

## تأثیر مواد افزودنی کریستال شونده بر خودترمیمی بتن

سید حسین قاسم زاده موسوی نژاد \*  
استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه گیلان.  
محمد رضانی خواجه غیائی  
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه گیلان.

### چکیده

ترک خوردگی در سطح بتن موجب کاهش دوام مصالح می‌گردد. بنابراین، با جلوگیری از گسترش ترک‌های کوچک در هنگام وقوع آن از به‌وجود آمدن ترک‌های بزرگ‌تر پیشگیری می‌شود. یک روش افزودن موادی است که بتن بتواند در هنگام ایجاد ترک، خودش را ترمیم کند. هدف اصلی بررسی تأثیر مواد افزودنی کریستالی شونده (۴٪ وزن سیمان)، بر خودترمیمی بتن در سه شرایط محیطی و مقایسه آن با بتن شاهد است. ترمیم به وسیله آزمایش نفوذپذیری بر روی نمونه‌های ترک خورده مختلف بررسی گردید و بسته‌شدگی فیزیکی ترک توسط میکروسکوپ نوری و با استفاده از پارامترهای هندسی ترک اندازه‌گیری شد. بازشدگی ترک‌های بررسی شده زیر ۴۰۰ میکرومتر است و برای این ترک‌ها به مدت ۴۲ روز فرصت ترمیم در نظر گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که ترتیب نرخ ترمیم برای همه نمونه‌ها در سه شرایط محیطی غوطه‌ور در آب (نزدیک ۰/۸۵)، تر و خشک شدن‌های متناوب (نزدیک ۰/۵۹) و خشک (نزدیک ۰/۲۶۵) به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: بتن، خودترمیم، مواد افزودنی کریستال شونده، دوام، نفوذپذیری.

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

## ۱- مقدمه

متشابه هستند [۷-۹]. مطالعات دیگری بر روی استفاده از الیاف‌ها برای محدود کردن عرض ترک‌ها و در نتیجه بهبود ترمیم ذاتی منعطف شد [۱۰ و ۱۱]، که شامل استفاده از الیاف‌های مختلف [۱۲] و ارزیابی فرایند ترمیم تحت شرایط محیطی متفاوت انجام گرفت [۱۳].

به هر ترتیب، برای اثر ترمیمی قابل ملاحظه نمی‌توان تنها به پدیده ترمیم ذاتی بتن اکتفا کرد. به همین دلیل است که "مفاهیم ترمیم مهندسی" جدید در چندین سال اخیر مثل استفاده از عامل ترمیمی میکروکپسول‌ها [۱۴ و ۱۵]، بتن باکتریایی [۱۶] یا استفاده از مواد افزودنی کریستال شونده [۱۷] مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس گزارش مؤسسه بتن آمریکا مواد افزودنی کریستال شونده نوعی مواد افزودنی آب‌بند کننده بتن هستند [۱۸]. این محصول در مقابل محصولات آب‌گریز قرار می‌گیرند و بسیار آب‌دوست هستند، بر همین اساس در مجاورت آب و رطوبت به سادگی واکنش نشان می‌دهند. زمانی که این واکنش اتفاق می‌افتد، رسوبی غیر قابل حل با فرمول هیدرو سیلیکات کلسیم (CSH) ترک موجود را مسدود می‌کند که در مقابل نفوذ آب از خود مقاومت نشان می‌دهند. بر این اساس تری سیلیکات کلسیم (C<sub>3</sub>S) مؤلفه ماتریسی هستند که در حضور آب واکنش نشان می‌دهند. این محصولات توسط مواد شیمیایی فعال در سیمان و ماسه تشکیل شده است که با توجه به توانایی کریستال کننده و رسوب تشکیل شده از ملکول آب و کلسیم، CSH اصلاح شده تشکیل شد. به این ترتیب رسوبات کریستالی برعکس مصالح آب‌گریز جزوی از سیستم (مصالح مجاور ترک) می‌شوند و می‌تواند در مقابل فشار زیادی تا ۱۴ بار مقاومت کند [۱۸]. بعضی از محققین، بسته شدن ظاهری ترک توسط مواد افزودنی مختلف در نمونه‌های ملات نسبت به ملات پرتلند شاهد را با استفاده از خاکستر بادی، افزودنی‌های منبسط شونده، سیلیسیم، افزودنی‌های کریستالی و پودر سنگ آهک، با شرایط محیطی غوطه‌ور در آب، مورد مطالعه قرار دادند [۱۹]. نشان داده شده است که مواد افزودنی کریستالی نسبت به افزودنی‌های دیگر فرایند ترمیم را با نرخ بیشتری در ترک‌های کوچک (کمتر از ۰/۰۵ میلیمتر) بهبود می‌بخشد. هرچند آن‌ها برای ترک‌های بزرگ تر ناکارآمد هستند. در مطالعات دیگر خود ترمیمی ملات، تاثیر مواد افزودنی کریستال شونده و مواد افزودنی منبسط کننده

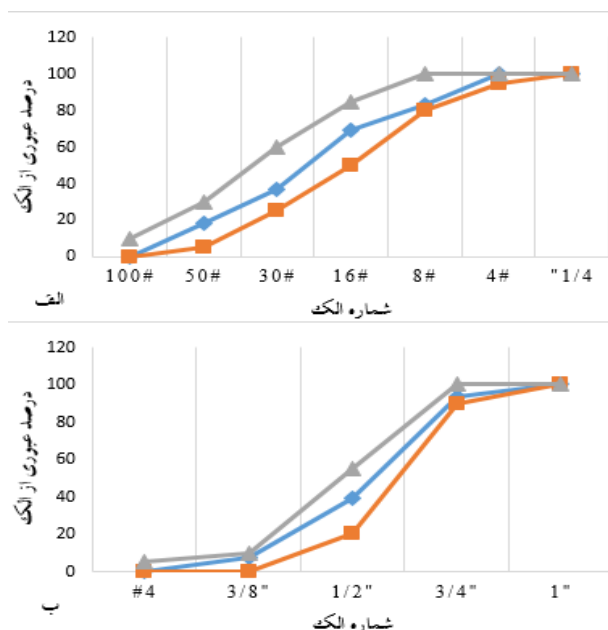
امروزه بتن آرمه به‌عنوان یک گزینه قابل اعتماد برای ساخت بسیاری از سازه‌های کوچک و بزرگ محسوب می‌گردد، به‌طوری که شاید بتوان از آن به‌عنوان مهمترین ماده ساختمانی موجود با کاربردی فراگیر نام برد. از طرف دیگر برای بتن نقاط ضعفی را می‌توان برشمرد که گاه ممکن است رغبتی برای استفاده از سایر مصالح ساختمانی را فراهم آورد. مقاومت کششی بتن بسیار پایین بوده و حدود یک دهم مقاومت فشاری آن است، این مسئله استفاده از فولاد در ناحیه کششی را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. با وجود این معمولاً در ناحیه کششی ترک‌هایی ایجاد شد که لازم است با تمهیدات خاص عرض این ترک‌ها را محدود کرد. چنین ترک‌هایی ممکن است در موارد خاص، زمینه نفوذ آب یا رطوبت یا یون‌های زیان‌آور را فراهم کنند. علاوه بر این تغییرات حجمی بتن باعث بروز پدیده‌هایی نظیر جمع‌شدگی و خزش شده که با گذشت زمان، ترک‌هایی را در بتن ایجاد می‌کنند [۱].

بسیاری از محققان با الهام از طبیعت، مانند درمان طبیعی زخم یا بریدگی در موجودات زنده که می‌توانند به صورت خود به خودی زخم خود را درمان کنند، توانسته‌اند از این ایده برای مصالح مصنوعی مانند بتن استفاده کنند و بتن را به‌عنوان یک بتن هوشمند معرفی نمایند [۲].

در گذشته برخی تحقیقات کامل روی موضوع بتن خودترمیم انجام گرفته است. نویل در سال ۱۹۸۱ به پدیده ترمیم ذاتی بتن و علت آن اشاره کرده بود. او دریافت که ممکن است ترک‌های ریز در بتن به‌طور کامل تحت شرایط مرطوب ترمیم پیدا کنند و علت این پدیده را تأخیر هیدراتاسیون، ذرات سیمان هیدراته نشده و کربناسیون بیان کرده بود [۳]. مدتی بعد این تحقیقات به وسیله هرن (۱۹۹۸)، ادواردسن (۱۹۹۹) و هاید (۲۰۰۵) ادامه پیدا کرد که تمام این محققان عامل اصلی خودترمیمی را به تأخیر افتادن هیدراتاسیون برای بتن کم سن و سال می‌دانند و این در حالی هست که کربناسیون، بیشتر برای بتن‌های قدیمی اهمیت دارد [۴-۶]. در مطالعات اخیر استفاده از سیمان با درصد‌های مختلفی از سیمان پرتلند و مواد افزودنی‌ها در فرایند ترمیم ذاتی مقایسه شدند که نتایج بهتر با مواد سیمانی شامل سرباره آهن‌گدازی و خاکستر بادی بدست آمده، به این صورت که باعث بهبود اثر تأخیر هیدراتاسیون می‌شوند، درحالی‌که رسوب کربناسیون با مواد سیمانی متفاوت

طبیعی و از شرک لوله‌سازی شمال تهیه شد. دانه‌بندی و مشخصات آن‌ها مطابق با استاندارد ASTM C۳۳ به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۲ آمده است.

مواد افزودنی کریستال شونده مصرفی با نام تجاری green seal gs100 محصول شرکت گرین سیل مالزی است که مشخصات فیزیکی این مواد افزودنی در جدول ۳ آورده شده است. این مواد به‌عنوان مواد افزودنی به صورت پودر به میزان ۴٪ وزن مواد سیمانی پس از اختلاط کامل با مواد سیمانی در طرح اختلاط استفاده شد.



شکل ۱- نمودار دانه بندی مصالح سنگی: ماسه (الف)، شن (ب)

## ۲-۲- نسبت های اختلاط

در این مقاله از دو طرح اختلاط استفاده شد. برای مخلوط شاهد نسبت آب به سیمان ۰/۳۶ و عیار سیمان  $450 \text{ kg/m}^3$  است. برای مخلوط دوم به میزان ۴٪ مواد افزودنی کریستالین شونده استفاده شده است. تمامی اوزان بر حسب یک متر مکعب است که بر اساس روابط حجمی ACI 211 به دست آمده است. برای بتن ساخته شده به میزان ۱ درصد هوا در نظر گرفته شده است و همچنین میزان شن مصرفی ۶۰ درصد حجم کل بتن در نظر گرفته شده است. طرح اختلاط در جدول ۴ آورده شده است.

و ترکیبی از آن دو، با آزمایش نفوذ پذیری و بسته شدن بصری انجام شد. برای استفاده از مواد افزودنی کریستالی به تنهایی محدودیت هایی برای ترمیم ترک بزرگتر از ۱۵۰ میکرومتر وجود داشت، اما برای ترکیبی از مواد افزودنی منبسط شونده و کریستالی، ترمیم کاملی برای ترک‌های بزرگتر از ۴۰۰ میکرومتر به دست آمد [۱۷].

مطالعه در مورد خواص خودترمیمی براساس ایجاد خرابی خاصی (به طور مثال ایجاد پیش ترک در نمونه استوانه ای) انجام شد و ارزیابی آن خرابی تحت شرایط محیطی متفاوت می‌تواند بر روی مشخصات دوام و مکانیکی بتن انجام پذیرد. در سال‌های اخیر روش‌های متفاوتی برای این اهداف منتشر شده است. چندین روش برای آنالیز نفوذ پذیری و به‌طور همزمان آزمایش بار [۲۰] یا آزمایش‌های مستقل برای هر قسمت از نمونه‌های ترک خورده ارائه شده است [۱۸]. در مورد رابطه بین خرابی وارد شده و خواص نفوذ پذیری، ادواردسن یک رابطه نسبی بین جریان آب را از طریق یک نمونه بتن ترک خورده و عرض ترک با بیان حاصل از قانون پوینسویل (Poiseuille) پیشنهاد کرد [۵]. در این پژوهش از نمونه‌های بتنی به جای ملات استفاده شده است، که در آن مساحت ناحیه ترک خورده قبل و بعد از ترمیم توسط نرم افزار فتوشاپ با دقت بسیار بالایی محاسبه گردید و نسبت بسته‌شدگی ترک نسبت به آزمایش نفوذپذیری از همبستگی خوبی برخوردار است.

## ۲- بر نامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

سیمان مورد استفاده در این پژوهش، از نوع سیمان پرتلند تیپ ۲ و مطابق با استاندارد ISIRI-389 است که از کارخانه سیمان هگمتان همدان تهیه شده است. طبق مشخصات فنی ارائه شده توسط کارخانه، وزن مخصوص این سیمان  $3 \text{ gr/cm}^3$  و نرمی آن  $2910 \text{ cm}^2/\text{gr}$  است که مشخصات شیمیایی آن در جدول ۱ آمده است.

شن مورد استفاده شده از نوع شکسته و از محل تأمین کنندگان مصالح سنگی ولیعصر شهر رشت و ماسه مورد استفاده از نوع ماسه

جدول ۱- ترکیب شیمیایی سیمان

ترکیب شیمیایی										
LOI	C <sub>3</sub> A	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	CO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	
۲/۱۱	۶/۳۰	۲/۲۶	۰/۴۹	۰/۶۵	۱/۵۵	۶۲/۹۵	۴/۰۳	۴/۹۵	۲۱/۲۷	درصد وزنی

جدول ۲- مشخصات مصالح سنگی

نوع سنگدانه		مشخصات
شن	ماسه	
۰/۷۴	۰/۸۰۴	درصد رطوبت در حالت SSD
۲۴۶۰	۲۶۳۰	چگالی در حالت SSD (Kg/m <sup>3</sup> )
۱۶۰۳	-	وزن مخصوص خشک (Kg/m <sup>3</sup> )
۱۹	۴/۷۵	حداکثر اندازه سنگدانه (mm)

جدول ۳- مشخصات فیزیکی مواد افزودنی کریستال شونده

۳ gr/cm <sup>3</sup>	وزن مخصوص
خاکستری	رنگ
پودر	حالت فیزیکی
۱۱-۱۳	PH
ندارد	یون کلر

ویبره شد، پس از قالب گیری و پرداخت نمونه‌ها، سطح آن‌ها با نایلون پوشانده شد و پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از قالب خارج گردید. با توجه به شکل ۲ نمونه‌ها به مدت ۲ روز برای آزمایش‌های اولیه در داخل حوضچه با دمای ۲۴ درجه سانتیگراد برای عمل آوری، از نمونه‌ها نگهداری شد. بعد از آن بر روی نمونه‌ها به وسیله بارگذاری برزلی پیش ترک ایجاد شد و آن‌ها را در سه شرایط محیطی غوطه‌ور در آب (WI)، محیط آزمایشگاه (AE) و تر و خشک شدن‌های متناوب (WD) (۴۸ ساعت به صورت غوطه‌ور و ۴۸ ساعت به صورت خشک) به مدت ۴۲ روز برای آزمایش‌های ثانویه نگهداری شدند. با توجه به جدول ۵، در این پژوهش برای هر طرح اختلاط از ۱۳ نمونه استوانه‌ای ۱۵×۱۵ سانتیمتری جهت آزمایش نفوذپذیری و میکروسکوپی برای هر طرح اختلاط و شرایط محیطی و ۳ نمونه مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتیمتری جهت آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه به صورت غوطه‌ور در آب استفاده شد.

جدول ۴- طرح اختلاط بتن شاهد و کریستالی

مصالح (kg/m <sup>3</sup> )	بتن کریستالی (C)	بتن شاهد (Ref)
سیمان تپ ۲	۴۵۰	۴۵۰
آب	۱۶۲	۱۶۲
ماسه طبیعی (۳-۰ mm)	۷۸۰	۸۰۰
شن (۱۹-۹/۵ mm)	۹۶۵	۹۶۵
الیاف فولادی	۴۰	۴۰
فوق روان کننده	۲/۰۲۵	۱/۹۸
مواد افزودنی کریستال شونده	۱۸	۰
اسلامپ (mm)	۱۰۰	۱۰۰

۴-۲- روش‌های تجربی

در ادامه به شرح روش انجام هر یک از آزمایش‌های انجام شده و سنین انجام آزمایش پرداخته شده است.

۲-۳- ساخت نمونه‌ها و عمل آوری

برای ساخت نمونه‌ها از سنگدانه‌های اشباع با سطح خشک استفاده شد تا از استفاده آب مازاد جهت اشباع کردن سنگدانه‌ها جلوگیری شود، برای این کار تمامی سنگدانه‌ها پس از شستن و رفع آلودگی، برای رسیدن به طرحی ثابت در محیط آزاد خشک شدند. تمامی نمونه‌ها به کمک مخلوط کن ۵۰ لیتری موجود در آزمایشگاه بتن دانشگاه گیلان، ساخته شده‌اند. توالی اختلاط بتن به این صورت انجام گرفت: ابتدا ماسه و شن به صورت خشک در داخل میکسر ریخته شد و به مدت یک دقیقه مخلوط گردید، دوم سیمان را به همراه الیاف فولادی و مواد افزودنی کریستال شونده به صورت خشک داخل مخلوط کن ریخته شد و به مدت یک دقیقه مخلوط گردید، سوم به میزان ۹۰ درصد، آب به مخلوط اضافه گردید و به مدت دو دقیقه اختلاط ادامه پیدا کرد، چهارم ۱۰ درصد باقی مانده آب با فوق روان کننده مخلوط شد و به مخلوط اضافه شد و به مدت سه دقیقه دیگر اختلاط ادامه پیدا کرد و در نهایت مخلوط بدست آمده را پس از حمل مخلوط آن را در داخل قالب‌ها ریخته و پس از آن به مدت کافی تا زمانی که شیره بتن مشخص شود

تاثیر مواد افزودنی کریستال شونده بر ...

بارگذاری جهت ایجاد پیش ترک، برای رسیدن به عرض ترک مورد نظر، سرعت بارگذاری به صورت آهسته و کنترل شده تنظیم شد. از میکروسکوپ نوری و خط کش مدرج میکرومتری جهت رسیدن به عرض ترک مورد نظر (۰/۴-۰ میلیمتر) استفاده گردید.



شکل ۳- فرآیند ایجاد پیش ترک بر روی نمونه‌های بتنی

#### ۲-۴-۳- ارزیابی مشخصات ترمیم: آزمایش نفوذپذیری

روش انجام این آزمایش بر اساس آزمایش نفوذپذیری شرح داده شده در استاندارد UNE-EN 12390-8 است، لذا به جای اندازه‌گیری عمق نفوذ آب، میزان جریان آب عبوری از ترک مد نظر قرار گرفته شده است. با توجه به شکل ۴ این آزمایش با فشار جریان آب ۱ psi  $\pm 0.05/0.03$  (بار) به صورت اتوماتیک انجام شد.



شکل ۴- آزمایش نفوذپذیری آب

این آزمایش شامل دو مرحله است: ۱- اندازه‌گیری مقدار آب عبوری از ترک به مدت ۵ دقیقه بلافاصله بعد از ایجاد پیش ترک ۲- اندازه‌گیری مقدار آب عبوری از ترک به مدت ۵ دقیقه پس از



شکل ۲- توالی تر و خشک شدن‌های متناوب

جدول ۵- تعداد نمونه‌های ساخته شده با توجه به شرایط محیطی

بتن	شرایط محیطی	تعداد نمونه‌ها	
		جهت آزمایش میکروسکوپی	تعداد نمونه‌ها
Ref	WI	۱۰	۳
	WD	۱۰	۳
	AE	۱۰	۳
C	WI	۱۰	۳
	WD	۱۰	۳
	AE	۱۰	۳

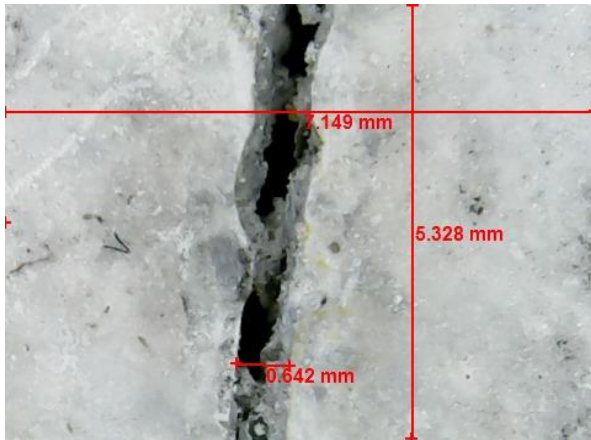
#### ۲-۴-۱- آزمایش مقاومت فشاری

مقاومت فشاری کلیه طرح اختلاطها در سن ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفت. برای انجام این آزمایش از نمونه‌های مکعبی  $10 \times 10 \times 10$  سانتیمتری استفاده شده است.

#### ۲-۴-۲- ایجاد خرابی: روند پیش ترک دادن

با توجه به شکل ۳ بر روی نمونه‌های استوانه‌ای ( $\Phi 150 \times 150$ ) در سن ۳ روزه به وسیله بارگذاری برزلی پیش ترک ایجاد شد. در حین انجام

ناحیه طول ترک پوشش می‌دهد. با تقسیم طول ۷/۱۵ میلی‌متر بر ۴۸۰ پیکسل، بعد هر پیکسل ۱۴/۹ میکرومتر به دست آمد و مساحت هر پیکسل ۲۲۱/۹ میکرومتر محاسبه گردید.

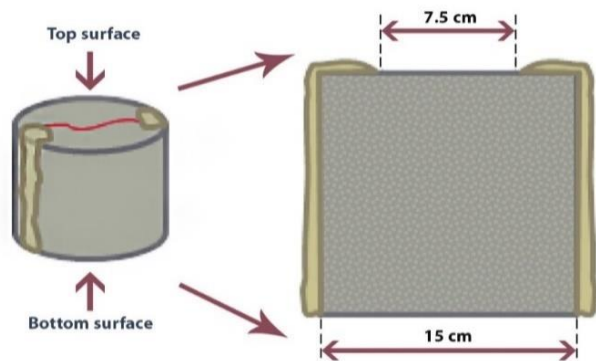


شکل ۶- ابعاد واقعی تصویر ناحیه ترک با بزرگنمایی ۵۰ برابر

پرسی که در حال حاضر مطرح است، چگونگی اندازه‌گیری مساحت کل ترک است. با توجه به شکل ۷ برای اندازه‌گیری مساحت دقیق کل ترک ( $A_{ex}$ )، از ابتدا تا انتهای ترک به صورت گام به گام و منفرد تصویر برداری شد، سپس این تصاویر با استفاده از برنامه Adobe Photoshop CS6 در کنار هم قرار داده شدند و یک تصویر سراسری پانوراما ایجاد شد. بعد از ایجاد تصویر سراسری پانوراما، از امکانات برنامه فتوشاپ استفاده شد و با تعیین حدود کردن مرزهای ترک، مساحت محصور بر اساس تعداد پیکسل‌ها و ضرب کردن آن‌ها در ابعاد آن‌ها بدست آمد. برای ایجاد تصاویر پانوراما از ترک نمونه‌های بتنی، یازده تصویر متوالی گرفته شد و به هم پیوند زده شدند. بعد از مشخص شدن مساحت محصور، از رنگ قرمز برای تعیین ناحیه ترمیم نشده و از رنگ زرد برای تعیین ناحیه ترمیم شده استفاده شد. با وجود مساحت پیکسلی، درصد بسته‌شدگی ترک بدست آمد.

۲- دومین خروجی این آزمایش بدست آوردن رابطه همبستگی بین مساحت دقیق ترک ( $A_{ex}$ ) و آزمایش نفوذپذیری است که با رسم رگرسیون‌های خطی و غیر خطی درجه سوم (Cubic) می‌توان دریافت که آیا با افزایش هندسه ترک میزان نرخ ترمیم افزایش می‌یابد یا خیر؟ و چه رابطه‌ای میان این دو پارامتر وجود دارد. همچنین می‌توان همبستگی نسبت بسته‌شدگی بصری ترک و نسبت ترمیم (میران نفوذپذیری آب) را نیز بدست آورد و آن‌ها را تحلیل و بررسی کرد.

فرایند ترمیم ترک. انتظار منطقی از این آزمایش این است که میزان آب عبوری، بعد از ترمیم کاهش داشته باشد، مگر آن که در ریز ساختار بتن در طول مدت ترمیم تغییراتی ایجاد شده باشد. با توجه به این که ترک ایجاد شده تا لبه‌های بتن نیز پیشروی کرده است، برای جلوگیری از نشت آب در کناره‌ها در هنگام آزمایش نفوذپذیری، از چسب بتن (Epoxy) جهت آب‌بندی این نواحی استفاده شده است. مشخصات آن در شکل ۵ آمده است.



شکل ۵- نحوه درزبندی لبه‌های نمونه‌های بتنی با استفاده از چسب بتن

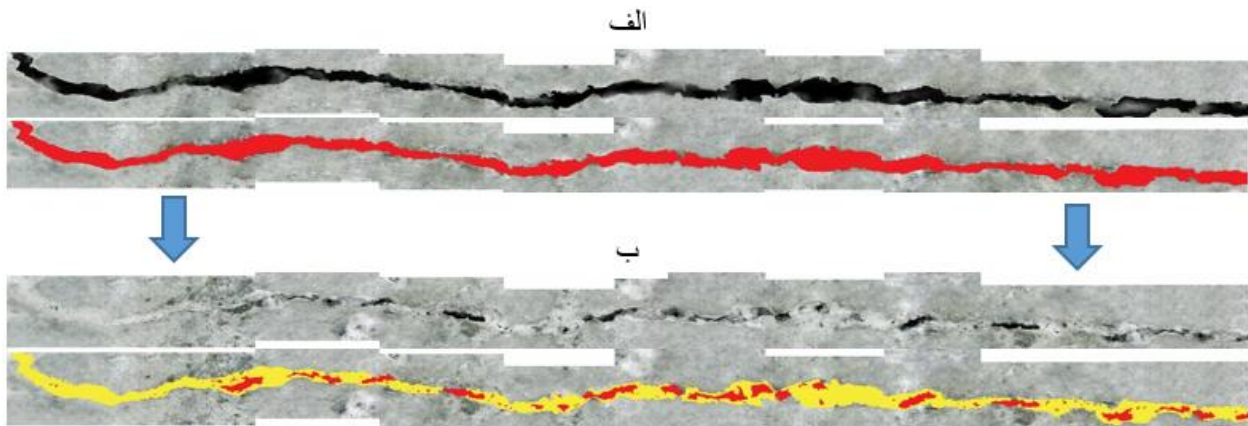
## ۲-۴-۴- ارزیابی مشخصات ترمیم: تحلیل هندسی ترک

این آزمایش با استفاده از میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۵۰ برابر استفاده شده است، نام محصول مورد استفاده، *cooling tech microscope* است. با استفاده از این میکروسکوپ به راحتی می‌توان مقدار عرض ترک را در حین بارگذاری کنترل کرد، همچنین با استفاده از این میکروسکوپ نوری می‌توان از ترک ایجاد شده بر روی نمونه‌ها جهت تحلیل هندسی، به صورت گام به گام تصویر برداری کرد.

تحلیل هندسی ترک به دو منظور انجام شد:

۱- تعیین میزان ترمیم ظاهری ترک با تصویربرداری از سطح ترک و با مقایسه پیکسلی مساحت ترک در دو مرحله قبل از ترمیم و بعد از ترمیم صورت گرفت. با توجه به این که هر تصویر از تعدادی پیکسل تشکیل شده و هر یک از این پیکسل‌ها دارای ابعاد مشخصی هستند، با جمع تعداد آن‌ها می‌توان مساحت هر یک از اشکال را به صورت دقیق به دست آورد. در شکل ۶ نشان داده شده است ابعاد هر تصویر ۴۸۰×۳۶۰ پیکسل است. با توجه به این که تصویر برداری از سطح ترک با بزرگنمایی ۵۰ برابر انجام شده است، هر یک از تصاویر ابعاد  $۷/۱۵ \times ۵/۳۳$  میلی‌متر را برای هر





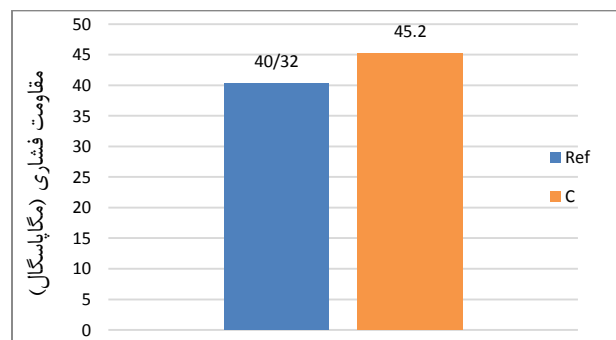
شکل ۷- تصویر پانورامای ترک با بزرگنمایی ۵۰ برابر: قبل از ترمیم با آرایش قرمز(الف)، بعد از ترمیم با آرایش زرد و قرمز(ب)

### ۳- تحلیل و بررسی نتایج آزمایش ها

#### ۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

به عدد صفر گرایش پیدا کند نشان دهنده آن است که میزان جریان اولیه و جریان نهایی برابر هستند؛ و زمانی که نرخ ترمیم به عدد یک گرایش پیدا می کند نشان می دهد میزان جریان نهایی صفر است. مقادیر منفی نشان دهنده بازشدگی ترک در طول مدت ترمیم است. همانطور که در نمودار پراکندگی شکل ۹ دیده شد نمونه هایی که در شرایط محیطی غوطه ور در آب (WI) نگهداری شده اند دارای پراکندگی کم و پایداری بیشتری نسبت به سایر شرایط محیطی هستند. در محیط غوطه ور در آب، نرخ ترمیم نمونه های مخلوط C در محدوده ۰/۸ و ۰/۹۶ بالاتر از نمونه های مخلوط Ref با محدوده ۰/۶ و ۰/۹۶ هستند و نسبت به نمونه های مخلوط Ref با ثبات تر و پایداری عمل کرده اند و از طرفی دارای قابلیت اعتماد بالاتری هستند. این نمودار نشان می دهد با کاهش میزان آب برای عمل آوری نمونه ها، پراکندگی ها بیشتر می شوند و باعث بی ثبات تر شدن نتایج شد. در محیط تر و خشک شدن های متناوب (WD)، نمونه های مخلوط C از میانگین نرخ ترمیم بالاتری با محدوده ۰/۳۸ و ۰/۹۲ نسبت به نرخ ترمیم نمونه های مخلوط Ref با محدوده ۰/۲۶ و ۰/۸۶ برخوردار هستند. نمونه های مخلوط C و Ref در محیط تر و خشک شدن های متناوب، دچار نزول پایداری زیادی نسبت به محیط غوطه ور در آب شده اند، البته نمونه های مخلوط Ref دچار ناپایداری بیشتری شده اند. با توجه به نمودار شکل ۹، نمونه هایی که در محیط خشک (AE) قرار گرفته اند دارای ضعیف ترین نتایج بودند. برای هر دو مخلوط C و Ref، میانگین نرخ ترمیم بسیار پایین بدست آمد، به طوری که در بعضی از نمونه ها مقادیر نرخ ترمیم منفی به دست آمد که نشان می دهد برای تعدادی از نمونه ها بازشدگی ترک رخ داده

هدف اصلی در این پژوهش بدست آوردن مشخصات ترمیم است، علی ای حال آزمایش مقاومت فشاری جهت مقایسه بهتر و حصول اطمینان از کیفیت نمونه های ساخته شده در سن ۲۸ روز، انجام شد. نمودار شکل ۸ نشان می دهد بتن حاوی مواد افزودنی کریستال شونده، میزان مقاومت فشاری را به میزان ۱۲/۱٪ نسبت به بتن شاهد، بهبود بخشید. به نظر می رسد وجود میکروسیلیس در مواد افزودنی کریستال شونده باعث افزایش مقاومت فشاری به این میزان شده است.



شکل ۸- میزان مقاومت فشاری برای دو بتن C و Ref

#### ۳-۲- نتایج خودترمیمی: آزمایش نفوذپذیری

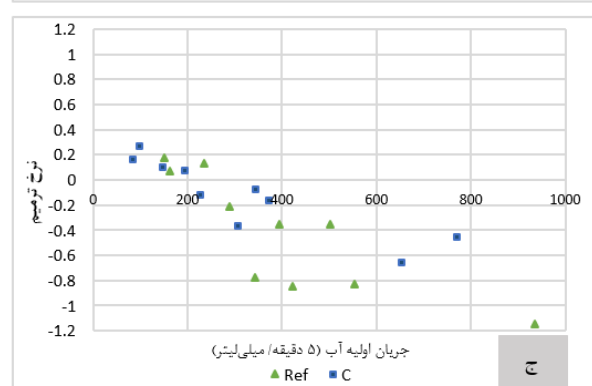
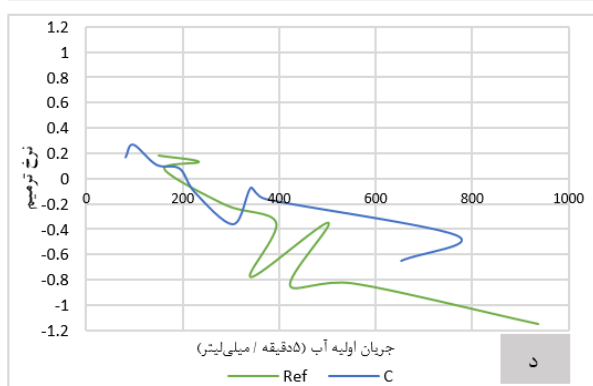
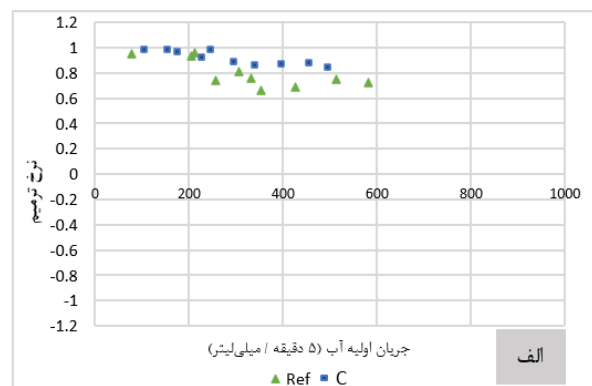
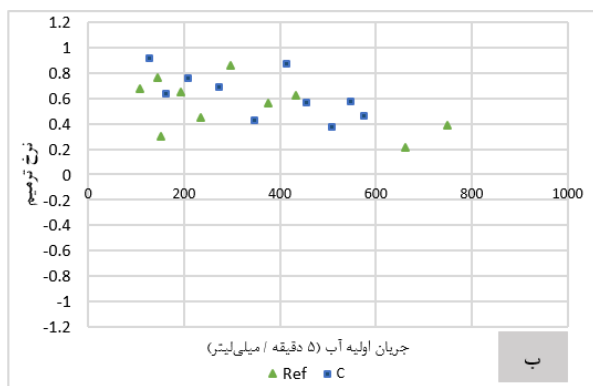
خواص خودترمیمی با توجه به نفوذپذیری اولیه و نهایی بر اساس رابطه ۱ تعیین شده است:

$$\text{نرخ ترمیم} = 1 - \frac{\text{جریان اولیه}}{\text{جریان نهایی}} = 1 - \frac{Q_{42}}{Q_0} \quad (1)$$

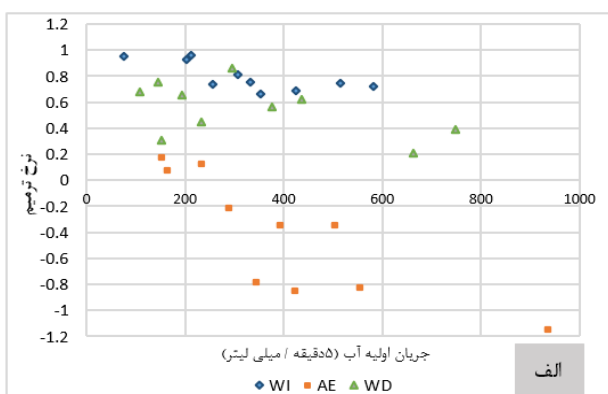
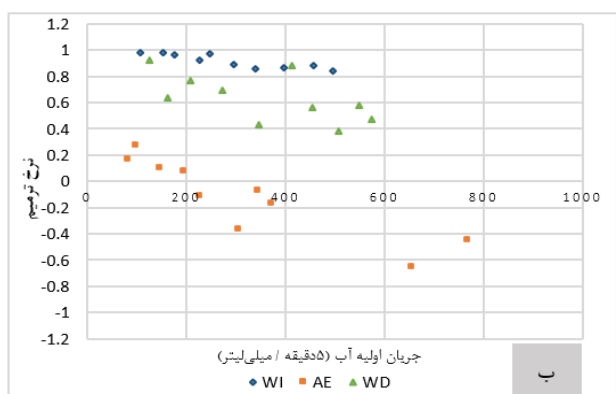
در این رابطه  $Q_{42}$ ، جریان نهایی بعد از ۴۲ روز ترمیم و  $Q_0$ ، جریان اولیه بلافاصله بعد از ایجاد پیش ترک است. زمانی که نرخ ترمیم

دچار انحراف و سیر نزولی شده‌اند. در نمودار شکل ۱۰ رفتار بتن شاهد و بتن کریستالی برای سه شرایط محیطی به طور مجزا برای مقایسه بهتر رسم شده است. این شکل میزان وابستگی شدید خودترمیمی به آب را نشان می‌دهد. با افزایش مقدار آب در شرایط محیطی میزان نرخ ترمیم افزایش پیدا کرد و منجر به پایداری بیشتر شد. در نمودار میله ای شکل ۱۱ مقادیر میانگین نرخ ترمیم برای بتن های C و Ref آورده است و نشان می‌دهد میانگین نرخ ترمیم بتن کریستالی در محیط غوطه‌ور در آب و تر و خشک شدن‌های متناوب باعث افزایش حدود ۱۰٪ نرخ ترمیم شده است.

عامل این پدیده می‌تواند جمع شدگی حاصل از انقباض در حین نگهداری نمونه‌ها در محیط خشک باشد. قابل ذکر است حتی در محیط خشک هم، میزان میانگین نرخ ترمیم نمونه‌های مخلوط C نسبت به نمونه‌های مخلوط Ref بیشتر بدست آمده است، به طوری که محدوده نرخ ترمیم برای C، در محدوده ۰/۶۵-۰/۲۷ و برای Ref، در محدوده ۰/۱۵-۰/۱۸ قرار گرفته است. در شکل ۹ (د)، نمودار منحنی تغییرات نرخ ترمیم براساس جریان اولیه رسم شده است. این نمودار نشان می‌دهد نمونه‌های C متمایل به محور افقی نمودار و نمونه‌های Ref نسبت به محور افقی نمودار



شکل ۹- بتن Ref و C در سه شرایط محیطی: (الف) غوطه‌ور در آب، (ب) تر و خشک شدن‌های متناوب، (ج) خشک، (د) خشک به صورت خط منحنی



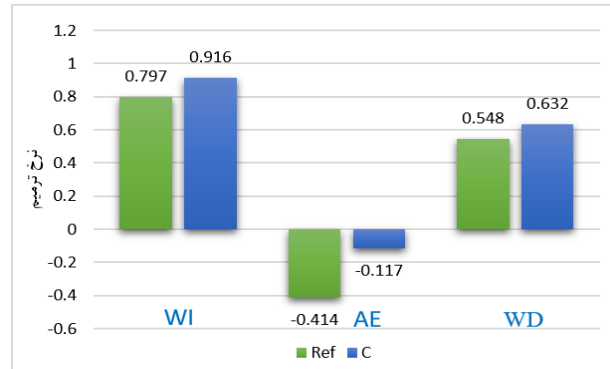
شکل ۱۰- رفتار بتن شاهد (الف) و بتن کریستالی (ب) تحت سه شرایط محیطی



می توان از این آزمایش به عنوان ارزیابی اولیه ترک استفاده کرد و می تواند برای قضاوت اولیه میزان ترمیم ترک مناسب باشد. با توجه به شکل ۸، درصد بسته شدگی بصری ترک با استفاده از تصاویر پانوراما انجام شد و به وسیله رابطه (۲) تعیین گردید:

$$(2) \quad \text{درصد بسته شدگی} = \frac{\text{مساحت ناحیه زرد رنگ در بعد از ترمیم}}{\text{مساحت ناحیه قرمز رنگ در قبل از ترمیم}} \times 100$$




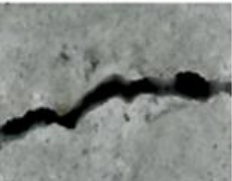
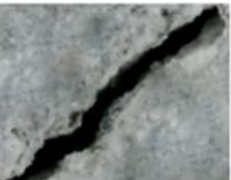
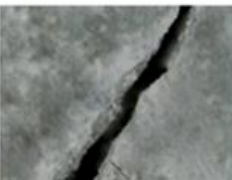
در شکل ۱۲ تصاویر منفرد از ترک (قبل و بعد از ترمیم) به عنوان نماینده هایی از کل طول ترک برای نشان دادن نرخ بسته شدگی ترک ارائه شده است. قسمت هایی از ترک که در مجاورت خمیر سیمان قرار دارند، میزان کربنات کلسیم رسوب شده بیشتر مشاهده شد.



شکل ۱۱- میانگین نرخ ترمیم برای دو مخلوط متفاوت و سه شرایط محیطی

### ۳-۳- نتایج خود ترمیمی: تحلیل هندسی ترک

باتوجه به این که با استفاده از میکروسکوپ نوری به راحتی می توان تشکیل کربنات کلسیم را در سطح ترک مشاهده کرد،

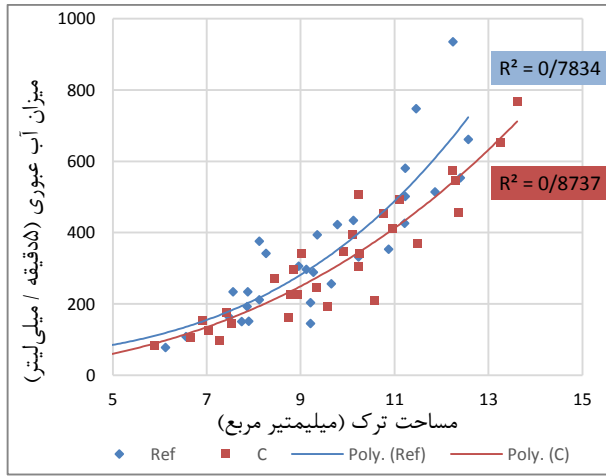
	بتن شاهد	بتن با مواد افزودنی کریستال شونده	
		قبل از ترمیم	بعد از ترمیم
شرایط محیطی	غوطه ور در آب	 بسته شدگی ترک: ۸۹٪	 بسته شدگی ترک: ۱۰۰٪
	ترو خشک شدن های متناوب	 بسته شدگی ترک: ۶۴٪	 بسته شدگی ترک: ۷۲٪
	خشک	 بسته شدگی ترک: ۰٪	 بسته شدگی ترک: ۰٪

شکل ۱۲- مقایسه نمای ترک در ۰ و ۴۲ روز بعد از ترمیم برای بتن کریستالی و بتن شاهد تحت سه شرایط محیطی

صدق می کند، همچنین میزان بسته شدگی در ترک هایی که دارای مساحت بیشتری بودند کمتر به دست آمد و ثابت می کند با بیشتر شدن مساحت ترک، درصد بسته شدگی ترک کاهش پیدا می کند. آزمایش میکروسکوپی نیز گویای این است که وجود آب در

وجود سنگدانه های درشت در سطح نمونه باعث ایجاد ناهمواری هایی در هندسه ترک شد و ترمیم ترک در مجاورت سنگدانه های درشت به مراتب کمتر بوده است، این مسئله بیشتر در مورد محیط تر و خشک شدن های متناوب برای نمونه های Ref

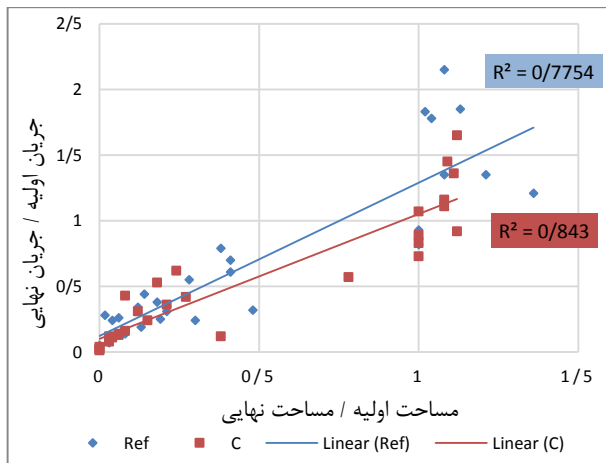
رگرسیون خطی در مقابل هم قرار داد تا میزان همبستگی آن ها نسبت به یکدیگر را تعیین نمود.



شکل ۱۳- رابطه بین نفوذپذیری و مساحت ترک

در نمودار رگرسیون شکل ۱۴ مشاهده می شود نمونه های بتن کریستالی با مقدار رگرسیون ۰/۸۴ روند خطی بیشتری دارد و میزان همبستگی آن ها نسبت به بتن شاهد واضح تر است. با این حال میزان همبستگی نمونه های بتن شاهد با مقدار رگرسیون ۰/۷۷، کمی پایین به نظر می رسد. این نمودار نسبت "مساحت اولیه / مساحت نهایی" با توجه به شکل ۸ به صورت رابطه ۳ بیان شده است:

$$(۳) \quad \frac{\text{مساحت ناحیه قرمز در بعد از ترمیم}}{\text{مساحت ناحیه قرمز در قبل از ترمیم}} = \text{نسبت ترمیم نشده}$$



شکل ۱۴- رابطه بین نسبت نفوذپذیری و نسبت ترمیم نشده ترک

در نمودار رگرسیون شکل ۱۴ دیده می شود مساحت ترک بعضی از نمونه ها از عدد یک عبور کرده است که نشان می دهد باز شدگی ترک اتفاق افتاده است و مربوط به شرایط محیطی خشک است. توجه شود که میزان رگرسیون های خطی و درجه سوم برای

هنگام عمل آوری نمونه ها بسیار اهمیت دارد، به طوری که بیشترین ترمیم مربوط به نمونه هایی است که در محیط غوطه ور در آب قرار گرفتند و بعد از آن مربوط به نمونه های نگه داری شده در محیط تر و خشک شدن های متناوب است. این بررسی نشان داد درصد بسته شدگی ترک در نمونه های نگه داری شده در محیط خشک برای هر دو مخلوط C و Ref صفر درصد است و نتایج آزمایش نفوذپذیری را توجیه می کند. نمونه های مخلوط C در شرایط محیطی غوطه ور در آب و تر و خشک شدن های متناوب دارای درصد بسته شدگی بیشتری نسبت به نمونه های مخلوط Ref است.

### ۳-۴- نتایج خودترمیمی: بررسی همبستگی مساحت دقیق ترک با نفوذپذیری

قاعدا تا با افزایش مساحت دقیق ترک ( $A_{ex}$ )، میزان نفوذپذیری نیز افزایش پیدا می کند. با رسم نمودار رگرسیون می توان به صادق بودن این منطق پی برد و همبستگی میان مساحت دقیق ترک و نفوذپذیری را به دست آورد. هرچه میزان رگرسیون به عدد یک نزدیکتر باشد می تواند باعث بالا رفتن قابلیت اعتماد و اعتبار آزمایش نفوذپذیری شود و به این نتیجه رسید که آزمایش نفوذپذیری می تواند نماینده خوبی برای تعیین درجه خود ترمیمی باشد یا خیر؟ با توجه به پژوهش های قبلی، ادواردسن به این نتیجه رسید که میزان نفوذپذیری به توان سوم عرض ترک بستگی دارد [۵]. به همین دلیل از رگرسیون مکعبی یا همان درجه سوم استفاده شده است. در نمودار شکل ۱۳ برای تمامی رگرسیون ها شرایط مرزی صفر در نظر گرفته شده است، به این معنی که اولین مساحت و نفوذپذیری ترک صفر محاسبه شده است و ادامه نمودار بر اساس آن ترسیم شده است. میزان همبستگی نمونه های مخلوط Ref و C به ترتیب ۰/۸۷ و ۰/۷۸ محاسبه شده است. میزان رگرسیون درجه سوم برای بتن C از دقت بالایی برخوردار است، اما برای بتن Ref، مقدار محاسبه شده کمی غیر واضح به نظر می رسد.

### ۳-۵- نتایج خودترمیمی: بررسی همبستگی نسبت ترمیم نشده ترک با نسبت نفوذپذیری

با داشتن میزان نفوذپذیری اولیه و ثانویه و مساحت نواحی ترمیم شده و ترمیم نشده برای نمونه های ترک خورده مربوط به آزمایش نفوذپذیری، می توان نسبت آن ها را بدست آورد و در یک نمودار

۷- نمونه‌های بتن حاوی افزودنی‌های کریستال شونده در عدم حضور آب به صورت غیر فعال باقی ماندند و خاصیت خودترمیمی از خود نشان ندادند.

۸- ترتیب نرخ ترمیم برای همه نمونه‌ها در سه شرایط محیطی به صورت زیر است:

غوطه‌ور در آب (نزدیک ۰/۸۵) < تر و خشک شدن های متناوب (نزدیک ۰/۵۹) < خشک (نزدیک ۰/۲۶۵-).

## ۵- مراجع

[۱] مستوفی نژاد، داود (۱۳۹۴)؛ سازه های بتن آرمه: جلد اول.

اصفهان: انتشارات ارکان دانش

[2] sangadji, senot; schlangen, erik. mimicking bone healing process to self- repair concrete structure novel approach using porous network concrete. procedia engineering, 2013, 54: 315-326.

[3] neville am. properties of concrete. 3rd ed. longman; 1981.

[4] hearn n. self-sealing, autogenous healing and continued hydration: what is the difference? mater struct/mater constr 1998;31:563-7.

[5] edvardsen c. water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. aci mater j 1999:448-54.

[6] ter heide n. crack healing in hydrating concrete [m.sc. thesis]. delft university of technology faculty of civil engineering and geosciences; 2005.

[7] van tittelboom k, gruyaert e, rahier h, de belie n. influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation. constr build mater 2012;37:349-59.

[8] qian s, zhou j, de rooij mr, schlangen e, yeag, van breugel k. self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials. cement concr compos 2009;31:613-21.

[9] zhang z, qian s, ma h. investigating mechanical properties and self-healing behavior of micro-cracked ecc with different volume of fly ash. constr build mater 2014;52:17-23.

تمامی نمونه های بتن شاهد و کریستالی در اشکال ۱۳ و ۱۴ برای تمام شرایط محیطی در نظر گرفته شده است تا بتوان یک رابطه کلی بین آن ها بدست آورد.

## ۴- نتایج

نتایج پژوهش با مقایسه روش های مختلف برای اندازه گیری ظرفیت خودترمیمی بتن مسلح شده با الیاف فولادی و اثرات مواد افزودنی کریستال شونده به عنوان عامل خود ترمیمی در سه شرایط محیطی متفاوت ارائه شده است.

نتایج زیر را می توان از قسمت سوم مقاله استخراج کرد:

با رجوع به روش آزمایش و پارامترهای اتخاذ شده برای تعیین و اندازه گیری روند فرایند ترمیم:

۱- روش استفاده شده جهت آزمایش نفوذپذیری برای تعیین میزان خودترمیمی، یک شاخص قابل اعتماد برای نشان دادن بهبود خواص دوام بتن است.

۲. مساحت دقیق هندسه ترک که از طریق تجزیه و تحلیل تصاویر، مورد ارزیابی قرار گرفت، رابطه ای واضح با نتایج جریان آب دارد. این پارامتر می تواند به عنوان جایگزینی برای آزمون های اندازه گیری نفوذپذیری آب در نظر گرفته شود. با این وجود، به عنوان شاخص های ترمیم، پراکندگی آن برای نمونه های مخلوط شاهد (Ref) بالا است.

۳- اندازه گیری مساحت ترک با استفاده از مجموع پیکسل های رنگی دارای دقت زیادی است.

با رجوع به آزمایش مقاومت فشاری:

۴- وجود مواد افزودنی کریستال شونده باعث افزایش مقاومت فشاری شد.

با رجوع به تأثیر ترکیبات بتن و شرایط محیطی:

۵- نمونه های با افزودنی های کریستالی رفتارهای پایدار و قابل اعتماد در آزمایش های ترمیم نشان می دهند، که حاوی پراکندگی پایین و روند واضح تری نسبت به نمونه های بتن شاهد هستند.

۶- نمونه های بتن حاوی افزودنی های کریستال شونده در محیط غوطه ور در آب، بیشترین میزان بهبود خود را با مقادیر حدود ۰/۹ حتی برای عرض های بزرگ تر (حدود ۰/۳ میلی متر) و حتی در چندین نمونه با ترمیم کامل به دست آمد.

- [10] qian sz, zhou j, schlangen e. influence of curing condition and precracking time on the self-healing behavior of engineered cementitious composites. *cement concr compos* 2010;32:686–93.
- [11] nishiwaki t, kwon s, homma d, yamada m, mihashi h. self-healing capability of fiber-reinforced cementitious composites for recovery of watertightness and mechanical properties. *materials* 2014;7:2141–54.
- [12] nishiwaki t, koda m, yamada m, mihashi h, kikuta t. experimental study on self healing capability of frcc using different types of synthetic fibers. *j adv concr technol* 2012;10:195–206.
- [13] yang y, yang eh, li vc. autogenous healing of engineered cementitious composites at early age. *cem concr res* 2011;41:176–83.
- [14] perez g, jimenez i, erkizia e, gaitero jj, kaltzakorta i, guerrero a. effect of selfhealing additions on the development of mechanical strength of cement paste. *chem mater res* 2013;5:102–5.
- [15] yang z, hollar j, he x, shi x. a self-healing cementitious composite using oil core/silica gel shell microcapsules. *cement concr compos* 2011;33: 506–12.
- [16] jonkers hm, schlangen e. crack repair by concrete-immobilized bacteria. in: *proceedings of the first international conference on self healing materials 2007*, noordwijk aan zee, the netherlands 2007; 1:7.
- [17] sisomphon k, copuroglu o, koenders eab. self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive. *cement concr compos* 2012;34:566–74.
- [18] ACI committee 212, 2010. report aci 212-3r-10, 2010. report on chemical admixtures for concrete. american concrete institute (aci), p 46–50.
- [19] jaroenratanapirom d, sahamitmongkol r. self-crack closing ability of mortar with different additives. *j met mater miner* 2011;21:9–17.
- [20] desmettre c, charron j-p. novel water permeability device for reinforced concrete under load. *mater struct* 2011;44:1713–2.

## The influence of Crystalline Admixture on the Self healing Concrete

Seyed Hosein Ghasemzadeh Mosavi Nejad \*

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

Mohamad Ramezani Khajeh Ghiyasi

Master Candidate, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

### Abstract

Cracking on the concrete surface reduces the durability of the materials. The penetration of water and harmful chemicals through these cracks into concrete will cause corrosion of rebar and demolition of concrete. If we can prevent the development of small cracks when it occurs, we have prevented the creation of larger cracks, because of stress concentration. A hopeful way, is to add the agents that can heal concrete when cracks are occurred, are so called Self-healing concrete. The aim of this study is to analyze the self-healing effect of a crystalline admixture (4% by the weight of cement) in three types of environmental exposure comparing with a reference concrete. Healing was studied by means of permeability tests on cracked specimens and physical closing of the crack was observed by optic microscope and quantified through crack geometrical parameters. The studied crack openings were under 400  $\mu\text{m}$  and the time set for healing was 42 days. The results show a different healing behavior depending on the exposure and the presence of the crystalline admixture, demonstrating that the presence of water is necessary for the healing reactions. Moreover, the respective rate of self-healing for all specimens at three different environmental conditions were obtained approximately 0.85 for the sinking in water, 0.59 for alternate wetting and drying and -0.265 for drying conditions.

**Keywords:** Concrete, self healing, crystalline admixture, durability, permeability.

---

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

