

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



محمدامین معینی

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



محمدباقری

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



فرامرز مودی

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



علی‌اکبر رضانیانپور

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

## 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 قلیافعال با توجه به عدم کاربرد سیمان پرتلند در مراحل تولیدشان، به عنوان مصالح سازگار با محیط‌زیست، 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 گراندی کم و متوسط و هشت طرح مخلوط قلیافعال 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 قلیافعال با پایه سرباره خواص مطلوبی را در مقایسه با رزین‌های اپوکسی در محیط‌های مرطوب از خود نشان می‌دهند.

کلمات کلیدی: رزین اپوکسی، مصالح قلیافعال، سرباره کوره آهن‌گدازی، تعمیر و تقویت، برش مایل

در سال‌های اخیر سازه‌های بتنی بسیاری با معضل خرابی ناشی از نادیده گرفتن معیارهای مربوط به دوام در مراحل طراحی سازه روبه‌رو شده‌اند. ترک‌خوردگی 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<sup>۱</sup>، 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 راه و ساختمان 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

<sup>1</sup> Alkali-activated materials

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 ( $500\text{ cps}$  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 موثر بر تزریق‌پذیری و مقاومت اتصال، رزین مورد استفاده در این پروژه در دو گرانروی کم و متوسط تهیه گردید و مورد آزمون قرار گرفت.

## ۲- مروری بر ادبیات

در سال ۲۰۱۲ واسکونسلوس 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 بازیابی 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<sup>۲</sup>، استحکام برشی مایل<sup>۳</sup>، کشش مستقیم و یک آزمون برش مستقیم جدید<sup>۴</sup> 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

<sup>2</sup> Pull-Off

<sup>3</sup> slant shear test

<sup>4</sup> Bi-Surface shear test

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 تعمیری 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 پریبکس [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.

گلاک 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.

الاستز 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

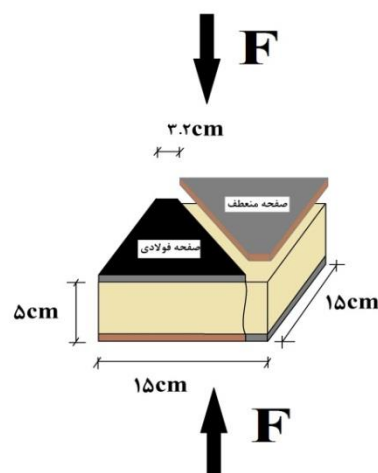
۱،۳ مصالح

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 سانتی‌متر مطابق با استاندارد BS.EN.12618.3 تهیه گردید. نمونه‌ها پس از عمل‌آوری در آب به کمک دو صفحه‌ی فولادی (مطابق شکل ۱) و یک آزمون مقاومت فشاری شکسته شدند. به منظور شبیه‌سازی عرض ترک‌ها دو بخش گسیخته‌شده‌ی هر یک از نمونه‌ها توسط جداکننده‌هایی به قطر ۵،۰ 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 ۲ جایگذاری شدند.



شکل ۲: آماده‌سازی نمونه‌های شکسته شده برای تزریق



شکل ۱: آماده‌سازی نمونه‌های آزمون برش مایل

### ۲.۱.۳ 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 گرانیوی 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 <sup>3</sup> )	درصد جامد وزنی (%Wt)	دمای انتقال شیشه (°C)	
EPL	HCC-MV-EPOXI-GRIS	رزین اپوکسی با گرانیوی پایین شرکت HCC	۱.۵۹۷	۹۲.۸	۶۳.۲۱	
EPM	HCC-BV-EPOXI-VERDE	رزین اپوکسی با گرانیوی 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 دوده سیلیس

ترکیبات شیمیایی	سرباره کوره آهنگدازی (%)	دوده سیلیس (%)
$SiO_2$	۳۷,۲۱	۸۸,۵
$Al_2O_3$	۱۱,۵۶	۱,۴
$Fe_2O_3$	۱,۰۱	۲,۱
$CaO$	۳۶,۷۵	۱,۵
$SO_3$	۰,۹۷	-
$MgO$	۱,۲۵	۲
$Na_2O$	۰,۶۱	-
$K_2O$	۰,۷	۰,۷۵
$P_2O_5$	۰,۰۳	-
$TiO_2$	۱,۲۳	۰,۱۵
$LOI$	۰,۰۲	۳
میانگین اندازه ذرات ( $\mu m$ )	۲۵,۹۷	۳-۲

و تزریق خمیرها آماده می‌شدند 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 می‌شد.

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 می‌شد تا محلول با غلظت ۶ مولار تهیه گردد، همچنین لازم به ذکر است که محلول‌های قلیایی حداقل یک روز قبل از ساخت

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 فعالساز 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

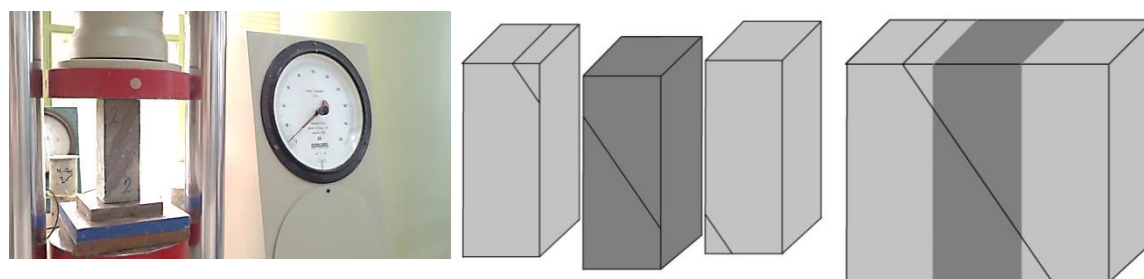
خروجی‌های آب باز شد و ۱۰ دقیقه پس از تخلیه آب، مواد تعمیراتی به روش تزریق اعمال گردید. طرح‌های مختلف به کمک پمپ تزریق یکی پس از دیگری به نمونه‌ها تزریق شدند. نمونه‌های تزریق شده با خمیرهای قلیافعال به مدت ۲۸ روز در حوضچه‌ی آب با دمای محیط قرار گرفتند. نمونه‌های تزریق شده با رزین‌های اپوکسی در محیط اتاق نگهداری شدند. سپس هر یک از نمونه‌ها مطابق با استاندارد BS.EN.12618.3 (شکل ۳) برش داده شدند و قطعه‌ی میانی در هر نمونه توسط جک آزمون مقاومت فشاری با سرعت ۰,۰۰۲ میلی‌متر بر ثانیه شکسته شد.

پس از آماده‌سازی نمونه‌های گسیخته‌شده برای تزریق مصالح تعمیراتی مورد استفاده در پروژه، نمونه‌ها به دو دسته‌ی 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

15 cm



شکل ۳: نحوه‌ی برش و آزمون نمونه‌های آزمایش برش مایل

5cm 5cm 5cm

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 قلیافعال در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۵: نتایج آزمون برش مایل برای نمونه‌های ترمیم شده با خمیرهای قلیافعال 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

## 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

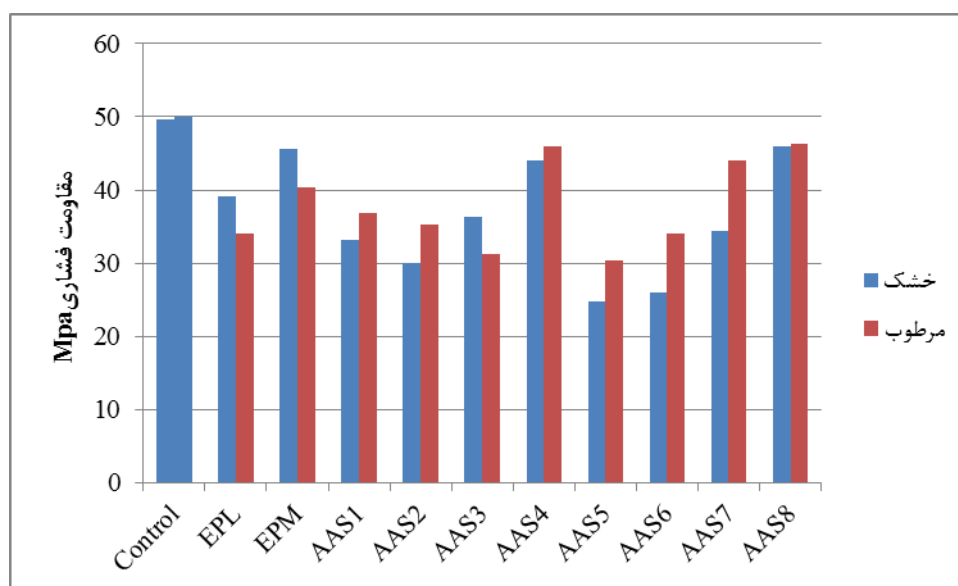
نوع رزین اپوکسی			
رزین اپوکسی با گرانروی پایین (EPL)		رزین اپوکسی با گرانروی متوسط (EPM)	
خشک	مرطوب	خشک	مرطوب
۳۹,۲	۳۴	۴۵,۶	۴۰,۴

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

براساس 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 که 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

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

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



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 قلیافعال 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 قلیافعال در این پروژه در محیط‌های مرطوب عملکردی بهتری نسبت به رزین‌های اپوکسی داشته‌اند، این امر با توجه به جذب کم‌تر آب خمیرهای قلیافعال، توسط نمونه‌ی مرطوب، تا حدودی توجیه پذیر است. لازم به ذکر است که عملکرد خمیرهای قلیافعال 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 سازه‌های بتنی، دکتر محمود نادری، فروردین ۱۳۷۳، انتشارات شرکت ابزار خاک."
- [5] "امیرپور، رضا؛ اکبری، رضا؛ ۱۳۹۴؛ 'تعمیر ترک سازه‌ای 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 compressive strength of natural pozzolan and slag-based geopolymers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 111, pp. 337–347, 2016.
- [18] F. and F. M. H. Jorne, "Evaluation of the grout injectability and types of resistance to grout flow," *Constr. Build. Mater.*, vol. 122, pp. 171–183, 2016.

# تعمیر و نگهداری سازه‌های بتنی مسلح تحت تاثیر خوردگی کلیدی واقع در ناحیه جزرومدی منطقه خلیج فارس



محمد شکرچی‌زاده  
عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی  
عمران و سرپرست انستیتو مصالح  
ساختمانی دانشگاه تهران



حسین تقدس  
عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی  
عمران دانشگاه تهران



عطیه فراهانی  
دانشجوی دکتری مهندسی  
عمران سازه دانشگاه تهران

## چکیده

دوام، عمر مفید و عملکرد سازه‌های بتن مسلح در معرض مناطق دریایی مانند جنوب ایران که در معرض خوردگی ناشی از نفوذ یون کلرید هستند، از اهمیت زیادی برخوردار است. خوردگی ناشی از نفوذ یون کلرید در بتن موجب تخریب سازه‌های بتن مسلح مانند پل‌ها و اسکله‌ها می‌شود. بنابراین، بررسی روش‌های تعمیر و نگهداری سازه‌های بتن مسلح در معرض خوردگی به منظور کاهش هزینه‌های چرخه عمر و افزایش عمر مفید و دوام این سازه‌ها حائز اهمیت می‌باشد.

در این تحقیق، در بخش مدل‌سازی عددی، مدل عددی یک ستون بتنی مسلح تحت تاثیر خوردگی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود به منظور بررسی تاثیر خوردگی و روش‌های مختلف تعمیر و نگهداری در جلوگیری از تخریب زودرس سازه‌های بتن مسلح در منطقه خلیج فارس ایجاد شده است. در این مدل‌سازی، از نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی ضریب انتشار یون کلرید در بتن و غلظت کلرید سطحی در مرحله شروع خوردگی حاصل از آزمون‌های بتنی با نسبت‌های آب به سیمان مختلف در ناحیه جزرومدی خلیج فارس، ارائه شده توسط نویسندگان مقاله، و مدل عددی شدت جریان خوردگی در بتن در مرحله گسترش خوردگی، موجود در ادبیات فنی، استفاده شده است. مدل المان محدود ستون بتنی مسلح تحت تاثیر خوردگی، درصد خوردگی میلگرهای طولی و عرضی و عرض ترک خوردگی پوشش بتنی را در طول زمان مورد ارزیابی قرار می‌دهد. همچنین، تاثیر استفاده از دو روش تعمیر شامل استفاده از شاتکریت و استفاده از پوشش سطحی پلی اورتان روی سطح خارجی بتن را مورد بررسی قرار می‌دهد. کلمات کلیدی: بتن مسلح، تعمیر و نگهداری، ترک خوردگی، خوردگی، نسبت آب به سیمان.

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، سازه‌های بتن مسلح بسیاری در اثر خوردگی میلگرد در بتن در مناطق دریایی به دلیل هجوم

یون کلرید به داخل بتن، دچار تخریب شده‌اند. بنابراین بررسی روش‌های مختلف تعمیر و نگهداری سازه‌های بتن مسلح در مناطق خورنده مانند خلیج فارس به منظور

افزایش دوام و عمر مفید این سازه‌ها و کاهش هزینه‌های بازسازی و تخریب سازه اولیه حائز اهمیت است. برای جلوگیری از نفوذ افزایش یون کلرید به داخل بتن می‌توان از راهکارهای مختلف شامل شاتکریت کردن سطح بتن یا افزایش ضخامت پوشش بتنی پس از شروع ترک خوردگی، تزریق اپوکسی به داخل ترک‌های سطحی بتن، استفاده از میلگردهای از جنس پلیمر مسلح شده به الیاف (FRP)<sup>۱</sup>، استفاده از میلگردهای زنگ‌نزن و استفاده از پوشش‌های سطحی مختلف نام برد.

چو و همکاران<sup>۲</sup> [۱] تاثیر افزایش ضخامت پوشش بتنی روی خوردگی میلگردها ناشی از نفوذ یون کلرید را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که با افزایش ضخامت پوشش بتنی، شدت جریان خوردگی کاهش می‌یابد. لیکن، پتانسیل خوردگی، مقاومت الکتریکی بتن و چگالی جریان خوردگی به ضخامت پوشش بتنی وابسته نیست. علاوه بر این، در تحقیق دیگری اینرایت و همکاران<sup>۳</sup> [۲] تاثیر استفاده از شاتکریت را به عنوان روش تعمیر سازه‌های بتنی در معرض یون کلرید پیشنهاد کردند. باید قبل از استفاده از این نوع تعمیر، آسیب ناشی از خوردگی میلگرد به کمک پاشش ماسه<sup>۴</sup> روی میلگردها از بین برود. پاشش ماسه موجب می‌شود که فرآیند خوردگی میلگرد متوقف شود و سپس، لایه شاتکریت اعمال شود. در این حالت، تیر آسیب دیده ناشی از خوردگی همانند تیر بدون خوردگی عمل کرده و پس از مدتی دوباره زمان شروع خوردگی آغاز می‌شود. نتایج نشان داده است که روش تعمیر شاتکریت، تاثیر کمی روی تابع خرابی در آنالیز احتمالاتی دارد. خانزاده و همکاران [۳] تاثیر استفاده از پوشش‌های سطحی مختلف را روی سطح خارجی بتن، به

منظور کاهش نفوذ یون کلرید به داخل بتن را در ناحیه جزرومدی منطقه خلیج فارس مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن است که پوشش‌های سطحی پلی اورتان (PU) و آلفاتیک اکریلیک (AA) بهترین عملکرد را در کاهش ضریب انتشار یون کلرید در بتن نسبت به نمونه شاهد داشته است.

به منظور انجام عملیات تعمیر و نگهداری سازه‌های بتنی مسلح، باید پدیده خوردگی و چگونگی نفوذ یون کلرید به داخل بتن را شناخت.

خوردگی میلگرد در بتن ناشی از نفوذ یون کلرید در بتن دارای دو مرحله است:

#### الف - مرحله شروع خوردگی

در این مرحله نفوذ یون کلرید موجود در آب دریا به داخل بتن از سطح بتن آغاز می‌شود و تا هنگامیکه غلظت یون کلرید روی سطح آرماتور به مقدار بحرانی غلظت یون کلرید ( $C_{cr}$ ) برسد، ادامه می‌یابد. این مرحله نیازمند اکسیژن و رطوبت کافی در محیط می‌باشد. غلظت یون کلرید بحرانی به عوامل مختلفی شرایط محیطی دما و رطوبت نسبی و غلظت یون کلرید موجود در آب وابسته است [۴]. زمانیکه غلظت یون کلرید روی سطح میلگرد به مقدار بحرانی خود می‌رسد، زمان شروع خوردگی ( $T_{corr}$ ) نامیده می‌شود. غلظت کلرید سطحی روی سطح بتن و ضریب انتشار یون کلرید در بتن با استفاده از پروفیل غلظت یون کلرید در عمق بتن محاسبه می‌شود. به این منظور، باید پروفیل غلظت یون کلرید برحسب عمق بتن را با راه‌حل یک بعدی عددی و یا تحلیلی ارائه شده از قانون دوم انتشار فیک<sup>۵</sup> مطابقت داد.

لوپینگ<sup>۶</sup> [۵] مطابق رابطه (۱) راه‌حل تحلیلی قانون دوم انتشار فیک را ارائه داده است.

<sup>۱</sup> Fiber Reinforced Polymer

<sup>۲</sup> Cho et al.

<sup>۳</sup> Enright et al.

<sup>۴</sup> Sand Blasting

<sup>۵</sup> Fick Second Law of Diffusion

<sup>۶</sup> Luping T.

$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_i) \operatorname{erf}(x / \sqrt{4Dt}) \quad (1)$$

که در آن،  $C$  میزان درصد وزنی یون کلرید،  $x$  فاصله از سطح بتن بر حسب متر،  $t$  مدت زمان رویارویی بر حسب ثانیه،  $D$  ضریب انتشار یون کلرید در بتن بر حسب متر مربع بر ثانیه،  $C_s$  میزان درصد وزنی یون کلرید در سطح بتن،  $C_i$  میزان درصد وزنی یون کلرید اولیه و  $\operatorname{erf}$  تابع خطا می‌باشد. میزان یون کلرید اولیه در آزمون‌های بدون پوزولان و دارای آب به سیمان مختلف برابر  $0.15$  درصد وزنی بتن بدست آمده است. از برآزش هر پروفیل یون کلرید بر حسب عمق پودرگیری با رابطه (۱) و با استفاده از نرم افزار *MATLAB* اعداد  $D$  و  $C_s$  بدست می‌آیند.

در ادبیات فنی مدل‌های تجربی و عددی زیادی برای پیش‌بینی ضریب انتشار یون کلرید در بتن و غلظت یون کلرید سطحی ناشی از نفوذ یون کلرید به داخل بتن در محیط‌های دریایی و یا آزمایشگاهی ارائه شده است [۹-۶].

فراهانی [۱۰] بر اساس داده‌های حاصل از سایت تحقیقاتی واقع در منطقه خلیج فارس، مدلی عددی برای ضریب انتشار یون کلرید در بتن برای آزمون‌های بتنی با نسبت آب به سیمان مختلف واقع در منطقه جزرومدی منطقه خلیج فارس مطابق رابطه (۲) ارائه کرده‌است.

(۲)

$$D = D_{ref} \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^n \exp \left[ \frac{U}{R} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \left[ 1 + \frac{(100-h)^4}{(100-h_c)^4} \right]^{-1}$$

که در آن،  $D$  ضریب انتشار یون کلرید در بتن بر حسب  $m^2/s$  و  $D_{ref}$  ضریب انتشار مرجع یون کلرید در بتن پس از ۳ ماه رویارویی در محیط کلریدی بر حسب  $m^2/s$  به صورت تابعی از نسبت آب به سیمان،  $t$  زمان رویارویی آزمون در محیط کلریدی بر حسب ماه،  $t_{ref}$  زمان رویارویی مرجع و برابر ۳ ماه و  $n$  ضریب سن بتن به صورت تابعی از نسبت آب به سیمان،  $U$  انرژی فعال‌سازی در فرایند انتشار بر حسب  $J.mol^{-1}.K^{-1}$  ثابت گازها برابر  $R$   $J.mol^{-1}.K^{-1}$  بر حسب  $T$ ،  $8/314$  دمای آزمون در محیط کلریدی بر حسب کلوین

( $K$ ) و  $T_{ref}$  دمای مرجع پس از ۳ ماه رویارویی در محیط کلریدی بر حسب کلوین ( $K$ )، مقدار نسبت  $U/R$  در منطقه خلیج فارس برابر  $2948 K$  بدست آمده است [۷، ۱۱۶]. همچنین،  $h$  رطوبت نسبی محیط کلریدی بر حسب درصد و  $hc$  رطوبت نسبی بحرانی و برابر  $75\%$  می‌باشد [۷۰].

علاوه بر ضریب انتشار یون کلرید در بتن، مدلی تجربی برای غلظت یون کلرید سطحی در بتن در منطقه خلیج فارس ارائه شده است. خاقانپور و همکاران [۱۲] مدلی تجربی برای پیش‌بینی غلظت یون کلرید سطحی در بتن با نسبت‌های آب به سیمان مختلف در ناحیه جزرومدی در منطقه خلیج فارس مطابق رابطه (۳) بدست آورده‌اند.

$$C_s = K t^d + C_0 \quad (3)$$

که در آن،  $C_s$  میزان درصد وزنی یون کلرید در سطح بتن،  $t$  زمان رویارویی آزمون در محیط کلریدی و  $K$  و  $d$  و  $C_0$  ثابت هستند.

### ب- مرحله گسترش خوردگی

این مرحله پس از زمان شروع خوردگی آغاز می‌شود و تا زمان فروپاشی سازه ناشی از خوردگی ادامه دارد. با افزایش غلظت یون کلرید روی سطح میلگرد، به تدریج پس از  $T_{corr}$  محصولات خوردگی یا زنگ آهن تولید می‌شود و شدت جریان خوردگی و در نتیجه آن درصد خوردگی افزایش می‌یابد.

محققان زیادی مدل‌های تجربی برای پیش‌بینی شدت جریان خوردگی میلگرد در بتن ناشی از نفوذ یون کلرید را پیش‌بینی کرده‌اند [۱۵-۱۳]. وو و استوارت [۱۶] در مطالعه خود شدت جریان خوردگی میلگرد ناشی از نفوذ یون کلرید در بتن بدون پوزولان با نسبت‌های آب به سیمان مختلف را مطابق رابطه (۴) پیش‌بینی کردند.

$$i_{corr}(t) = 32.1(1-w/c)^{-1.64} t_p^{-0.29} / x \quad (4)$$

تعمیر می‌باشد. این دو روش تعمیر در زمان شروع ترک خوردگی پوشش بتنی اعمال می‌شود.

## ۲- مدلسازی عددی

با استفاده از مدل المان محدود یک ستون بتن مسلح با مقطع مربع، تحلیل وابسته به زمان تغییرات عرض ترک خوردگی پوشش بتنی، قطر میلگردهای طولی و عرضی و همچنین درصد خوردگی میلگردهای طولی و عرضی در اثر خوردگی ناشی از نفوذ یک بعدی یون کلرید در بتن انجام شده است.

### ۲-۱- مشخصات ستون بتنی مسلح و مصالح مصرفی

#### قبل از خوردگی

ابعاد مقطع، ارتفاع ستون، ضخامت پوشش بتنی اولیه، قطر میلگرد طولی، تعداد میلگرد طولی در مقطع، قطر میلگرد عرضی و فاصله میلگردهای عرضی به ترتیب برابر ۲۵۰ میلیمتر، ۱۸۰۰ میلیمتر، ۳۵ میلیمتر، ۱۶ میلیمتر، ۸، ۸ میلیمتر و ۸۰ میلیمتر می‌باشد. مشخصات مکانیکی میلگردهای طولی و عرضی در جدول ۱ خلاصه شده است. مقاومت فشاری بتن برابر ۳۰ مگاپاسکال فرض شده است.

که در آن،  $i_{corr}(t)$  شدت جریان خوردگی میلگرد ناشی از نفوذ یون کلرید،  $w/c$  نسبت آب به سیمان،  $t_p$  زمان رویارویی پس از زمان شروع خوردگی و  $x$  فاصله سطح بتن تا سطح میلگرد می‌باشد.

به منظور بررسی تاثیر خوردگی روی عملکرد و دوام سازه‌های بتن مسلح و افزایش عمر مفید این سازه‌ها در حین کاهش هزینه، باید با توجه به مدل‌های عددی پیش‌بینی پدیده خوردگی در طول چرخه عمر سازه، روش‌های مختلف تعمیر و نگهداری سازه‌ها مدلسازی شود و بهینه‌ترین روش با توجه به عملکرد سازه تحت تاثیر بار ثقلی و جانبی و پدیده خوردگی به طور همزمان، انتخاب شود.

در این تحقیق، با توجه به تحقیقات گسترده از مهندسين مجری روش‌های تعمیر و نگهداری سازه‌های بتن مسلح در معرض خوردگی کلریدی در جنوب ایران، دو روش تعمیر و نگهداری ستون بتن مسلح در معرض خوردگی ناشی از نفوذ یون کلرید در بتن در ناحیه جزرومدی منطقه خلیج فارس ارائه شده است. روش اول، استفاده از پوشش سطحی پلی اورتان ( $PU$ ) روی سطح بتن و روش دوم، استفاده از شاتکریت کردن بتن روی سطح پوشش بتنی قبل از اعمال

جدول ۱- مشخصات مکانیکی میلگردهای طولی و عرضی

Bar Diameter		16 mm	8 mm
Yield strain	$\epsilon_y$	0.00252	0.00247
Yield stress (MPa)	$\sigma_y$	530	510
Elastic modulus (MPa)	$E_s$	210000	212099
Hardening strain	$\epsilon_{sh}$	0.0083	No plateau
Strain at maximum stress	$\epsilon_u$	0.06	0.06033
Maximum stress (MPa)	$\sigma_u$	630	616
Fracture strain	$\epsilon_r$	0.18	0.161

خوردگی مطابق رابطه (۵)، مستخرج از رابطه (۱)، تخمین زده شود.

$$T_{corr} = \left( \frac{x^2}{4D} \right) \times \left( \operatorname{erf}^{-1} \left( \frac{C_s - C_{cr}}{C_s - C_i} \right) \right)^2 \quad (5)$$

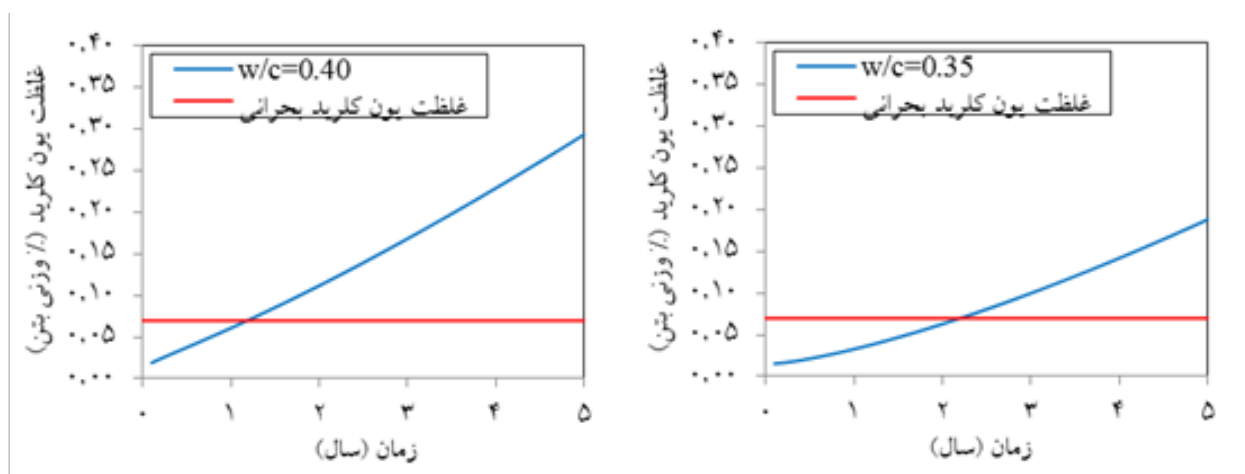
## ۳- تجزیه و تحلیل نتایج

### ۳-۱- پیش‌بینی زمان شروع خوردگی

به منظور محاسبه زمان شروع ترک خوردگی پوشش بتنی به دلیل انبساط محصولات خوردگی، بایستی زمان شروع

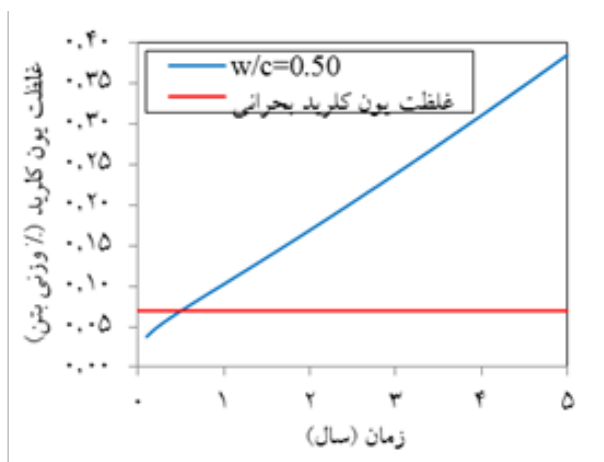
برای منطقه خلیج فارس را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، زمانی که غلظت یون کلرید در بتن به مقدار بحرانی ( $C_{cr}$ ) خود یعنی ۰/۰۷ درصد وزنی بتن برای منطقه خلیج فارس می‌رسد، فرایند خوردگی شروع می‌شود و مرحله گسترش خوردگی آغاز می‌شود.

با توجه به رابطه (۵)، زمان شروع خوردگی میلگرد ناشی از نفوذ یون کلرید برای طرح اختلاط بتن با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۳۵، ۰/۴۰ و ۰/۵۰ به ترتیب برابر ۲/۲۶، ۱/۳۵ و ۰/۵۰ سال می‌باشد. شکل ۱ نمودار غلظت یون کلرید بر حسب زمان بر اساس رابطه (۱) و با جایگذاری روابط (۲) و (۳) برای ضریب انتشار یون کلرید و غلظت کلرید سطحی



(ب)

(الف)



(ج)

شکل ۱- غلظت یون کلرید در سطح میلگرد بر حسب زمان برای بتن حاوی سیمان پرتلند

(الف)  $w/c = 0.35$  (ب)  $w/c = 0.40$  (ج)  $w/c = 0.50$

بهره‌برداری و حتی در حین ساخت دچار تخریب شده‌اند. بدین منظور، روش‌های تعمیر و نگهداری سازه‌های بتن مسلح در مناطق دریایی به منظور افزایش عمر مفید این سازه‌ها و کاهش هزینه‌های تخریب و بازسازی مجدد، حائز اهمیت می‌باشد.

نتایج حاصل از شکل ۱ حاکی از آن است که بتن حاوی سیمان پرتلند و بدون پوزولان و ضخامت پوشش بتنی کم برای محیط‌های دریایی خورنده مانند منطقه خلیج فارس مناسب نیست. به طوریکه، بسیاری از پروژه‌های عمرانی مانند پل‌ها، اسکله‌ها و باراندازها در سال‌های اولیه



همانطور که ذکر شد، یکی از روش‌های تعمیر و نگهداری سازه‌های بتن مسلح در معرض خوردگی، استفاده از انواع پوشش‌های سطحی بر روی سطح خارجی بتن است. در این تحقیق روشی به منظور مدلسازی این پوشش‌های سطحی استفاده شده است که در ادامه برای پوشش سطحی پلی اورتان ( $PU$ ) قابل استفاده در این تحقیق به عنوان روش تعمیر، توضیح داده خواهد شد.

### ۳-۲- مدلسازی پوشش بتنی معادل پوشش سطحی بتن در روش تعمیر به کمک پوشش سطحی پلی اورتان

خانزاده و همکاران [۳]، زمان از بین رفتن انواع پوشش‌های سطحی را از زمان مصرف این پوشش‌ها روی سطح بتن در تحقیق خود بدست آوردند. در تحقیق حاضر، پوشش پلی اورتان ( $PU$ ) به دلیل عملکرد بهتر در محیط خورنده کلردی از میان سایر پوشش‌ها به عنوان یکی از روش‌های تعمیر و نگهداری انتخاب شد. به منظور مدلسازی پوشش  $PU$ ، از داده‌های مربوط به غلظت کلرید سطحی و ضریب انتشار یون کلرید در بتن بدون پوشش  $PU$  و دارای پوشش  $PU$  در زمان مصرف و در زمان از بین رفتن این نوع پوشش استفاده شده است. با استفاده از این داده‌ها و به کمک رابطه (۶) می‌توان از اختلاف مقدار  $x$  برای آزمون بتنی دارای پوشش  $PU$  و آزمون بتنی بدون پوشش  $PU$ ، مقدار پوشش بتنی معادل پوشش سطحی  $PU$  را محاسبه کرد.

$$x = \operatorname{erf}^{-1} \left( \frac{C_s - C_{cr}}{C_s - C_i} \right) \times 2\sqrt{D.t} \quad (6)$$

که با توجه به توضیحات داده شده، مقدار پوشش بتنی معادل پوشش سطحی  $PU$ ، برابر  $31/2$  میلیمتر محاسبه می‌شود.

در این تحقیق، زمان اعمال روش‌های تعمیر و نگهداری شامل استفاده از شاتکریت و پوشش سطحی  $PU$ ، در زمان شروع ترک‌خوردگی پوشش بتنی می‌باشد. در ادامه نحوه محاسبه زمان ترک‌خوردگی پوشش بتن در اثر خوردگی با

توجه به شدت جریان خوردگی و مشخصات بتن توضیح داده خواهد شد.

### ۳-۳- پیش‌بینی زمان شروع ترک خوردگی پوشش بتنی

زمان شروع ترک خوردگی پوشش بتنی مطابق رابطه (۷) توسط لیو و ویرز<sup>۹</sup> [۱۷] ارائه شده است.

$$t_{cr} = \frac{W_{crit}^2}{2k_p} \quad (7)$$

که در آن،  $W_{crit}$  مقدار کل محصولات خوردگی که فضای متخلخل بتن اطراف میلگرد را پر می‌کند و منبسط می‌شود،  $k_p$  نرخ تولید محصولات خوردگی مطابق رابطه (۸) ارائه شده توسط وال<sup>۹</sup> [۱۸] می‌باشد.

$$k_p = 9.8 \times 10^{-5} \frac{\pi d_0 i_{corr}(t)}{\alpha} \quad (8)$$

که در آن،  $i_{corr}(t)$  شدت جریان خوردگی میلگرد ناشی از نفوذ یون کلرید،  $d_0$  قطر اولیه میلگرد و  $\alpha$  نسبت وزن ملکولی فولاد و وزن ملکولی محصولات خوردگی می‌باشد.

با توجه به رابطه (۷)، زمان شروع ترک خوردگی پوشش بتنی، در حالتی که روش‌های تعمیر اعمال نشده است، برای طرح اختلاط بتن با نسبت‌های آب به سیمان  $0/35$ ،  $0/40$  و  $0/50$  به ترتیب برابر  $3/90$ ،  $3/53$  و  $2/69$  سال محاسبه می‌شود.

### ۳-۴- پیش‌بینی عرض ترک خوردگی پوشش بتنی

در حالت کلی، عرض ترک خوردگی پوشش بتنی ناشی از تخریب یک عضو بتن مسلح مطابق رابطه (۹) محاسبه می‌شود [۱۹].

$$w = K (\Delta A_s - \Delta A_{s0}) \quad (9)$$

که در آن،  $\Delta A_s$  سطح مقطع کاهش یافته میلگرد برحسب میلیمترمربع در زمان  $t$  پس از زمان شروع ترک خوردگی،  $\Delta A_{s0}$  سطح مقطع کاهش یافته میلگرد برحسب

<sup>۸</sup> Liu and Weyers

<sup>۹</sup> Val

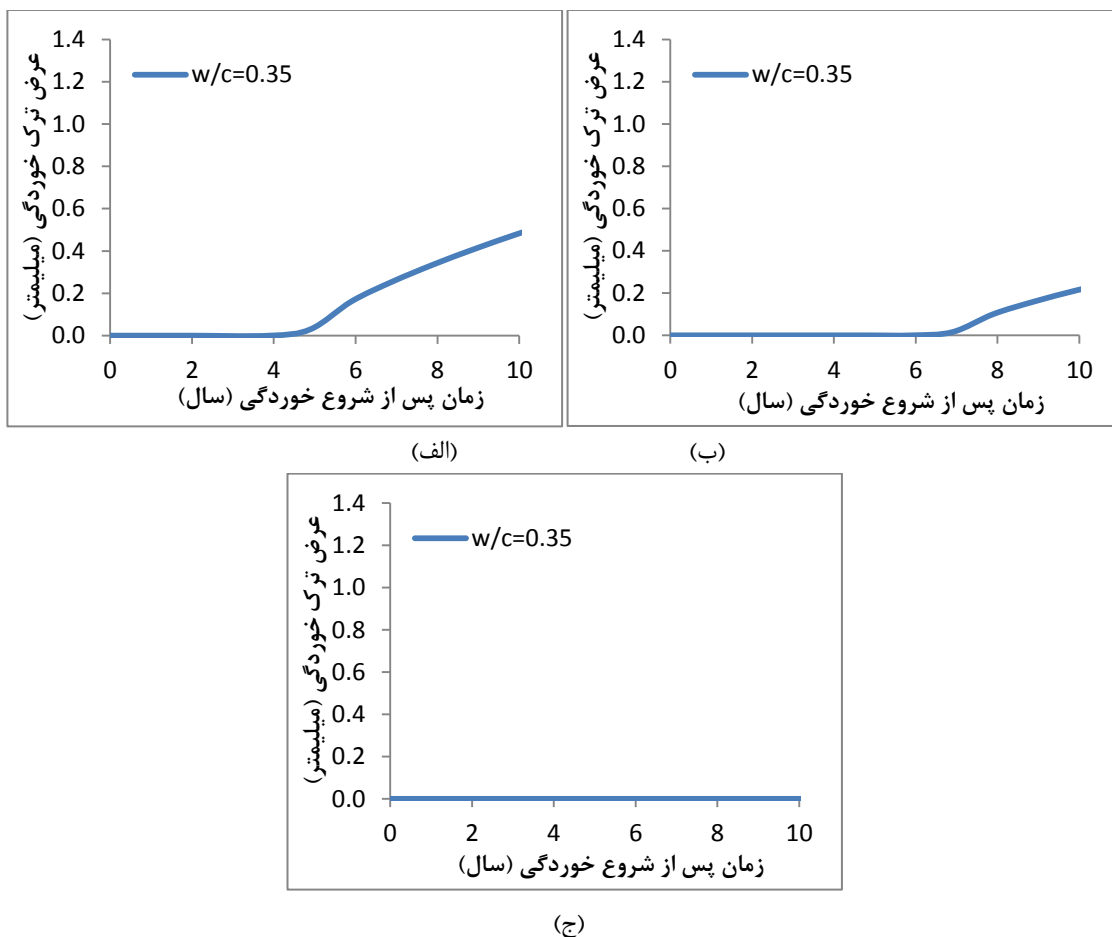
میلیترمربع در زمان شروع ترک خوردگی و  $K$  ضریب تجربی و برابر  $0/0575$  می باشد.

کاشانی و همکاران [۲۰] زمان عمر مفید میلگرد را زمانی محاسبه کردند که عرض ترک در پوشش بتنی در اثر خوردگی به مقدار  $0/5$  میلیمتر برسد. این مقدار بحرانی عرض ترک در پوشش بتنی برای حالت حدی بهره برداری تعیین شده است.

شکل های ۲-۴ به ترتیب، عرض ترک خوردگی پوشش بتنی تا زمان ۱۰ سال پس از زمان شروع خوردگی را برای ستون بتن مسلح بدون استفاده از تعمیر، استفاده از شاتکریت و استفاده از پوشش سطحی  $PU$  برای بتن با نسبت آب به سیمان  $0/35$ ،  $0/40$  و  $0/50$  نشان می دهد.

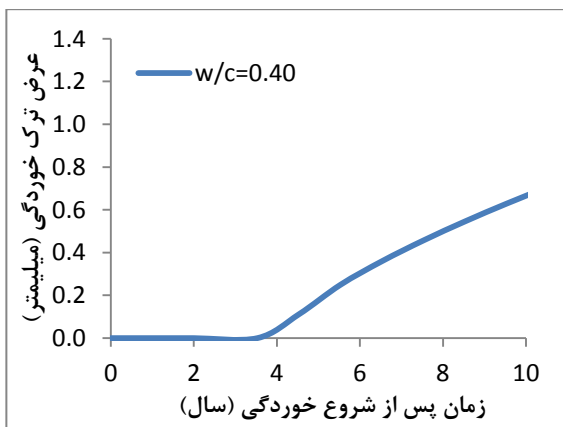
همانطور که در شکل ۲ مشخص است، عرض ترک خوردگی پوشش بتنی قبل از زمان شروع ترک خوردگی بدون استفاده از تعمیر، برابر صفر است و پس از زمان شروع

ترک خوردگی افزایش می یابد. مقایسه شکل ۲ و ۳ نشان می دهد که با استفاده از شاتکریت روی سطح بتن به ضخامت  $7$  میلیمتر نسبت به روش بدون تعمیر، عرض ترک به ترتیب در بتن با نسبت های آب به سیمان  $0/35$ ،  $0/40$  و  $0/50$ ،  $0/56$ ،  $0/50$  و  $0/42$  کاهش می یابد. همچنین، شکل ۲ نشان می دهد که با استفاده از شاتکریت روی بتن، زمان شروع ترک خوردگی پس از اعمال شاتکریت به ترتیب در بتن با نسبت های آب به سیمان  $0/35$ ،  $0/40$  و  $0/50$  به  $5/9$ ،  $5/4$  و  $4/1$  سال افزایش می یابد. با توجه به شکل ۳، عرض ترک در بتن با آب به سیمان مختلف در اثر استفاده از روش تعمیر اعمال پوشش سطحی  $PU$  روی سطح بتن تا زمان ۱۰ سال برابر صفر است. این نتیجه بدین معنی است که زمان شروع ترک خوردگی پس از اعمال  $PU$  تا زمان ۱۰ سال رخ نداده است.

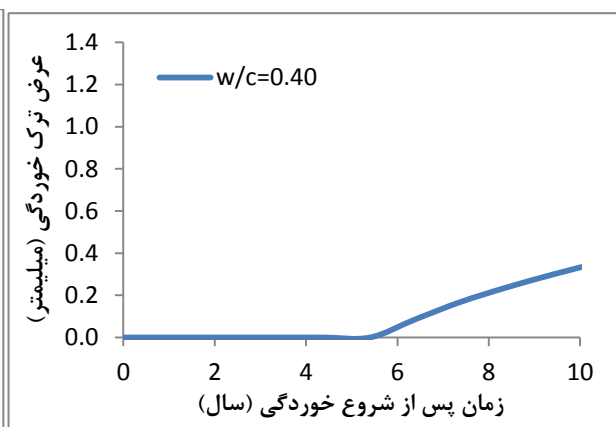


شکل ۲- عرض ترک خوردگی پوشش بتنی بر حسب زمان

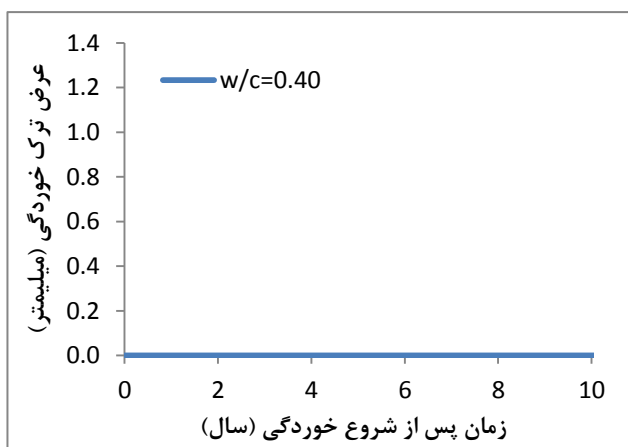
(الف) بدون اعمال تعمیر (ب) استفاده از شاتکریت (ج) استفاده از پوشش سطحی  $PU$  ( $w/c = 0.35$ )



(ب)

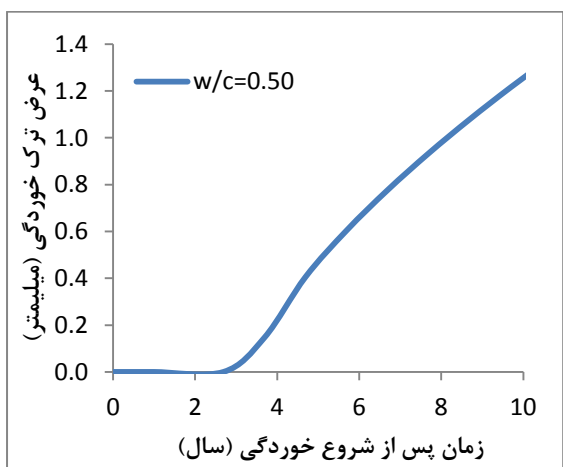


(الف)

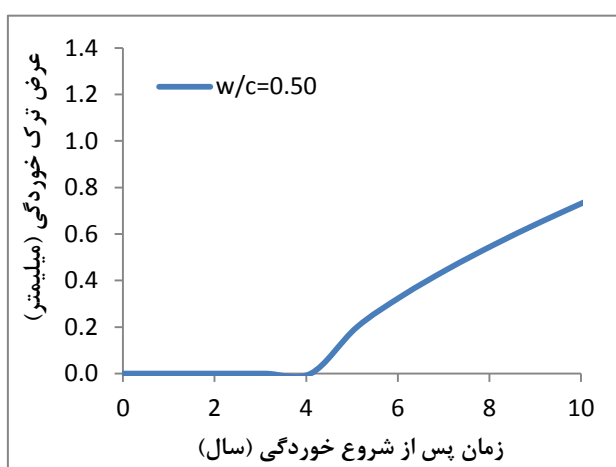


(ج)

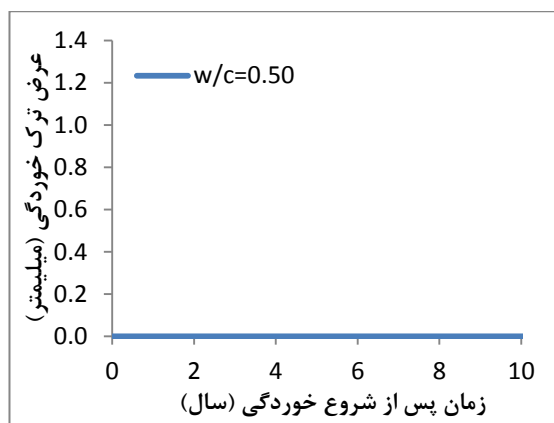
شکل ۳- عرض ترک خوردگی پوشش بتنی برحسب زمان  
(الف) بدون اعمال تعمیر (ب) استفاده از شاتکریت (ج) استفاده از پوشش سطحی  $(w/c = 0.40)$  PU



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۴- عرض ترک خوردگی پوشش بتنی برحسب زمان (الف) بدون اعمال تعمیر، (ب) استفاده از شاتکریت و (ج) استفاده از پوشش سطحی  $PU (w/c = 0.50)$

### ۳-۵- محاسبه قطر میلگردهای عرضی و طولی پس از خوردگی

قطر کاهش یافته میلگردهای طولی ( $dt$ ) و عرضی ( $dt_{tie}$ ) به ترتیب، به کمک روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$dt = d_0 - \alpha P_{avg} \quad (10)$$

$$dt_{tie} = d_{0\_tie} - \alpha P_{avg\_tie} \quad (11)$$

که در آن،  $d_0$  و  $d_{0\_tie}$  به ترتیب قطر اولیه میلگردهای طولی و عرضی قبل از شروع فرایند خوردگی می‌باشد.  $\alpha$  برای خوردگی یکنواخت میلگرد برابر ۲ و برای خوردگی حفره‌ای و موضعی میلگرد بسته به میزان خوردگی، بین ۴ تا ۸ متغیر است [۱۹].  $P_{ave}$  میانگین عمق خوردگی براساس کاهش جرم حجمی در زمان پس از شروع خوردگی می‌باشد که مطابق رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$P_{ave}(t) = \kappa \int_{T_{cor}}^t i_{corr}(t) dt \quad (12)$$

که در آن،  $\kappa$  ضریب تبدیل واحد از  $\mu A/cm^2$  به  $mm/year$  و برابر  $0.116$ ،  $i_{corr}(t)$  چگالی جریان خوردگی میلگردها در زمان پس از زمان شروع خوردگی مطابق رابطه (۴) می‌باشد.

با محاسبه قطر میلگردهای طولی و عرضی در هر زمان پس از خوردگی، می‌توان درصد خوردگی میلگردهای طولی و عرضی را در هر زمان محاسبه نمود.

### ۳-۶- محاسبه درصد خوردگی میلگردهای طولی و عرضی

در نهایت، با توجه به روابط (۱۳) و (۱۴) می‌توان به ترتیب درصد خوردگی میلگردهای طولی ( $\psi$ ) و عرضی ( $\psi_{tie}$ ) را بدست آورد.

$$\psi = 100 \left( 1 - \left( \frac{dt}{d_0} \right)^2 \right) \quad (13)$$

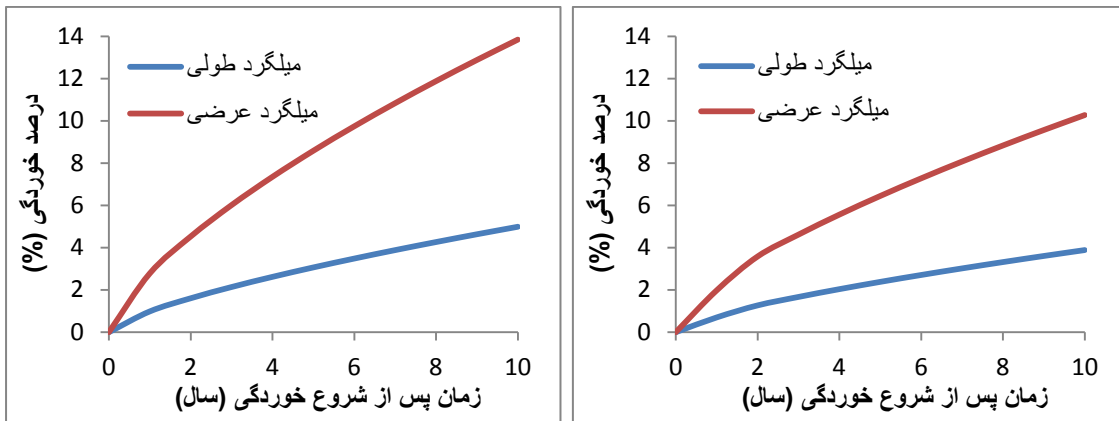
$$\psi_{tie} = 100 \left( 1 - \left( \frac{dt_{tie}}{d_{0\_tie}} \right)^2 \right) \quad (14)$$

شکل ۵- (ب و ج) نشان می‌دهد که درصد خوردگی میلگرد طولی و عرضی به ترتیب  $22/0\%$  و  $25/8\%$  در روش تعمیر استفاده از شاتکریت، و  $43/9\%$  و  $48/8\%$  در روش تعمیر استفاده از پوشش سطحی  $PU$  نسبت به بدون اعمال تعمیر کاهش یافته است.

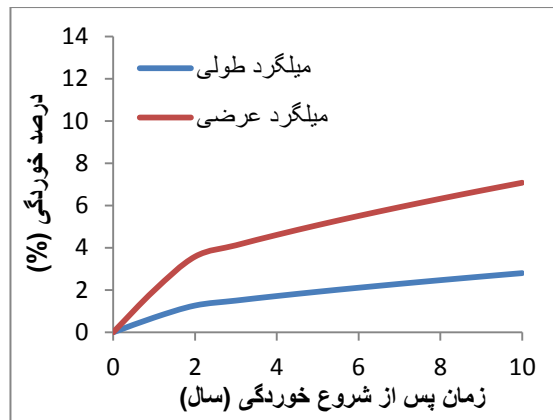
شکل ۶- (ب و ج) نشان می‌دهد که درصد خوردگی میلگرد طولی و عرضی به ترتیب  $22/2\%$  و  $25/7\%$  در روش تعمیر استفاده از شاتکریت، و  $43/8\%$  و  $48/7\%$  در روش تعمیر استفاده از پوشش سطحی  $PU$  نسبت به بدون اعمال تعمیر کاهش یافته است.

تعمیر استفاده از پوشش سطحی  $PU$  نسبت به بدون اعمال تعمیر کاهش یافته است.

شکل ۷- (ب و ج) نشان می‌دهد که درصد خوردگی میلگرد طولی و عرضی به ترتیب  $۲۴/۳\%$  و  $۲۸/۳\%$  در روش تعمیر استفاده از شاتکریت، و  $۴۹/۷\%$  و  $۵۵/۴\%$  در روش

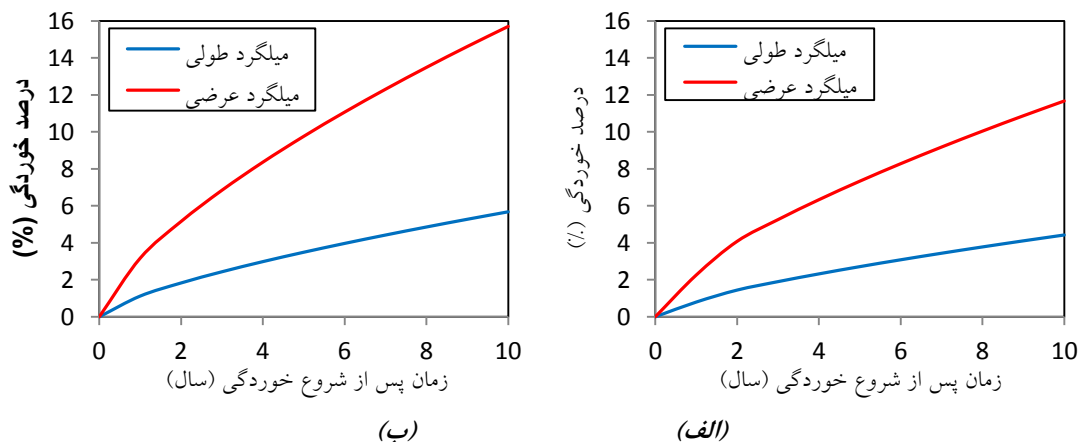


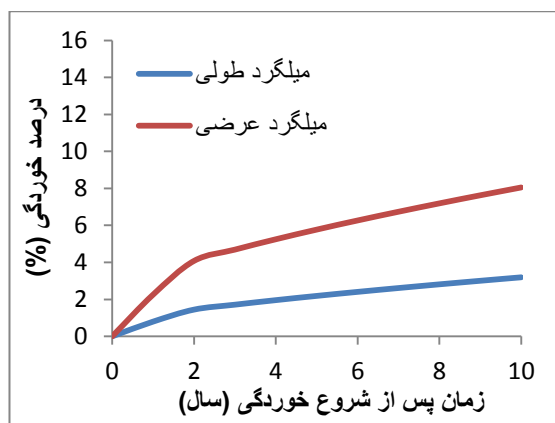
(ب) (الف)



(ج)

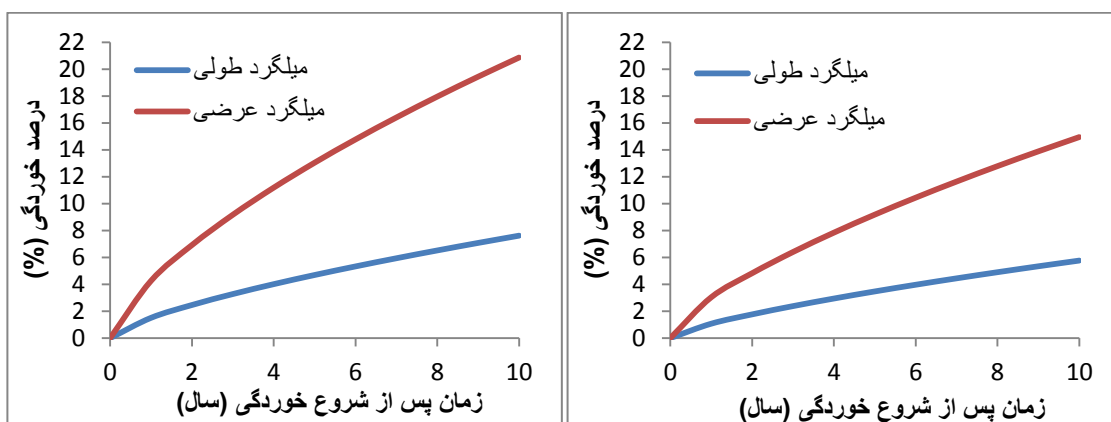
شکل ۵- درصد خوردگی میلگردهای طولی و عرضی برحسب زمان (الف) بدون اعمال تعمیر، (ب) استفاده از شاتکریت و (ج) استفاده از پوشش سطحی  $PU (w/c = 0.35)$





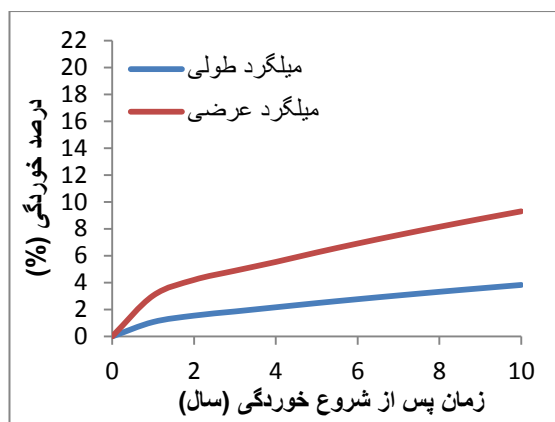
(ج)

شکل ۶- درصد خوردگی میلگردهای طولی و عرضی برحسب زمان (الف) بدون اعمال تعمیر، (ب) استفاده از شاتکریت و (ج) استفاده از پوشش سطحی PU (w/c = 0.40)



(ب)

(الف)



(ج)

شکل ۷- درصد خوردگی میلگردهای طولی و عرضی برحسب زمان (الف) بدون اعمال تعمیر، (ب) استفاده از شاتکریت و (ج) استفاده از پوشش سطحی PU (w/c = 0.50)

تعمیر و نگهداری سازه‌های بتن مسلح تحت تاثیر خوردگی در محیط‌های دریایی مانند منطقه خلیج فارس به منظور افزایش دوام، عملکرد، عمر مفید و کاهش هزینه بازسازی این سازه‌ها حائز اهمیت می‌باشد.

در این تحقیق، ضخامت پوشش بتنی معادل پوشش سطحی پلی اورتان با استفاده از نتایج آزمون‌های سایت برای آزمون‌های بتنی بدون پوشش سطحی و با پوشش سطحی، به منظور مدلسازی و شبیه‌سازی عملکرد این پوشش سطحی در کاهش خوردگی کلریدی محاسبه شده است. استفاده از دو روش اعمال پوشش سطحی و شاتکریت روی سطح خارجی مقطع سازه بتن مسلح در زمان شروع ترک خوردگی به عنوان تعمیر و نگهداری ستون خورده شده بتن مسلح با مقطع مربعی در طول زمان ۱۰ سال مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، عرض ترک خوردگی پوشش بتنی، کاهش قطر میلگردهای طولی و عرضی و درصد خوردگی میلگردهای طولی و عرضی برای بتن حاوی سیمان پرتلند با نسبت‌های آب به سیمان مختلف محاسبه شده است. نتایج حاکی از آن است که درصد خوردگی میلگردهای طولی و عرضی با استفاده از پوشش سطحی پلی اورتان نسبت به استفاده از شاتکریت به ضخامت ۷ میلیمتر کمتر است. همچنین، عرض ترک خوردگی پوشش بتنی با استفاده از روش تعمیر پلی اورتان تا زمان ۱۰ سال برابر صفر و در روش استفاده از شاتکریت نسبت به روش بدون تعمیر کمتر است. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد با افزایش نسبت آب به سیمان، درصد خوردگی میلگردهای طولی و عرضی و عرض ترک خوردگی پوشش بتنی افزایش می‌یابد.

#### مراجع

- [1] Cho, S.H., Chung, L., Roh, Y.S. (2005). "Estimation of rebar corrosion rate in reinforced concrete structure." *Corros. Rev.*, 329-353.
- [2] Enright, M.P., and Frangopol, D.M. (1999). "Maintenance planning for deteriorating concrete bridges." *J. Struct. Eng.*, 10.1061/(ASCE)0733-9445, 125(12), 1407-1414.
- [3] Khanzadeh Moradillo, M., Shekarchi, M., Hoseini, M. (2012). "Time-dependent performance of concrete surface coatings in tidal zone of marine environment." *Constr. Build. Mater.*, 30, 198-205.
- [4] Ghoddousi, P., Ganjian, E., Parhizkar, T., Ramezani-pour, A.A. (1998). "Concrete technology in the environmental conditions of Persian Gulf." *BHRC Publication*.
- [5] Luping, T. (1996). "Chloride Transport in Concrete, Measurement and Prediction." *Ph.D. Dissertation, Chalmers University of Technology, Department of Building Materials, Goteborg, Sweden, 104 pp.*
- [6] Saetta, A.V., Scotta, R.V., Vitaliani, R.V. (1993). "Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete." *ACI Mater. J.*, 90(5), 441-451.
- [7] Farahani, A., Taghaddos, H., Shekarchi, M. (2015). "Prediction of long-term chloride diffusion in silica fume concrete in a marine environment." *Cem. Concr. Compos.*, 59, 10-17.
- [8] Ferreira, R.M. (2010). "Optimization of RC structure performance in marine environment." *Eng. Struct.*, 32(5), 1489-1494.
- [9] Chalee, W., Jaturapitakkul, C., Chindapasirt, P. (2009). "Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater." *Marine Structures*, 22, 341-353.
- [10] Farahani, A. (2014). "Performance evaluation of numerical models for study of chloride ion diffusion in concrete structures in Persian Gulf." *M.Sc. Thesis, University of Tehran, School of Civil Engineering, Tehran, Iran, 154 pp.*



- [11] Ehlen, M.A. (2012). "Life-365™ Service Life Prediction Model™ and computer program for predicting the service life and life-cycle cost of reinforced concrete exposed to chlorides." *Manual of Life-365™ Version 2.1, Produced by the Life-365™ Consortium II.*
- [12] Khaghanpour, R., Dousti, A., Shekarchi, M. (2016). "Prediction of cover thickness based on long-term chloride penetration in a marine environment." *J. Perform. Constr. Facil.*, 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000931, 1-10.
- [13] Kong, Q., Gong, G., Yang, J., Song, X. (2006). "The corrosion rate of reinforcement in chloride contaminated concrete." *Low Temperature Architecture Technology*, 111, 1-2.
- [14] Alonso, C., Andrade, C., Gonzalez, J. (1988). "Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcements in carbonated mortar made with several cement types." *Cem. Concr. Res.*, 8, 687-698.
- [15] Liu, T., and Weyers, R.W. (1998b). "Modeling the dynamic corrosion process in chloride contaminated concrete structures." *Cem. Concr. Res.*, 28(3), 365-379.
- [16] Vu, K.A.T., and Stewart, M.G. (2000). "Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models." *Struct. Saf.*, 22(4), 313-333.
- [17] Liu, Y., and Weyers, R.E. (1998a). "Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures." *ACI Mater. J.*, 95(6), 675-681.
- [18] Val, D.V. (2007). "Factors affecting life-cycle cost analysis of RC structures in chloride contaminated environments." *J. Infrastruct. Syst.*, 13(2), 135-143.
- [19] Vidal, T., Castel, A., Francois, R. (2004). "Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete." *Cem. Concr. Res.*, 34(1), 165-174.
- [20] Kashani, M.M., Lowes, L.N., Crewe, A.J., Alexander, N.A. (2014). "Finite element investigation of the influence of corrosion pattern on inelastic buckling and cyclic response of corroded reinforcing bars." *Eng. Struct.*, 75, 113-125.

# ارزیابی مقاومت بتن خود تراکم حاوی نانو مواد با استفاده از روش فراصوتی



صابر دیلمی  
دانشجوی کارشناسی ارشد عمران  
گرایش سازه، دانشگاه گیلان



رحمت مدندوست  
دانشیار گروه عمران  
دانشکده فنی دانشگاه گیلان

## چکیده

در این مطالعه، مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی نانو مواد با استفاده از روش غیر مخرب امواج فراصوتی ارزیابی شد. برای تعیین خواص بتن خود تراکم تازه از آزمایش جریان اسلامپ،  $T_{50}$ ، آزمایش قیف  $V$  و آزمایش جعبه  $L$  استفاده شد. بتن های خودتراکم با ۱۳ طرح اختلاط مختلف حاوی مقادیر بین ۰/۲۵ و ۲ درصد نانو اکسید های سیلیس ( $NS$ )، آلومینیوم ( $NA$ ) و مس ( $NC$ ) که به عنوان ماده چسبنده جایگزین وزن سیمان شده است، در سنین بین ۳ تا ۹۰ روز و دارای مقاومت های فشاری بین ۲۰ و ۵۴ مگاپاسکال، آزمایش شدند. تأثیر عواملی چون نوع و مقدار نانو مواد، شرایط عمل آوری مرطوب و خشک بر رابطه سرعت امواج فراصوتی ( $UPV$ ) و مقاومت فشاری بررسی شد. نتایج آزمایش ها نشان می دهد که نمونه های حاوی  $NS$ ،  $NA$  و  $NC$  به ترتیب با مقادیر ۱/۵، ۰/۲۵ و ۰/۲۵ درصد وزن سیمان (درصد بهینه)، بیشترین  $UPV$  و مقاومت فشاری را دارند.  $UPV$  در نمونه های حاوی درصد بهینه در سنین اول کمتر و در سنین بالا بیشتر از نمونه شاهد شد. رابطه  $UPV$  و مقاومت فشاری نمایی است که ضرایب ثابت این روابط نمایی برای هر نانو مواد و مقادیر مختلف آن ها متفاوت می باشد و همچنین اختلاف  $UPV$  و نمودار این روابط در دو شرایط عمل آوری، برای نمونه های حاوی نانو مواد کمتر از نمونه شاهد شد. تغییرات مقاومت بتن های خودتراکم حاوی نانو مواد حساسیت کمتری نسبت به تغییرات  $UPV$  داشت.

کلمات کلیدی: سرعت امواج فراصوتی، مقاومت فشاری، نانو مواد، بتن خود تراکم

## ۱. مقدمه

دارد. بعضاً مشکل اجرا از نظر ویریه کردن برای بتن های معمولی کاملاً مشهود است. تحقیقات نوین استفاده از بتن خود تراکم را مطرح کرده است که دارای تراکم مناسب و

با توجه به رشد صنعت، ساخت ساختمان ها در تعداد طبقات زیاد انجام میگیرد و تراکم میله گرد را به همراه

آسان، کیفیت و دوام بهتر می باشد. در بتن های خود تراکم، برای بهبود خواص مکانیکی و خواص بتن تازه علاوه بر مواد تشکیل دهنده بتن های نرمال از مواد دیگری نظیر نانو مواد استفاده می شود. ذرات نانو بر خصوصیات بتن خودتراکم تازه و سخت شده اثرات متفاوت و منحصر به فردی از خود نشان می دهند. در این خصوص مطالعاتی هم انجام شده و از نانو مواد هایی نظیر نانو سیلیس [۵-۱]، نانو آلومینیوم [۵ و ۶]، نانو آهن [۵]، نانو مس [۷ و ۸] و ... استفاده شده است.

ارزیابی مقاومت بتن همواره مورد توجه کاربران و محققان بوده است که طبق آیین نامه ها با استفاده از نمونه های استاندارد از بتن تهیه شده، گرفته می شود که البته بیانگر مقاومت واقعی بتن در محل نیستند. لذا در این خصوص مطالعاتی بر روی سازه های موجود به روش های غیر مخرب نظیر چکش اشمیت، امواج فراصوتی و روش های نیمه مخرب نظیر مغزه گیری، نفوذ میل، *pull* و *pull out* صورت گرفته است که روش غیر مخرب امواج فراصوتی مورد توجه در این مقاله است. در این آزمایش هیچگونه خرابی ایجاد نمی شود و علاوه بر آن کم هزینه و به سرعت قابل انجام است. عوامل مختلفی مانند شرایط نگهداری و مقدار رطوبت، ماکزیمم سایز سنگدانه، شکل و اندازه نمونه، نوع سیمان، سن بتن، اثر آرماتور و نسبت های اختلاط بر روی سرعت امواج فراصوتی در بتن موثر می باشد. این روش به طور گسترده روی بتن معمولی انجام شده است که بانگی [۹] مطالعات فراوانی در این زمینه انجام داده است، اما این آزمایش روی بتن خود تراکم به ویژه بتن های حاوی نانو مواد بنظر بطور محدود انجام شده است.

در این مطالعه بتن خود تراکم حاوی سه نوع نانو مواد شامل *NS*، *NA* و *NC* مد نظر می باشد و بررسی ارسال امواج از بتن های یاد شده مورد توجه می باشد. مقدار بهینه این نانو مواد تعیین می شود و با توجه به اهداف این

مطالعه تعیین رابطه مقاومت فشاری و *UPV* و عوامل مؤثر بر این روابط مورد توجه می باشد.

دمیروگا [۱۰] با جایگزین نمودن درصدی از مواد پوزولانی شامل خاکستر بادی و سربراره کوره آهن در سیمان پرتلند تیپ یک به تاثیر هریک و ترکیب آنها بر *UPV* و مقاومت فشاری بتن پرداخته است و رابطه مقاومت فشاری و *UPV*، برای مقادیر و نوع های مختلف افزودنی را نمایی توصیف کرد. پونتس و همکاران [۱۱] نیز برای بررسی تاثیر افزودنی های میکرو و نانو سیلیس بر بتن خودتراکم در سنین اولیه و تخلخل سخت شده از روش *UPV* استفاده کردند. بارلونگا و همکاران [۱۲] خواص بتن خودتراکم سخت شده حاوی افزودنی های معدنی و میکروساختار آن را بررسی کردند و مقاومت فشاری و *UPV* آنها را در طول زمان ارزیابی کردند.

جهت استفاده از نانو مواد در بتن، سوبولوف و همکاران [۱] گزارش کرده اند که با افزودن ۰/۲۵ درصد *NS* موجب افزایش ۱۰ درصد مقاومت ۲۸ روزه می شود. زکی و رجب [۲] بیان کرده اند که استفاده از ۰/۵ درصد *NS* در تمام سنین بیشترین مقاومت فشاری را دارد. نظری و همکاران [۷ و ۸] دریافتند که با افزایش *NC* تا ۳ درصد باعث افزایش ژل سیلیکات کلسیم هیدراته، کاهش کریستال های کلسیم هیدراکسید، بهبود مقاومت و جذب آب بتن می شود. همچنین دریافتند که افزودن بیش از ۴ درصد *NC* باعث کاهش مقاومت فشاری بتن خود تراکم می شود. راشاد [۶] دریافت که با افزودن ۰/۵ تا ۵ درصد *NA* به ملات و ۰/۵ تا ۳ درصد به بتن مقاومت فشاری، کششی، خمشی و مدول الاستیسیته افزایش می یابد.

## ۲. برنامه ی آزمایشگاهی و مصالح

### ۲.۱. مصالح مصرفی

در این مطالعه از سیمان پرتلند نایین نوع ۱-۳۲۵ با وزن مخصوص ۳۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و سطح ویژه

۲۸۵۰ سانتیمتر مربع بر گرم استفاده شده است. از پودر سنگ معدنی به عنوان پر کننده استفاده شده است. در جدول ۱ مشخصات شیمیایی سیمان و پودر سنگ آهک آمده است.

جدول ۱ مشخصات شیمیایی سیمان و پودر سنگ آهک

%	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Cl	I.R	L.O.I
سیمان	۲۱/۸	۵/۳	۳/۳	۵۳/۲۵	-۳/۵ ۴/۵	۲/۰-۱/۶		۰/۰۲۰-۰/۰۰۵	۰/۶۰-۰/۰۷	۱/۵-۱/۰
پودر سنگ	۰/۴۵	۰/۳۳	۰/۰۲	۵۲/۳۵	۰/۰۲	۵۲/۳۵	۹۹/۳			

در این مطالعه از *NS*، *NA* و *NC* تولید شده توسط شرکت *US Research Nanomaterials, Inc* [۱۵] استفاده شده است. *NS* دارای خلوص ۹۸ درصد، میانگین اندازه ذرات ۶۰-۷۰ نانومتر، سطح ویژه ۱۶۰ متر مربع بر گرم و چگالی واقعی ۲/۴ گرم بر سانتیمتر مکعب است. *NA* دارای خلوص ۹۹ درصد، میانگین اندازه ذرات ۲۰ نانومتر، سطح ویژه ۱۳۸ متر مربع بر گرم و چگالی واقعی ۳/۸۹ گرم بر سانتیمتر مکعب است. *NC* دارای خلوص ۹۹ درصد، میانگین اندازه ذرات ۴۰ نانومتر، سطح ویژه ۲۰ متر مربع بر گرم و چگالی واقعی ۶/۴ گرم بر سانتیمتر مکعب است. مشخصات شیمیایی نانو مواد در جدول ۲ آمده است [۱۵].

شن و ماسه رودخانه ای اشباع با سطح خشک متناسب با دانه بندی مجاز استاندارد *ASTM C33/C33M* [۱۳] استفاده شد. مدول نرمی ماسه ۲/۷ است که طبق حدود استاندارد *ASTM C33/C33M* [۱۳] (۳/۱ - ۲/۲)، مناسب می باشد. حداکثر اندازه سنگدانه طبق *EFNARC* [۱۴] برای بتن های خود تراکم ۱۲-۲۰ میلیمتر در نظر گرفته شد. وزن مخصوص ظاهری برای شن و ماسه به ترتیب ۱۷۰۳ و ۲۰۶۵ کیلوگرم بر متر مکعب است. همچنین درصد جذب آب شن و ماسه نیز به ترتیب ۱/۸ و ۱/۲ درصد تعیین گردید. از فوق روان کننده *Civil Flow ۲۸۰* با بنیان شیمیایی پلی کربوکسیلات استفاده شده است. آب مصرفی در این پروژه آب شرب شهرستان رشت می باشد.

جدول ۲ مشخصات شیمیایی نانو مواد

نوع نانو	Ba	Cd	Co	Zn	Sr	Ca	K	P	Mg	Fe	Pb	Mn	Cr	Na	Ti
CuO (ppm)	۰/۷۵	۲/۵	۶/۴	۱۹۵	۲/۳	۴۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۷۵	۸۷	۹۰	۳/۵			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ppm)			≤۲			≤۸۰				≤۲۵		≤۳	≤۴	≤۷۰	
SiO <sub>2</sub> (ppm)						<۱۳۰				<۴۰				<۸۰	<۲۲۰

درصد، *NA* و *NC* با مقادیر ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱/۵ درصد نسبت به وزن سیمان به صورت جایگزین بخشی از سیمان مصرفی به مخلوط افزوده شدند. طرح مخلوط تمامی مخلوط ها در جدول ۳ آمده است.

## ۲.۲. طرح مخلوط بتن خود تراکم

در این مطالعه، طرح مخلوط بتن های خود تراکم به گونه ای اتخاذ شده است که کارایی مناسب توصیه شده *EFNARC* [۱۴] را دارد. *NS* با مقادیر ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲

جدول ۳ طرح مخلوط ها

شماره مخلوط	نوع مخلوط	درصد نانو % مواد	شن ( $kg/m^3$ )	ماسه ( $kg/m^3$ )	پودر سنگ ( $kg/m^3$ )	سیمان ( $kg/m^3$ )	nano SiO <sub>2</sub> ( $kg/m^3$ )	nano CuO ( $kg/m^3$ )	nano Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ( $kg/m^3$ )	آب ( $kg/m^3$ )	فوق روان کننده ( $kg/m^3$ )
۱	Control	۰	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۰/۰	۰	۰	۰	۱۴۸	۷
۲	NS	۰/۵	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۸/۱	۱/۸۵۰	۰	۰	۱۴۸	۷
۳		۱	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۶/۳	۳/۷۰۰	۰	۰	۱۴۸	۷
۴		۱/۵	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۴/۴	۵/۵۵۰	۰	۰	۱۴۸	۷
۵		۲	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۲/۶	۷/۴۰۰	۰	۰	۱۴۸	۷
۶	NC	۰/۲۵	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۹/۰	۰	۰/۹۲۵	۰	۱۴۸	۷
۷		۰/۵	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۸/۱	۰	۱/۸۵	۰	۱۴۸	۷
۸		۰/۷۵	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۷/۲	۰	۲/۷۷۵	۰	۱۴۸	۷
۹		۱/۵	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۴/۴	۰	۵/۵۵	۰	۱۴۸	۷
۱۰	NA	۰/۲۵	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۹/۰	۰	۰	۰/۹۲۵	۱۴۸	۷
۱۱		۰/۵	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۸/۱	۰	۰	۱/۸۵	۱۴۸	۷
۱۲		۰/۷۵	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۷/۲	۰	۰	۲/۷۷۵	۱۴۸	۷
۱۳		۱/۵	۷۵۰	۸۲۸	۲۳۰	۳۶۴/۴	۰	۰	۵/۵۵	۱۴۸	۷

### ۳.۲. آزمایش های انجام شده

آزمایش جریان اسلامپ،  $T_{50}$ ، آزمایش قیف  $V$  و آزمایش جعبه  $L$  برای ارزیابی خواص بتن خود تراکم تازه انجام شد. برای ارزیابی خواص بتن خودتراکم سخت شده از آزمایش های مقاومت فشاری و  $UPV$  استفاده شد. قابل ذکر است که تمامی آزمایش ها در آزمایشگاه بتن دانشکده مهندسی عمران دانشگاه گیلان انجام شده است.

### ۳.۲.۱. آماده سازی نمونه ها

برای ارزیابی توانایی جریان و چسبندگی بتن خود تراکم از آزمایش جریان اسلامپ و  $T_{50}$  استفاده شد. همچنین برای تعیین توانایی پرکنندگی و جریان و توانایی عبور از آزمایش قیف  $V$  و جعبه  $L$  شکل دارای ۳ میله گرد استفاده شد.

پس از انجام آزمایش های بتن خودتراکم تازه و اطمینان از مناسب بودن آن مطابق استاندارد  $BS EN12390-2:2009$  [۱۶] بتن خودتراکم درون قالب های مکعبی با ضلع ۱۰۰ میلیمتر ریخته شد و با یک پارچه مرطوب و یک ورقه پلاستیکی پوشانده شد و در یک محل خشک با دمای ۲۵ درجه سانتیگراد نگهداری شد. نمونه ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج و تا زمان آزمایش در مخزن آبی با دمای ۲۰ درجه سانتیگراد نگهداری شدند. برای حالت خشک نیز نمونه ها تا زمان آزمایش در محیط خشک

آزمایشگاه با دمای ۲۵ درجه سانتیگراد نگهداری شدند. نمونه ها در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز آزمایش شدند و میانگین نتایج ۳ نمونه به عنوان نتیجه نهایی در تحلیل ها استفاده شد.

### ۳.۲.۲. آزمایش سرعت امواج فراصوتی و مقاومت فشاری

مطابق استاندارد  $ASTM C597-16$  [۱۷] آزمایش  $UPV$ ، به وسیله دستگاه پاندیت ( $pundit$ ) با دقت ۰/۱ میکروثانیه و فرکانس انتقال ۵۴ کیلو هرتز به روش انتقال مستقیم بر روی نمونه ها انجام شد. قبل از آزمایش سطح نمونه ها صاف و هموار شد و از گریس برای ارتباط بین مبدل ها و سطح نمونه استفاده شد. با اندازه گیری زمان انتقال موج و استفاده از رابطه ۱،  $UPV$  محاسبه شد.

$$V=L/T \quad (1)$$

در این رابطه ( $T$ ) زمان انتقال موج، ( $L$ ) بعد نمونه و ( $V$ ) سرعت امواج فراصوتی است.

پس از انجام آزمایش امواج فراصوتی، طبق استاندارد  $BS EN 12390-3:2009$  [۱۸] آزمایش مقاومت فشاری با سرعت بارگذاری ۰/۴ مگاپاسکال بر ثانیه نیز بر روی همین نمونه ها به وسیله ی دستگاه جک هیدرولیکی انجام شد.

نتایج آزمایش های بتن خودتراکم تازه و رده آن ها طبق حدود مجاز در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴ نتایج آزمایش های بتن خودتراکم تازه

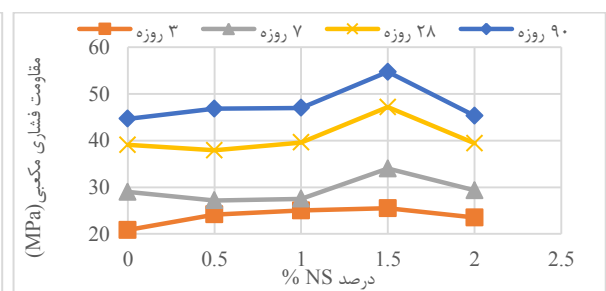
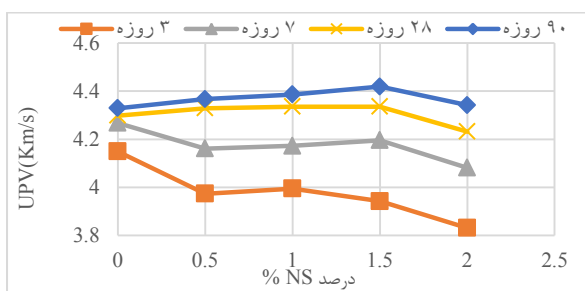
شماره مخلوط	نوع مخلوط	درصد نانو مواد %	Slump Flow(mm)	T500 (s)	V Funnel (s)	L box
۱	Control	۰	۸۴۰	۲/۰۳	۹/۱۱	۰/۹۸
۲	NS	۰/۵	۸۲۵	۲/۱۲	۹/۴۶	۰/۹۵
۳		۱	۸۲۰	۲/۳۶	۱۰/۲۱	۰/۹۱
۴		۱/۵	۸۱۵	۳/۰۹	۱۰/۸۱	۰/۸۶
۵		۲	۸۰۵	۳/۱۶	۱۱/۳۴	۰/۸۳
۶	NC	۰/۲۵	۸۳۲/۵	۲/۲۵	۹/۳۱	۰/۹۶
۷		۰/۵	۸۲۳	۲/۴۲	۹/۹۲	۰/۹۳
۸		۰/۷۵	۸۲۱/۵	۳/۱	۱۰/۲۲	۰/۹۰
۹		۱/۵	۷۹۵/۵	۳/۴۳	۱۱/۴۶	۰/۸۴
۱۰	NA	۰/۲۵	۸۲۱/۵	۳/۰۷	۹/۵۱	۰/۹۲
۱۱		۰/۵	۸۰۷/۵	۳/۲۴	۱۰/۲۱	۰/۸۷
۱۲		۰/۷۵	۷۸۸	۳/۳۲	۱۰/۹۸	۰/۸۵
۱۳		۱/۵	۷۶۲/۵	۳/۹۷	۱۱/۹۲	۰/۸۱
حدود EFNARC			۷۶۰ - ۸۵۰ mm (SF3)	(VS2/VF2) > ۲ s	(VF2) ۹ - ۲۵ s	(PA2) ≥ ۰/۱۸۰

بتن خود تراکم در تمام طرح های اختلاط رعایت شده است.

### ۲.۳. ارزیابی مقاومت فشاری و سرعت امواج فراصوتی

نتایج آزمایش مقاومت فشاری ( $f^c$ ) و UPV در حالت نگهداری خشک (*dry*) و مرطوب (*wet*) در جدول ۵ نشان داده شده است. همچنین به عنوان نمونه تغییرات آن ها برای نمونه های حاوی NS در شرایط مرطوب در شکل ۱ نشان داده شده است.

مطابق EFNARC [۱۴] رده SF3 برای بتن ریزی های قائم مانند ستون های لاغر و سازه های دارای اشکال پیچیده و پر کردن قالب هایی که تراکم میلگرد بالایی دارند، مناسب می باشد و در پایان، سطح بهتری را نسبت به رده های دیگر به وجود می آورد. در رده ( $VS2/VF2$ ) مقاومت در برابر جدا شدگی بهبود می یابد و برای محدود کردن فشار قالب مفید است. رده PA2 نیز برای سازه های مهندسی مناسب است. نتایج نشان می دهند که با افزودن مواد نانو کارایی بتن خود تراکم کاهش یافت. با این حال تمام محدودیت های توصیه شده توسط EFNARC [۱۴] برای



شکل ۱ تغییرات مقاومت فشاری و UPV برای نانو سیلیس در شرایط مرطوب

جدول ۵ نتایج آزمایش مقاومت فشاری و UPV در حالت نگهداری خشک و مرطوب

نوع نانو	نگهداری خشک f'c(Mpa)				نگهداری خشک UPV(Km/s)				نگهداری مرطوب f'c(Mpa)				نگهداری مرطوب UPV(Km/s)				
	درصد نانو	۳روزه	۷روزه	۲۸روزه	۳روزه	۷روزه	۲۸روزه	۹۰روزه	۳روزه	۷روزه	۲۸روزه	۹۰روزه	۳روزه	۷روزه	۲۸روزه	۹۰روزه	
NS	۰	۲۳/۸	۲۹	۳۸/۵۸	۴۱/۵۱	۳/۹۸	۴/۰۳	۴/۱	۴/۱۲	۲۰/۸	۲۹	۳۹/۰۹	۴۴/۶۸	۴/۱۵	۴/۲۷	۴/۳	۴/۳۳
	۰/۵	۲۴/۵	۲۸/۵۱	۴۰/۶۸	۴۸/۸۴	۳/۷۶	۳/۸۷	۴/۱	۴/۱۴	۲۴/۲	۲۷/۱۷	۳۷/۹	۴۶/۸۴	۳/۹۷	۴/۱۶	۴/۳۳	۴/۳۷
	۱	۲۴/۸	۳۰/۵۹	۴۳/۳۴	۴۹/۳۴	۳/۸۴	۳/۹۲	۴/۱۱	۴/۱۵	۲۵	۲۷/۵۱	۳۹/۶	۴۷/۰۱	۳/۹۹	۴/۱۷	۴/۳۴	۴/۳۹
	۱/۵	۲۶/۵	۳۲/۲۹	۴۶/۰۱	۵۲/۳۵	۳/۸۷	۳/۹۵	۴/۱۹	۴/۲۶	۲۵/۵	۳۳/۹۹	۴۷/۱۸	۵۴/۷۳	۳/۹۴	۴/۲	۴/۳۴	۴/۴۲
	۲	۲۳/۵	۳۱/۱	۴۱/۵۱	۴۵	۳/۶۹	۳/۸۸	۴/۰۵	۴/۲۳	۲۳/۵	۲۹/۳۴	۳۹/۴۳	۴۵/۳۴	۳/۸۴	۴/۰۸	۴/۲۳	۴/۳۴
NA	۰	۲۳/۸	۲۹	۳۸/۵۸	۴۱/۵۱	۳/۹۸	۴/۰۳	۴/۱	۴/۱۲	۲۰/۸	۲۹/۰۱	۳۹/۰۹	۴۴/۶۸	۴/۱۵	۴/۲۷	۴/۳	۴/۳۳
	۰/۲۵	۲۷/۸	۳۵/۵۲	۴۵/۵۱	۴۹/۱۸	۳/۸۳	۴/۰۳	۴/۱۵	۴/۳۲	۲۶/۸	۳۲/۴۶	۴۱/۶۸	۵۲/۰۱	۳/۹۶	۴/۱۷	۴/۳۱	۴/۳۵
	۰/۵	۲۷/۵	۳۳/۱۴	۴۲/۸۴	۴۳/۱۸	۳/۸۱	۳/۹۹	۴/۰۲	۴/۰۸	۲۶/۲	۳۱/۱	۴۱/۳۴	۴۵/۸۴	۳/۹	۴/۰۹	۴/۱۸	۴/۳۲
	۰/۷۵	۲۴/۵	۳۲/۶۳	۴۰/۶۸	۴۲/۱۸	۳/۷۴	۳/۹۸	۴/۰۱	۴/۰۳	۲۴/۲	۲۶/۸۴	۳۸/۹۲	۴۱/۰۱	۳/۸۶	۳/۹۶	۴/۱۷	۴/۳
	۱/۵	۲۴/۳	۲۶/۳۴	۳۹/۹۴	۴۰/۶۸	۳/۶۷	۳/۸۴	۳/۹۸	۴	۲۲	۲۶/۰۱	۳۹/۲۶	۴۰/۶۸	۳/۷۹	۳/۹۵	۴/۱۸	۴/۲۱
NC	۰	۲۳/۸	۲۹	۳۸/۵۸	۴۱/۵۱	۳/۹۸	۴/۰۳	۴/۱	۴/۱۲	۲۰/۸	۲۹	۳۹/۰۹	۴۴/۶۸	۴/۱۵	۴/۲۷	۴/۳	۴/۳۳
	۰/۲۵	۲۳/۷	۳۱/۱	۴۰/۱۸	۴۶/۵۱	۳/۸	۴/۰۲	۴/۱	۴/۳	۲۵/۷	۳۲/۱۲	۴۲/۱۸	۴۸/۶۸	۴/۰۱	۴/۰۹	۴/۳۳	۴/۴۴
	۰/۵	۲۱	۲۷/۵۱	۳۹/۶	۴۵/۳۴	۳/۵۸	۳/۸۳	۳/۹۸	۴/۰۵	۲۰/۲	۳۰/۵۹	۳۷/۹	۴۱/۰۱	۳/۷۵	۳/۹۸	۴/۲۱	۴/۲۶
	۰/۷۵	۲۰/۳	۲۶/۵۱	۳۹/۰۹	۴۰/۲۸	۳/۵۴	۳/۶۹	۳/۹۶	۳/۹۹	۱۹/۸	۲۸/۵۱	۳۶/۰۳	۴۰/۶۲	۳/۷۴	۳/۹۷	۴/۰۹	۴/۲۳
	۱/۵	۱۸/۵	۲۴/۵۱	۳۴/۶۷	۳۷/۹	۳/۴۸	۳/۶۲	۳/۸۸	۳/۹	۱۷	۲۵/۶۷	۳۳/۸۲	۳۸/۵۸	۳/۶۶	۳/۹۳	۴/۰۹	۴/۱

علت فعالیت بالایشان باعث تسریع هیدراتاسیون سیمان و مانع از رشد کریستال های هیدرواکسید کلسیم در میان تولیدات هیدراتاسیون می شوند و همچنین حفرات سیمانی را پر می کنند و موجب افزایش مقاومت و بهبود خواص فیزیکی، مکانیکی و دوام بتن می شوند [۱۹-۲۲].

در جدول ۶، درصد اختلاف UPV نمونه های حاوی نانو مواد مذکور نسبت به نمونه شاهد در سنین مختلف آمده است.

مقدار بهینه NS، NA و NC برای بتن خود تراکم سخت شده به ترتیب ۱/۵، ۰/۲۵ و ۰/۲۵ درصد وزن سیمان است. مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه ها حاوی این مقادیر NS، NA و NC در نگهداری خشک به ترتیب ۲۶، ۱۸ و ۱۲ درصد و در نگهداری مرطوب ۲۲، ۱۶ و ۹ درصد نسبت به نمونه های شاهد افزایش یافت. از این پس مقادیر بهینه نانو مواد نام برده شده در این مطالعه مد نظر می باشد. از دلایل این بهبود مقاومت می توان گفت که ذرات نانو به

جدول ۶ مقدار اختلاف UPV نمونه های حاوی نانو مواد نسبت به نمونه شاهد (درصد)

سن (روز)	عمل آوری خشک			عمل آوری مرطوب		
	NS	NA	NC	NS	NA	NC
۳	-۲/۵	-۳/۸	-۴/۴	-۵	-۴/۴	-۳
۷	-۲	۰/۱	-۰/۲	-۱/۶	-۲/۲	-۴
۲۸	۲	۱/۲	۰/۱	۰/۸	۰/۲	۰/۷
۹۰	۳	۴/۸	۴/۴	۲	۰/۵	۲/۶

تأثیر چندانی بر مقاومت ندارند اما باعث کاهش UPV می شوند. با افزایش سن و پیشرفت واکنش هیراتاسیون این تخلخل ها از فرآورده های هیدراتاسیون پر شده و UPV افزایش می یابد.

با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول ۶، UPV در سنین اولیه کمتر از نمونه های شاهد است. علت این پدیده ممکن است این باشد که نانو ذرات با داشتن مساحت سطح ویژه بالا توانایی جذب بیشتر ملکول های آب را در اطراف خود دارد و باعث ایجاد تخلخل های بسیار ریز می شود که

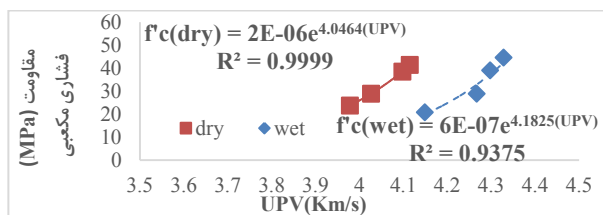


باعث می شود که ذرات نانو به خوبی و یکنواخت پخش نشوند. جمع شدن نانو ذرات باعث ایجاد یک ناحیه ضعف به شکل حفره می شود [۲۳] و به تبع آن میکرو ساختار هیدرات سیمان نمی تواند شکل بگیرد که در نتیجه باعث کاهش مقاومت فشاری می شود. به نظر می رسد که این پدیده تاثیر چشمگیری بر کاهش  $UPV$  دارد که نشان دهنده تاثیر زیاد نانو مواد در  $UPV$  است.

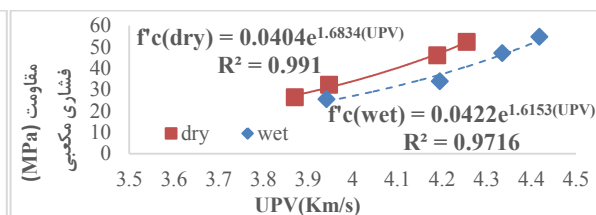
نمودار مقاومت فشاری نسبت به  $UPV$  برای نمونه های شاهد و حاوی درصد های بهینه نانو مواد با رابطه نمایی با دقت بسیار خوبی تخمین زده شد و در شکل ۲ نشان داده شده است.

این پدیده در مطالعات گذشته برای بتن های حاوی دوده سیلیس نیز مشاهده شد. دمیربوگا [۱۰] دریافت که استفاده از مقادیر بالای خاکستر بادی به جای سیمان در کوتاه مدت موجب کاهش شدید مقاومت بتن و  $UPV$  می شود که این افت با گذشت زمان در بازه زمانی ۱۲۰ روز که نهایت زمان آزمایش نمونه هایش بود تا حد زیادی جبران شده بود. وی همچنین دریافت که جایگزینی خاکستر بادی به میزان ۷۰٪ بیشترین کاهش در  $UPV$  و مقاومت بتن را ایجاد نموده است.

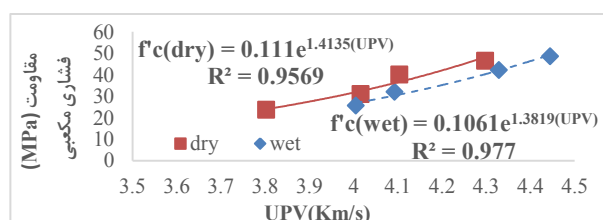
با افزایش درصد نانو مواد بیشتر از مقدار بهینه، مقاومت فشاری و  $UPV$  کاهش می یابد. این اتفاق ممکن است به این دلیل باشد که افزایش میزان پودر نانو از حد بهینه آن



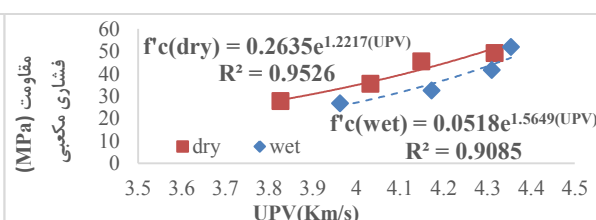
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۲ رابطه مقاومت فشاری و  $UPV$  برای نمونه های شاهد و حاوی درصد بهینه نانو مواد (الف) نمونه شاهد. (ب) نمونه حاوی ۱/۵ درصد  $NS$ . (ج) نمونه حاوی ۰/۲۵ درصد  $NC$ . (د) نمونه حاوی ۰/۲۵ درصد  $NA$ .

شاهد است. علت این پدیده ممکن است این باشد که پودرهای نانو به دلیل نرمی بسیار بالا، ملکول های آب بیشتری را اطراف خود جذب می کنند. در شرایط نگهداری خشک از این ذخیره آب برای انجام واکنش های شیمیایی و هیدراتاسیون استفاده می شود و تا حدودی کاستی های شرایط نگهداری خشک جبران می شود و در نتیجه اختلاف آن ها به حداقل می رسد. همچنین وجود نانو مواد

در شرایط مرطوب نسبت به خشک در تمام سنین به طور متوسط برای نمونه های شاهد، حاوی  $NS$ ،  $NA$  و  $NC$  به ترتیب ۵، ۳/۸، ۳ و ۴ درصد بیشتر است. علت این امر وجود آب در تخلخل های بتن است که باعث می شود امواج فراصوتی سریع تر انتقال یابند [۲۴]. با توجه به این مقادیر و شکل ۳ اختلاف  $UPV$  و نمودارهای دو شرایط نگهداری برای نمونه های حاوی نانو مواد کمتر از نمونه های

در نمونه ها تخلخل را کاهش میدهد و به تبع آن در شرایط مرطوب آب کمتری نسبت به نمونه های شاهد در منافذ وجود دارد، از این رو در مقایسه با نمونه های شاهد، *UPV* نسبت به حالت خشک آن کمتر افزایش می یابد.

با مقایسه ی نمودار شکل ۳ بتن های خودتراکم حاوی نانو مواد نسبت به بتن خودتراکم شاهد می بینیم که دامنه مقاومت فشاری و *UPV* افزایش یافته است و شیب این نمودار کاهش یافته است. یعنی تغییرات مقاومت نمونه های حاوی نانو مواد حساسیت کمتری نسبت به تغییرات *UPV* آن ها دارد.

قابل ذکر است که تفاوت در ساخت نمونه ها، اختلاف در ساختار بتن خود تراکم و عیار سیمان و مواد پر کننده و ممکن است استفاده از نانو ذرات با مشخصه های متفاوت، علت اختلاف در مقاومت ها و درصد بهینه ذرات نانو در این پژوهش و مطالعات مشابه دیگر باشد. بنابراین برای سایر بتن ها نتایج ممکن است متفاوت باشد.

#### ۴. نتایج

در این مطالعه برای ارزیابی مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی نانو مواد از روش امواج فراصوتی استفاده شد. بتن های خودتراکم با ۱۳ طرح اختلاط مختلف حاوی مقادیر بین ۰/۲۵ و ۲ درصد *NS*، *NA* و *NC*، در سنین بین ۳ تا ۹۰ روز تحت آزمایش های امواج فراصوتی و مقاومت فشاری قرار گرفتند و تأثیر عواملی چون نوع و مقدار نانو مواد، شرایط عمل آوری مرطوب و خشک بر سرعت امواج فراصوتی بررسی شد. برای ارزیابی خواص بتن خودتراکم تازه نیز آزمایش های جریان اسلامپ،  $T_{50}$ ، قیف  $V$ ، جعبه  $L$  انجام شد. بر اساس بررسی اطلاعات حاصل از این آزمایش ها می توان نتیجه گرفت که:

۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نشان می دهد که مقدار بهینه *NS*، *NA* و *NC* برای بتن خود تراکم سخت شده به ترتیب ۱/۵، ۰/۲۵ و ۰/۲۵ درصد وزن سیمان است.

مقاومت فشاری ۹۰ روزه نمونه های حاوی این مقادیر *NS*، *NA* و *NC* در عمل آوری خشک به ترتیب ۲۶، ۱۸ و ۱۲ درصد و در عمل آوری مرطوب ۲۲، ۱۶ و ۹ درصد نسبت به نمونه های شاهد افزایش یافت. بتن خودتراکم حاوی ۱/۵ درصد *NS* عمل آوری شده در شرایط مرطوب با مقاومت فشاری ۵۴/۷۳ مگاپاسکال بیشترین مقاومت فشاری را بین سایر بتن های خودتراکم دارد.

۲- نتایج آزمایش امواج فراصوتی نشان می دهد که *UPV* ۹۰ روزه نمونه های حاوی مقادیر بهینه *NS*، *NA* و *NC* در عمل آوری خشک به ترتیب ۳، ۴ و ۴ درصد و در عمل آوری مرطوب ۲، ۰/۵ و ۲ درصد نسبت به نمونه های شاهد افزایش یافت. همچنین *UPV* در نمونه های حاوی درصد بهینه در سنین اول، کمتر و در سنین بالاتر بیشتر از نمونه شاهد است.

۳- با افزایش درصد نانو مواد بیشتر از مقدار بهینه بتن سخت شده، مقاومت فشاری و *UPV* کاهش می یابد، به طوری که نمونه های حاوی درصد های بالا تر *NA* و *NC* در برخی سنین مقاومت فشاری و *UPV* کمتری نسبت به نمونه شاهد دارند.

۴- با توجه به رابطه مقاومت فشاری و *UPV*، مشاهده گردید که تغییرات مقاومت بتن های خودتراکم حاوی نانو مواد حساسیت کمتری نسبت به *UPV* دارد. همچنین *UPV* در عمل آوری مرطوب نسبت به خشک در تمام سنین به طور متوسط برای نمونه های شاهد، حاوی *NS*، *NA* و *NC* به ترتیب ۵، ۳/۸، ۳ و ۴ درصد بیشتر است، اما اختلاف *UPV* و نمودارهای دو شرایط عمل آوری برای نمونه های حاوی نانو مواد، کمتر از نمونه شاهد است.

۵- بر اساس آزمایش های بتن خودتراکم تازه مشاهده شد که با افزایش مقدار نانو مواد کارایی بتن خودتراکم تازه کم می شود.

- [1] Sobolev, K., Flores, I., Torres-Martinez, L.M., Valdez, P.L., Zarazua, E., Cuellar, E.L. (2009). "Engineering of SiO<sub>2</sub> nanoparticles for optimal performance in nano cement based materials". *Nanotechnology in Construction Proceedings of the NICOM3 (3rd International Symposium on Nanotechnology in Construction)*. Prague, Czech Republic, pp 139–148.
- [2] Zaki, S.I., Ragab Khaled, S. (2009). "How nanotechnology can change concrete industry". *1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries*, ISSN 2170–0095, Oran, Algeria, vol. 1, pp 407–414.
- [3] Du, H., Pang, S.D. (2014). "Effect of colloidal nano-silica on the mechanical and durability performances of mortar". *Key Eng. Mater.* 629, pp 443–448.
- [4] Nazari, A., Riahi, S. (2011). "The effects of SiO<sub>2</sub> nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength compacting concrete". *Compos. Eng.* 42 (3), pp 570–578.
- [5] Oltulu, M., Sahi, R. (2013). "Effect of nano SiO<sub>2</sub>, nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and nano Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders on compressive strengths and capillary water absorption of cement mortar containing fly ash". a comparative study, *Energy Build.* 58, pp 292–301.
- [6] Rashad, M.A. (2013). "A synopsis about the effect of nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and nano-clay on some properties of cementitious materials". *A short guide for Civil Engineer, Mater Des.* 52, pp 143–57.
- [7] Nazari, A., Rafieipour, M.H., Riahi, S. (2011). "The effects of CuO nanoparticles on properties of self-compacting concrete with GGBFS as binder". *Mater. Res. J.* 14, pp 307–316.
- [8] Nazari, A., Riahi, S. (2011). "Effects of CuO nanoparticles on compressive strength of selfcompacting concrete". *Indian Acad. Sci.* 36, pp 371–391.
- [9] Bungey, J. H., Grantham, M. G., Millard, S. (2006). "Testing of concrete in structures". *Crc Press*.
- [10] Demirboğa, R., Türkmen, İ., Karakoc, M. B. (2004). "Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixtured concrete". *Cement and Concrete Research*, 34(12), pp 2329-2336.
- [11] Puentes, J., Barluenga, G., Palomar, I. (2015). "Effect of silica-based nano and micro additions on SCC at early age and on hardened porosity and permeability". *Construction and Building Materials* 81, pp 154–161.
- [12] Barluenga, G., Palomar, I., Puentes, J. (2015). "Hardened properties and microstructure of SCC with mineral additions". *Construction and Building Materials* 94, pp 728–736.
- [13] American Society for Testing Material, ASTM C33/C33M–16. (2016). "Standard Specification for Concrete Aggregates", West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [14] EFNARC. (2005). *The European Specification and guidelines for self-compacting concrete*, May.
- [15] US Research Nanomaterials, Inc. 3302 Twig Leaf Lane, Houston, TX77084, USA, [www.us-nano.com](http://www.us-nano.com).
- [16] British Standards Institution, BS EN 12390-2. (2009). *Testing hardened concrete. Making and curing specimens for strength tests*.
- [17] American Society for Testing Material, ASTM C597–16. (2016). "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete". West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- [18] British Standards Institution, BS EN 12390-3. (2009). *Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens*.
- [19] Taheri-Behrooz, F., Memar Maher, B., Shokrieh, M.M. (2015). "Mechanical properties modification of a thin film phenolic resin filled with nano silica particles". *Comput. Mater. Sci.* 96, pp 411–415.
- [20] Du, H., Du, S., Liu, X. (2014). "Durability performances of concrete with nano-silica", *Constr. Build. Mater.* 73, pp 705–712.
- [21] Aly, M., Hashmi, M.S.J., Olabi, A.G., Messeiry, M., Abadir, E.F., Hussain, A.I. (2012). "Effect of colloidal nano-silica on the mechanical and physical behaviour of waste-glass cement mortar". *Mater. Des.* 33, pp 127–135.
- [22] Oltulu, M., Sahin, R. (2014). "Pore structure analysis of hardened cement mortars containing silica fume and different nano-powders". *Constr. Build. Mater.* 53, pp 658–664.
- [23] Li H., Xiao H.G., Ou J.P. (2004). "A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nano phase materials". *Cem Concr Re*;34(3):435–8.
- [24] Safiuddin, M., Raman, S. N., Zain, M. F. M. (2007). "Effect of different curing methods on the properties of microsilica concrete". *Australian journal of basic and applied sciences*, Vol. 1(2), pp 87-95.

# تقویت پیچشی تیرهای بتن مسلح مستطیلی با استفاده از FRP به روشهای شیارزنی و مهار متقابل



محمد رضا توکلی زاده  
استادیار دانشگاه فردوسی مشهد



سیدحسین میرزایی حصار  
دانشجوی کارشناسی ارشد  
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم  
تحقیقات خراسان رضوی نیشابور

## چکیده

امروزه و در دهه های اخیر، به دلایل مختلفی همچون، افزایش بارهای بهره برداری، خطاهای طراحی، خوردگی و پوسیدگی مواد، تغییرات آیین نامه ها، خطاهای اجرایی، تقویت و مرمت سازه های بتنی از موضوعات مورد علاقه بسیاری از محققان بوده است، که درمیان این تحقیقات سهم کمتری به مطالعات در زمینه تقویت پیچشی اعضاء بتن آرمه تعلق دارد. در طراحی بسیاری از اعضاء بتنی همچون تیرهای لبه ای دال ها، شاه تیرهای کناری پل ها، تیرهای با بارگذاری خارج از محور، و تیرهایی که به آنها تیری در وسط دهانه و در راستای متعامد وصل شده است، نیروهای پیچشی مهم بوده و باید در نظر گرفته شوند. هدف از تحقیق حاضر تقویت تیرهای بتنی با استفاده از کامپوزیت FRP، در شرایط یکسان آزمایشگاهی و مقایسه با نمونه شاهد بدون تقویت، به منظور رسیدن به بهترین روش نصب از نظر کسب مقاومت و شکل پذیری می باشد. به این منظور ۵ نمونه تیر بتنی مسلح به عرض ۱۵۰، ارتفاع ۲۰۰ و طول ۱۵۰۰ میلی متر، بعد از تقویت با چیدمان های مختلف، تحت آزمایش بارگذاری پیچشی خالص قرار گرفت. پس از بررسی نتایج و مقایسه با نمونه شاهد، نمونه های دورپیچ کامل کربن، دورپیچ نوار زاویه دار، به ترتیب، ۷۲،۶ و ۶۱،۳ درصد افزایش مقاومت را نسبت به نمونه شاهد از خود نشان دادند.

واژه های کلیدی: تقویت پیچشی، کامپوزیت FRP، تیر بتنی، جداسدگی زودرس، ظرفیت پیچشی

## ۱-مقدمه:

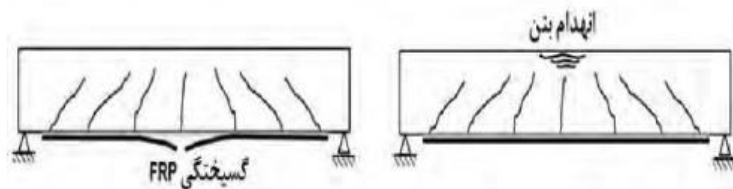
امروزه و در دهه های اخیر به دلایل مختلفی همچون افزایش بارهای بهره برداری، خطاهای اجرایی، تغییرات آیین نامه و ... تقویت و مرمت سازه های بتنی از موضوعات

مورد علاقه بسیاری از محققان بوده است، که از این تحقیقات سهم کمتری به مطالعات در زمینه تقویت پیچشی اعضاء بتن آرمه تعلق دارد.

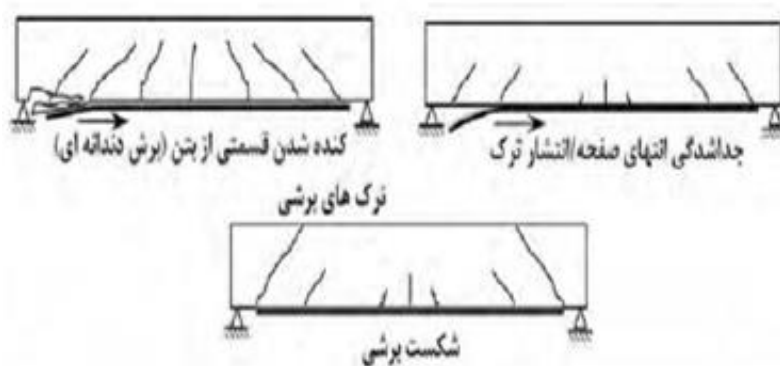
شود. از این رو در تحقیق حاضر به تقویت پیچشی تیرهای بتن مسلح به وسیله ورق های FRP و با استفاده از چیدمان و روش های مختلف نصب پرداخته شده است.

## ۲- حالت های گسیختگی:

به طور کلی گسیختگی به سه دسته خمشی، برشی، جداسدگی تقسیم بندی می شوند. و در حالات جزئی تر به، گسیختگی برشی، گسیختگی برشی-پیچشی، جداسدگی پوشش بتن، جداسدگی بین سطحی ورق انتهایی، جداسدگی بین سطحی ناشی از ترک برشی-پیچشی، جداسدگی بین سطحی در فاصله بین ترکها تقسیم بندی می شوند.



شکل ۱-۲: گسیختگی های معمولی تیر بتنی تقویت شده دربار نهایی



شکل ۲-۲: حالت های مختلف گسیختگی زودرس تیر بتنی تقویت شده دربار نهایی

با کمک روش های گوناگون انجام شده است. با این همه، این موضوع هنوز از اصلی ترین موضوع ها در زمینه کاربرد ورق های FRP در مقاوم سازی می باشد که نظر پژوهشگران بسیاری را به خود جلب کرده است که به اختصار در زیر بیان شده است:

## ۳- پیشینه پژوهش:

در تیرهای بتن آرمه ی تقویت شده با ورق های FRP، به دلیل جداسدگی زودرس و ناگهانی ورق، ممکن است تیر به ظرفیت نهایی خود نرسد.

در سال های اخیر پژوهش های بسیاری در زمینه ی عامل های رویداد پدیده ی جداسدگی و ایجاد دیرکرد در آن

قباره و قریل در سال ۲۰۰۲ مطالعات آزمایشگاهی را برای بهبود مقاومت پیچشی تیرهای بتن مسلح بر روی ۱۱ عدد تیر به طول ۲۴۴۰ میلی‌متر عرض ۳۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر انجام دادند، که ۲ عدد تیر به عنوان نمونه کنترلی و ۸ عدد دیگر با چیدمانهای مختلف *FRP* تقویت شده بود. در این مطالعات از هر دو نوع الیاف شیشه و کربن در یک لایه استفاده شد. تیرها تحت اثر لنگر پیچشی خالص قرار داده شد و مقادیر لنگر نهایی پیچشی، زاویه دوران و تغییر طول نسبی نمونه‌ها را اندازه‌گیری کردند در انتها نتایج نشان داد که چیدمان دور پیچ کامل تیر بهترین نتیجه را از نظر افزایش لنگر نهایی پیچشی و زاویه دوران از خود نشان می‌دهد و چیدمان الیاف با زاویه ۴۵ درجه این اطمینان را می‌دهد که از اثر بخشی الیاف بطور موثر استفاده شده است.

ساروانا پانچاچارام و عبدالجلیل بلاربی در سال ۲۰۰۲ مطالعه آزمایشگاهی بر روی رفتار پیچشی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با کامپوزیت های *FRP* انجام دادند در این تحقیق مطالعه بر روی ۸ عدد تیر به طول ۳۹۶۰ میلی‌متر، ارتفاع و عرض ۲۷۹،۴ میلی‌متر انجام شد، که این تیرها با چیدمان های مختلف تقویت شده بودند. تمام تیرهای تقویت شده با ورقهای *GFRP* افزایش قابل توجهی در مقاومت پیچشی و لنگر پیچشی ترک خوردگی و دوران پیچشی را نشان می‌دادند، چیدمان دور پیچ کامل با زاویه ۹۰ درجه الیاف نسبت به محور طولی، بهترین عملکرد را داشته و این افزایش به مقدار ۱۵۰ درصد در لنگر پیچشی نهایی می‌باشد. استفاده از نوارهای طولی در جهت و راستای تیر افزایش قبل توجهی در لنگر ترک خوردگی را نشان داد. چیدمان *U* شکل حداقل افزایش ظرفیت دوران پیچشی را نشان داد. و این امر به علت جدا شدن لبه ورقها در وجوه کناری تیر بوده است، با این حال بعد از نصب مهارتی ها در اطراف آن، افزایش در ظرفیت پیچشی و زاویه دوران پیچشی رخ می‌دهد، و عمدتاً شکست به دلیل خرد

شدن بتن در اطراف میل مهارتی ها و جدا شدن آنها همراه با ورقها می‌باشد. وقتی از چیدمان نوارهای طولی به همراه نوارهای دور پیچ منقطع استفاده می‌گردد، نتایج افزایش در مقاومت نهایی قبل و بعد از ترک خوردگی را و همچنین انعطاف پذیری و شکل پذیری خوبی را نشان می‌دهند

در سال ۲۰۰۶ کنستانتین و چالی یوریس، مطالعه آزمایشگاهی بر روی ۱۴ عدد تیر بتن مسلح مستطیلی و *T* شکل بدون خاموت و تقویت شده پیچشی با استفاده از الیاف *CFRP* انجام دادند بعد از اندازه‌گیری مقادیری شامل لنگر ترک خوردگی، لنگر نهایی، و زاویه دوران به این نتیجه رسیدند که تیرهای مستطیلی که دور پیچ کامل شده بودند بهترین عملکرد را نشان داده و بعد از آن چیدمان نوارهای دور پیچ منقطع در رتبه بعدی قرار دارد. تیرهای مستطیلی که بانوارهای *U* شکل تقویت شده اند دچار شکست ناشی از جدا شدگی زود رس لایه در وجوه کناری تیر شده‌اند، و این شکل از شکست در تیرهای *T* شکل نیز دیده شد ولی در کل تقویت کردن با پارچه های *FRP* راه حل مناسبی دیده شد.

حمیدرضا رونق و مهران عاملی در سال ۲۰۰۷ با مطالعه آزمایشگاهی بر روی ۱۲ عدد تیر بتن مسلح تقویت شده با الیاف کربن و شیشه در چهار حالت مختلف چیدمان لایه ها با یک و دو لایه تقویت به نتایج زیر رسیدند. چیدمان دور پیچ کامل با ۱ و دو لایه کربن و شیشه بهترین مقاومت پیچشی و نتایج رادر لنگر پیچشی و زاویه دوران پیچشی از خود نشان دادند. بعد از آن چیدمان دور پیچ منقطع و چیدمان پوشش *U* شکل گسترده در طول تیر، و پوشش *U* شکل نوارهای منقطع به ترتیب در جایگاه های بعدی از نظر مقدار لنگر پیچشی و زاویه دوران می‌باشد.

در سال ۲۰۱۰ دیفالا و قباره با مطالعه آزمایشگاهی بر روی ۶ عدد تیر *T* شکل بتن مسلح آنها را بوسیله الیاف *CFRP* تقویت پیچشی کرده و مورد آزمایش قرار دادند، که نتایج آن به شرح زیر است:



ظرفیت پیچشی و برشی و سختی بعد از ترک خوردگی نمونه های تقویت شده تا ۷۱٪ نسبت به نمونه کنترلی افزایش یافته است. تقویت کردنها باعث افزایش شکل پذیری تا مرحله شکست می شود. اگرچه روش تقویت  $U$  شکل تاثیر کمتری نسبت به دورپیچ کامل دارند، ولی کاملا اجرایی و عملی می باشد. پوشش  $U$  شکل نسبت به پوشش  $U$  شکل ادامه یافته تاثیر کمتری دارد. میل مهاری های استفاده شده می تواند تنشهای محوری را به عنوان بخشی از جریان برش تحمل کند، و با جریان پیچشی موجود در تیر مقابله و مقاومت نماید.

در سال ۲۰۱۱ مصطفی الحجازی و محمد الکاتب مطالعه آزمایشگاهی بر روی ۵ عدد تیر بتن مسلح تقویت شده با الیاف  $CFRP$  و با موضوع تقویت پیچشی تیرهای بتن مسلح بوسیله الیاف و ورقهای  $CFRP$  انجام داده که این تقویت کردنها با چیدمان نوارهای دورپیچ، منقطع و فواصل مشخص در یک لایه و دولایه ضخامت انجام شد. طول تیر ۳۱۰۰ میلی متر ارتفاع ۳۰۰ میلی متر و عرض ۱۲۰ میلی متر بوده است. نتایج نشان داد که این تقویت کردنها باعث بهبود عملکرد کلیه تیرها شده است. تقویت کردن تیرها بوسیله ورقهای  $CFRP$  به ما کمک کرد تا رفتار و ظرفیت پیچشی تیرها را تا ۱۱۶/۷٪ نسبت به نمونه کنترلی افزایش و بهبود داشته باشد، همچنین سختی پیچشی تیرها نسبت به نمونه کنترلی تا ۶۶/۴٪ افزایش داشته و این عمل بوسیله کم کردن زاویه دوران اتفاق افتاده است. استفاده از یک لایه با فواصل کمتر رفتاری مشابه به استفاده از دو لایه و فواصل زیادتر را دارد

در سال ۲۰۱۳ جاریوال و همکاران مطالعه آزمایشگاهی خود را بر روی ۷ عدد تیر مستطیلی که ۱ عدد به عنوان نمونه کنترلی و ۶ عدد با چیدمان های مختلف تقویت پیچشی شده بودند انجام دادند. طول نمونه ها ۱۷۰۰ میلی متر، و عرض و ارتفاع آنها ۱۵۰ میلی متر بوده و با استفاده از

الیاف  $CFRP$  تقویت شده بودند که نتایج آن بشرح ذیل است:

- ماکسیمم ۱۰۰٪ و ۱۱۷٪ افزایش در لنگر پیچشی ترک خوردگی و لنگر پیچشی نهایی برای نمونه ها نسبت به نمونه کنترلی بدست آمده بود. ترکیب چیدمان نوار طولی گوشه و نوارهای منقطع دور پیچ شده نتایج بهتری از نظر شکل پذیری - نسبت به دیگر چیدمانها در بر داشته است. چیدمان نوارهای مایل نسبت به نوارهای قائم مقاومت پیچشی بیشتری را نشان داده اند. بهترین عملکرد از نظر مقاومت پیچشی مربوط به چیدمان دورپیچ کامل گسترده در عرض بوده است. (منظور در کل تیر).

#### ۴- مشخصات نمونه آزمایشگاهی:

در این پروژه تحقیقاتی ۵ نمونه تیر بتنی با ابعاد ۱۵۰\*۲۰۰\*۱۵۰۰ میلی متر، هر کدام توسط ۴ میلگرد طولی از نمره ۱۰ آجدار از نوع  $AIII$  ۲ عدد در پایین مقطع و ۲ عدد در بالای مقطع، خاموت نمره ۸ به فاصله ۱۵ سانتی متر از نوع  $AI$  ساخته گردید.

پس از آرماتور بندی تیرها و ساخت قالب سپس با رعایت کاور اقدام به بتن ریزی میکنیم که همگی در یک نوبت بتن ریزی شدند و تعداد ۶ نمونه مکعبی ۱۵۰\*۱۵۰\*۱۵۰ میلی متر جهت آزمایش اندازه گیری مقاومت فشاری ۲۸ روزه گرفته شده و تیرهای بتنی به همراه نمونه های مکعبی جهت عمل آوری به مدت ۲۸ روز در حوضچه آب غرقاب شده اند.

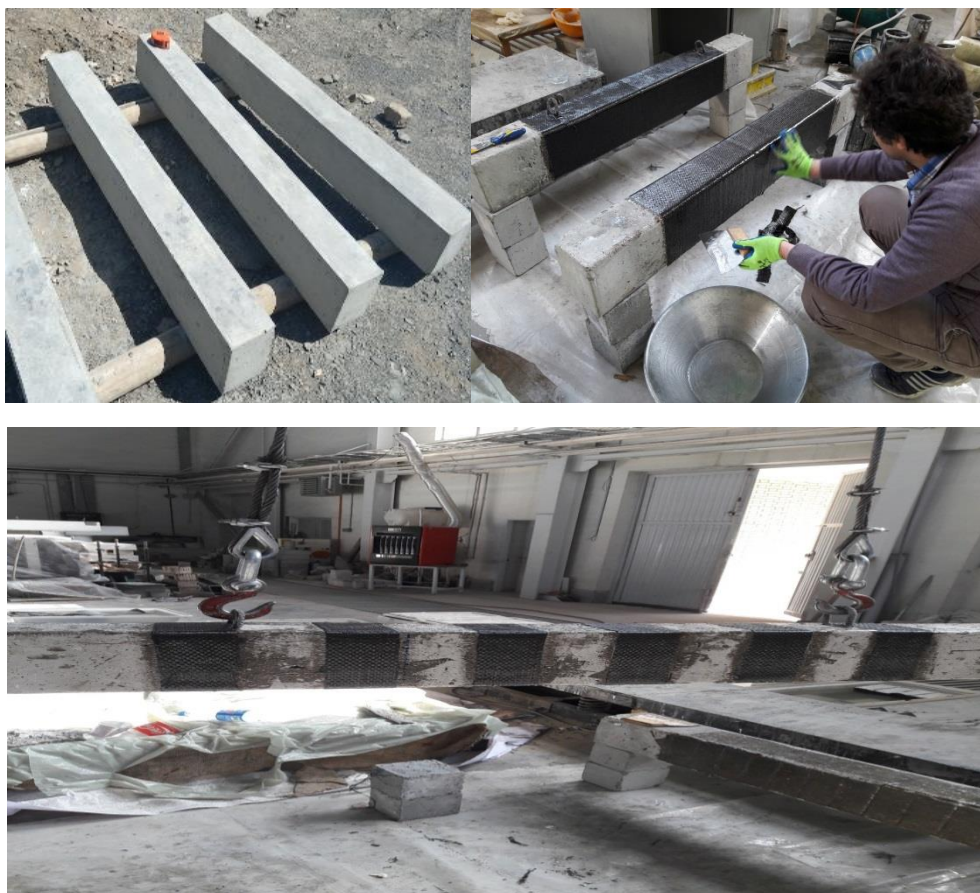
هر کدام از این نمونه ها با عناوین  $B0$ ،  $B1$ ،  $B2$ ،  $B3$ ،  $B4$  نامگذاری شده است.

در این آزمایش پس از آماده سازی سطحی مناسب (برداشتن شیره بتن توسط عملیات ماسه پاشی به طوری که سنگدانه ها نمایان شوند) اقدام به چسباندن لایه ها طبق استاندارد  $ACI440$  شده است.



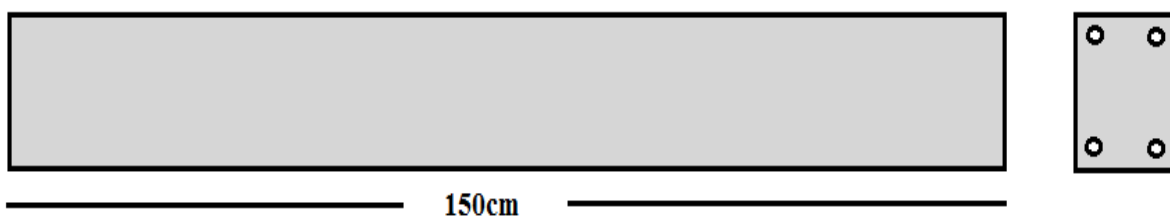
قرار گرفته و بصورت کنترل دوران با نرخ ۲۰ کیلوگرم بر ثانیه، در دو انتهای تیر شکسته شد.

تیرهای بتنی ساخته شده تحت بارگذاری پیچش خالص در آزمایشگاه دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

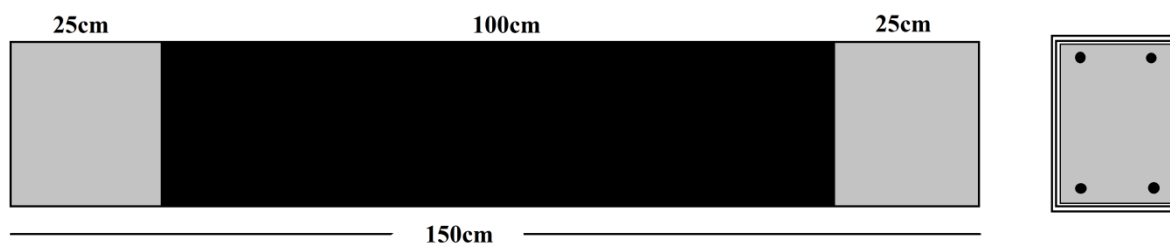


شکل ۴-۱: چسباندن FRP

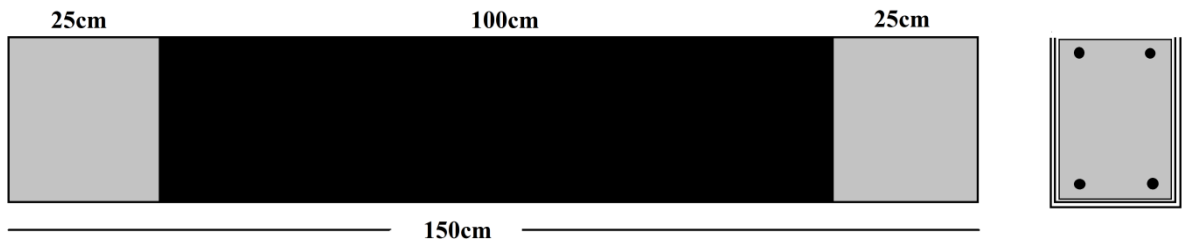
B0 نمونه شاهد بوده که بدون هیچ گونه تقویت آزمایش می گردد.



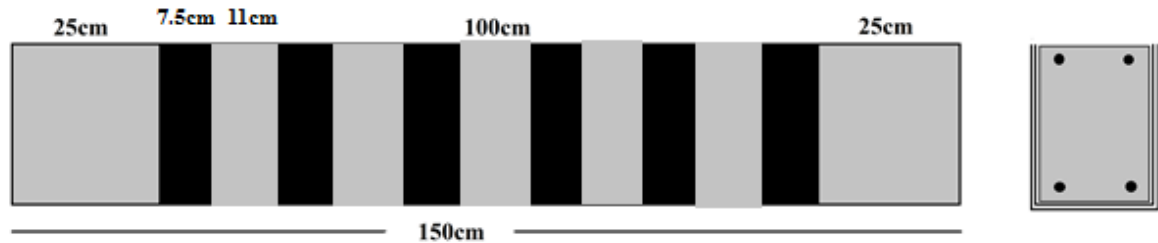
B1 نمونه تقویت شده بادورپیچ ۲ لایه CFRP به طول ۱ متر



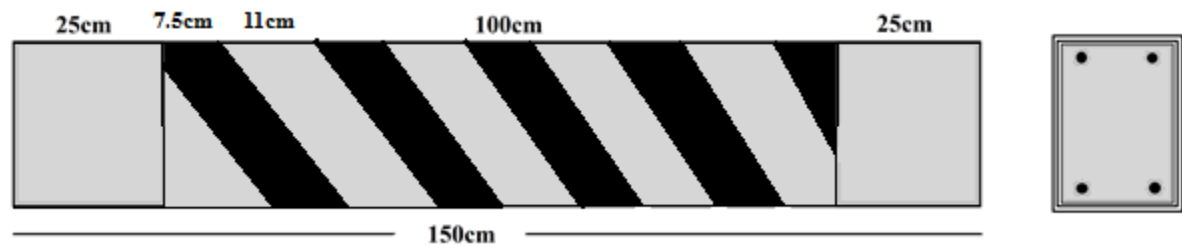
B2 نمونه تقویت شده رکابی شکل با ۲ لایه CFRP به طول ۱ متر



B3 نمونه تقویت شده نوار دورپیچ با ۲ لایه CFRP به عرض ۷,۵ و فاصله ۱۱ سانتیمتر.



B4 نمونه تقویت شده بانوارهای دورپیچ زاویه دار ۲ لایه CFRP به عرض ۷,۵ و فاصله ۱۱ سانتیمتر.



آنگاه همه نمونه ها بر روی دستگاه تست پیچشی قرار گرفته و به وسیله جک هیدرولیکی بارگذاری شدند، سپس شروع به اندازه گیری حداکثر بار، تغییر مکان و ثبت آن توسط کامپیوتر گردید .  
 نوع الیاف CFRP مورد استفاده در این تحقیق به شرح جدول زیر می باشد:

جدول ۴-۱ مشخصات کامپوزیت

جنس الیاف	مقاومت کششی نهایی MPa	مدول الاستیسیته GPa	ضخامت mm
CFRP	۴۹۰۰	۲۳۰	۰,۱۱۱

جدول ۴-۲ مشخصات بتن مصرفی

نوع مصالح	آب	سیمان	ماسه	شن
میزان مصرف $kg/m^3$	۱۵۰	۳۵۰	۷۲۰	۱۰۸۰

جدول ۴-۳ مشخصات رزین مورد استفاده

مقاومت کششی MPa	مدول کششی MPa	مدول خمشی GPa
۳۰	۲۵۰۰	۲۷۰۰

نحوه انجام آزمایش به این صورت است که همه تیرهای این آزمایش به صورت دو سر مفصل و تحت بارگذاری پیچشی خالص قرار گرفته اند. بارگذاری به صورت کنترل تغییر بار که با نرخ ۲۰ کیلوگرم بر ثانیه اعمال شده و نمودار بار-دوران به وسیله دستگاه جک ۲۰۰ تنی ثبت می گردد.



شکل ۴-۲ نمای از دستگاه بارگذاری

### ۵- نتایج آزمایشگاه:

جدول ۱-۵ مقایسه نتایج نمونه ها

نحوه شکست	درصد افزایش شکل پذیری نسبت به نمونه شاهد	درصد افزایش لنگر نهایی نسبت به حالت تقویت نشده طبق آزمایشات	بیشینه لنگر آزمایشگاه $kN$	دوران متناسب با بیشینه لنگر (درجه)	دوران نهایی نمونه (درجه)	شماره نمونه
پیچشی		-	۳,۴۹	۴	۴,۵	B0
پاره شدن FRP همراه قلوه کن شدن بتن	۴۲,۳	۷۲,۶۶	۱۴,۱۶	۶,۴	۶,۴	B1
Debonding و پارگی در لایه	۲۳	۲۸,۳۳	۵,۴۱	۴,۷	۵,۴	B2
پاره شدن FRP و قلوه کن شدن بتن	۴۸,۳	۴۱,۳۶	۶,۶۶	۵	۷	B3
پارگی در لایه FRP	۵۵,۲	۶۱,۳	۱۰,۴۱	۹,۳	۹,۳	B4

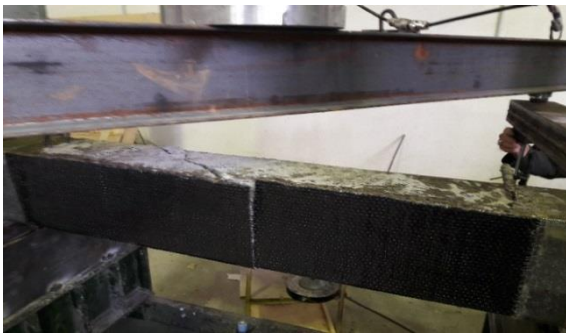
عکس از نمونه ها:



شکل ۱- عکس نمونه B0



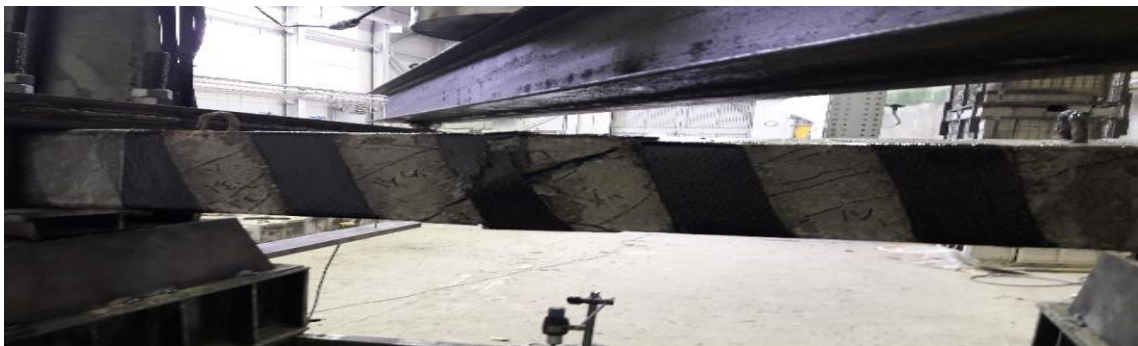
شکل ۲- عکس نمونه B1



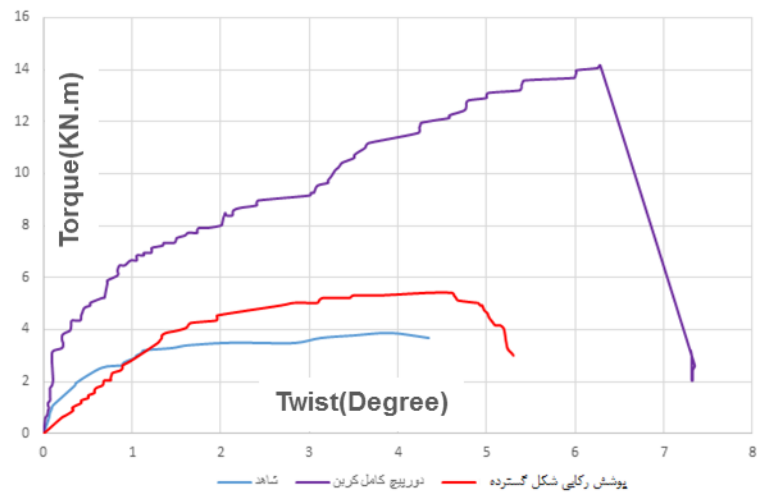
شکل ۳- عکس از نمونه B2



شکل ۴- عکس از نمونه B3

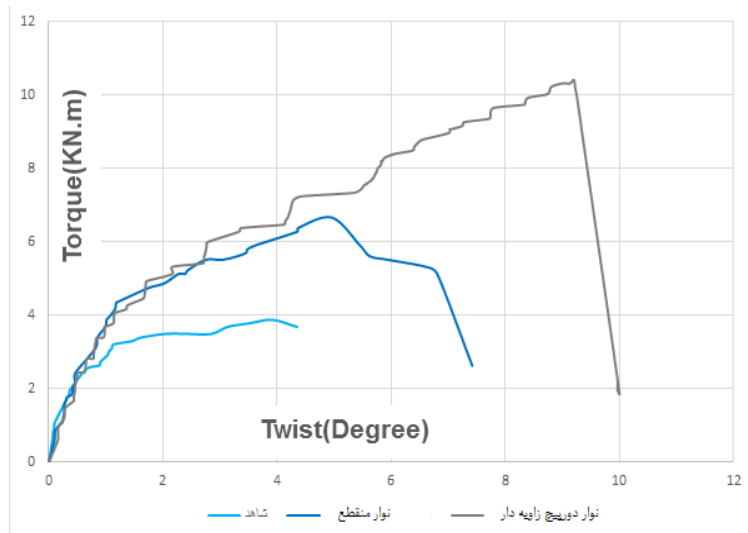


شکل ۵- عکس از نمونه B4



نمودار ۱-۵: مقایسه نمودار B2، B1، B0





نمودار ۵-۲: مقایسه نمودار B0، B3، B4

### نتیجه گیری:

با توجه به اینکه همه تیرها در شرایط آزمایشگاهی یکسان تحت آزمایش قرار گرفتند و همان طور که از جداول و نمودارهای فوق مشاهده گردید نتایج زیر بدست می آید:

- ۱- بهترین نمونه از نظر کسب مقاومت نمونه دورپیچ کامل ۲ لایه CFRP به طول ۱ متر میباشد.
- ۲- بهترین نمونه از نظر بهبود رفتار شکل پذیری به ترتیب نمونه های دورپیچ نوار منقطع، و نوار زاویه دار میباشد.
- ۳- چیدمان دورپیچ نوار زاویه دار، بهبود در رفتار شکل پذیری، همچنین افزایش مقاومت نهایی را نسبت به حالت بدون زاویه آن در پی داشته است.
- ۴- چیدمان دورپیچ کامل، گرچه از نظر مقاومت باعث بهبود ظرفیت نمنه گردیده، ولی از نظر کاربردی قابلیت اجرایی کمی دارد.

### منابع و ماخذ:

- [۱]. طائونی، شاپور، ۱۳۳۴. طراحی سازه های فولادی (براساس طراحی به روش تنش مجاز و روش حدی). انتشارات علم و ادب، ۳۹۱.
- [۲]. فردیناند پی، بیر، ای راسل، جانسون، جان تی، ای ولف. مقاومت مصالح (ترجمه بهرام پوستی). انتشارات متفکران، ۱۳۹۲.
- [۳]. موستوفی نژاد، داود، ۱۳۳۹. سازه های بتن آرمه (جلد اول)، انتشارات ارکان دانش، ۱۳۸۵.
- [۴]. رئوفی، ابدالرئوف، ۱۳۲۵، مبانی بتن مسلح براساس آیین نامه های ACI318-08 و آبا. ناشر، ابدالرئوف رئوفی، مشهد، ۱۳۸۸.
- [۵]. طلائعی طباطبائی، سید بهزاد، موستوفی نژاد، داود، ۱۳۹۰. تقویت برشی-پیچشی تیرهای بتن آرمه با استفاده از کامپوزیت های FRP. رساله دکتری مهندسی عمران - گرایش سازه. دانشکده مهندسی عمران. دانشگاه صنعتی اصفهان.

[۶] میرزایی، مهدی، عربزاده، ابوالفضل، ۱۳۸۷. ارزیابی مقاومت برشی تیرهای عمیق بتن مسلح تقویت شده با ورق های FRP. پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - گرایش سازه. دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.

[۷] کرمانی، فرهاد، وارسته پور، حمید، ۱۳۹۴. طراحی بهینه تیر بتنی با استفاده از الیاف کربن. پایان نامه کارشناسی ارشد عمران - گرایش سازه. دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات خراسان رضوی (نیشابور).

[8]. Gobarah, A., Ghorbel, M., and Chidiac, S. (2002). "Upgrading torsional resistance of RC beams using FRP." *Journal of Composites for Construction*, 6, 257-263.

[9]. Panchacharam, S. and Belarbi, A. (2002). "Torsional behaviour of reinforced concrete beams strengthened with FRP composites", *Proceedings 1st FIB Congress, Osaka, Japan, 1-10*.

[10]. Chalioris, C.E. (2007a). "Torsional strengthening of rectangular and flanged beams using carbon fibre reinforced polymers - Experimental study", *Construction & Building Materials*, in press (available online since 16 Nov. 2006).

[11]. Ameli, M., and Ronagh, H. R. (2007). "Analytical method for evaluating ultimate torque of FRP strengthened reinforced concrete beams", *Journal of Composites for Construction*, 11, 384-390.

[۱۲]. ذهبیون، امیر، بررسی کاربرد ورق های FRP در افزایش ظرفیت پیچشی تیرهای بتنی، دانشگاه آزاد شهر کرد، پایان نامه کارشناسی ارشد عمران - زلزله، زمستان ۱۳۸۶.

[13]. Deifalla, A. and Ghobarah, A. (2010). "Strengthening RC T-Beams Subjected to Combined Torsion and Shear Using FRP Fabrics: Experimental Study." *J. Compos. Constr.*, 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000091, 301-311.

[14]. El Mostafa Higazy and Mahmoud El-Kateb. (2011). "STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE BEAMS UNDER TORSION USING CFRP SHEETS." *36th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES: 14 - 16 August 2011, Singapore*.

[15]. Chhabirani Tudu (210CE2277). (2012). "STUDY OF TORSIONAL BEHAVIOUR OF RECTANGULAR REINFORCED CONCRETE BEAMS WRAPPED WITH GFRP." *Department of Civil Engineering, National Institute of Technology Rourkela Odisha -769008, India May 2012*.

[16]. Deifalla A, Awad A, El-Garhy M. (2013). "Effectiveness of externally bonded CFRP strips for strengthening flanged beams under torsion: an experimental study." *Eng Struct* 2013;56:2065-75. Elsevier.

[17]. Vishnu H. Jariwala, Paresh V. Patel, Sharad Kumar P. Purohit. (2013). "Strengthening of RC Beams subjected to Combined Torsion and Bending with GFRP Composites." *Procedia Engineering, Volume 51, 2013, Pages 282-289*.

# بررسی و ارزیابی فاکتور $K$ در بتن های خودتراکم حاوی زئولیت و سرباره کوره آهن گدازی



سید محمد سجادی عطار  
مربی دانشکده شهید منتظری  
مشهد و مدیر آزمایشگاه کنترل  
کیفیت خط دوقطارشهری مشهد



محمد ابراهیم کمکی  
کارشناس مهندسی عمران  
دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد



محسن تدین  
استادیار دانشگاه بوعلی سینا  
همدان



امیرخانی  
دانشجو کارشناسی ارشد سازه  
دانشگاه صنعتی شاهرود

## چکیده

مهم ترین توسعه متحولانه در ساخت و اجرای بتن در سه دهه اخیر، استفاده از بتن های خودتراکم می باشد. بتن خودتراکم به منظور حذف سروصدای ناشی از لرزاننده در قطعات بتنی، کاربرد قابل توجهی پیدا کرده است. استفاده از این نوع بتن در محیط کارگاه سبب کاهش آلودگی صوتی و حتی امکان ایجاد کارگاه قطعات بتنی در سطح شهر را میسر می سازد. استفاده از بتن خودتراکم در ساخت قطعات بتنی رفته رفته رو به افزایش است. استفاده از بتن خودتراکم هزینه لرزاننده را ذخیره می کند و تراکم بتن در سازه ها را نیز تضمین می کند. تولید سیمان یکی از صنایع آلاینده محیط زیست محسوب می شود به نحوی که به ازای تولید هر تن کلینکر سیمان تقریباً یک تن گاز دی اکسید کربن وارد جو می شود. به همین علت تولید بتن مقاوم و بادوام با سیمان کمتر و به جای آن استفاده از افزودنی های معدنی و شیمیایی می تواند تأثیر قابل ملاحظه ای در حفظ محیط زیست داشته باشد. از آنجایی که زئولیت و سرباره کوره آهن گدازی به وفور در کشور یافت می شود و استفاده از آن ها نیز از نظر اجرایی و همچنین اقتصادی قابل توجیه است؛ لذا در تحقیق حال حاضر به بررسی فاکتور  $K$  در بتن خودتراکم می پردازیم. در تحقیق انجام شده ۲۱ طرح مخلوط بتن خودتراکم در نسبت های آب به سیمان ۰/۴۰، ۰/۴۵ و ۰/۵۰ با مصرف زئولیت ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ و سرباره کوره آهن گدازی ۱۵٪، ۲۵٪ و ۳۵٪ استفاده گردیده که با بتن شاهد در سن مقاومتی ۲۸ روزه مورد مقایسه قرار گرفته است و فاکتور  $K$  برای زئولیت و سرباره کوره آهن گدازی در بتن خودتراکم محاسبه گردیده است.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، فاکتور  $K$ ، زئولیت، سرباره کوره آهن گدازی

## ۱. مقدمه

با توجه به گسترش شهرنشینی امروزه سازه ها نسبت به سازه های قدیمی بزرگ تر و پیچیده تر هستند و لذا شامل پی های حجیم تر، تیرها و ستون هایی اند که می باید از بتن مسلح استفاده گردند که در مقایسه فنی و اقتصادی با سازه های چوبی و فولادی مورد بررسی دقیق تری قرار گیرند. بتن به عنوان پرمصرف ترین مصالح صنعت ساخت همواره

دستخوش تحولات و پیشرفت های شگرفی شده است. زمان، هزینه و کیفیت سه عامل مهم در اجرا سازه های بتنی می باشند که تأثیر مهمی در صنعت ساختمان دارند [۱]. استفاده از انواع پوزولان به عنوان ماده جایگزین سیمان در بتن علاوه بر کمک به کاهش مصرف سیمان و انرژی و تولید گازهای گلخانه ای، خواص مکانیکی مانند مقاومت فشاری در سنین بالا و دوام بتن نظیر نفوذپذیری را بهبود می بخشد [۲]. همچنین استفاده از مواد پوزولانی



همراه با مواد افزودنی شیمیایی در سال‌های اخیر این امکان را برای دانشمندان علم تکنولوژی بتن فراهم نموده است که بتوانند بتن‌های خاصی را برای شرایط مختلف طراحی نمایند.

تفاوت عمده بتن خودتراکم با بتن معمولی استفاده از مقادیر بالای مواد پودری و فوق روان‌کننده‌های قوی در بتن خودتراکم می‌باشد. درحالی‌که در بتن معمولی در بسیاری از اوقات نیازی بر استفاده از این مواد نیست. همچنین در بتن خودتراکم به دلیل روانی بالا احتمال جداسازی مصالح سنگی درشت از بتن زیاد می‌باشد لذا غلظت مناسب باید تأمین گردد.

طرح بتن خودتراکم باید به نحوی باشد که علاوه برداشتن مشخصات مناسب از لحاظ کارایی و رئولوژی، از نظر مقاومت و دوام نیز مشخصات فنی را برآورده سازد. به همین دلیل تاکنون روش استاندارد و مورد اجماع در دنیا برای طرح مخلوط بتن خودتراکم بیان نشده است [۳].

برای تولید بتن خود تراکم استفاده از فوق روان‌کننده‌ها برای رسیدن به خواسته‌های مورد انتظار نظیر کارایی نیز الزامی می‌باشد. همچنین استفاده از فوق روان‌کننده‌ها سبب کاهش مصرف آب گردیده که کاهش تخلخل بتن و بهبود رفتار ناحیه انتقال بتن را به دنبال دارد. انتخاب دانه‌بندی مناسب سنگ‌دانه‌ها و استفاده از مواد افزودنی معدنی سبب کنترل آب انداختگی و جداسازی در بتن خودتراکم می‌گردد.

زئولیت یک ماده معدنی است که عمدتاً از آلومینوسیلیکات تشکیل شده و به‌طور خلاصه از دسته کانی‌های رسی هستند که همچون سایر کانی‌های رسی از پایه هیدرو سیلیکات‌های آلومینیوم همراه با برخی کاتیون‌ها و اکسیدهای فلزات قلیایی و قلیایی خاکی تشکیل شده‌اند.

سرباره محصولی مصنوعی و جانبی است که به هنگام جداسازی آهن در کوره‌های ذوب آهن از ناخالصی‌های موجود در سنگ آهن به وجود می‌آید. سرباره ترکیبی از سیلیکات و اکسیدهای فلزی پیچیده است که پس از سرد شدن مواد ناخالص، باقی می‌ماند. این ترکیب پس از شکل گرفتن در مصارفی اعم از سیمان‌های سرباره‌ای و مواد نسوز و پشم سرباره و بالاست راه آهن و مصالح زیرسازی جاده و مصالح سنگی آسفالت و بتن کاربرد دارد.

یکی از مزایایی که در روش طرح ملی مخلوط بتن وجود دارد جامعیتی است که نسبت به سایر روش‌ها در آن دیده می‌شود و نقش عوامل متعددی که در ویژگی‌های بتن اثرگذار است در آن دیده شده است. از جمله این موارد میزان اثربخشی پوزولان‌ها بر مقاومت و دوام بتن می‌باشد که با فاکتور  $K$  تعیین شده است [۴]. این مسئله در روش طرح ملی مخلوط بتن با فاکتور  $K$  توصیف شده است. از طرفی با گسترش بتن‌های ویژه نظیر بتن خودتراکم ضرورت تدوین روش طرح ملی طرح مخلوط بتن خودتراکم احساس می‌شود ولی مطالعات اولیه کافی در خصوص آن وجود ندارد. هدف از تحقیق فعلی به دست آوردن فاکتور  $K$  برای زئولیت و سرباره کوره آهن‌گدازی در بتن خودتراکم است که در شرایط مختلف از دیدگاه مشخصات مکانیکی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

## ۲. برنامه آزمایشگاهی

### ۱.۲. مصالح مصرفی

#### ۱.۱.۲. مواد سیمانی

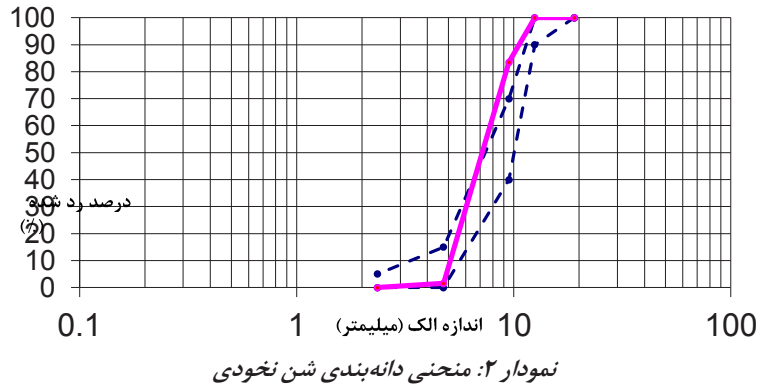
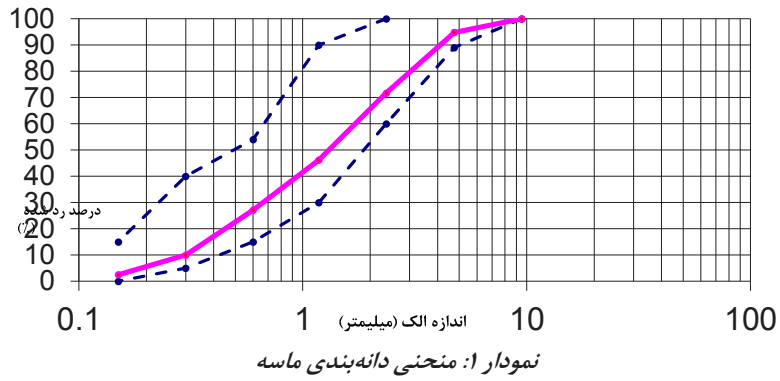
سیمان مورد استفاده در این پژوهش از نوع پرتلند تیپ ۲ مطابق استاندارد  $ASTM C150$  تولید کارخانه سیمان بجنورد می‌باشد. مشخصات شیمیایی زئولیت مطابق جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱: مشخصات شیمیایی زئولیت

L.O.I	Fe2O3	CaO	K2O	Na2O	Al2O3	SiO2
۱۲/۲	۰/۲۰/۹	۰/۶	۴/۴	۳/۸	۱۱	۶۸/۵

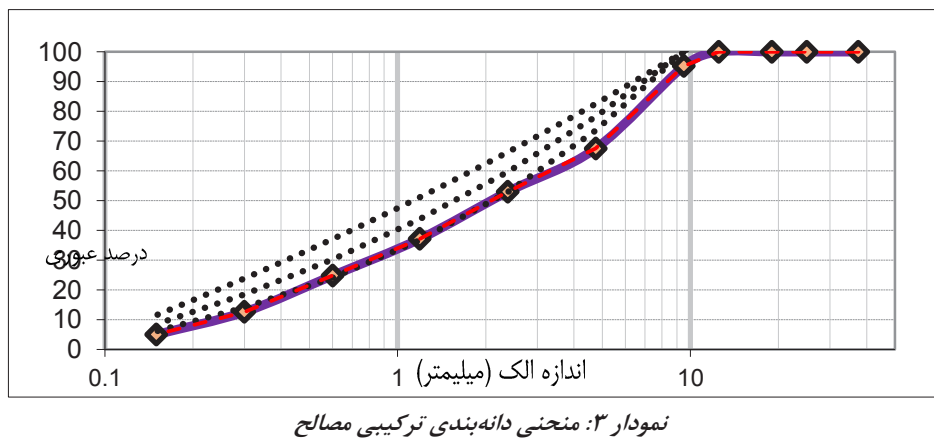
#### ۲.۱.۲. سنگ‌دانه‌ها

درشت‌دانه مصرفی در این پژوهش از نوع شکسته با حداکثر قطر ۱۹ میلی‌متر و وزن مخصوص ۲۶۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ماسه با وزن مخصوص ۲۶۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ماسه‌بادی با وزن مخصوص ۲۶۸۵ استفاده شد. همچنین از پور سنگ آهکی با وزن مخصوص ۲۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب نیز استفاده گردید. در نمودار ۱ و ۲ منحنی دانه‌بندی ماسه و شن نخودی و در نمودار ۳ منحنی ترکیبی دانه‌بندی و همچنین در جدول ۲ سهم استفاده از مصالح و مدول نرمی نیز آورده شده است.



جدول ۲: سهم استفاده از مصالح و مدول نرمی مصالح

مدول نرمی FM	سهم	مصالح
۶/۱۳	۳۰	شن ریز (نخودی)
۳/۴۸	۶۰	ماسه
۱/۳۹	۴	ماسه یادی
۱/۰۷	۶	پودر سنگ
۴/۰۵	۱۰۰	ترکیب سنگ دانه‌ها



به منظور رسیدن به خواص رئولوژیکی مناسب در بتن خودتراکم از فوق روان کننده با پایه پلی کربکسیلات با وزن مخصوص ۱۰۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب و درصد مواد جامد ۴۹٪ استفاده گردید.

### ۳.۱.۲ آب

آب مصرفی جهت ساخت بتن از آب آشامیدنی شهر چناران با  $pH=7/5$  استفاده گردید.

### ۴.۱.۲ افزودنی فوق روان کننده

## ۲.۲. طرح مخلوط و نحوه ساخت و عمل آوری

طرح مخلوط بتن باید به گونه‌ای طراحی گردد که بتواند تمامی ویژگی‌های بتن تازه و سخت شده را برآورده نماید. در ابتدای هرروز درصد رطوبت مصالح گرفته شده و پس از توزین مصالح، ابتدا سنگ‌دانه‌ها و پودر سنگ آهکی درون مخلوط‌کن ریخته شد و پس از یک دقیقه چرخیدن مخلوط‌کن و یکنواخت شدن مصالح، سیمان و پوزولان و در انتها آب نیز به طرح اضافه گردید. فوق روان کننده به عنوان تنها پارامتر متغیر طرح‌ها با توجه به رسیدن جریان

اسلامپ در محدوده ۵۵ الی ۷۵ سانتیمتر به طرح‌ها اضافه می‌گردید. سپس آزمایش‌های جریان اسلامپ،  $T50$ ، حلقه  $J$  و جعبه  $L$  نیز صورت گرفتند. همچنین جداسازی دانه‌ها و آب‌انداختگی بتن به صورت چشمی کنترل گردید. نمونه‌ها مطابق با استاندارد  $ASTM C192$  پس از ۲۴ ساعت عمل آوری در قالب و با یک‌لایه روکش پلاستیکی بلافاصله پس از خروج از قالب در حوضچه‌های آب با دمای استاندارد تا روز آزمون قرار گرفتند. طرح‌های اختلاط در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: طرح‌های اختلاط

نام طرح	مجموع مواد سیمانی (kg)	درصد مصرف پوزولان	نسبت آب به مواد سیمانی	سیمان (kg)	زئولیت (kg)	سرباره کوره آهن‌گدازی (kg)	شن (kg)	ماسه (kg)	ماسه‌بادی (kg)	پودر سنگ (kg)	فوق روان کننده (kg)
Z1	۴۵۰	%۵	۰/۴۰	۴۲۷/۵	۲۲/۵	-	۵۲۵	۱۰۴۹	۷۰	۱۰۶	۱/۸۷
Z2	۴۵۰	%۵	۰/۴۵	۴۲۷/۵	۲۲/۵	-	۵۰۷	۱۰۱۴	۶۸	۱۰۲	۱/۷۵
Z3	۴۵۰	%۵	۰/۵۰	۴۲۷/۵	۲۲/۵	-	۴۸۹	۹۷۸	۶۵	۹۹	۱/۲۲
Z4	۴۵۰	%۱۰	۰/۴۰	۴۰۵	۴۵	-	۵۲۱	۱۰۴۲	۶۹	۱۰۵	۳/۵۷
Z5	۴۵۰	%۱۰	۰/۴۵	۴۰۵	۴۵	-	۵۰۴	۱۰۰۸	۶۷	۱۰۲	۲/۳۴
Z6	۴۵۰	%۱۰	۰/۵۰	۴۰۵	۴۵	-	۴۸۷	۹۷۴	۶۵	۹۸	۱/۴
Z7	۴۵۰	%۱۵	۰/۴۰	۳۸۲/۵	۶۷/۵	-	۵۲۰	۱۰۳۹	۶۹	۱۰۵	۲/۹۲
Z8	۴۵۰	%۱۵	۰/۴۵	۳۸۲/۵	۶۷/۵	-	۵۰۲	۱۰۰۴	۶۷	۱۰۱	۲/۴۹
Z9	۴۵۰	%۱۵	۰/۵۰	۳۸۲/۵	۶۷/۵	-	۴۸۴	۹۶۹	۶۵	۹۸	۱/۸۷
S1	۴۵۰	%۲۵	۰/۴۰	۳۳۷/۵	-	۱۱۲/۵	۵۴۰	۱۰۷۹	۷۲	۱۰۹	۳/۱۴
S2	۴۵۰	%۲۵	۰/۴۵	۳۳۷/۵	-	۱۱۲/۵	۵۲۴	۱۰۴۹	۷۰	۱۰۶	۲/۴۹
S3	۴۵۰	%۲۵	۰/۵۰	۳۳۷/۵	-	۱۱۲/۵	۵۰۹	۱۰۱۸	۶۸	۱۰۳	۱/۸۷
S4	۴۵۰	%۳۵	۰/۴۰	۲۹۲/۵	-	۱۵۷/۵	۵۴۵	۱۰۸۹	۷۳	۱۱۰	۳/۷۳
S5	۴۵۰	%۳۵	۰/۴۵	۲۹۲/۵	-	۱۵۷/۵	۵۳۱	۱۰۶۲	۷۱	۱۰۷	۲/۱۸
S6	۴۵۰	%۳۵	۰/۵۰	۲۹۲/۵	-	۱۵۷/۵	۵۱۶	۱۰۳۳	۶۹	۱۰۴	۱/۸۷
S7	۴۵۰	%۱۵	۰/۴۰	۳۸۲/۵	-	۶۷/۵	۵۳۵	۱۰۷۰	۷۱	۱۰۸	۱/۸۷
S8	۴۵۰	%۱۵	۰/۴۵	۳۸۲/۵	-	۶۷/۵	۵۱۸	۱۰۳۷	۶۹	۱۰۴	۱/۸۷
S9	۴۵۰	%۱۵	۰/۵۰	۳۸۲/۵	-	۶۷/۵	۵۰۲	۱۰۰۴	۶۷	۱۰۱	۱/۴۷
A1	۴۵۰	%۰	۰/۴۰	۴۵۰	-	-	۵۲۷	۱۰۵۴	۷۰	۱۰۶	۱/۵۶
A2	۴۵۰	%۰	۰/۴۵	۴۵۰	-	-	۵۰۹	۱۰۱۹	۶۸	۱۰۳	۱/۲۵
A3	۴۵۰	%۰	۰/۵۰	۴۵۰	-	-	۴۹۲	۹۸۳	۶۶	۹۹	۰/۵۶

### ۳.۲. نمونه‌های آزمایشگاهی

جهت سنجش مقاومت فشاری از نمونه مکعبی  $10 \times 10 \times 10$  سانتی‌متری استفاده گردید که معیار ارزیابی و محاسبه فاکتور  $K$  طبق استاندارد  $DIN CEN/TR 16639$  نیز در سن ۲۸ روزه می‌باشد که جهت ارزیابی دقیق‌تر از ۳ نمونه در این سن و میانگین‌گیری نتایج استفاده گردید [۵].

### ۳. بحث و بررسی

#### ۱.۳. خواص بتن تازه

به‌منظور بررسی ویژگی‌های رئولوژی بتن خودتراکم؛ آزمایش‌های جریان اسلامپ،  $T50$ ، حلقه  $J$  و جعبه  $L$  نیز انجام پذیرفت که در شکل ۴ مشخص می‌باشد. همچنین نتایج آن در جدول ۴ ارائه گردیده است. در جدول ۵، ملاک‌ها و معیارهای قبول بتن خودتراکم (از نظر کارایی)، برای حداکثر اندازه سنگ‌دانه کمتر از ۲۰ میلی‌متر آورده شده است. همچنین مجموعه‌عللی که باعث پدید آمدن جواب‌های ناصحیح برای آزمایش‌های کارایی می‌شوند، بیان شده است [۶].



شکل ۴: عکس رئولوژی بتن خودتراکم، نمونه‌ها، شکستن نمونه‌ها

جدول ۴: خواص بتن تازه خودتراکم

نام طرح	جریان اسلامپ (cm)	T50(sec)	حلقه J (cm)	جعبه L
Z1	۶۹	۳/۸۵	۶۵	۰/۸۷
Z2	۶۰	۳/۹	۵۶	۰/۷۶
Z3	۶۰	۳/۴	۵۷	۰/۷۷
Z4	۷۳	۳/۴۵	۷۱	۰/۸۹
Z5	۷۵	۳/۱۵	۷۱	۰/۹۲
Z6	۷۵/۵	۳/۴	۵۳	۰/۷۱
Z7	۶۹	۳/۶۵	۶۵	۰/۸۶
Z8	۶۷	۳/۸	۶۳	۰/۸۱
Z9	۶۲	۴/۲	۵۸	۰/۷۸
S1	۷۰	۴/۶	۶۷	۰/۹۲
S2	۶۷/۵	۴/۸۵	۶۱	۰/۸۷
S3	۶۰	۵/۲	۵۷	۰/۸۲
S4	۶۸/۵	۴/۷	۶۴	۰/۸۹
S5	۵۷	۴/۸	۵۳	۰/۸۰
S6	۵۵	۴/۶	۵۱	۰/۷۶
S7	۶۶	۴/۷	۵۸	۰/۹۰
S8	۷۳	۳/۸	۶۹	۰/۸۶
S9	۶۰	۵/۱	۵۳	۰/۷۹
A1	۶۶	۳/۲	۵۵	۰/۹۲
A2	۵۷	۳/۵	۴۸	۰/۸۴
A3	۵۶	۳/۸	۴۷/۵	۰/۸۲

جدول ۵: معیارهای قبول بتن خودتراکم از نظر کارایی و عوامل پدیدآورنده اختلال در نتایج [۶]

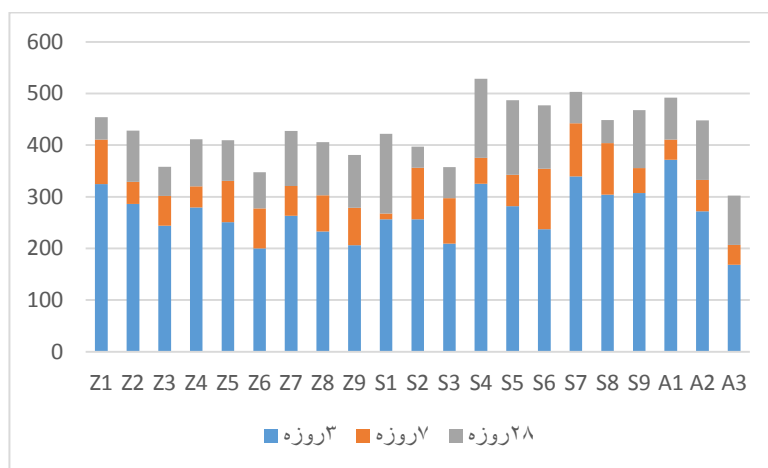
نام آزمایش	محدوده مقادیر قابل قبول		واحد	علت احتمالی نتیجه کمتر از محدوده	علت احتمالی نتیجه بیشتر از محدوده
	حداقل	حداکثر			
جریان اسلامپ	۶۵	۸۰	سانتی‌متر	لزجت بسیار بالا حد تسلیم بسیار پایین	لزجت بسیار پایین جداشدگی
T50 (اسلامپ)	۲	۵	ثانیه	لزجت بسیار پایین	لزجت بسیار بالا حد تسلیم بسیار بالا
حلقه J	۰	۱۰	سانتی‌متر	لزجت بسیار بالا حد تسلیم بسیار بالا جداشدگی انسداد	لزجت بسیار پایین جداشدگی
جعبه L	۰/۸	۱	$\frac{h_2}{h_1} +$	لزجت بسیار بالا حد تسلیم بسیار بالا انسداد	جواب غلط

پشت میلگردها نیز مشاهده گردید و در بتن‌های حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی سرعت حرکت بتن نسبت به بتن‌های شاهد و بتن‌های حاوی ژئولیت کمتر بود.

### ۲.۳. آزمایش مقاومت فشاری

برای هر یک از طرح‌ها تعداد ۷ عدد آزمون مکعبی  $10 \times 10 \times 10$  گرفته شده است که ۴ عدد از این آزمون‌ها در سنین ۳ و ۷، ۳ عدد از این آزمون‌ها در سن ۲۸ مورد آزمایش قرار گرفت که نتایج آن در نمودار شماره ۵ آورده شده است.

با توجه به نتایج جریان اسلامپ مشخص گردید کلیه طرح‌ها در محدوده ۵۵ الی ۷۵ سانتی‌متری می‌باشند که بیشترین و کمترین مقادیر اسلامپ به ترتیب مربوط به طرح‌های Z6 و A3 نیز می‌باشد. طبق آزمایش T50 ملاحظه گردید که بتن‌های حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی نسبت به بتن‌های حاوی ژئولیت زمان بیشتری را صرف رسیدن به قطر ۵۰ سانتی‌متری می‌کند که این به دلیل لزجت ظاهری بالاتر بتن‌های حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی نسبت به بتن‌های حاوی ژئولیت می‌باشد. در کلیه طرح‌ها در آزمایش جعبه L عدم جداشدگی بتن در



نمودار ۵: نتایج مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۷ و ۳ روزه

آهن‌گدازی و ژئولیت و همچنین قیمت آن‌ها باید مدنظر قرار گیرد.

### ۳.۳. محاسبه و ارزیابی فاکتور K

در روش طرح ملی مخلوط بتن برای محاسبه نسبت آب به سیمان معادل و جهت منظور نمودن اثر پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی در طرح مخلوط از ضریب  $k$  استفاده می‌شود. ضریب  $k$  بیانگر میزان اثربخشی پوزولان‌های مختلف بر مقاومت و دوام بتن می‌باشد به نحوی که میکروسیلیس در مقادیر برابر اثر بیشتری نسبت به سیمان دارند در حالی که خاکستر بادی و پوزولان‌های طبیعی معمولاً در اوزان مساوی کم‌اثرتر نسبت به سیمان می‌باشند.

همان‌طور که انتظار آن را داشتیم با افزایش سن نمونه‌ها؛ مقاومت فشاری نیز افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به طرح مخلوط‌های ساخته شده شاهد آن هستیم که با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی از ۰/۴۰ به ۰/۵۰ مقاومت فشاری کاهش یافته است. بیشترین و کمترین مقادیر مقاومت فشاری به ترتیب مربوط به طرح‌های ۴ گ و A3 نیز می‌باشد. همچنین ملاحظه می‌گردد که بتن‌های حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی نسبت به بتن‌های حاوی ژئولیت از نظر مقاومت فشاری عملکرد بهتری داشته و توصیه می‌گردد در بتن‌ریزی‌هایی که مقاومت فشاری در سازه مدنظر است از سرباره کوره آهن‌گدازی جهت افزایش مقاومت بتن نیز استفاده نماییم. البته ذکر این نکته حائز اهمیت است که درصد مصرف پوزولان‌های سرباره کوره

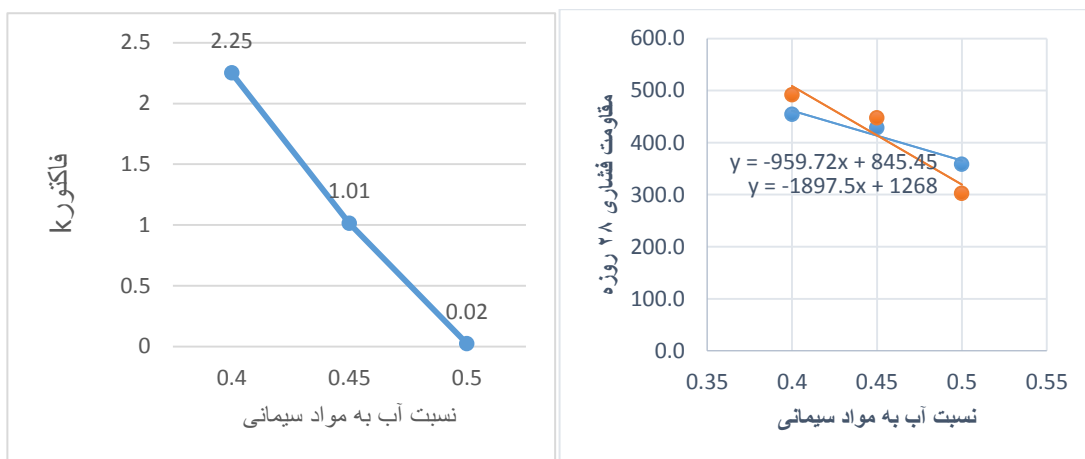


احساس می‌شود ولی مطالعات اولیه کافی در خصوص آن وجود ندارد، به همین دلیل در این پژوهش سعی بر آن شد که برای ژئولیت و سرباره کوره آهن‌گدازی در بتن خودتراکم این ضریب با توجه به استاندارد اروپایی *DIN CEN/TR 16639* نیز به دست آید. نمودارهای فاکتور *K* در برابر نسبت آب به سیمان در بتن خودتراکم برای طرح‌های ساخته‌شده مطابق شکل‌های شماره ۶ الی ۱۱ نیز می‌باشد.

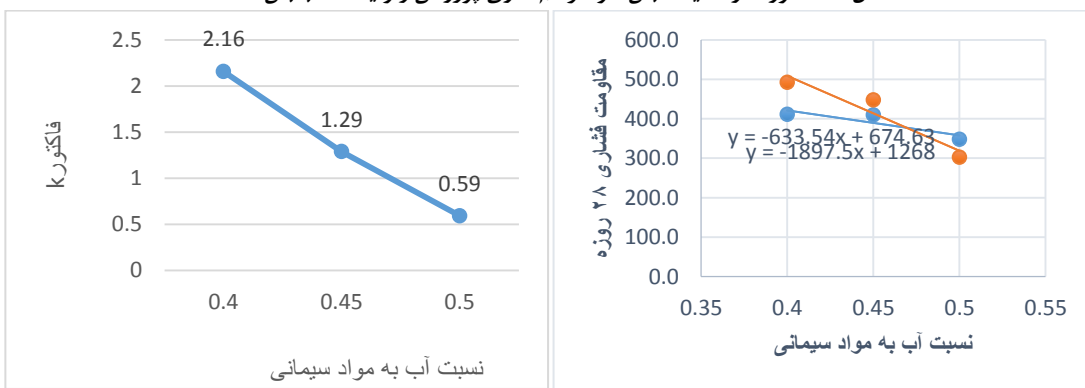
$$\left(\frac{W}{C}\right)_e = \frac{W_f}{C + k.M} \quad (1)$$

که در آن:  $\left(\frac{W}{C}\right)_e$ : نسبت آب به سیمان معادل

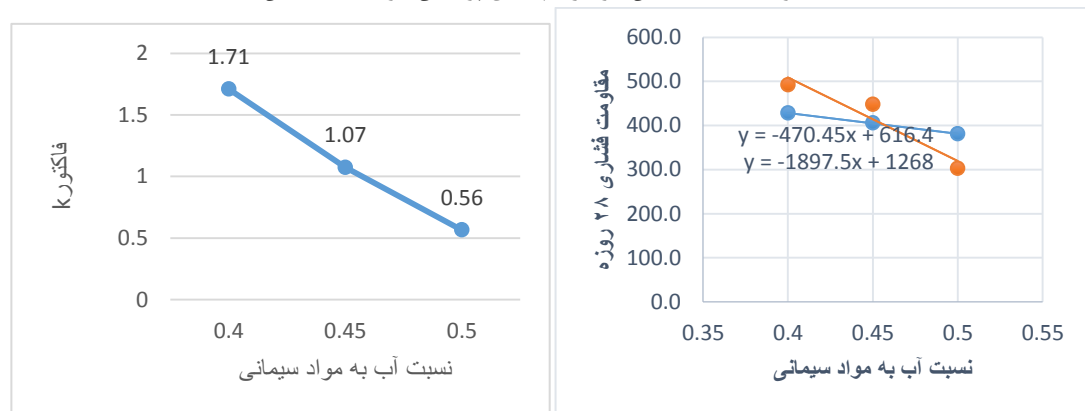
$W_f$ : آب آزاد  $M$ : مقدار افزودنی معدنی پودری فعال  
از طرفی با گسترش بتن‌های ویژه نظیر بتن خودتراکم ضرورت تدوین روش طرح ملی طرح مخلوط بتن خودتراکم



شکل ۶: فاکتور *K* و مقایسه بتن خودتراکم حاوی پوزولان ژئولیت ۵٪ با بتن شاهد

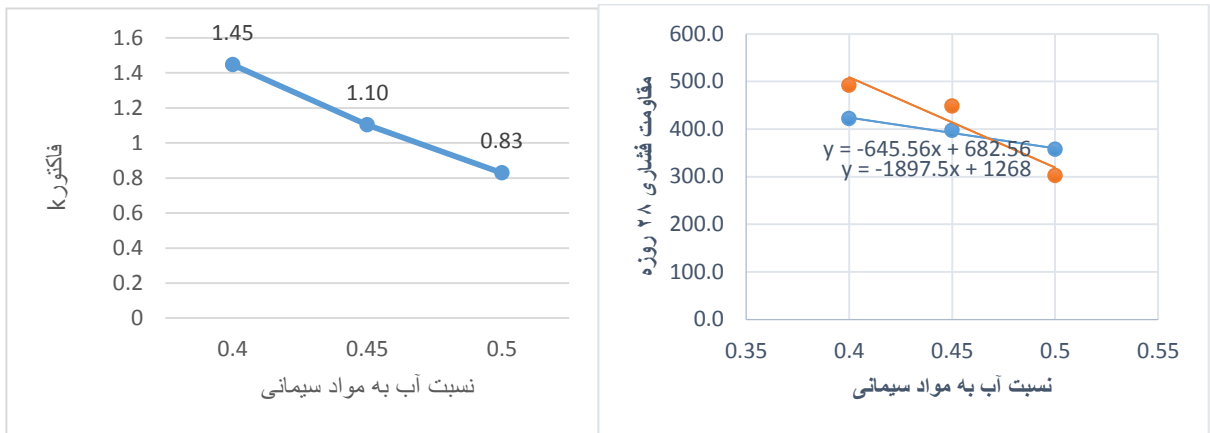


شکل ۷: فاکتور *K* و مقایسه بتن خودتراکم حاوی پوزولان ژئولیت ۱۰٪ با بتن شاهد

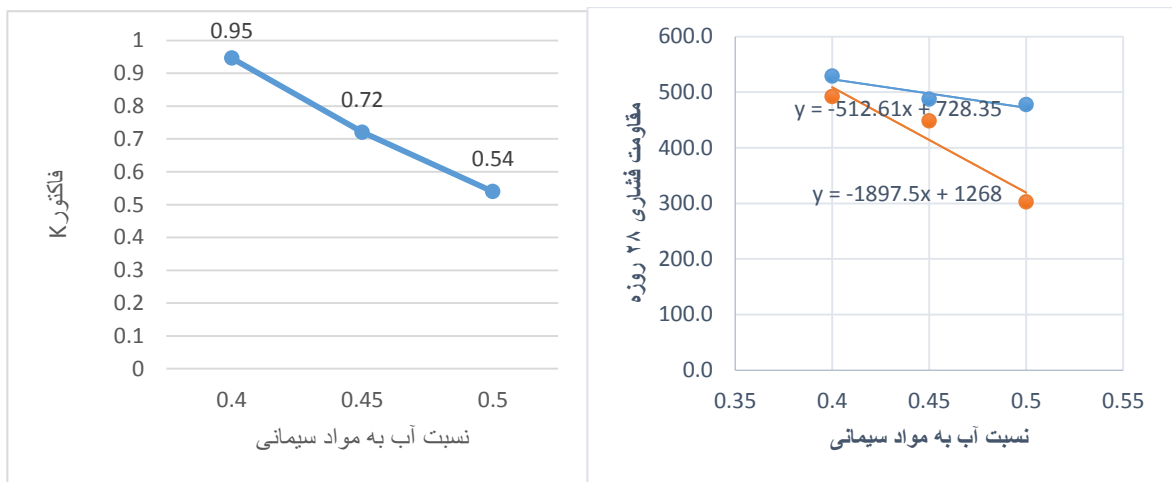


شکل ۸: فاکتور *K* و مقایسه بتن خودتراکم حاوی پوزولان ژئولیت ۱۵٪ با بتن شاهد

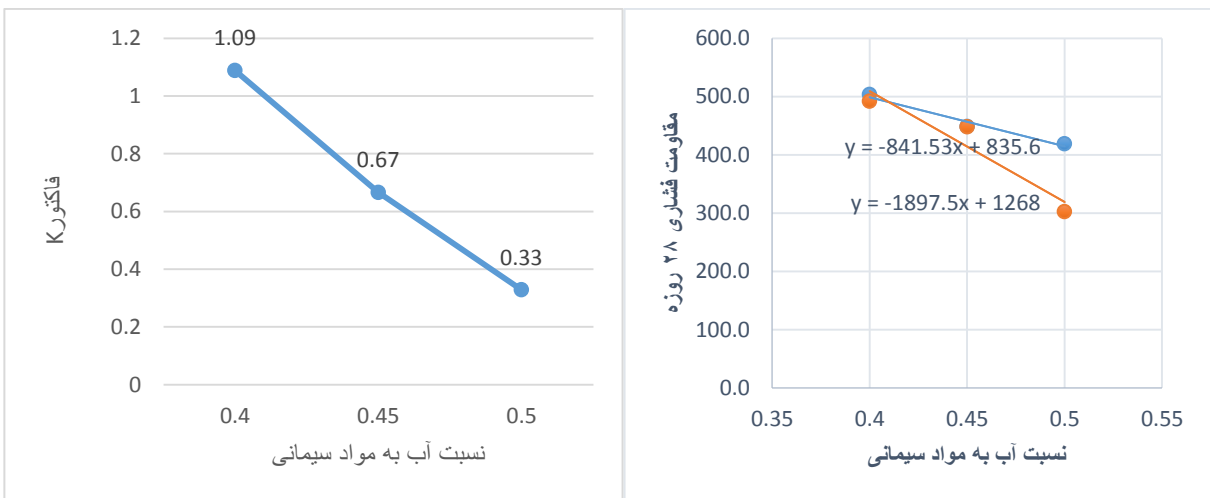




شکل ۹: فاکتور K و مقایسه بتن خودتراکم حاوی پوزولان سربراره کوره آهن‌گدازی ۲۵٪ با بتن شاهد



شکل ۱۰: فاکتور K و مقایسه بتن خودتراکم حاوی پوزولان سربراره کوره آهن‌گدازی ۳۵٪ با بتن شاهد



شکل ۱۱: فاکتور K و مقایسه بتن خودتراکم حاوی پوزولان سربراره کوره آهن‌گدازی ۱۵٪ با بتن شاهد

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی در محدوده ۰/۴۰ الی ۰/۵۰ در بتن‌های حاوی سربراره کوره آهن‌گدازی و زئولیت مقادیر فاکتور K کاهش می‌یابد.

#### ۴. نتیجه گیری

با توجه به اینکه مطالعات اولیه در خصوص بتن خودتراکم در حال انجام می‌باشد لذا لازم دانستیم که به بررسی و ارزیابی فاکتور  $K$  در بتن خودتراکم در این مطالعه بپردازیم لذا نتایج زیر قابل استخراج می‌باشد:

۱- نتایج نشان می‌دهد که بتن‌های حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی نسبت به بتن‌های حاوی زئولیت و بتن‌های شاهد دارای لزجت و قوام بیشتری می‌باشد و آزمایش  $T50$  در طرح‌ها نشان می‌دهد که بتن‌های حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی دارای سرعت حرکت کمتری برای رسیدن به قطر ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد لذا توصیه می‌گردد در بتن‌ریزی‌هایی که لزجت و قوام بتن از اهمیت بیشتری برخوردار است از این نوع بتن استفاده گردد. البته شایان ذکر است که میزان مصرف سرباره کوره آهن‌گدازی با زئولیت تفاوت چشمگیری دارد و برای مقایسه رئولوژی این دو نوع پوزولان بهتر است در درصدهای مصرف یکسان مورد مقایسه قرار گیرند.

۲- نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه حاکی از آن است که بتن حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی نسبت به بتن شاهد و بتن‌های حاوی زئولیت از عملکرد بهتری برخوردار می‌باشد و همچنین مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی ۳۵٪

#### مراجع

- [۱] توتونچی، ه.، خانزادی، م.، فامیلی، ه.، (۱۳۸۸). "بررسی تأثیر عیار سیمان بر رئولوژی و خواص مکانیکی بتن خودتراکم حاوی میکروسیلیس"، اولین کنفرانس ملی بتن، تهران.
- [۲] رضانیان‌پور، ع.، پیدایش، م.، میرولد، س.، آرامون، ا.، مهدیخانی، م.، (۱۳۸۸). "اثر انواع پوزولان طبیعی بر دوام بتن در برابر حمله کلرایدی"، اولین کنفرانس ملی بتن، تهران.
- [۳] قدوسی، پ.، شیرزادی جاوید، ع.، رحمتی، ب.، (۱۳۹۳). "روش نوین طرح مخلوط بتن خودتراکم بر پایه مقاومت فشاری"، تحقیقات بتن، سال ششم، شماره اول، ص ۸۷-۱۰۲.
- [۴] مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، (۱۳۸۸). "روش ملی طرح مخلوط بتن"، نشریه ۴۷۹، چاپ دوم.
- [5] DIN CEN/TR 16639.(2014) , " Use of k-value concept, equivalent concrete performance concept and equivalent performance of combinations concept", technical report.
- [6].Efnarc.(2005), "Specification and Guidelines for Self-compacting concrete".

سرباره کوره آهن‌گدازی از مقادیر دیگر بهتر ارزیابی شده و توصیه می‌گردد در سازه‌هایی که مقاومت فشاری بالاتری مدنظر می‌باشد از سرباره کوره آهن‌گدازی در طرح‌های اختلاط استفاده گردد.

۳- با توجه به مطالعه صورت پذیرفته می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مصرف زئولیت در بتن خودتراکم شاهد کاهش فاکتور  $K$  در بتن خودتراکم نیز می‌باشیم و مقدار فاکتور  $K$  در محدوده نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۰ الی ۰/۵۰ در بتن خودتراکم عدد ۱۱/۱۰ الی ۱/۶۰ نیز پیشنهاد می‌گردد.

۴- مقدار فاکتور  $K$  برای سرباره کوره آهن‌گدازی در محدوده نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۰ الی ۰/۵۰ در بتن خودتراکم عدد ۰/۷۰ الی ۱/۱۵ نیز پیشنهاد می‌گردد.

#### تشکر و قدردانی

از جناب آقایان مهندس محمدجواد طاهباز، مهندس جمال حیدری و مهندس اسلامی به خاطر راهنمایی‌هایشان سپاس‌گذاری می‌شود. همچنین از شرکت صنایع شیمیایی ژیکاو و تمامی کارکنان این شرکت به دلیل در اختیار گذاشتن تمامی امکانات آزمایشگاهی و انجام آزمایش‌ها کمال تشکر و قدردانی را داریم.