یک تابع غیرخطی مناسب با ضرایب آماری کاملاً تنظیم شده، a_i است. دو مدل جداگانه با توجه به انواع مختلف دیسک ایجاد شد. ضرایب معادلات از طریق این تجزیه و تحلیل با استفاده از الگوریتم Levenberg Marquardt- که در جدول (۶) ارائه شده است، تعیین شده است.

۵-۳- عملکرد مدل های پیشنهادی

پارامترهای تخمین خطا یعنی R_{adj}^2 ، MAPE، RMSE، VAF، بر اساس عملکرد مدل‌ها در جدول (۷) آورده شده است. نتایج این ارزیابی‌های آماری درستی حاصل از روابط پیشنهادی را تأیید می‌کند به طوری که حدود ۸۰٪ از تغییرات در پاسخ می‌توان با مدل‌های برازش شده توضیح داد. علاوه بر این، با اشاره به این جدول، می‌توان تأکید کرد که معادلات غیرخطی پیشنهادی برای پیش بینی مقاومت فشاری SFRSCC دقیق‌ترین نتایج را در مقایسه با معادلات خطی

تمام متغیرهای مستقل باقیمانده انجام می‌شود. به عبارت دیگر، متغیرهای پیش‌بینی کننده با مقدار t کمتر از ۰/۰۵ در سطح اطمینان ۹۵٪ مهم ارزیابی شده و در مدل منظور می‌شوند. با مراجعه به جدول (۴)، متغیر $\frac{\sqrt{F}d_a}{\sqrt{f_p T}}$ از مدل خارج شده و لازم نیست در مدل نهایی در نظر گرفته شود.

جدول ۴. اهمیت ضرایب رگرسیون: دیسک آلومینیومی

Aluminum disc	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
β_0	15.232	0.142	-	107.307	0.000
$\frac{F}{C}$	-20.767	0.523	-0.677	-39.734	0.000
$\frac{t}{D}$	-7.133	0.212	-0.575	-33.683	0.000
$\frac{h}{D}$	0.840	0.094	0.153	8.980	0.000
$\frac{d_a}{D}$	0.698	0.347	0.034	2.014	0.044
Excluded Variable					
$\frac{\sqrt{F}d_a}{\sqrt{f_p T}}$	-	-	-0.041	-1.927	0.054

Table 4. Significance of Regression Coefficients: Aluminum disc

مدل خطی زیر برای پیش‌بینی مقاومت فشاری SFRSCC بر اساس پارامترهای بدون بعد برای نتایج دیسک فولادی ارائه شده

$$\frac{f_c}{f_p} = 14.351 - 20.482 \times \frac{F}{C} - 4.684 \times \frac{t}{D} + 0.251 \times \frac{h}{D} \quad (10)$$

اهمیت ضرایب رگرسیون برای برآورد مقاومت فشاری در جدول (۵) ذکر شده است، که همچنین ضرایب رگرسیون استاندارد، Beta، مقدار t (در سطح اطمینان ۹۵٪) و Sig (p) را نشان می‌دهد. همانطور که در بالا ذکر شد، با اشاره به جدول (۵)، متغیرها $\frac{d_a}{D}$ و $\frac{\sqrt{F}d_a}{\sqrt{f_p T}}$ برای حضور در مدل نهایی رد می‌شوند. همچنین، به طور کلی می‌توان اظهار داشت که اهمیت متغیرها به ترتیب کاهش سطح حساسیت بر اساس

شکل ۵. مقادیر تجربی در مقابل نتایج پیش بینی شده. (الف) دیسک آلومینیومی، (ب) دیسک فولادی

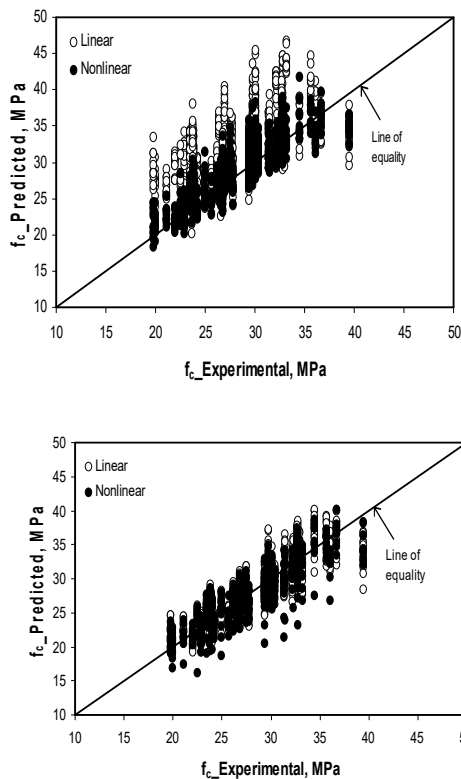


Fig. 5. Experimental values versus predicted results; (a) Aluminum disc, (b) steel disc

۵-۴ - اعتبار مدل های پیشنهادی

اعتبار مدل‌های استخراج شده با نتایج بدست آمده توسط مندوست [۸] و لانگ و موری [۹] تأیید شده است. اشکال ۶ و ۷ نشان می‌دهد که عملکرد مدل‌های معرفی شده ممکن است با درجه دقت مطلوبی قابل پذیرش باشد. لازم به ذکر است که در شکل ۶، رکوردها فقط مربوط به بتن با وزن معمولی با مقاومت مکعب ۲۸ روزه بین ۳۲ تا ۴۳ مگاپاسکال از مرجع [۸] می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، واضح است که تفاوت چشمگیری بین منحنی‌ها و همچنین بین مدل‌ها وجود ندارد. با این حال، به طور کلی می‌توان تشخیص داد که مدل‌های غیرخطی عملکرد کمی بهتر نسبت به مدل‌های خطی دارند به ویژه برای دیسک‌های فولادی که بطور مطلوبی به نتایج

بدست آمده توسط لانگ و موری

روش pull-off برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن خود تراکم...

ایجاد کرده‌اند. باید تأکید کرد که اعتبار مدل برای انواع دیگر بتن و همچنین خارج از محدوده داده‌های آزمایشگاهی در نظر گرفته شده نیاز به تأیید بیشتر دارد و ممکن است با الگوی دیگری دنبال شود.

جدول ۷. ارزیابی آماری مدل‌های رگرسیون خطی

Regression models	R_{adj}^2	RMSE	MAPE	VAF (%)
linear				
Aluminum disc: Eq.9	0.805	2.2304	18.81	46
Steel disc: Eq.10	0.757	0.8853	6.46	75
Nonlinear				
Aluminum disc: Eq.3	0.859	0.9215	6.51	81
Steel disc: Eq.4	0.822	0.8764	6.02	77

Table 7. Statistical evaluations of linear regression models

شکل‌های (a و b) عملکرد بسیار خوب مدل‌های رگرسیون پیشنهادی به ویژه برای دیسک‌های نوع فولادی را نشان می‌دهند. این شکل همچنین قابلیت پیش‌بینی بالاتر مدل‌های غیرخطی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این شکل دیده می‌شود، مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده مقاومت فشاری به خوبی با هم ارتباط دارند که در آن نقاط نماینده مقادیر واقعی و پیش‌بینی به طور کلی نزدیک خط برابری جمع شده‌اند. لازم به ذکر است که مدل‌های خطی روند بیش تخمین برای مقاومت فشاری را نشان می‌دهند. با در نظر گرفتن شکل (۵)، ۸۶ و ۵۲ درصد از داده‌ها به ترتیب توسط مدل‌های خطی مربوط به دیسک‌های آلومینیم یوم و فولاد بیش تخمین برآورد شده است. با این حال، این رفتار برای روابط غیرخطی که تر مشخص است به طوری که مقادیر مربوطه به ترتیب ۵۸ و ۵۰ درصد است

ویژگی‌های SFRSCC و همچنین پارامترهای آزمون pull-off ساخته شده است. چنین ملاحظاتی تاکنون در این زمینه مطرح نشده است. نتایج بدست آمده از مدل‌های رگرسیون، با نتایج تجربی برای هر دو مدل خطی و غیرخطی، درجه قابل قبولی از دقت را نشان داد، که نشان می‌دهد پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن بر اساس نتایج آزمون pull-off، می‌تواند از این طریق با دقت مطلوبی انجام شود. با این حال، نتایج نشان داد که معادلات غیرخطی دقیق‌ترین نتایج را در مقایسه با مدل‌های خطی ارائه می‌دهند. همچنین، اعتبار مدل‌های توسعه یافته در توانایی پیش‌بینی نتایج به دست آمده در کارهای قبلی توسط دیگران تأیید شده است.

۷- مراجع

- [1] K.H. Khayat, G.D. Schutter (Eds.), Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete, State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 228-MPS on Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete: Vol. 14, Springer, 2014.
- [2] R.D. Neves, J.C.O. Fernandes de Almeida, Compressive behaviour of steel fibre reinforced concrete, Structural Concrete 6(1) (2005) 1-8.
- [3] A. Khaloo, E.M. Raisi, P. Hosseini, H. Tahsiri, Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers, Construction and Building Materials 51 (2014) 179-186.
- [4] F. Aslani, Sh. Nejadi, 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 53 (2013) 121-133.
- [5] J.H. Bungey, S.G. Millard, Testing of concrete in structures, third ed., Blackie Academic & Professional: an imprint of Chapman & Hall, 1996.
- [6] Suhang Yang, Zhifeng Xu, Zhengning Bian, Prediction on compressive strength concrete using modified pull-off testing method (MPTM), Construction and Building Materials 250 (2020) 118834.
- [7] J.H. Bungey, R. Madandoust, Factors influencing pull-off tests on concrete,

نزدیک است [9]. در حقیقت، بر اساس تعداد زیاد داده و دامنه متغیرهای مورد استفاده در این مطالعه، می‌توان ادعا کرد که مدل‌های پیشنهادی با توجه به قابلیت نشان داده شده امکان استفاده در موارد مختلف را دارند، چراکه این مدل‌ها تجربه‌ای در مورد یافته‌های بدست آمده توسط دیگران را نداشتند. با این وجود، باید در نظر داشت که انتظار می‌رود روابط متفاوتی برای انواع مختلف بتن مانند مقاومت بالا و سبک وزن، ایجاد شود.

شکل ۶. مقایسه روابط بین قدرت کشش و مقاومت فشاری دیسک آلومینیومی

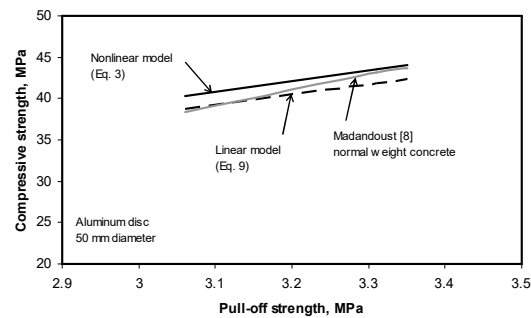


Fig. 6. Comparison of relationships between pull-off strength and compressive strength for aluminum disc.

شکل ۷. مقایسه روابط بین قدرت کشش و مقاومت فشاری دیسک فولادی

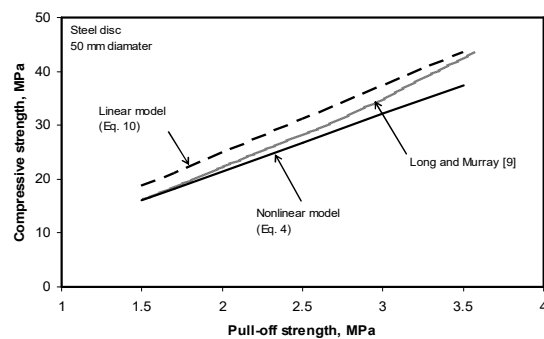


Fig. 7. Comparison of relationships between pull-off strength and compressive strength for steel disc

۶. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، مدل‌های پیش‌بینی بر اساس اشکال بدون بعد از پارامترهای تأثیرگذار بر مقاومت فشاری از جمله

- concrete, *Journal of the Chinese Institute of Engineers* 26 (4) (2003) 523-530.
- [18] M. Sahmaran, A. Yurtseven, I.O. Yaman, Workability of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete, *Building and Environment* 40 (2005) 1672–1677.
- [19] EFNARC, The European guidelines for self-compacting concrete; specification, production and use, 2005.
- [20] ACI Committee 237, Self-consolidating concrete, ACI 237R-07, Farmington Hills: American Concrete Institute, 2007.
- [21] BS 1881: Part 207, Recommendations for the assessment of concrete strength by near-to-surface tests, British Standards Institution: London, 1992.
- [22] ASTM C 1583, 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, 2004.
- [23] ASTM D 4541, Standard test method for pull-off strength of coating using portable adhesion testers, American Society for Testing and Materials, 2002.
- [24] BS EN 12390-3, Testing hardened concrete — Part 3: Compressive strength of test specimens, BSI, 2009.
- [25] ASTM C 192, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, American Standards for Testing and Materials, 2004.
- [26] G.A.F. Seber, A.J. Lee, *Linear Regression Analysis*, Second Edition, John Wiley & Sons Inc., 2003.
- Magazine of Concrete Research* 44 (158) (1992) 21–30.
- [8] R. Madandoust, *Strength Assessment of Lightweight Concrete*, Ph.D. Thesis, University of Liverpool, 1990.
- [9] A.E. Long AE, A.McC. Murray, The pull-off partially destructive test for concrete, Spec. Publ. SP 82-17, American Concrete Institute, Detroit, 1984, pp. 327–350.
- [10] Usama Ebead, Adel Younis, Pull-off characterization of FRCM/Concrete interface, *Composites Part B* 165 (2019) 545–553.
- [11] Jacek Szymanowski, Łukasz Sadowski, The influence of the addition of tetragonal crystalline titanium oxide nanoparticles on the adhesive and functional properties of layered cementitious composites, *Composite Structures* 233 (2020) 111636.
- [12] A Naser, M Fahad, Adhesion test for epoxy reinforcing using waste materials applied on concrete surfaces, *Materials Science and Engineering* 433 (2018) 012004 doi:10.1088/1757-899X/433/1/012004
- [13] R. Giannini, L. Sguerri, F. Paolacci, S. Alessandri, Assessment of concrete strength combining direct and NDT measures via Bayesian inference, *Engineering Structures* 64 (2014) 68–77.
- [14] D.C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons, Inc., eighth ed., Arizona State University, 2013.
- [15] Q.M. Li, X.W. Chen, Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non deformable projectile, *International Journal of Impact Engineering* 28 (2003) 93–116.
- [16] ASTM C 150, Standard specification for Portland cement, American Standards for Testing and Materials, 2004.
- [17] B. Miao, J.Ch. Chern, Ch.A. Yang, Influences of fiber content on properties of self-compacting steel fiber reinforced

Pull-off method for predicting compressive strength of self-compacting concrete reinforced with steel fibers using dimensionless parameters

K. Momeni^{1*}, R. Ghavideh², R. Madandoust³

1- PHD of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Imam sadeq Astaneh ashrafiyeh, Guilan Branch, Technical and Vocational University (TVU), Guilan, Iran

2 -PHD, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University of Lashenesha-Zibakenar Branch, Lashtenesha, Guilan, Iran

3.-Associate professor Faculty of Engineering University of Guilan

* kmomeni@tvu.ac.ir

Abstract

In this study, a statistical analysis of the prediction of compressive strength of self-compacting steel fiber reinforced concrete (SFRSCC) based on pull-off test results using linear and nonlinear regression models is presented. For this purpose, an extensive test program was performed including different amounts of cement and aggregate size along with steel fibers in the amounts of 0, 30, 50 and 80 kg / m³. Aluminum and steel discs with diameters of 50 mm and 70 mm with different thicknesses were used. In addition, the effect of partial core depth on pull-off resistance was investigated. The effects of SFRSCC properties and test parameters are included in the proposed equations as dimensionless variables. The results showed that both linear and nonlinear regression models have high potential as a reliable tool for predicting SFRSCC compressive strength based on pull-off experiments. In the multiple linear regression model for predicting SFRSCC compressive strength for aluminum disc, the most effective parameter is F / C factor and d_a / D factor has the least effect and for steel disc, the most effective parameter is F / C and the lowest effect is related. To the d_a / D factor. However, the most accurate results are obtained from nonlinear equations compared to linear models.

Keywords: self-compacting concrete; Steel fibers; Pull-off test; pushing resistance; Regression models