

ارزیابی چسبندگی رزین‌های اپوکسی و خمیرهای قلیا فعال با پایه سرباره به عنوان ماده تعمیراتی به کمک آزمون برش مایل

علی اکبر رضانیانپور^۱، فرامرز مودی^۲، محمدباقری^۳، محمدامین معینی^۳

۱- استاد تمام دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست

۲- استادیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر، مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر

Bagheri.mohammad@aut.ac.ir

چکیده

با توجه به افزایش روز افزون خرابی‌ها در سازه‌های بتنی، نیاز به استفاده از مصالح تعمیراتی مناسب و کارآمد بیش از پیش احساس می‌گردد. رزین‌های اپوکسی به عنوان یکی از مواد تعمیراتی پرکاربرد در زمینه‌ی تعمیر و تقویت سازه‌های بتنی شناخته می‌شوند. استفاده از این مواد پلیمری به دلیل هزینه‌های بالای تهیه‌ی آنها از یک سو و عدم سازگاری این مواد شیمیایی با محیط زیست از سوی دیگر باعث می‌شود تا کاربرد این دسته از مصالح با محدودیت‌هایی مواجه گردد. در سالیان اخیر، مصالح قلیا فعال با توجه به عدم کاربرد سیمان پرتلند در مراحل تولیدشان، به عنوان مصالح سازگار با محیط زیست، توجه جامعه‌ی تحقیقاتی را به خود معطوف کرده‌اند. در این مقاله با توجه به نتایج آزمایش برش مایل، به بررسی خواص تعمیراتی و کیفیت اتصال یک رزین تجاری در دو گراندروم کم و متوسط و هشت طرح مخلوط قلیا فعال پرداخته شده است. همچنین با توجه به اهمیت رطوبت به عنوان یک عامل مؤثر بر کیفیت اتصال مصالح تعمیراتی، در تمامی طرح‌ها دو حالت رطوبتی خشک و مرطوب در نظر گرفته شده است. نتایج حاکی از آن است که خمیرهای قلیا فعال با پایه سرباره خواص مطلوبی را در مقایسه با رزین‌های اپوکسی در محیط‌های مرطوب از خود نشان می‌دهند.

کلمات کلیدی: رزین اپوکسی، مصالح قلیا فعال، سرباره کوره آهن گدازی، تعمیر و تقویت، برش مایل

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر سازه‌های بتنی بسیاری با معضل خرابی ناشی از نادیده گرفتن معیارهای مربوط به دوام در مراحل طراحی سازه روبه رو شده‌اند. ترک خوردگی رایج‌ترین نوع خرابی در بتن می‌باشد که به دلایل مختلفی روی می‌دهد. روش‌های متعددی برای ترمیم ترک‌ها وجود دارد که عوامل مختلفی در انتخاب آنها به عنوان روش تعمیر اثرگذار است. یکی از رایج‌ترین روش‌های تعمیر ترک در سازه‌های بتنی، ترمیم به روش تزریق تحت فشار مواد تعمیراتی است. تزریق معمولاً وقتی به عنوان روش تعمیر مورد استفاده قرار می‌گیرد که امکان استفاده از سایر روش‌های ترمیم ترک وجود نداشته باشد. از طرفی بسیاری از

خرابی‌ها در سازه‌های بتنی در حضور رطوبت رخ می‌دهند، از این رو سازگاری ماده‌ی تعمیراتی با رطوبت، یکی از ویژگی‌های حیاتی این دسته از مصالح ساختمانی شمرده می‌شود.

قابلیت اطمینان به یک سازه‌ی تعمیر شده، تا حدود زیادی تحت تأثیر عملکرد مواد تعمیراتی و چسبندگی آنها به بتن پایه خصوصاً در محیط‌های مهاجم می‌باشد. بر این اساس انتخاب مصالح تعمیراتی در مراحل تعمیر و نگهداری یک سازه‌ی بتنی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از سوی دیگر با توجه به نقش قابل توجه عملکرد مصالح تعمیراتی بر دوام سازه، برای انتخاب مصالح تعمیراتی باید ملاحظات ویژه‌ای در نظر گرفته شود. تا کنون مواد پلیمری و پایه‌سیمانی بسیاری با هدف استفاده به عنوان مواد تعمیراتی به کار گرفته شده‌اند [۱].

مواد قلیافعال^۱، با خاصیت چسبندگی مناسب، از پتانسیل بالایی برای جایگزینی با سیمان پرتلند برخوردار هستند. این مواد در مقایسه با سیمان پرتلند از خواص مکانیکی و دوامی مطلوبی برخوردارند. از سوی دیگر با توجه به مشکلات زیست‌محیطی ناشی از فرایند تولید سیمان، در سال‌های اخیر فعال‌سازی قلیایی به شدت مورد توجه قرار گرفته است. بر اساس تحقیقات، ۷٪ از کل گازهای گلخانه‌ای تولید شده توسط انسان طی فرایند تولید سیمان وارد جو کره‌ی زمین می‌شود. نکته قابل توجه دیگر این است که مواد اولیه مناسب برای فعال‌سازی قلیایی اغلب از پسماندهای صنعتی مانند خاکستر بادی و سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی بدست می‌آیند. این موضوع در حفظ محیط زیست از آلودگی‌های ناشی از رهاسازی پسماندهای صنعتی تا حدود زیادی مؤثر است. تا کنون تحقیقات متعددی بر روی خواص مواد قلیافعال صورت گرفته است که بر اساس آنها این مواد به عنوان یک جایگزین مناسب برای سیمان شناخته می‌شوند. شناخت کاربردهای جدید مواد قلیافعال و بکارگیری آنها در پروژه‌های عمرانی از یک سو منجر به بهبود دوام سازه‌ها و از سوی دیگر مانع از افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌گردد [۲]. در دهه‌های اخیر بکارگیری ملات‌های قلیافعال به عنوان یک ماده‌ی تعمیراتی پایدارتر در مقایسه با ملات‌های پایه سیمانی توسط محققان پیشنهاد شده است [۳].

یکی دیگر از مصالح تعمیراتی پرکاربرد در صنعت ساخت، رزین‌های تعمیراتی پلیمری هستند. از سال ۱۹۴۰ که رزین‌های اپوکسی در صنعت راه‌وساختمان به کار گرفته شدند، از آنها برای چسباندن قطعه‌های ساختمانی، تزریق ترک‌ها، پوشش‌ها، تعمیرات تکه‌ای تحکیم پیچ‌ها، تحکیم پایه‌ی ماشین‌آلات، به‌کارگیری در سطوح تحت سایش و اعمال در کارهای زیر آبی (به عنوان ماده‌ی چسباننده) استفاده شده است. نام اپوکسی از این واقعیت منشأ می‌گیرد که مولکول‌های این سیستم از رزین‌ها، دارای کربن و اکسیژن هستند و به همین علت اپوکسیدها نامیده می‌شوند. اتم اکسیژن به دو اتم کربن اتصال دارد و این اتم‌های کربن نیز به طرق دیگری به یکدیگر متصل هستند. ساده‌ترین نوع اپوکسیدها، اکسید اتیلن است و واکنش رزین‌های اپوکسی وابسته به نوع گروه‌های اکسید اتیلن می‌باشد [۴].

تعیین غلظت مناسب ماده‌ی اپوکسی بستگی به ابعاد ترک، ضخامت عضو بتنی و شرایط دسترسی در هنگام تزریق دارد. برای ترک‌هایی با عرض ۰٫۳ میلی‌متر یا کمتر، از اپوکسی با غلظت کم (۵۰۰ cps یا کمتر) استفاده می‌شود. برای ترک‌های عریض‌تر یا نقاطی که امکان تزریق فقط از یک طرف وجود دارد، استفاده از اپوکسی با غلظت شبیه ژله می‌تواند مفیدتر باشد [۵].

در این مقاله با کمک آزمون برش مایل، اتصال مواد تعمیراتی مختلف به بتن، مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور بررسی نقش رطوبت بر کیفیت اتصال، دو حالت خشک و مرطوب برای ترک در زمان تزریق در نظر گرفته شد. همچنین اثر دوده‌ی سیلیس به عنوان افزودنی معدنی در مراحل تولید مخلوط‌های قلیافعال بر اتصال ماده‌ی تعمیراتی و بتن پایه مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که با توجه به اهمیت گرانروی رزین اپوکسی به عنوان یک معیار مؤثر بر تزریق‌پذیری و مقاومت اتصال، رزین مورد استفاده در این پروژه در دو گرانروی کم و متوسط تهیه گردید و مورد آزمون قرار گرفت.

¹ Alkali-activated materials

۲. مروری بر ادبیات

در سال ۲۰۱۲ واسکونسوس و همکاران در یک کار پژوهشی به بررسی عملکرد ملات‌های قلیافعال با پایه متاکائولین در مقاوم‌سازی بتن پرداختند. بر اساس نتایج، استفاده از ملات قلیافعال به عنوان ماده‌ی تعمیراتی با توجه به مقاومت مکانیکی و چسبندگی بالا به بتن، توصیه گردید [۶]. تاناکورن و همکاران در سال ۲۰۱۵ امکان استفاده از ملات‌های قلیافعال با پایه خاکستر بادی پرکلسیم را ارزیابی کردند. آنها با مقایسه مقاومت چسبندگی برشی بین ماده‌ی تعمیراتی و بتن پایه دریافتند که ملات قلیافعال با پایه خاکستر بادی عملکرد بهتری نسبت به مصالح تعمیراتی تجاری استفاده شده در این پروژه دارد [۷].

مواد تعمیراتی معمولاً تحت تنش‌های برشی و فشاری ارزیابی می‌شوند. این درحالی است که مقاومت چسبندگی نقشی اساسی در کیفیت عملیات ترمیم ایفا می‌کند. ماده‌ی تعمیراتی باید چسبندگی مطلوبی با بتن پایه داشته باشد تا ضمن بازبانی یکنواختی سازه‌ی بتنی، با افزایش کیفیت ترمیم، مانع از مشکلات دوامی دیگر نظیر خوردگی آرماتور و... گردد. روش‌های متعددی از جمله آزمون کشش مستقیم و آزمون برش مایل، به منظور ارزیابی مقاومت چسبندگی مواد تعمیراتی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. آیت‌الله ممیز و همکاران در سال ۲۰۰۵ به مقایسه روش‌های ارزیابی مقاومت چسبندگی بین ملات‌های تعمیراتی و بتن پرداختند. در این مطالعه ضمن استفاده از مواد پایه سیمانی به عنوان ماده‌ی تعمیراتی، چهار روش ارزیابی مختلف جهت مقایسه انتخاب شدند. آنها همچنین با بکارگیری از دو دسته نمونه با زبری کم و زیاد در سطوح تعمیراتی، اثر آماده‌سازی نمونه‌ها قبل از اعمال ماده تعمیراتی بر روی مقاومت چسبندگی را مورد بررسی قرار دادند. استحکام چسبندگی کشش^۲، استحکام برشی مایل^۳، کشش مستقیم و یک آزمون برش مستقیم جدید^۴ از جمله روش‌های مقایسه شده در این پروژه بودند. براساس این پژوهش، نتایج به دست آمده از آزمون‌های مختلف با یکدیگر تفاوت دارد و مقدار مقاومت چسبندگی به طور قابل ملاحظه‌ای به روش آزمون بستگی دارد. با این حال روندهای به دست آمده از هر روش آزمون، برای تمامی مصالح کاملاً مشابه بودند. برای مثال افزایش مقاومت چسبندگی کششی با افزایش مقاومت چسبندگی سایر روش‌ها همراه بود. آنها همچنین دریافتند که مقدار مقاومت چسبندگی حاصل از آزمون استحکام چسبندگی کششی، از آزمون استحکام چسبندگی برشی کم‌تر است [۸].

در خصوص مواد تعمیراتی پایه پلیمری تاکنون تحقیقات گسترده‌ای انجام گرفته است. بر این اساس، پایداری اتصالات رزینی به تجمع آب در ناحیه‌ی انتقال بین رزین و بتن بستگی دارد. انتظار می‌رود اثر لایه‌های نازک آب جذب‌شده توسط سطح تعمیراتی بر رزین، به دلیل جایگیری چسب ناچیز باشد. این درحالی است که حجم بیشتر آب مانع از پیشروی و گسترش رزین تعمیراتی در زمان اعمال آن بر سطح تعمیر می‌شود [۹].

کامین و همکاران در سال ۱۹۸۱ یک رابطه‌ی خطی میان مقاومت اتصال و مقدار نهایی رطوبت جذب شده یافتند. بر این اساس افزایش میزان رطوبت جذب شده باعث کاهش مقاومت اتصال می‌گردد [۱۰]. رطوبت سطحی و یا آب نهفته در فضاهای موجود در بتن پایه می‌تواند به ملکول‌های رزین متصل شده و با ایجاد تورم در این ناحیه به بروز تنش‌هایی منجر شود [۱۱].

گراسکورث و پریکس [۱۲] در سال ۲۰۰۱ تزریق رزین‌های اپوکسی در حضور آب را مورد تحقیق قرار دادند. بر اساس این تحقیقات، رزین‌هایی با ترکیب شیمیایی اصلاح شده و سازگار شده با آب چسبندگی مناسبی داشتند اما رزین‌های اپوکسی معمولی مورد استفاده در حضور آب، اتصال مطلوبی را نتیجه نمی‌دهند.

آیلو [۱۳] و همکاران در سال ۲۰۰۶ دریافتند که اثر آب بر چسبندگی اتصال رزین قابل توجه است؛ آنها کاهش مقاومت چسبندگی به میزان ۳۰٪ را برای نمونه‌هایی که به مدت یک ماه در آب غوطه‌ور بودند، گزارش کردند.

² Pull-Off

³ slant shear test

⁴ Bi-Surface shear test

کُلاک و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۰۹ در بخشی از یک پروژه‌ی تحقیقاتی به بررسی اثر رطوبت در زمان تزریق، بر کیفیت اتصال پرداختند. بر طبق این پژوهش برای نمونه‌هایی که پیش از تزریق به مدت ۲۴ ساعت در آب غوطه‌ور بودند، نسبت مقاومت خمشی به مقاومت خمشی نمونه‌ی شاهد کاهش یافت و این نشان دهنده‌ی اثر منفی وجود رطوبت بر کیفیت اتصال است.

الاستر و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۰، از آزمایش برش مایل برای بررسی مقاومت چسبندگی بین ملات‌های تعمیراتی انتخابی و بتن استفاده کردند. در این پروژه هفت ماده با پایه‌ی پلیمر و ۶ ماده با پایه‌ی سیمانی مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس نتایج، رزین‌های مورد استفاده در این پروژه نسبت به مواد پایه سیمانی عملکرد بهتری از خود نشان داده‌اند. همچنین این مواد در برابر چرخه‌های گرم و سرد شدن، کاهش مقاومت چسبندگی کم‌تری داشتند. لاو و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۲ دریافتند که قرارگیری در شرایط رطوبتی باعث می‌شود که خرابی در بتن مستقل از شرایط مقاومتی و دوامی بتن و از ناحیه‌ی چسبندگی بین اپوکسی و بتن رخ دهد.

۳. برنامه‌ی آزمایشگاهی

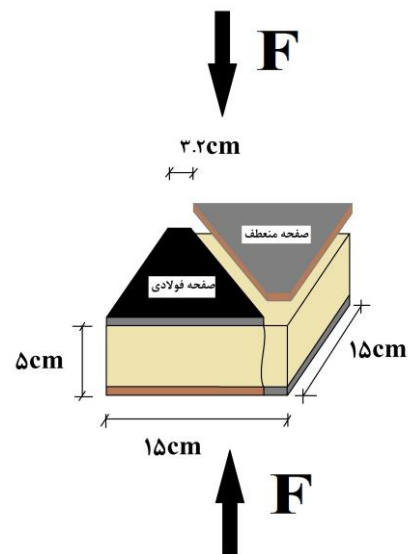
۱،۳ مصالح

۱،۱،۳ آماده‌سازی نمونه‌های بتنی و شبیه‌سازی ترک

تعداد ۴۰ عدد نمونه‌ی بتن خودمتراکم با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۵۰ مگاپاسکال در قالب‌هایی با ابعاد ۵*۱۵*۱۵ سانتی متر مطابق با استاندارد BS.EN.12618.3 تهیه گردید. نمونه‌ها پس از عمل‌آوری در آب به کمک دو صفحه‌ی فولادی (مطابق شکل ۲) و جک آزمون مقاومت فشاری شکسته شدند. به منظور شبیه‌سازی عرض ترک‌ها دو بخش گسیخته‌شده‌ی هر یک از نمونه‌ها توسط جداکننده‌هایی به قطر ۰،۵ میلی‌متر از هم فاصله داده می‌شدند. سپس دور هر یک از نمونه‌ها از محل گسیختگی به کمک بتونه محدود و روزنه‌هایی برای تزریق مصالح تعمیراتی مطابق با شکل ۱ جایگذاری شدند.



شکل ۱: آماده‌سازی نمونه‌های شکسته شده برای تزریق



شکل ۲: آماده‌سازی نمونه‌های آزمون برش مایل

۳،۱،۲ تهیه رزین اپوکسی

رزین اپوکسی مورد استفاده در این پژوهش نوعی رزین تجاری با پایه‌ی اپوکسی است که از شرکت اسپانیایی HCC خریداری شده‌است. جدول ۱ مربوط به مشخصات این رزین می‌باشد. لازم به ذکر است که این رزین‌های دوجزئی با دو گراندروی کم و متوسط تهیه و مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۱: مشخصات رزین مورد استفاده در پروژه

مشخصات رزین مصرفی						
نام تجاری		پایه	چگالی (gr/cm ³)	درصد جامد وزنی (%Wt)	دمای انتقال شیشه (°C)	
EPL	HCC-MV-EPOXI-GRIS	رزین اپوکسی با گراندروی پایین شرکت HCC	۱،۵۹۷	۹۲،۸	۶۳،۲۱	
EPM	HCC-BV-EPOXI-VERDE	رزین اپوکسی با گراندروی متوسط شرکت HCC	۱،۶۴۳	۹۲،۴	۶۲،۸۶	

۳،۱،۳ تهیه‌ی خمیرهای قلیافعال

در این پروژه خمیرهای قلیافعال با استفاده از سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی و دوده‌سیلیس به عنوان ماده‌ی پایه و مخلوط سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات به عنوان فعال‌ساز شیمیایی تهیه گردیدند. سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی با سطح مخصوص ۳۰۷۵ سانتی‌مترمربع بر گرم، از شرکت صنایع سیمان مدائن شهر اصفهان و همچنین دوده‌سیلیس از کارخانه‌ی سیلیس ازنا تهیه شدند. خواص فیزیکی و همچنین ترکیبات شیمیایی حاضر در سرباره و دوده سیلیس مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: خواص فیزیکی و ترکیبات شیمیایی حاضر در سرباره و دوده‌سیلیس

ترکیبات شیمیایی	سرباره کوره آهن‌گدازی (%)	دوده سیلیس (%)
SiO ₂	۳۷،۲۱	۸۸،۵
Al ₂ O ₃	۱۱،۵۶	۱،۴
Fe ₂ O ₃	۱،۰۱	۲،۱
CaO	۲۶،۷۵	۱،۵
SO ₃	۰،۹۷	-
MgO	۸،۲۵	۲
Na ₂ O	۰،۶۱	-
K ₂ O	۰،۷	۰،۷۵
P ₂ O ₅	۰،۰۳	-
TiO ₂	۱،۲۳	۰،۱۵
LOI	۰،۰۲	۳
خواص فیزیکی	سرباره کوره آهن‌گدازی	دوده سیلیس
میانگین اندازه ذرات (µm)	۲۵،۹۷	۳-۲

به منظور تهیهی خمیرهای قلیافعال، از ترکیب سدیم هیدروکسید با غلظت ۶ مولار و سدیم سیلیکات مایع با مدول سیلیکاتی ۲,۳۳ به عنوان فعالساز شیمیایی استفاده شد. سدیم هیدروکسید به صورت پرک و با خلوص ۹۸,۵٪ از تولیدکنندهی داخلی تهیه گردید. مقدار مشخصی از پرکهای سدیم هیدروکسید با آب مخلوط می شد تا محلول با غلظت ۶ مولار تهیه گردد، همچنین لازم به ذکر است که محلولهای قلیایی حداقل یک روز قبل از ساخت و تزریق خمیرها آماده می شدند تا فرصت سرد شدن پیدا کنند.

۸ طرح مخلوط، منطبق بر جدول ۳، برای ساخت نمونههای قلیافعال انتخاب گردیدند. در برخی از طرحها از دوده سیلیس به عنوان جایگزین ۵٪ از سرباره استفاده گردید. دوده سیلیس به صورت لجن (بعد از مخلوط شدن با محلول قلیایی) به مخلوطها اضافه می شد.

جدول ۳: مشخصات خمیرهای قلیافعال مورد استفاده در پروژه

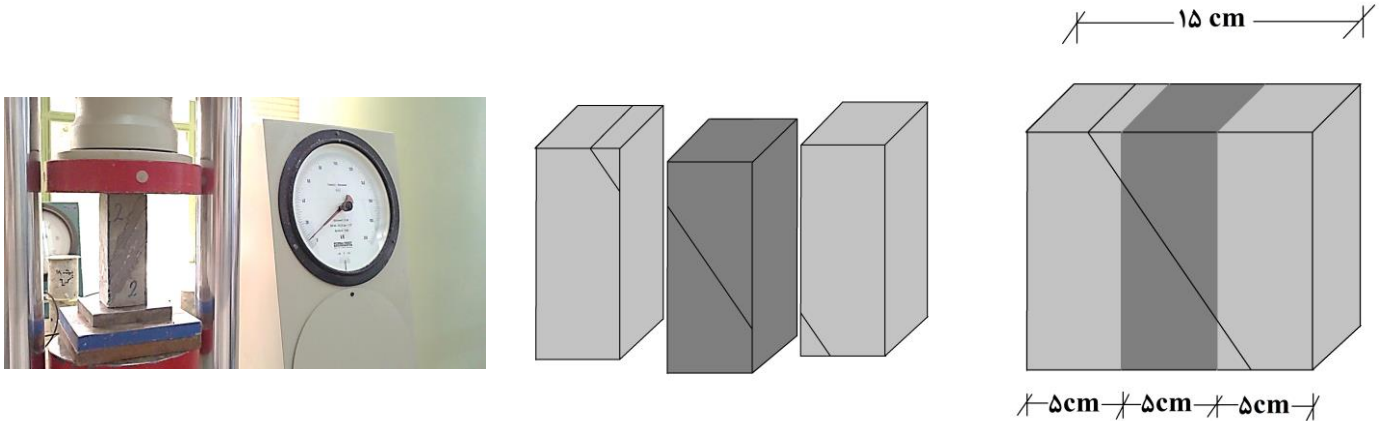
ردیف	نام طرح	درصد جایگزینی دوده سیلیس	غلظت محلول قلیایی (مولار)	نسبت سیلیکات به محلول قلیایی	نسبت محلول فعال ساز به مواد پایه
۱	AAS1	۰	۶	۰,۴	۰,۵۵
۲	AAS2	۰	۶	۰,۵	۰,۵۵
۳	AAS3	۵	۶	۰,۴	۰,۵۵
۴	AAS4	۵	۶	۰,۵	۰,۵۵
۵	AAS5	۰	۶	۰,۴	۰,۶۵
۶	AAS6	۰	۶	۰,۵	۰,۶۵
۷	AAS7	۵	۶	۰,۴	۰,۶۵
۸	AAS8	۵	۶	۰,۵	۰,۶۵

۲,۳ روش آزمایش

پس از آماده سازی نمونههای گسیخته شده برای تزریق مصالح تعمیراتی مورد استفاده در پروژه، نمونهها به دو دسته ی با ترک خشک و ترک مرطوب تقسیم شدند. ایجاد رطوبت در ترکها بر اساس استاندارد BS.EN.12618.3 به ترتیب زیر صورت پذیرفت:

۱. ترک خشک: مواد تعمیراتی بدون اعمال هیچ رطوبتی توسط پمپ تزریق به نمونهها تزریق گردید.
۲. ترک مرطوب: پیش از تزریق مواد تعمیراتی، آب به درون ترک تزریق گردید و پس از گذشت نیم ساعت خروجیهای آب باز شد و ۱۰ دقیقه پس از تخلیه آب، مواد تعمیراتی به روش تزریق اعمال گردید.

طرحهای مختلف به کمک پمپ تزریق یکی پس از دیگری به نمونهها تزریق شدند. نمونههای تزریق شده با خمیرهای قلیافعال به مدت ۲۸ روز در حوضچه ی آب با دمای محیط قرار گرفتند. نمونههای تزریق شده با رزینهای اپوکسی در محیط اتاق نگهداری شدند. سپس هر یک از نمونهها مطابق با استاندارد BS.EN.12618.3 (شکل ۳) برش داده شدند و قطعه ی میانی در هر نمونه توسط جک آزمون مقاومت فشاری با سرعت ۰,۰۰۲ میلی متر بر ثانیه شکسته شد.



شکل ۳: نحوه‌ی برش و آزمون نمونه‌های آزمایش برش مایل

۴. نتیجه‌گیری و بحث

نتایج آزمون برش مایل بر روی نمونه‌های ترمیم شده به کمک تزریق رزین اپوکسی در جدول ۴ قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۴: نتایج آزمون برش مایل برای نمونه‌های ترمیم شده با رزین اپوکسی بر حسب مگاپاسکال

نوع رزین اپوکسی			
رزین اپوکسی با گرانروی پایین (EPL)		رزین اپوکسی با گرانروی متوسط (EPM)	
خشک	مرطوب	خشک	مرطوب
۳۹,۲	۳۴	۴۵,۶	۴۰,۴

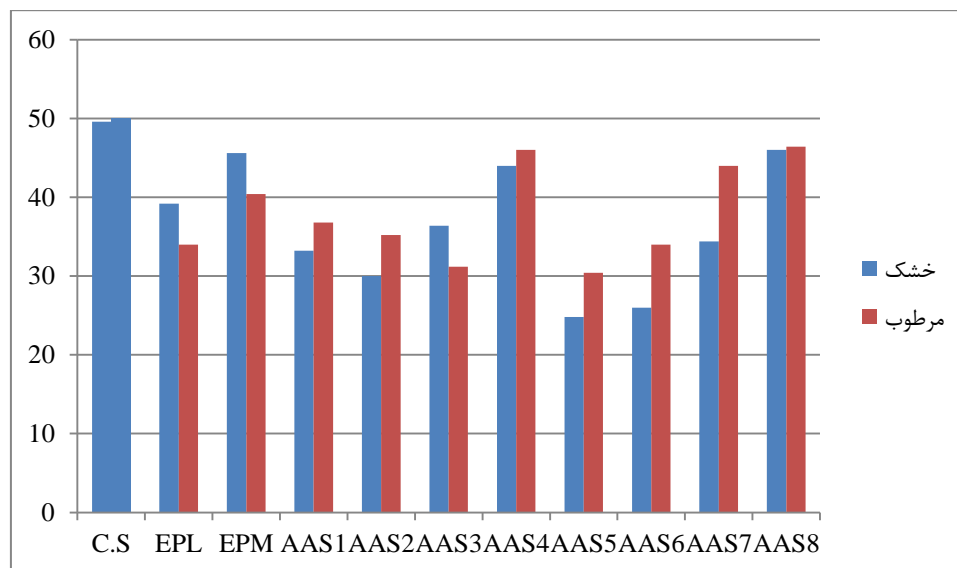
با توجه به نتایج مشاهده می‌گردد که بطور کلی رزین اپوکسی در حالات خشک عملکرد بهتری از حالات مرطوب داشته است. از سوی دیگر رزین با گرانروی بیشتر ضمن عملکرد بهتر نسبت به رزین با گرانروی پایین، در برابر رطوبت حساسیت کمتری از خود نشان داده است.

در ادامه نتایج مربوط به طرح‌های ترمیم شده به کمک خمیرهای قلیا‌فقال در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۵: نتایج آزمون برش مایل برای نمونه‌های ترمیم شده با خمیرهای قلیا‌فقال بر حسب مگاپاسکال

نام طرح	حالت خشک	حالت مرطوب
AAS1	۳۳,۲	۳۶,۸
AAS2	۳۰	۳۵,۲
AAS3	۳۶,۴	۳۱,۲
AAS4	۴۴	۴۶
AAS5	۲۴,۸	۳۰,۴
AAS6	۲۶	۳۴
AAS7	۳۴,۴	۴۴
AAS8	۴۶	۴۶,۴

بر اساس نتایج مربوط به آزمایش برش مایل خمیرهای قلیافعال با پایه‌ی سرباره، افزوده شدن دوده‌ی سیلیس باعث افزایش مقاومت نمونه‌ها گردید. این امر را می‌توان مربوط به شرکت ذرات دوده‌ی سیلیس در واکنش پوزولانی و مصرف هیدروکسید کلسیم دانست [۱۶]. مصرف شدن هیدروکسید کلسیم که همراه با تولید ژل C-S-H اضافی می‌باشد باعث کاهش حفرات و همچنین متراکم‌تر کردن ریز ساختار خمیرها می‌گردد. علاوه بر این خمیرهای تهیه شده با نسبت محلول به پوزولان ۰,۵۵، مقاومت بهتری از خود در مقایسه با خمیرهای تهیه شده با نسبت محلول به پوزولان ۰,۶۵ نشان دادند، که این امر با توجه به مطالعات پیشین [۱۷] می‌تواند به دلیل نسبت کم‌تر آب به مواد سیمانی در این مخلوط‌ها باشد. در خصوص تأثیر نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم، به این نتیجه می‌رسیم که، برای مخلوط‌های تهیه شده با نسبت محلول به پوزولان ۰,۵۵، افزایش نسبت سیلیکات سدیم باعث کاهش مقاومت نمونه‌ها می‌شود، این در حالی است برای مخلوط‌های تهیه شده با نسبت محلول به پوزولان ۰,۶۵، افزایش نسبت سیلیکات سدیم باعث افزایش مقاومت نمونه‌ها شده است. در شکل ۴ نمودار ستونی نتایج آزمون برش مایل برای تمامی طرح‌های مورد استفاده در این مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۴: نتایج آزمون برش مایل برای تمامی طرح‌ها بر حسب مگاپاسکال

با توجه به نمودار مشاهده می‌گردد که عملکرد طرح‌های قلیافعال در مقایسه با رزین‌های اپوکسی که یکی از پر مصرف‌ترین مواد تعمیراتی در صنعت ساخت‌وساز می‌باشند بسیار مطلوب بوده است. این امر حاکی از قابلیت مناسب مخلوط‌های قلیافعال برای بکارگیری در پروژه‌های تعمیراتی است. نکته‌ی قابل توجه دیگر در مقایسه‌ی بین عملکرد رزین‌های اپوکسی و خمیرهای قلیافعال نقش رطوبت در اتصال این مواد تعمیراتی است. به طوری که رزین‌های اپوکسی در حضور رطوبت با کاهش مقاومت اتصال مواجه می‌شوند اما در استفاده از خمیرهای قلیافعال وجود رطوبت اثر مثبت داشته است. هرچند لزوم بررسی اثر میزان رطوبت بر کیفیت چسبندگی خمیرهای قلیافعال احساس می‌شود اما تا اینجا می‌توان گفت که میزان کم رطوبت باعث اتصال بهتر خمیر قلیافعال به بتن پایه می‌گردد. این موضوع با توجه به جذب کم‌تر آب خمیرهای قلیافعال، توسط نمونه‌ی مرطوب، تا حدودی توجیه پذیر است. لازم به ذکر است که با توجه به تحقیقات پیشین [۱۸] وجود رطوبت تزریق‌پذیری را افزایش می‌دهد و افزایش تزریق‌پذیری باعث بهبود عملکرد ملات تعمیراتی می‌گردد.

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج می‌توان گفت عملکرد خمیرهای قلیاف‌تال نسبت به رزین‌های اپوکسی مطلوب بوده است. این عملکرد مطلوب در محیط مرطوب بیشتر به چشم می‌آید. رزین‌های اپوکسی در محیط‌های دارای رطوبت بسته به ترکیبات شیمیایی خود عملکرد متفاوتی دارند و به طور معمول با افزایش رطوبت، چسبندگی آنها کاهش یافته و بر مقاومت نمونه‌های ترمیم شده اثر می‌گذارد. خمیرهای قلیاف‌تال در این پروژه در محیط‌های مرطوب عملکردی بهتری نسبت به رزین‌های اپوکسی داشته‌اند، این امر با توجه به جذب کم‌تر آب خمیرهای قلیاف‌تال، توسط نمونه‌ی مرطوب، تا حدودی توجیه پذیر است. لازم به ذکر است که عملکرد خمیرهای قلیاف‌تال در محیط‌های خیس و غوطه‌ور در آب می‌تواند متفاوت باشد و این موضوع باید در پژوهش‌های آتی مورد بررسی قرار گیرد.

۶. مراجع

- [1] I. Repository, "Bond Strength of Concrete Patch Repairs An Evaluation of Test methods for the award of Doctor of Philosophy of the Loughborough University of Technology."
- [2] W. K. Part, M. Ramli, and C. B. Cheah, "An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products," *Constr. Build. Mater.*, vol. 77, pp. 370–395, 2015.
- [3] S. Kramar, A. Šajna, and V. Ducman, "Assessment of alkali activated mortars based on different precursors with regard to their suitability for concrete repair," *Constr. Build. Mater.*, vol. 124, pp. 937–944, 2016.
- [4] "آسیب شناسی و بهسازی سازه های بتنی، دکتر محمود نادری، فروردین ۱۳۷۳، انتشارات شرکت ابزار خاک."
- [5] "امیرپور، رضا؛ اکبری، رضا؛ ۱۳۹۴؛ 'تعمیر ترک سازه ای با تزریق اپوکسی؟' بولتن فنی شماره ۱-۳-۹۴؛ اداره کل نگهداری راه و ابنیه."
- [6] E. Vasconcelos, S. Fernandes, B. de Aguiar, and F. Pacheco-Torgal, "Concrete Retrofitting Using CFRP and Geopolymer Mortars," *Mater. Sci. Forum*, vol. 730–732, pp. 427–432, 2012.
- [7] T. Phoo-Ngernkham, V. Sata, S. Hanjitsuwan, C. Ridtirud, S. Hatanaka, and P. Chindaprasirt, "High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair material," *Constr. Build. Mater.*, vol. 98, pp. 482–488, 2015.
- [8] A. Momayez, M. R. Ehsani, A. A. Ramezani-pour, and H. Rajaie, "Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 4, pp. 748–757, 2005.
- [9] "Bowers RC, Zisman WA. Surf Properties. In: Baer E, editor. Engineering Design for Plastics. New York: Reinhold Publishing Corporation; 1964."
- [10] "Comyn J. In: Kinloch AJ, editor. Development of adhesives-2. London: Applied Science; 1981."
- [11] A. Çolak, T. Çoşgun, and A. E. Bakirci, "Effects of environmental factors on the adhesion and durability characteristics of epoxy-bonded concrete prisms," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 2, pp. 758–767, 2009.
- [12] K. P. Grosskurth and W. Perbix, "Force Transmitting Filling of Wet and Water Filled Cracks in Concrete Structures by Means of Crack Injection with Newly Developed Epoxy Resins," *Struct. Eng. Mech. Comput.*, vol. 2, pp. 1251–1258, 2001.
- [13] M. Frigione, M. A. Aiello, and C. Naddeo, "Water effects on the bond strength of concrete/concrete adhesive joints," *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, no. 10, pp. 957–970, 2006.
- [14] A. Al-Ostaz, M. Irshidat, B. Tenkhoff, and P. S. Ponnappalli, "Deterioration of Bond Integrity between Repair Material and Concrete due to Thermal and Mechanical Incompatibilities," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 22, no. 4, pp. 136–144, 2010.
- [15] D. Lau, "Moisture-induced debonding in concrete-epoxy interface," *HKIE Trans. Hong Kong Inst. Eng.*, vol. 19, no. 3, pp. 33–38, 2012.
- [16] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concrete: microstructure, properties, and materials*. 2006.
- [17] M. J. and A. A. R. Nadoushan, "The effect of type and concentration of activators on flowability and



مرکز تحقیقات
راه، مسکن و شهرسازی

نهمین کنفرانس ملی بتن ایران
۱۵ و ۱۶ مهرماه ۱۳۹۶
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



انجمن علمی بتن ایران



انجمن علمی بتن ایران
انجمن علمی بتن ایران

compressive strength of natural pozzolan and slag-based geopolymers,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 111, pp. 337–347, 2016.

F. and F. M. H. Jorne, “Evaluation of the grout injectability and types of resistance to grout flow,” [18] *Constr. Build. Mater.*, vol. 122, pp. 171–183, 2016.