

## تأثیر شرایط عمل آوری، پرداخت سطحی و سرعت بارگذاری بر مقاومت پیوستگی لایه تعمیری از نوع بتن خود تراکم حاوی الیاف فولادی با بستر بتنی معمولی به روش pull-off

ام البنین آراسته خوش بین \*

دانشجوی دکتری، عمران سازه، دانشکده فنی، پردیس دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

رحمت مدندوست

استاد، هیات علمی گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان.

ملک محمد رنجبر تکلیمی

دانشیار، هیات علمی گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان.

### چکیده

از عوامل بسیار مهم در عملکرد یکپارچه لایه تعمیری و بتن قدیمی، چسبندگی بین این دو می باشد. اندازه گیری دقیق چسبندگی تحت تأثیر عواملی چون مقاومت و شرایط سطحی بتن قدیم، مکانیزم اعمال نیرو و شرایط محیطی مؤثر بر عمل آوری لایه تعمیری می باشد. در این پژوهش در مجموع ۸ طرح اختلاط ساخته شد. جهت بررسی تأثیر تراز مقاومت و کیفیت لایه بستر، دو رده بتن با مقاومت‌هایی در محدوده ۲۰-۳۰ و ۴۰-۵۰ مگاپاسکال و دو نوع سطح پرداخت شده و پرداخت شده با شیار مورد بررسی قرار گرفت. لایه‌های تعمیری بتن‌ها با سه رده مقاومتی بتن خود-تراکم حاوی دو درصد و ۱/۵ درصد حجمی الیاف فولادی ترمیم شد. نمونه‌ها بعد از ساخت در شرایط عمل آوری مختلف هوای آزاد، استاندارد و تسریع شده با آب گرم قرار گرفتند. آزمون‌های مقاومت فشاری، خمشی و کشش غیر مستقیم بروی طرح‌های مورد استفاده بعنوان لایه تعمیری انجام شد و جهت ارزیابی مقاومت پیوستگی بین لایه‌ها، آزمون چسبندگی لایه استفاده شد. نتایج آشکار ساختند که تأثیر مقاومت بتن بستر به مراتب مهم‌تر از اثر مقاومتی لایه تعمیری است و همچنین تأثیر شرایط عمل آوری نسبت به شرایط پرداخت و آماده‌سازی بستر به مراتب شدیدتر بود. مقاومت پیوستگی طرح‌های حاوی ۰/۵ درصد الیاف فولادی در رده های C50، C60 و C70 و با عمل آوری در آب گرم پس از ۲۸ روز به ترتیب ۱۰۵، ۱۰۸ و ۱۰۴ درصد بالاتر از نمونه‌های عمل آوری شده در هوای آزاد بوده‌است.

واژه‌های کلیدی: چسبندگی لایه، بتن خود-تراکم، الیاف فولادی، لایه تعمیری، شرایط عمل آوری.

## ۱- مقدمه

روش های انجام آن را به دنبال داشت [۵]. Carino در گزارش خود اشاره می کند که این آزمایش مستقلاً در همان زمان در اتریش با عنوان Tear-off توسط Stehno و Mall در سال ۱۹۷۷ بررسی شد [۷].

Long در سال ۱۹۸۱ مطالعه گسترده آزمایشگاهی انجام داد و نتیجه گرفت که آزمایش چسبندگی لایه نسبت به آزمایش گسیختگی داخلی نتایج به مراتب قابل اعتمادتری ارائه می کند. Bungey و Soutsos [۸] در سال ۲۰۰۱ آزمایش های مختلف چسبندگی لایه و بیرون کشیدگی<sup>۲</sup> را در آزمایشگاه Cardington که یک آزمایشگاه تحقیقات ساختمانی در انگلستان است ترتیب دادند. بتن با ترکیبات مختلف با مقاومت فشاری در محدوده ۳۷ تا ۸۵ مگاپاسکال بررسی شد.

نتایج نشان داد که هر دو روش می توانند تخمین قابل قبولی از مقاومت بتن در محدوده اطمینان ذکر شده در جدول ۲ ارائه کنند. مطالعه Bungey و Madandoust [۵] بر روی بتن های سبک این نتیجه را تأیید و تأکید می نماید. Ramos و همکاران [۹] پس از یک مطالعه گسترده آماری بر روی ۵۵ نمونه مطالعاتی، آزمایش چسبندگی لایه را به طور قابل قبولی در ارزیابی چسبندگی اندودکاری و سرامیک نمای ساختمان به کار بردند.

به طور کلی این موضوع پذیرفته شده است که انجام آزمایش با سرعت های بارگذاری بیشتر منجر به بارهای گسیختگی بزرگتری می شود [۱۰ و ۱۱]. در این خصوص می توان به دو تحقیق انجام شده اشاره داشت. Bonaldo و همکاران [۱۰] در مطالعه خود سه نرخ بارگذاری ۰/۰۲ و ۰/۰۵ و ۰/۱۵ N/mm<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup> را مورد بررسی قرار دادند. مطالعه آنها شامل بررسی مقاومت چسبندگی لایه تعمیری SFRC به بتن زیرلایه بود. مقایسه نتایج حاصل از سه سرعت بارگذاری به دلیل اختلاف آنها چندان آسان نبود. نتایج همچنین نشان داد که مقاومت چسبندگی لایه با افزایش سرعت بارگذاری تمایل به افزایش دارند که این موضوع دشواری مقایسه نتایج دستگاه های مختلف را تأیید می نماید.

گزارشی توسط Vaysburd و McDonald [۱۲] به عنوان گزارش فنی در سال ۱۹۹۹ منتشر گردید. این گزارش شامل ۲۵۷ آزمایش چسبندگی لایه در سه منطقه Illinois، Arizona و

آزمایش های متفاوتی برای اندازه گیری مقاومت پیوستگی بین لایه تعمیری بتنی و بتن بستر معرفی شده اند. نشان داده شده است که اندازه مقاومت پیوستگی دو لایه به مقدار قابل توجهی بستگی به نوع آزمایش برای تعیین آن دارد. با توجه به روش مورد استفاده، مقاومت پیوستگی تعیین شده ممکن است بسیار متفاوت با مقدار واقعی آن باشد [۱].

به طور کلی، پارامترهایی مانند چسبندگی سطح بستر، اصطکاک، درگیر بودن سنگدانه ها و مشخصات متغیر در طول زمان بر مقاومت پیوستگی مؤثر هستند. هر کدام از این متغیرها خود می توانند وابسته به عوامل دیگری باشند. چسبندگی سطوح وابسته به عامل چسباننده، تراکم مصالح، تمیزی سطح، رطوبت لایه تعمیری، سن نمونه و زبری سطح می باشد. اصطکاک و درگیر بودن سنگدانه ها نیز عاملی از پارامترهایی همچون اندازه سنگدانه ها، شکل سنگدانه ها و آماده سازی می باشد.

روش های تعیین مقاومت پیوستگی بین لایه تعمیری و لایه بستر را می توان به چند دسته مجزا تقسیم نمود. دسته اول که همانند آزمون چسبندگی لایه<sup>۱</sup>، مقاومت پیوستگی را تحت تنش کششی تعیین می کنند. دسته دوم که مقاومت پیوستگی را تحت تنش برشی می - سنجند، مانند روش های پیچش و انتقال اصطکاک و دسته سوم که ترکیبی از تنش های فشاری و برشی را بر مقاومت پیوستگی سطحی ارزیابی می کنند، همانند روش برش شیبدار (Slant shear) [۲-۴]. اولین پیشرفت ها در زمینه آزمون چسبندگی لایه در ارزیابی مقاومت بتن در دانشگاه Queens-Belfast در دهه ۱۹۷۰ شکل گرفت که منجر به ساخت اولین دستگاه تجاری با عنوان Limpet گردید [۵]. در همان دوران مشکلات به وجود آمده برای بتن های ساخته شده با سیمان پرآلومین موجب نگرانی شده بود و نیاز استفاده از آزمایش در محل برای تخمین مقاومت فشاری بتن به شدت احساس می شد [۶].

آزمون چسبندگی لایه به عنوان نسل جدیدی از آزمایش های نیمه مخرب در سال ۱۹۷۴ توسط Long بررسی شد. دستگاه های دیگری نیز در سایر کشورها مثل دانمارک، آمریکا و انگلستان ساخته شد که در نتیجه گستره وسیعی از اشکال آزمایش و

<sup>۲</sup> Pull-Out

<sup>۱</sup> Pull-Off

نوع بتن از ۷۹ تا ۸۴ درصد از ظرفیت باربری اولیه احیاء گردید. همچنین Ghavidel و همکاران [۲۱] در مطالعه خود به بررسی قابلیت اعتماد آزمون چسبندگی لایه برای کاربرد بتن خود-تراکم مسلح به الیاف فولادی پرداخته و تأثیر مثبت افزایش درصد الیاف را بر مقاومت کششی لایه تعمیری، تأیید نمودند. شرایط عمل‌آوری نیز بر کیفیت پیوند دو لایه بتن، پیش از این مورد ارزیابی قرار گرفته- است که می‌توان به پژوهش Zanotti و همکاران [۲۲] در این زمینه اشاره نمود. آنها بهبود کیفیت پیوند را در اثر عمل‌آوری در شرایط تسریع شده به‌ویژه در سنین اولیه گزارش نمودند.

در این پژوهش، جهت بررسی تأثیر تراز مقاومت و کیفیت لایه بستر، دو رده مقاومتی بتن بستر مد نظر قرار گرفت. لایه‌های تعمیری با سه رده مقاومتی بتن خود-تراکم حاوی دو درصد ۰٫۵ و ۱ درصد حجمی الیاف فولادی در نظر گرفته شد. نمونه‌ها بعد از ساخت در شرایط عمل‌آوری مختلف هوای آزاد، استاندارد و تسریع شده با آب گرم قرار گرفتند. آزمون‌های مقاومت فشاری، خمشی و کشش غیرمستقیم بر روی طرح‌های مورد استفاده به‌عنوان لایه تعمیری انجام شد و جهت ارزیابی مقاومت پیوستگی بین لایه‌ها، آزمون چسبندگی لایه استفاده شد تا تأثیر این عوامل بر پیوستگی دو لایه بررسی شود.

## ۲- مصالح و برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح

در این تحقیق از سیمان تیپ ۲ هگمتان برای ساخت نمونه‌های بتنی استفاده شد. فوق‌روان‌کننده مورد استفاده با نام تجاری FARCO PLAST P10-3R محصول شرکت شیمی ساختمان و بر پایه پلی‌کربوکسیلات‌های اصلاح شده مطابق با استاندارد ASTM C494 [۲۳] می‌باشد. افزودنی مایع جهت کنترل گرانیروی بتن بر پایه پلیمرهای آلی قابل حل در آب می‌باشد. در این پژوهش از الیاف فولادی قلابدار (شکل ۱) و کم-کربن به طول ۳۵ و قطر ۰٫۸ میلی‌متر (نسبت ابعاد ۴۳/۷۵) و با چگالی ۷/۸۵ گرم بر سانتیمتر مکعب و مقاومت کششی ۸۰۰-۱۲۰۰ مگاپاسکال استفاده شد.

### ۲-۲- شرایط عمل‌آوری

در این مطالعه جهت ارزیابی تأثیر شرایط عمل‌آوری بر مقاومت پیوستگی لایه‌های تعمیری با بسترهای بتن معمولی، شرایط عمل‌آوری

Florida با استفاده از سه دستگاه تجاری آزمایش چسبندگی لایه شامل German Instrument Bond-Test Kit (GI) و Proceq DYNA Z15 و Hilti Test Mater4 بود. یافته‌ها نشان داد که نتایج دستگاه GI و Proceq کاملاً با هم قابل مقایسه- اند. چراکه متوسط مقاومت چسبندگی لایه اندازه‌گیری شده با دستگاه GI، ۱/۰۲ نتایج دستگاه Proceq بود. همچنین متوسط ضریب تغییرات به‌دست آمده برای GI و Proceq به ترتیب ۱۴٪ و ۱۲٪ به‌دست آمد. اما نتایج حاصل از دستگاه Hilti اختلاف زیادی با این دو دستگاه داشت. علت عمده این اختلاف، عدم کنترل دقیق سرعت بارگذاری بود. مقاومت کششی تأثیر مستقیمی بر روی مقاومت پیوستگی دارد. زیرا روی توسعه ترک‌ها تأثیر می‌گذارد و مرز دو لایه را تغییر می‌دهد. Delatte و همکاران [۱۳] گزارش دادند که افزایش مقاومت در سنین اولیه بتن منجر به افزایش قابل توجه مقاومت کششی و در نتیجه آن مقاومت پیوستگی برشی لایه تعمیری خواهد شد. همچنین نفوذپذیری لایه تعمیری نیز روی دوام پیوستگی تأثیرگذار است. برای مثال زمانی که رطوبت نمی‌تواند از بتن بستر به داخل لایه تعمیری نفوذ کرده و خارج شود، باعث ایجاد تنش در سطح مشترک می‌گردد [۱۴]. تحقیقات Banthia و همکاران [۱۵] نشان داده‌است که لایه‌های تعمیری با عمق کمتر نسبت به لایه‌های تعمیری با ضخامت بیشتر راحت‌تر جدا می‌شوند. در نتایج متفاوت، Laurence و همکاران [۱۶] گزارش کردند که ضخامت لایه تعمیری تأثیری در مقاومت پیوستگی ندارد.

یکی از عوامل بسیار تأثیرگذار بر پیوستگی لایه تعمیری بتنی به بتن بستر، زبری سطح بتن بستر است. نتایج تحقیقات متعدد نشان داده- است که سنبلاست و استفاده از واتر جت بهترین روش‌های آماده- سازی سطح بستر برای بهبود چسبندگی دو لایه می‌باشند. با این حال نتایج متفاوتی نیز گزارش شده‌است. Talbot و همکاران [۱۷] گزارش کردند که نتایج ضعیفی در اثر سنبلاست بستر مشاهده نموده‌اند. ولی در تحقیقی دیگر [۱۸] بالاترین مقاومت چسبندگی را با این روش به‌دست آورده‌است. همچنین در تحقیق Julio و همکاران [۱۹]، آماده‌سازی سطح با استفاده از روش سنبلاست، بهینه‌ترین روش معرفی شده‌است.

کاربرد بتن مسلح به الیاف فولادی در لایه تعمیری را در تحقیقات متعددی می‌توان مشاهده نمود که از آن جمله، پژوهش Haddad و همکاران [۲۰] می‌باشد که با تعمیر بتن آسیب‌دیده توسط این

تراکم الیافی لایه‌های تعمیر می‌باشد. در خصوص بررسی تأثیر تراز مقاومت و ضخامت بستر، به کارگیری دو نوع بتن بستر با مقاومت‌هایی در محدوده ۲۰-۳۰ و ۴۰-۵۰ مگاپاسکال مورد نظر بوده است. تمرکز این مطالعه روی پارامترهای مربوط به آزمایش چسبندگی لایه و در نظر گرفتن متغیرهای مربوط به آزمایش به صورت چندپارامتری می‌باشد. برای ساخت نمونه‌های بتنی ابتدا مواد سیمانی و ماسه و سنگ‌دانه‌های درشت و الیاف به مخلوط اضافه شده و به خوبی با مواد سیمانی ترکیب شدند. مخلوط آب و فوق‌روان‌کننده به آرامی به ترکیب اضافه شده و مخلوط کردن با سرعت بیشتری تا تشکیل خمیر سیمانی ادامه پیدا کرد. بعد از گذشت ۴۸ ساعت تمامی نمونه‌ها از قالب بیرون آورده شدند و در حوضچه‌های عمل‌آوری تحت شرایط مختلف تا سن آزمایش عمل‌آوری شدند.

استاندارد بر اساس ASTM C192 [۲۴]، هوای آزاد [۲۵] و تسریع‌شده (آب گرم با دمای ۳۵ درجه) [۲۶] دنبال شد.



شکل ۱- الیاف فولادی قلابدار مورد استفاده در لایه تعمیر

### ۳-۲- طرح اختلاط و نحوه ساخت

در این پژوهش در مجموع ۸ طرح اختلاط ساخته شد. جدول ۱ طرح‌های اختلاط ساخته شده برای این تحقیق را نشان می‌دهد. دو طرح اول مربوط به بتن بستر و ۶ طرح بعدی مربوط به بتن‌های خود-

جدول ۱- طرح اختلاط

طرح	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	آب (kg/m <sup>3</sup> )	دوده سیلیس (kg/m <sup>3</sup> )	W/C	شن (kg/m <sup>3</sup> )	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	الیاف فولادی (kg/m <sup>3</sup> )	فوق روان کننده (kg/m <sup>3</sup> )	کنترل کننده لزجت (kg/m <sup>3</sup> )
C25	300	150	-	0.50	980	870	-	-	-
C50	495	152	55	0.28	950	695	-	3.85	-
SF05C50	495	150	55	0.27	950	700	39.25	4.4	2.75
SF05C60	540	148	60	0.25	950	680	39.25	4.8	3
SF05C70	585	146	65	0.22	925	670	39.25	5.2	3.25
SF10C50	495	150	55	0.27	950	700	78.5	4.95	3.3
SF10C60	540	148	60	0.25	950	680	78.5	5.4	3.6
SF10C70	585	146	65	0.22	925	670	78.5	5.85	3.9



شکل ۲- نمونه‌ها قبل و بعد از آزمایش چسبندگی لایه

استاندارد BS-206 [۲۷] انجام گرفت. بعد از خروج نمونه‌های از حوضچه‌های آب آهک، سطح نمونه‌ها با پارچه خشک گردید و نمونه، آماده آزمایش شد. بعد از قرارگیری دقیق نمونه داخل

### ۴-۲- برنامه آزمایش

#### ۴-۲-۱- مقاومت فشاری

این آزمایش بر روی مکعب‌های با بعد ۱۵۰ میلی‌متر و بر اساس

مطابق استاندارد ASTM C1583 [۳۰] انجام می‌شود، تنش کششی بیشترین مقدار را نسبت به تنش برشی دارد. جک مخصوص انجام آزمون چسبندگی لایه به گونه‌ای است که یک Actuator توسط دیسک به سطح بتن متصل می‌گردد و با کمک آن بار کششی را بر روی سطح بتن اعمال می‌کند. همچنین این جک دارای یک دیتالاگر است و می‌تواند مقدار حداکثر نیروی کششی را در خود ذخیره نماید. شکل ۳ نمایی از این دستگاه را نشان می‌دهد. چسب مورد استفاده برای این آزمایش از نوع اپوکسی دو-جزئی انتخاب گردید. دو سرعت بارگذاری مختلف L به میزان 0.15 MPa/s و H به میزان 0.3 MPa/s جهت آزمایش نمونه‌ها در محدوده استاندارد، انتخاب گردید.



شکل ۳- دستگاه سنجش چسبندگی لایه

### ۳- تحلیل نتایج

#### ۳-۱- مشخصات مکانیکی طرح‌ها

شکل ۴ مقاومت فشاری بتن‌های بستر یا زیر لایه و همچنین بتن‌های لایه تعمیری را در سن ۲۸ روز نشان می‌دهند. نتایج به دست آمده بیانگر اثر مثبت جزئی الیاف مقاومت فشاری بوده و همچنین رده‌های مقاومتی به خوبی بر اساس طرح‌های اختلاط در نظر گرفته شده به دست آمده‌اند. اختلاف نسبتاً کمی که رده‌های مقاومتی در نظر گرفته شده با نتایج تحقیقات Bonaldo [۱۰] دارند می‌تواند منجر به پایه‌گذاری مقایسه‌ای علمی مابین نتایج حاضر در این پروژه و نتایج تحقیقات او گردد. رده C50 دارای اختلافی در حدود ۲۰٪ با رده بالای مقاومت فشاری بستر در پروژه Bonaldo می‌باشد. این افزایش اختلاف نیز به دلیل ایجاد فاصله بیشتر و امکان تفکیک بهتر نتایج، ایجاد شده‌است. مقاومت فشاری طرح‌های حاوی ۱۰٪ الیاف فولادی در رده‌های C50، C60 و C70 بترتیب

دستگاه جک بتن-شکن، نرخ بار اعمالی روی ۸۰۰ نیوتن بر ثانیه تنظیم شد و پس از شکست نمونه با تقسیم حداکثر نیروی وارده بر سطح نمونه مقاومت فشاری به دست آمد.

#### ۲-۴-۲- مقاومت کششی دونیم‌شدن

جهت تعیین مقاومت کششی دونیم‌شدن بتن، این آزمایش که به آزمایش برزیلی یا شکافت نیز معروف می‌باشد براساس استاندارد ASTM C496 [۲۸] بکار برده می‌شود. بدین منظور از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر استفاده گردید. بر سطح جانبی آن اعمال گردد. بار اعمالی از سوی جک به تدریج افزایش یافته تا آنجا که منجر به دو نیم شدن نمونه گردد. سپس بار نهایی گسیختگی توسط دستگاه قرائت و ثبت شده است. نحوه محاسبه مقاومت کششی براساس رابطه‌ی (۱) می‌باشد.

$$T = \frac{2 \times P}{\pi \times L \times D} \quad (1)$$

که در آن T مقاومت کششی (N/mm<sup>2</sup>)؛ P بار اعمال شده (N)؛ L طول نمونه (mm) و D قطر نمونه (mm) می‌باشد.

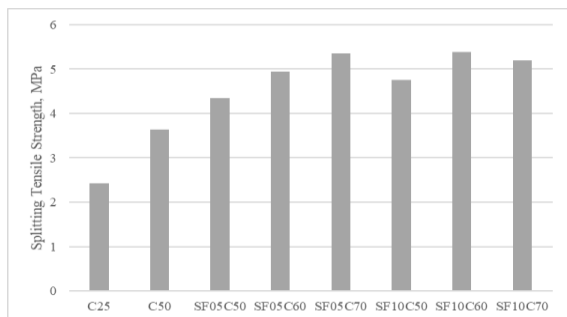
#### ۲-۴-۳- مقاومت خمشی

این روش آزمایش، عملکرد خمشی بتن مسلح با الیاف فولادی را با استفاده از پارامترهای مستخرج از منحنی بار- تغییر مکان که با آزمایش یک تیر با تکیه‌گاه‌های ساده تحت بارگذاری چهار نقطه- ای بر طبق استاندارد ASTM C1609 [۲۹] (شکل ۳-۶) و به کمک یک سیستم کنترلی خود-تنظیم جهت ثبت پارامترها، ارزیابی می‌کند.

#### ۲-۴-۴- آزمایش چسبندگی لایه

برای بررسی چسبندگی لایه‌های بتن از آزمون چسبندگی لایه استفاده شد. این آزمایش که میزان بزرگ‌ترین نیروی عمودی قابل تحمل توسط بتن به واسطه دیسک چسبانده شده به سطح آن را نشان می‌دهد در صورت اعمال بر لایه تعمیری، نتایج آن می‌تواند جهت تخمین مقاومت پیوستگی مورد ارزیابی قرار گیرد. سطحی که در آن گسیختگی اتفاق می‌افتد، نمایان‌گر ضعیف‌ترین مقطع در عمق ناحیه اعمال شده (در صورت مغزه‌گیری) تا دیسک فولادی متصل شده با چسب اپوکسی است. در این آزمون که

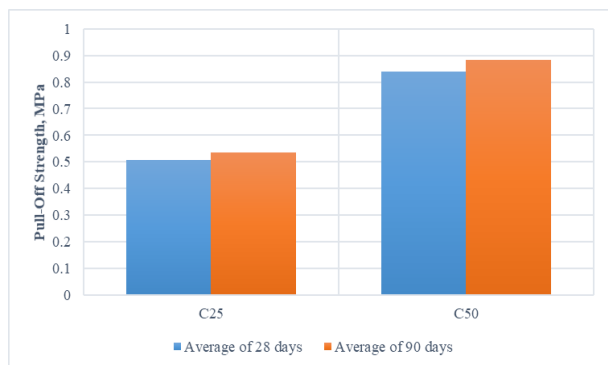
بوده و اثر رده‌های مقاومتی را کمرنگ نموده است. نتایج مقاومت کششی طرح‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- نتایج مقاومت کششی دونیم شدن طرح‌های مختلف در سن ۲۸ روز

### ۲-۳- نتایج آزمون چسبندگی لایه

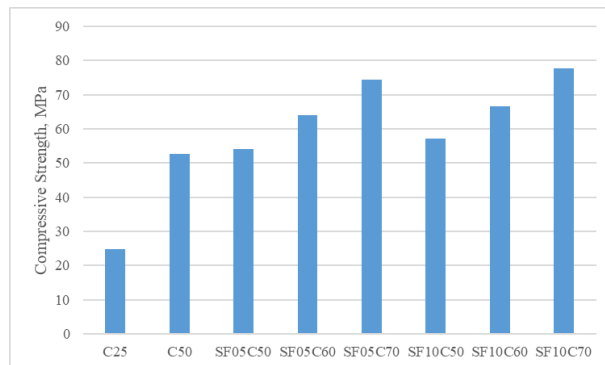
نتایج میانگین مقاومت پیوستگی نمونه‌های مختلف در سنین ۲۸ و ۹۰ روز در دو رده مقاومت بستر C25 و C50 در شکل ۷ نشان داده شده است. با میانگین گیری کلان، از داده‌های آزمون مقاومت پیوستگی، می‌توان در نگاه اول اثر قابل توجه رده‌های مقاومتی بتن بستر را تشخیص داد. اختلاف نتایج ۲۸ و ۹۰ روزه با افزایش رده مقاومت بتن، بیشتر می‌شود که این تغییر را می‌توان منتج از تأثیر مقاومت بستر دانست.



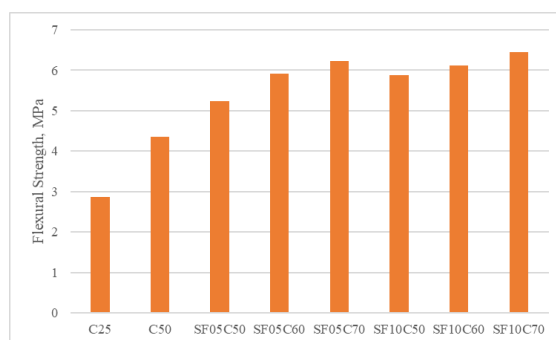
شکل ۷- نتایج میانگین مقاومت پیوستگی نمونه‌های مختلف در سنین ۲۸ و ۹۰ روز در دو رده مقاومت بستر C25 و C50

شکل ۸ نتایج میانگین مقاومت پیوستگی نمونه‌های مختلف در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بر اساس انواع بتن‌های لایه تعمیری نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن رده تعمیری، اختلاف نتایج ۲۸ و ۹۰ روزه تشدید می‌گردد. همچنین افزایش رده مقاومت منجر به بهبود مقاومت پیوستگی شده است که در مورد افزایش درصد الیاف، اثرات خفیف‌تری دیده می‌شود. به نظر می‌رسد در سن ۲۸ روز،

۴/۵٪، ۴٪ و ۴/۷٪ بالاتر از نمونه‌های حاوی ۵٪ الیاف بوده است. همچنین در الیاف ۰/۵ و ۱٪، افزایش رده بتن از C50 به C60 و C70 بترتیب باعث ۱۸/۳، ۳۷/۵۹، ۱۶/۴۶ و ۳۶/۲۵ درصد افزایش مقاومت فشاری شده است.



شکل ۴- نتایج مقاومت فشاری طرح‌های مختلف در سن ۲۸ روز نتایج مقاومت خمشی طرح‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج مقاومت خمشی، تأثیر الیاف را به خوبی در افزایش مقدار مقاومت نشان می‌دهد. همچنین اختلاف شدیدی بین نتایج رده C25 با بقیه بتن‌ها وجود دارد. این اختلاف، محور اصلی تمایز نتایج در آزمایش چسبندگی لایه خواهد بود. مقاومت خمشی طرح‌های حاوی ۱٪ الیاف فولادی در رده‌های C50، C60 و C70 به ترتیب ۱۲/۲۴، ۳/۵۵ و ۳/۳۷ درصد بالاتر از نمونه‌های حاوی ۰/۵٪ الیاف بوده است. همچنین در ۰/۵ و ۱٪ الیاف فولادی، افزایش رده بتن از C50 به C60 و C70 به ترتیب باعث ۱۳، ۱۹/۱۲ و ۴/۲۶ و ۹/۷۱ درصد افزایش مقاومت خمشی شده است.

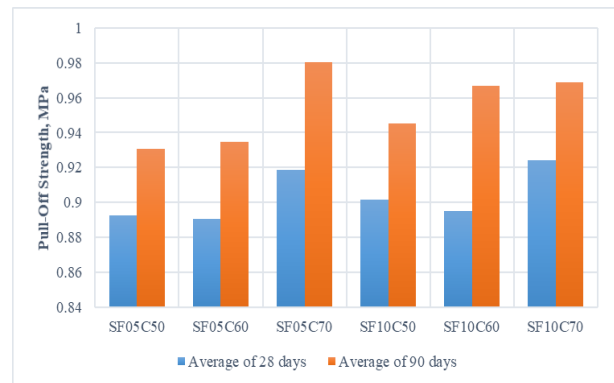


شکل ۵- نتایج مقاومت خمشی طرح‌های مختلف در سن ۲۸ روز در نتایج مقاومت کششی دونیم شدن، یک نقطه بهینه در رده ۶۰ بتن الیافی خود-تراکم دیده می‌شود و برای درصد یک الیاف، مقدار الیاف زیاد منجر به تشکیل نقطه بهینه در درصد پایین‌تر می‌گردد. به نظر می‌رسد درصد بالای الیاف بر رفتار کششی بتن غالب

نتایج رده‌های ۵۰ و ۶۰ بتن الیافی خود-تراکم کمی گمراه‌کننده باشند اما در سن ۹۰ روز، اختلاف به خوبی آشکار می‌گردد. در سن ۹۰ روز در حضور ۰/۵٪ الیاف فولادی، با افزایش رده بتن لایه تعمیری از C50 به C60 و C70، مقاومت پیوستگی بترتیب ۰/۴۶ و ۵/۳۳ درصد افزایش یافته‌است.

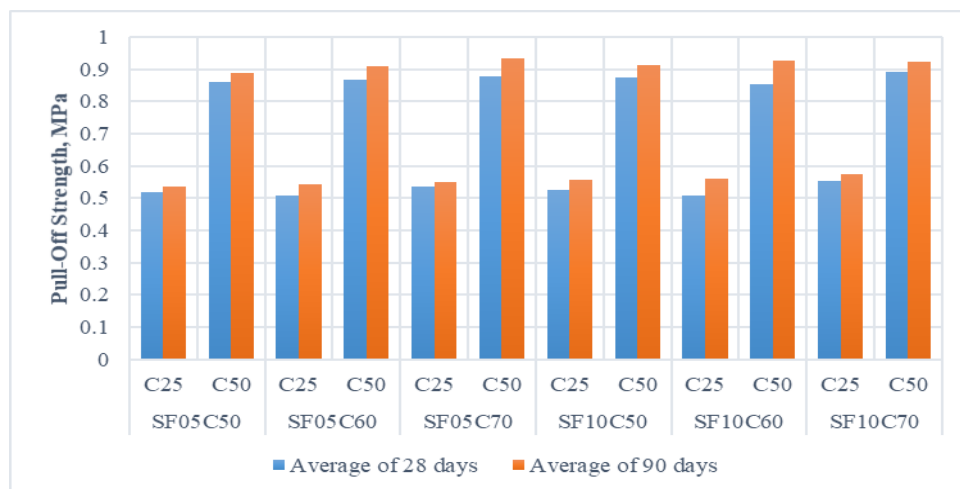
سنین ۲۸ و ۹۰ روز بر اساس نوع بتن بستر و لایه تعمیری نشان می‌دهد. در نمونه‌های با بستر بتنی از رده C50، نتایج مقاومت پیوستگی به شکل قابل توجهی بزرگتر از نمونه‌های بر روی بستر بتنی با رده C25 بوده‌است. مقاومت پیوستگی در حضور ۰/۵٪ الیاف فولادی و در سن ۲۸ روز در نمونه‌های با بستر رده C50 و با لایه تعمیری در رده‌های C50، C60 و C70 بترتیب ۶۶/۰۷، ۷۰/۸۹ و ۶۳/۹۲ درصد بالاتر از نمونه‌های مشابه با بستر رده C25 بوده‌است. این افزایش قابل توجه مقاومت پیوستگی، با افزایش سن نمونه‌ها تا ۹۰ روز نیز برقرار است. در هر دو نوع بستر، افزایش الیاف، تاثیر قابل توجهی بر مقاومت پیوستگی در سن ۲۸ روز نداشته‌است، ولی در سن ۹۰ روز شاهد افزایش جزئی در اثر افزایش الیاف تا ۱٪ بوده‌ایم. شکل ۱۰ نتایج میانگین مقاومت پیوستگی نمونه‌های مختلف در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بر اساس انواع بتن‌های لایه تعمیری و شرایط عمل‌آوری نشان می‌دهد. همانطور که در نمودار مشهود است، عمل‌آوری در آب گرم نسبت به دو حالت دیگر عمل‌آوری، نتایج بهتری را حاصل نموده‌است.

نتایج میانگین مقاومت پیوستگی نمونه‌های مختلف در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بر اساس انواع بتن‌های لایه تعمیری



شکل ۸- نتایج میانگین مقاومت پیوستگی نمونه‌های مختلف در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بر اساس انواع بتن‌های لایه تعمیری

شکل ۹ نتایج میانگین مقاومت پیوستگی نمونه‌های مختلف در

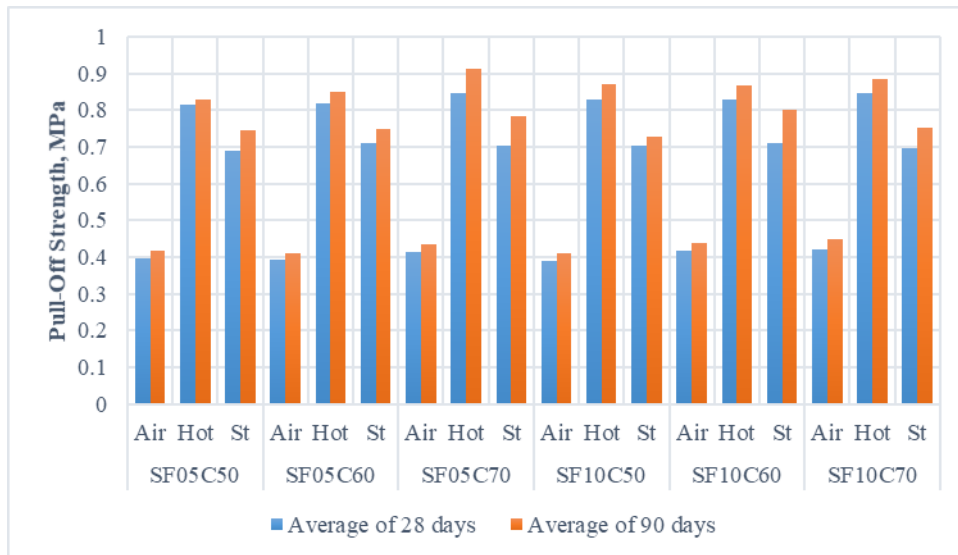


شکل ۹- نتایج میانگین مقاومت پیوستگی نمونه‌های مختلف در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بر اساس نوع بتن بستر و لایه تعمیری

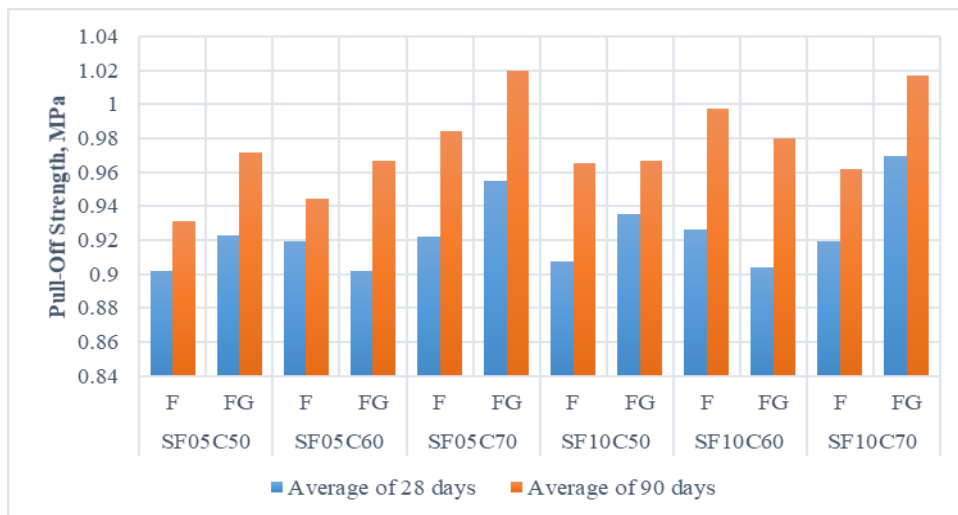
دارای شیارهای خطی برای بتن بستر ایجاد چسبندگی بیشتر به لایه تعمیر بتنی می‌کنند. نتایج مقاومت پیوستگی در ۲۸ روز تفاوت چندانی نشان ندادند اما در ۹۰ روز مقاومت پیوستگی طرح‌های حاوی ۰/۵ درصد الیاف فولادی در رده‌های C50، C60 و C70 و با پرداخت سطحی همراه با شیار بترتیب ۴/۳۲، ۲/۳۲ و ۳/۶۵ درصد بالاتر از نمونه‌های با پرداخت سطحی بدون شیار بوده‌است. این تغییرات در نمونه‌های حاوی ۱٪ الیاف بسیار ناچیز بوده‌است.

در شکل ۱۱ نتایج میانگین مقاومت پیوستگی نمونه‌های مختلف در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بر اساس انواع بتن‌های لایه تعمیری و شرایط پرداخت سطح بستر نشان داده شده‌است که اختلاف بسیار کمی را بین دو حالت پرداخت و پرداخت و شیار نشان می‌دهد. انتظار می‌رفت که افزایش مقاومت تشدید شود اما بر اساس تحقیقات پیشین نیز، روش مضرس کردن به شکل موثری گزارش شده و گلوگاه اصلی بر روی مقاومت بستر قرار می‌گیرد. Tayeh و همکاران [۳۵] گزارش کرده بودند که سطوح سندبلاست شده و





شکل ۱۰- نتایج میانگین مقاومت پیوستگی نمونه‌های مختلف در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بر اساس انواع بتن‌های لایه تعمیری و شرایط عمل‌آوری



شکل ۱۱- نتایج میانگین مقاومت پیوستگی نمونه‌های مختلف در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بر اساس انواع بتن‌های لایه تعمیری و شرایط پرداخت سطح بستر

شکل ۱۲ نتایج میانگین مقاومت پیوستگی نمونه‌های مختلف در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بر اساس انواع بتن‌های لایه تعمیری و سرعت-های بارگذاری را نشان می‌دهد. در ۲۸ روز مقاومت پیوستگی طرح‌های حاوی ۵/۰ درصد الیاف فولادی در رده‌های C50، C60 و C70 و با سرعت بارگذاری پایین به ترتیب ۱۵/۰۶، ۱۹/۴۳ و ۱۶/۴۱ درصد پایین‌تر از نمونه‌های تحت بارگذاری با سرعت بالا بوده است. این تغییرات در نمونه‌های حاوی ۱٪ الیاف به ترتیب ۲۰/۷۷، ۱۹/۵ و ۱۷/۳۶ درصد کاهش را نشان داده است که بیانگر کاهش مقاومت پیوستگی شدیدتر در درصد بالاتر الیاف می‌باشد. همان‌گونه که در نمودار شکل ۱۲ مشهود است، افزایش سرعت بارگذاری به شکلی محسوس منجر به افزایش مقاومت پیوستگی می‌گردد که تعیین نمودن معیار یا محدوده‌ای برای

سرعت، می‌تواند تعیین‌کننده ظرفیت لایه‌ها در پیوستگی با توجه به نرخ بارگذاری باشد. هرچند مستقل از نرخ بارگذاری، افزایش سن، منجر به افزایش مقاومت پیوستگی شده است.

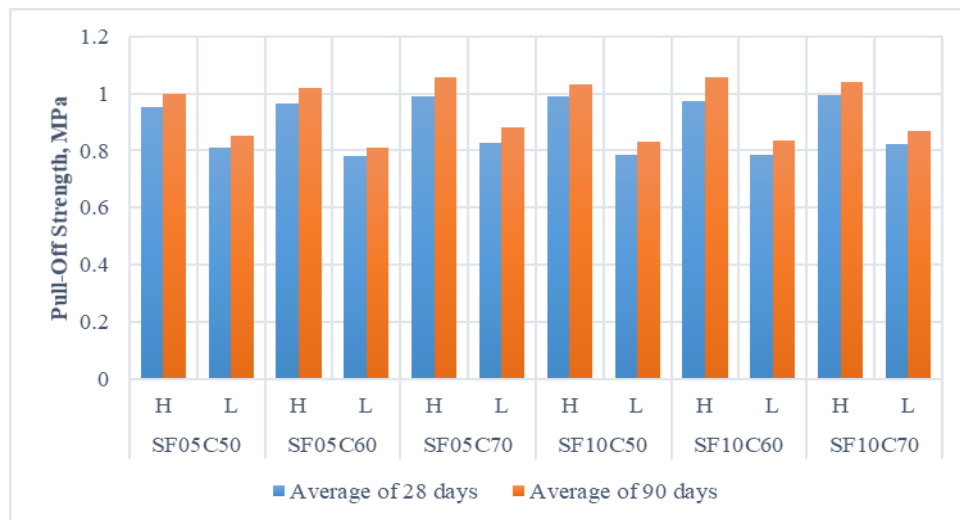
### ۳-۳- همبستگی نتایج

با بررسی همبستگی نتایج مقاومت پیوستگی برای دو سرعت بارگذاری مختلف (شکل ۱۳)، می‌توان مشاهده نمود که در سن ۲۸ روز، نتایج سرعت بارگذاری H، ۱،۴۹ برابر سرعت بارگذاری L و در سن ۹۰ روز این ضریب به ۱،۶۲ افزایش یافت که نشان‌دهنده تأثیر سن بتن بر افزایش اختلاف نتایج در اثر افزایش سرعت بارگذاری می‌باشد. دقت نتایج به دست آمده نیز حداقل ۹۷٪ بر اساس همبستگی خطی به دست آمده که نشان‌دهنده قابلیت اعتماد



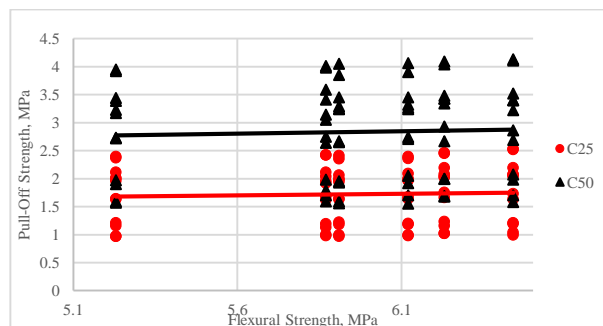
تأثیر شرایط عمل‌آوری، پرداخت سطحی و ...

نتایج تجربی در این آزمایش می‌باشد. همچنین رده‌های مقاومت ۲۵ و ۵۰ بستر محدوده مشخصی از فاصله بین نتایج چسبندگی لایه را ۱۴ به نمایش گذاشته‌اند. با خطای بسیار کم در مقایسه با آزمون کشش دونیم‌شدن در شکل



شکل ۱۲- نتایج میانگین مقاومت پیوستگی نمونه‌های مختلف در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بر اساس انواع بتن‌های لایه تعمیریه و سرعت‌های بارگذاری

می‌شود که نشان‌دهنده تأثیر بیشتر مقاومت بستر بالاتر بر نتایج مقاومت چسبندگی لایه می‌باشد.



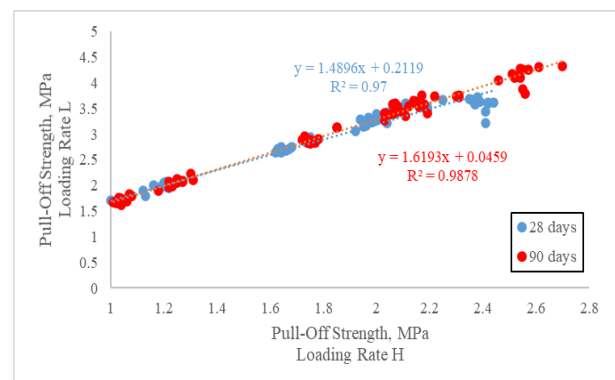
شکل ۱۵- اختلاف همبستگی نتایج دو رده مقاومت بتن بستر بین

نتایج مقاومت خمشی لایه تعمیریه و مقاومت پیوستگی

#### ۴- نتیجه‌گیری

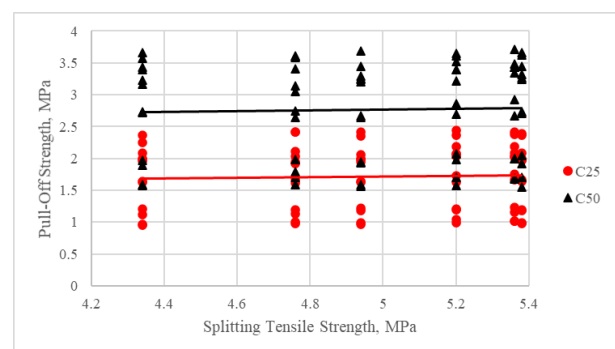
در این پژوهش جهت بررسی عوامل مؤثر بر مقاومت پیوستگی لایه تعمیریه از نوع بتن خود-تراکم الیافی، لایه بستر از دو رده مقاومتی و دو نوع سطح پرداخت شده و پرداخت شده با شیار مورد نظر قرار گرفتند. همچنین لایه‌های تعمیریه با سه رده مقاومتی بتن خود-تراکم و حاوی ۰/۵ و ۱ درصد حجمی الیاف فولادی در نظر گرفته شد. نمونه‌ها بعد از ساخت در شرایط مختلف عمل‌آوری قرار گرفتند. نتایج شاخص این تحقیق شامل موارد زیر می‌باشد:

- در نمونه‌های با بستر بتنی از رده C50، نتایج مقاومت پیوستگی به شکل بسیار قابل توجهی بزرگتر از نمونه‌های بر روی بستر بتنی با



شکل ۱۳- همبستگی نتایج میانگین مقاومت پیوستگی نمونه‌های مختلف

در سنین ۲۸ و ۹۰ روز مابین نرخ‌های پایین و بالای بارگذاری



شکل ۱۴- اختلاف همبستگی نتایج دو رده مقاومت بتن بستر بین

نتایج مقاومت کشش دونیم‌شدن لایه تعمیریه و مقاومت پیوستگی

در شکل ۱۵ ارتباط بین نتایج مقاومت خمشی و نتایج چسبندگی لایه به نمایش گذاشته شده است. در هر دو شکل ۱۴ و ۱۵ در رده مقاومت بتن بستر C50 افزایش جزئی شیب در همبستگی دیده

[5] Bungey J. H, Madandoust R. Factors influencing pull-off tests on concrete. *Mag. Conc. Res.* 1992;44(158):21-30.

[6] 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.

[7] Carino NJ. (1994), "Nondestructive Testing of Concrete: History and Challenges", ACI SP-144, *Concrete Technology - Past, Present and Future*, P.K. Mehta, Ed., American concrete Institute, Detroit, MI, pp 623-678.

[8] 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.

[9] 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.

[10] Bonaldo E, Barros J.A.O, Lourenco, P.B., (2005), Bond characterization between concrete substrate and repairing SFRC using pull-off testing, *International Journal of Adhesion & Adhesives* 25, 463-474.

[11] Austin, S., Robins, P., Pan, P., Tensile bond testing of concrete repairs, *Materials and Structures*, 1995, 28, 249-259.

[12] Vaysburd, A.M., McDonald, J.E., (1999), An Evaluation of Equipment and Procedures for Tensile Bond Testing of Concrete Repairs, Technical Report REMR-CS-61, Prepared for Headquarters, U.S. Army Corps of Engineers.

[13] Delatte, N.J., Williamson, M. S. and Fowler, D. W. (2000) "Bond strength development of high-early strength bonded concrete overlays," *ACI Materials Journal*, pp. 201-207.

[14] Schrader, E. K. (1992) "Mistakes, misconceptions, and controversial issues concerning concrete and concrete repairs," *Concrete International*, vol. Parts 1, 2, and 3.

[15] Banthia, N., Gupta, R. and Mindess, S. (2006) "Development of fiber reinforced concrete repair materials," *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 33, pp. 126-133.

[16] Laurence, O., Bissonnette, B., Pigeon, M. and Rossi, P. (2000) "Effect of steel macro fibres on cracking of thin concrete repairs.," In *Proceedings, 5th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes (BEFIB 2000)*, pp. 213-222.

[17] Talbot, C., Pigeon, M., Beaupre, D. and Morgan, D. (1994) "Influence of surface

رده C25 بوده است. این افزایش قابل توجه مقاومت پیوستگی، با افزایش سن نمونه‌ها تا ۹۰ روز نیز برقرار است. در هر دو نوع بستر، افزایش الیاف تاثیر قابل توجهی بر مقاومت پیوستگی در سن ۲۸ روز نداشته است، ولی در سن ۹۰ روز شاهد افزایش جزئی در اثر افزایش الیاف تا ۱٪ بوده ایم.

- عمل آوری در آب گرم نسبت به دو حالت دیگر، نتایج مقاومت پیوستگی بسیار بالاتری را نشان داده است. مقاومت پیوستگی طرح‌های حاوی ۰/۵ درصد الیاف فولادی در رده‌های C50، C60 و C70 و با عمل آوری در آب گرم پس از ۲۸ روز به ترتیب ۱۰۵، ۱۰۸ و ۱۰۴ درصد بالاتر از نمونه‌های عمل آوری شده در هوای آزاد و به ترتیب ۱۸، ۱۵/۲ و ۱۹/۹۸ درصد بالاتر از نمونه‌های عمل آوری شده در حالت استاندارد بوده است. تغییر مقدار الیاف و افزایش سن تاثیر کمی بر این تغییرات داشتند.

- نتایج میانگین مقاومت پیوستگی نمونه‌های مختلف در سنین ۲۸ و ۹۰ روز بر اساس انواع بتن‌های لایه بستر و تعمیراتی اختلاف بسیار کمی را بین دو حالت سطح پرداخت و پرداخت همراه با شیار نشان می‌دهد.

- افزایش سرعت بارگذاری بشکلی محسوس منجر به افزایش نتایج مقاومت پیوستگی شده است که نشانگر اهمیت تعیین محدوده‌ای معین برای سرعت انجام آزمایش جهت بررسی درست پیوستگی دو لایه می‌باشد.

## ۵- مراجع

[1] Momayez, A., Ehsani, M. R., Ramezani pour, A. A. and Rajaie, H. (2005) "Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials," *Cement and Concrete Research* vol. 35 pp. 748-757.

[۲] قدوسیان، ا. (۱۳۸۹) "تعیین چسبندگی بتن خودمتراکم بر بسترهای مختلف بتنی با استفاده از روش‌های پیچش و انتقال اصطکاک"، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی.

[3] ASTM, (1999) "C1042-99 : Standard test method for bond strength of latex systems used with concrete by Slant shear," ed: ASTM International.

[4] Pedro, M. D. S., Eduardo, J. and Vitor, D. S. (2007) "Correlation between concrete-to-concrete bond strength and the roughness of the substrate surface," *Construction and Building Materials*, vol. 21, pp. 1688-1695.

American Standards for Testing and Materials.

[30] P. Aitcin, R. J. Flatt, Science and Technology of Concrete Admixtures, Woodhead Publishing.

[31] Beushausen, H. (2005) "Long-term performance of bonded concrete overlays subjected to differential shrinkage," University of Cape Town.

[32] Zhou, J., Ye, G., Schlangen, E. and Breugel, K. V. (2008) "Modelling of stresses and strains in bonded concrete overlays subjected to differential volume changes," cement & Concrete Composites, vol. 49, pp. 199-205.

[33] Jr., J. E. B. and Berton, S. (2004) "Simulation of shrinkage induced cracking in cement composite overlays," Cement and concrete research, vol. 26, pp. 861-871.

[34] Roziere, E., Granger, S., Turcry, P. and Loukili, A. (2007) "Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete," Cement and concrete research, vol. 29, pp. 626-636.

[35] Tayeh, B. A., Bakar, B. H. A., Johari, M. A. M. and Voo, Y. L. (2012) "Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete overlay," Cement and Concrete Research, pp. 538-548.

preparation on long-term bonding of shotcrete," ACI Mater J, pp. 560-6.

[18] Bissonnette, B., Pierre, P. and Pigeon, M. (1999) "Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials," vol. 29, pp. 1655-1662.

[19] Julio, E. N. B. S., Branco, F. A. B. and Silva, V. D. (2004) "Concrete-to-concrete bond strength. Influence of the roughness of the substrate surface," Construction and building materials ,vol. 18, pp. 675-681.

[20] Haddad, R.H., AL-Mekhlafty, N., Ashteyat, A.M. (2011) "Repair of heat-damaged reinforced concrete slabs using fibrous composite materials", Construction and Building Materials, Vol. 25(3), P.P. 1213-1221.

[21] Ghavidel R., Madandoust R., Ranjbar M.M. (2015) "Reliability of pull-off test for steel fiber reinforced self-compacting concrete", Measurement, Vol. 73, P.P. 628-639.

[22] Zanotti C., Borges P.H.R., Bhutta A., Banthia N. (2017) "Bond strength between concrete substrate and metakaolin geopolymer repair mortar: Effect of curing regime and PVA fiber reinforcement", Cement and Concrete Composites, Vol. 80, P.P. 307-316.

[23] ASTM C496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA

[24] ASTM C192, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

[25] Fernando López Gayarre F.L., Pérez C.L.C., López M.A.S., (2014), The effect of curing conditions on the compressive strength of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials; 53: 260-266.

[26] ASTM C1768, Standard Practice for Accelerated Curing of Concrete Cylinders, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

[27] BS EN 206:2013, Concrete- Specifications, performance, production and conformity, British Standards Institution, London, 2013.

[28] Carmona S, Aguado A, Molins C., (2013), Characterization of the properties of steel fiber reinforced concrete by means of the generalized Barcelona test. Construction and Building Materials; 48:592-600.

[29] ASTM C 1609, (2010), Standard test method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading).

## Effect of curing, finishing and loading rate on the bond strength of fiber reinforced SCC layer with normal concrete by pull-off method

Omolbanin Arasteh Khoshbin \*

Ph.D Student, Department of Civil Engineering, University campus2, University of Guilan, Rasht, Iran.

Rahmat Madandoust

Professor, Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

Rahmat Madandoust

Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

### Abstract

The main factor in integrated performance of repair overlay and substrate concrete is the bonding between them. The accurate measurement of bonding is dependent to factors such as strength and surface characteristics of substrate concrete, loading mechanism and curing condition of overlay. In this research, 8 mix designs are considered. For assessment of strength level and surface quality of substrate, two concrete grades in the ranges of 20-30 and 40-50 MPa, and also two surface conditions including simple finishing and ribbed finishing were considered. Repair overlays were considered from three different strength grades of self-compacting concretes contained 0.5% and 1% of steel fibers. After fabrication, for curing, three different conditions of curing in open air, curing in warm water, and standard curing were deemed. Compressive strength, flexural strength and splitting tensile strength tests were performed on samples, and Pull-Off method were used for evaluation of bonding strength. The results indicated that the impact of substrate strength on bonding is more significant than overlay strength, and also the effect of curing condition was more salient than finishing quality. The bonding strength of overlays contained 0.5% of steel fibers and with strength grades of C50, C60 and C70 cured in warm water were 105%, 108% and 104%, respectively, higher than same samples cured in open air.

**Keywords:** Pull-Off, Self-compacting concrete, Steel fibers, Repair overlay, Curing condition.

---

\* Corresponding Author: Arasteh.kh@gmail.com