



Impact of TEOS and GGBFS on the Self-Healing Properties of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC): A Focus on Mechanical Recovery

Sayed Mehdi Taherian Ghahfarokhi

PhD Student, Department of Civil Engineering, Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran

Mohamad Mohamadi Dehcheshmeh*

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran

Hossein Tajmir Riahi

Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Gholamreza Ghodrati Amiri

Professor, Center of Excellence for Fundamental Studies in Structural Engineering, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

m.mohammadi.dehcheshmeh@iaushk.ac.ir

Keywords

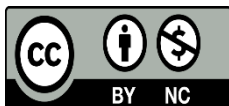
Self-healing,
UHPFRC,
TEOS,
GGBFS,
Mechanical
Characteristic

Abstract

This study investigates the impact of tetraethyl orthosilicate (TEOS) and the partial replacement of cement with ground granulated blast-furnace slag (GGBFS) on the self-healing properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC), with a particular focus on the recovery of mechanical properties, including flexural and compressive strength. Microcracks, approximately 150 microns in width, were induced in UHPFRC samples at three days of age. Two mix designs were tested under different exposure conditions: one group of samples was immersed in water at ambient temperature for 90 days after microcrack formation, while the other group was exposed to TEOS on the cracked surfaces, with the remaining surfaces kept in contact with water for the same duration. The mix designs included one with 15% GGBFS replacing cement and another without GGBFS. The healed samples were evaluated using digital optical microscopy, mechanical property recovery tests (compressive and flexural strength), and microstructural analysis via scanning electron microscopy (SEM) equipped with an energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) analyzer. The results demonstrated that samples containing GGBFS and exposed to TEOS exhibited superior crack closure and recovery of mechanical properties. Furthermore, EDS analysis revealed that the Ca/Si ratio in the healing products within the cracks decreased to less than 1, which likely contributed to enhanced crack sealing and improved mechanical performance.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).



* Corresponding Author

تأثیر تئوس و سرباره بر خودترمیمی بتن فوق توانمند الیافی با تمرکز بر بازایی خصوصیات مکانیکی

سید مهدی طاهریان قهفرخی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران

محمد محمدی دهچشمه*

استادیار گروه مهندسی عمران، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران

حسین تاجمیر ریاحی

دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

غلامرضا قدرتی امیری

استاد مرکز عالی مطالعات بنیادی مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

m.mohammadi.dehcheshmeh@iaushk.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۸ اسفند ۱۴۰۳

تاریخ دریافت: ۱۹ آذر ۱۴۰۳

چکیده

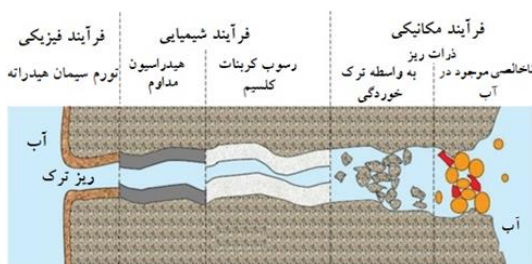
در این تحقیق بر تأثیر مواجهه مستقیم تترائیل ارتوسیلیکات و جایگزینی بخشی از سیمان با سرباره کوره ذوب آهن بر عملکرد خودترمیمی بتن فوق توانمند الیافی با تمرکز بر بازایی مقاومت خمشی و فشاری پرداخته شده است. برای این منظور، بر روی نمونه‌های ساخته شده، در سن سه روز، ریزترک‌هایی به عرض حدود ۱۵۰ میکرون ایجاد گردید. دو طرح اختلاط با دو نوع شرایط مواجهه مورد بررسی قرار گرفت: در دسته اول، نمونه‌ها پس از ایجاد ریزترک به مدت ۹۰ روز در آب با دمای محیط قرار گرفتند و در دسته دوم، تنها وجه ترک‌دار در معرض تئوس و سایر وجوه به مدت ۹۰ روز در تماس با آب بودند. یکی از طرح‌ها شامل ۱۵ درصد سرباره کوره ذوب آهن به جای سیمان بود و دیگری فاقد سرباره بود. نمونه‌های ترمیم شده با پردازش تصاویر میکروسکوپ نوری دیجیتال، بازایی خصوصیات مکانیکی (مقاومت فشاری و خمشی) و تعیین میکروساختار با میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به آنالایزر EDS ارزیابی شدند. نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های ترمیم شده که با سرباره کوره ذوب آهن ساخته و در مواجهه با تئوس قرار گرفتند به بهترین نتایج از نظر بسته شدن ترک‌ها و بازایی مقاومت فشاری و خمشی منجر شده‌اند. همچنین تحلیل EDS برای این نمونه‌ها نشان می‌دهد که نسبت Ca/Si در محصولات ترمیمی داخل ترک به کمتر از ۱ کاهش یافته که می‌تواند از دلایل بهتر بسته شدن ترک‌ها و بهبود مشخصات مکانیکی باشد.

واژگان کلیدی: خودترمیمی، بتن فوق توانمند، تئوس، سرباره فولاد و خصوصیات مکانیکی

۱- مقدمه

بتن پرمصرف‌ترین ماده در طرح‌های توسعه زیر ساخت‌های عمرانی می‌باشد. در طول عمر بسیاری از سازه‌ها، اطمینان از دوام بالا یک پارامتر مهم برای اطمینان از بهره‌وری و خدمت‌رسانی است و در همین راستا ارتقاء مداوم مقررات دوام سازه‌های بتنی منجر به توسعه بتن‌های فوق توانمند الیافی (UHPFRC) گردید [۱ و ۲]. در سال ۱۹۹۴ اصطلاح بتن فوق‌توانمند توسط دلارارد^۱ معرفی گردید [۳]. در طراحی این بتن استفاده از نسبت آب به سیمان بسیار کم، میزان سیمان بالا، میزان زیاد مواد مکمل سیمان (به طور عمده خاکستر بادی)، الیاف تقویت کننده، بهبود در ریزساختار و همگنی و افزایش سختی مورد توجه قرار می‌گیرد [۱ و ۳]. مطابق با استاندارد ASTM^۲ به شماره C1856 این بتن‌ها می‌بایست حداقل مقاومت فشاری ۱۲۰ مگاپاسکال داشته باشند. از سوی دیگر نگرانی فزاینده در مورد ایمنی و پایداری سازه‌ها، منجر به توسعه مواد خودترمیم‌شونده هوشمند و روش‌های پیشگیری از تعمیر شده است. ظاهر شدن ترک‌های کوچک در بتن تقریباً اجتناب ناپذیر است، اگر چه این لزوماً باعث ایجاد خطر فروپاشی سازه نمی‌شود، اما مطمئناً باعث اختلال در عملکرد و تسریع در تخریب شده و از عمر و پایداری آن می‌کاهد [۲]. بتن‌های با کارایی بالا نظیر بتن فوق توانمند به دلیل حجم بالای مواد سیمانی، در سنین پایین مستعد انقباض خود به خودی، خزش کششی و ترک هستند [۴]. لذا داشتن خاصیت خودترمیمی این بتن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. خودترمیمی در بتن به دو دسته خود به خودی^۳ و مستقل^۴ قابل تقسیم است. خودترمیمی مستقل نیازمند تحریک خارجی است. در واقع یک عامل خارجی به بتن افزوده می‌شود که این عامل بخشی از فرآیند طبیعی هیدراسیون سیمان نیست. در حالی که ترمیم خود به خودی نیازمند محرک‌های خارجی نیست و ترمیم از فرآیند طبیعی هیدراسیون سیمان نشأت می‌گیرد و در این روش، آسیب، خود محرک برای فرآیند ترمیم است. پدیده‌های ترمیم خود به خودی در بتن و ترکیبات سیمانی به طور عمده مربوط به مداخلات پیچیده فیزیکی، مکانیکی و مکانیسم‌های شیمیایی درون ماتریس سیمانی است [۵ و ۶]. ظرفیت ترمیم ترک در حالت خود به خودی مواد بر پایه سیمان به ترکیبات متعارف ماتریس سیمانی متکی است و همچنین می‌تواند با مواد افزودنی مناسب برانگیخته شود [۷ و ۸]. در شکل ۱ مکانیسم‌های موثر

در هنگام ایجاد ترک در معرض آب که در ترمیم خود به خودی نقش دارند، ارائه شده است. در فرآیندهای شیمیایی دو مکانیسم شامل هیدراسیون مداوم دانه‌های سیمانی هیدراته نشده [۶] و شکل‌گیری بلورهای کربنات کلسیم (CaCO_3) روی وجه ترک [۹]، به عنوان نتیجه مستقیم شیمیایی واکنش‌های بین یون‌های کلسیم Ca^{+2} (موجود در ماتریس بتن) و یون‌های کربنات CO_3^{-2} موجود در آب یا دی اکسید کربن (CO_2) موجود در هوا مهم هستند. ترمیم خود به خودی حاصل از هیدراسیون مداوم، برای بازیابی خواص مکانیکی ترکیب بسیار مهم است زیرا این محصولات هیدراسیون جدید دارای استحکامی شبیه به ژل هیدرات کلسیم سیلیکات اولیه (C-S-H) بوده و به وضوح از رسوب کربنات کلسیم برتر هستند [۲]. ولی بررسی ساختار محصولات ترمیم کننده داخل ترک نشان می‌دهد که نسبت رسوبات کربنات کلسیم بسیار بیشتر از هیدرات کلسیم سیلیکات است. به عنوان مثال در مطالعه هوانگ و دامیدوت^۷ [۱۰] محصولات خودترمیم شکل گرفته در ترک‌های ایجاد شده در سنین پایین در بتن با سیمان پرتلند معمولی (با نسبت آب به سیمان ۰/۳) شامل یون‌های کلسیم که نشان‌دهنده درصد $\text{Ca}(\text{OH})_2$ در محصولات ترمیم است برابر با ۷۸ درصد و C-S-H برابر با ۱۷ درصد بودند. لذا چنانچه درصد C-S-H در محصولات خودترمیم افزایش یابد علاوه بر بسته شدن بهتر ترک‌ها، باعث بازیابی خواص مکانیکی شده و کیفیت و دوام بتن ارتقاء می‌یابد. ایده‌آل‌ترین حالت این است که طی یک فرآیند و یا با افزودن ماده‌ای، رسوبات کربنات کلسیم ناشی از $\text{Ca}(\text{OH})_2$ به ژل C-S-H تبدیل گردد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که ماده شیمیایی تترا اتیل ارتو سیلیکات (تتوس^۸) توانایی تبدیل $\text{Ca}(\text{OH})_2$ به ژل C-S-H را دارد [۱۱ و ۱۲].



شکل ۱- مکانیسم‌های اصلی در ترمیم خود به خودی بتن

¹ Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete

² de Larrard

³ American Society for Testing and Materials

⁴ Autogenous self-healing

⁵ Autonomous self-healing

⁶ Calcium Silicate Hydrates

⁷ Huang and Damidot

⁸ TEOS

در مورد تأثیرات تتوس بر بتن و ترکیبات سیمانی مطالعات کمی انجام پذیرفته و در نتیجه مطالعات تأثیر تتوس بر خودترمیمی بتن نیز اندک می‌باشد. در ادامه به برخی از آنها اشاره شده است. پیگینو و همکاران^۹ [۱۳] در مطالعه‌ای به بررسی تأثیرات پوشش سطحی بتن با اتیل سیلیکات (تتوس) پرداخته و نشان دادند که این روش می‌تواند به‌طور مؤثری جذب مویرگی، ضریب انتشار کلرید و عمق کربناسیون را کاهش داده و در عین حال تغییرات رنگی محدود و کاهنده‌ای در طول زمان ایجاد کند. هُو و همکاران^{۱۰} [۱۴] در مطالعه‌ای به بررسی تأثیرات استفاده از تترا اتوکسی سیلان (تتوس) و نانو سیلیکا کلوییدی (CNS) بر روی سطح ملات سیمانی سخت‌شده پرداختند و نشان دادند که تتوس در مقایسه با CNS، تأثیر بهتری در کاهش ضریب جذب آب، نرخ انتقال بخار آب و عمق نفوذ آب دارد. باربرنا-فرناندز و همکاران^{۱۱} [۱۵] در مطالعه‌ای به بررسی اثربخشی تتوس به عنوان ماده تقویت‌کننده ملات سیمان پرتلند برای استفاده در آثار میراث فرهنگی پرداختند و نشان دادند که تتوس باعث افزایش مقاومت ملات سیمان، کاهش تخلخل و نفوذپذیری و ایجاد تغییرات ظاهری ناچیز می‌شود که نشان‌دهنده مناسب بودن آن برای حفظ ملات‌های میراث فرهنگی است. گو و همکاران^{۱۲} [۱۶] در مطالعه‌ای تأثیر تتوس و دو عامل Na_2SiO_3 و سیلان، بر ترمیم سطحی بتن را بررسی کردند و نشان دادند که تتوس به مقدار زیادی خصوصیات حمل و نقل بتن را کاهش می‌دهد و عملکرد بهتری در برابر سولفات سدیم نسبت به سایر عوامل دارد.

کانلوپولوس و همکاران^{۱۳} [۱۷] چهار ماده سیلیکات سدیم، سیلیس کلوتیدی، تتوس و اکسید منیزیم را در کپسول شیشه‌ای جداره نازک کپسوله کردند و اثر آن را بر خودترمیمی بتن مورد بررسی قراردادند. این مطالعه نشان داد که اضافه کردن تتوس به همراه سایر ترکیبات معدنی منجر به کاهش قابل توجه در سطح ترک و بهبود در بازیابی بار تحت شرایط مختلف عمل‌آوری می‌شود. در کنار مزایای استفاده از این کپسول‌ها در خودترمیمی بتن، معایب زیادی در کار با آنها وجود دارد. به عنوان مثال، در اختلاط و جابه‌جایی بتن ممکن است شکسته شوند و

باعث آزاد شدن زود هنگام عامل ترمیم کننده شوند [۱۸]. کپسول‌های بزرگ می‌توانند خواص رئولوژیکی بتن را تغییر داده و علاوه بر کاهش مقاومت فشاری و خمشی بتن سخت شده، کارایی آن را نیز پایین آورند [۱۹]. اندازه بزرگ این کپسول‌ها ممکن است رساندن مؤثر عوامل ترمیم کننده به ریزترک‌ها را محدود کند و اثربخشی ترمیم را کاهش دهد [۲۰]. همچنین، به دلیل واکنش‌های ناخواسته قلیایی سیلیس، کپسول‌های شیشه‌ای ممکن است اثرات منفی بر دوام بتن داشته باشند زیرا احتمال بروز واکنش‌های ناخواسته قلیایی سیلیس وجود دارد [۲۱]. بر اساس توضیحات گفته شده می‌توان نتیجه گرفت روش کپسوله کردن تتوس در کنار داشتن مزایای مناسب برای ترمیم موجب ضعف در ساختار بتن می‌گردد؛ لذا این روش به ویژه برای بتن فوق توانمند که داشتن ساختار متراکم و خصوصیات مکانیکی بالا از ویژگی‌های اصلی آن است، مناسب نمی‌باشد.

این پژوهش، برای نخستین بار، اثر مستقیم تتوس بر ترمیم ریزترک‌های ایجاد شده در سنین پایین بر سطح بتن فوق‌توانمند الیافی و بازیابی مقاومت خمشی و فشاری آن را بررسی می‌کند. با توجه به تایید اثربخشی سرباره کوره ذوب‌آهن در خودترمیمی بتن [۱۰ و ۲۱] در یکی از دو طرح اختلاط بتن فوق‌توانمند، ۱۵ درصد میزان سیمان مخلوط با سرباره کوره ذوب‌آهن (به اختصار سرباره) جایگزین و تأثیر آن با متغیر دیگر این تحقیق (تتوس) بررسی گردید. در کل دو روش مواجهه (مواجهه با تتوس و آب)، دو طرح اختلاط (با و بدون سرباره) با دو شکل متفاوت (مکعبی و منشوری) برای تعیین بازیابی مقاومت فشاری و خمشی مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت. برای تعریف شرایط مواجهه بعد از ایجاد ریزترک، کلیه نمونه‌ها (شامل مکعبی و منشوری) به دو دسته مساوی تقسیم شدند. دسته اول مستقیماً تا سن ۹۰ روز در آب با دمای محیط و دسته دوم وجه ترک‌دار نمونه در مواجهه با تتوس قرار گرفت در حالی که سایر وجوه در تماس با آب بود. در سن ۹۰ روز کلیه نمونه‌ها از آب خارج و شکل ظاهری ترک‌ها (درصد بسته شدن ترک‌ها)، بازیابی خصوصیات مکانیکی (شامل مقاومت فشاری و مقاومت خمشی) و ریز ساختار مواد ترمیمی نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت.

⁹ Pigino et al.

¹⁰ Hou et al.

¹¹ Barberena-Fernández et al.

¹² Gou et al.

¹³ Kanellopoulos et al.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

سیمان مورد استفاده در این تحقیق از نوع پرتلند CEM I 525 و مواد مکمل سیمانی شامل پودر میکرو سیلیس^{۱۴} (SF) و سرباره کوره ذوب آهن^{۱۵} (GGBFS) می‌باشند که خواص آنها در جدول ۱ ارائه شده است. دو اندازه مختلف ماسه کوارتزی (۰/۲-۰، ۰/۶-۰ میلی‌متر) استفاده شد. فوق‌روان‌کننده مورد استفاده پایه پلی کربوکسیلاتی به رنگ قهوه‌ای تیره و pH خنثی (۷=) و به صورت مایع می‌باشد. مقدار فوق‌روان‌کننده طوری تنظیم شد که قطر جریان مخلوط اندازه‌گیری شده بر اساس استاندارد ASTM به شماره C230 حدود ۲۵ سانتی‌متر باشد. علاوه بر این، ترکیب دو نوع الیاف مصنوعی PP^{۱۶} و PVA^{۱۷} با نسبت یک درصد حجمی از هر کدام مطابق جدول ۲ به کار رفته است. الیاف PVA به دلیل ماهیت آب دوست بودن آنها با ایجاد مکان هسته به بهبود ترمیم کمک می‌کنند و نمونه‌های دارای الیاف PVA در مقایسه با نمونه‌های دارای الیاف فاقد قطبیت، بازده خودترمیمی بهتری دارند [۲۲]. قطبیت الیاف را قادر می‌سازد تا به عنوان مکان‌های هسته عمل کنند و یون‌های Ca^{2+} را جذب کنند (شکل ۲- الف). از طرفی الیاف طولانی‌تر نسبت به الیاف کوتاه‌تر احتمال بالاتری برای قرار گرفتن در سطح ترک دارند که باعث ایجاد ناحیه پیوند بالاتر بین الیاف و ماتریس می‌شود. سطح پیوند بالاتر منجر به اثر پل زدن بهتر الیاف برای جلوگیری از انتشار ترک‌ها و بهبود عملکرد خمشی پس از ترک‌خوردگی می‌شود [۲۳] (شکل ۲- ب). لذا علاوه بر الیاف PVA (با طول ۶ میلی‌متر) از الیاف PP (با طول بلندتر (با طول ۱۲ میلی‌متر) نیز استفاده گردیده است (از هر کدام ۱٪ حجمی).

جدول ۱- آنالیز فیزیکی و شیمیایی سیمان، میکروسیلیس و سرباره

نام ترکیب شیمیایی	درصد وزنی	
	سیمان ۵۲۵-۱	میکروسیلیس
SiO ₂	۲۰/۳	۹۱/۶
Al ₂ O ₃	۵/۷	۰/۶
Fe ₂ O ₃	۳/۳	۰/۶
CaO	۶۵/۷۰	۱/۳
MgO	۱/۶۰	۱/۳
SO ₃	۱/۸۰	۰/۰۱
Na ₂ O	-	۰/۴
K ₂ O	-	۰/۸
TiO ₂	-	-
MnO ₂	-	۰/۲
BaO	-	۰/۲
P ₂ O ₅	-	۰/۰۱
C ₃ S	۶۵/۴	-
C ₂ S	۸/۹	-
C ₄ AF	۹/۴	-
L.O.I	۱/۱۰	۱/۵
خصوصیات فیزیکی		
بلین (cm ² /gr)	۳۲۰۰	۲۰۰۰۰
وزن مخصوص (kg/m ³)	۳۱۵۰	۲۳۰۰

۲-۲- تترایاتیل ارتوسیلیکات (تئوس)

تترایاتیل ارتوسیلیکات که با نام‌های تترایاتوکسی سیلان و یا تئوس نیز شناخته می‌شود، یک رزین سیلیکونی و ترکیبی شامل عنصر سیلیکون، اکسیژن و گروه‌های آلی است. تئوس مورد استفاده در این تحقیق ساخت شرکت سیگما آلدریج با مشخصات شیمیایی ویسکوزیته ۴/۹ میلی‌پاسکال‌ثانیه، دانسیته ۰/۹۸ کیلوگرم بر لیتر با نقطه جوش ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. همچنین از نظر فیزیکی به صورت مایع بدون رنگ و غیر قابل حل در آب می‌باشد. ساختار اصلی آن شامل شبکه‌ای از اتم‌های سیلیس (Si) و اکسیژن (O) است که به صورت متناوب به هم متصل شده‌اند. این اتصالات می‌توانند به صورت خطی یا شبکه‌ای کم و بیش پیچیده باشند [۲۴] (شکل ۳). برای استفاده بهینه از تئوس به منظور انجام واکنش بهتر و تسهیل فرآیند هیدرولیز، می‌توان آن را با یک حلال مخلوط نمود [۱۵]. برای این منظور از وایت

¹⁴ Silica Fume

¹⁵ Ground Granulated Blast Furnace Slag

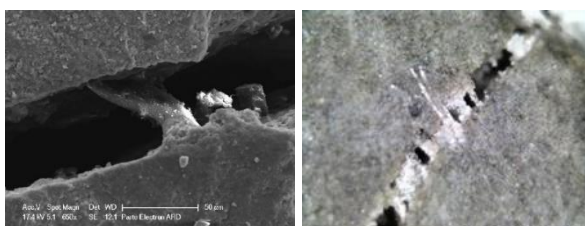
¹⁶ Polypropylene

¹⁷ Polyvinyl alcohol

اسپریت^{۱۸} با نسبت وزنی ۲۵ درصد با ۷۵ درصد TEOS ترکیب و به مدت ۳ هفته نگهداری شد.

جدول ۲- مشخصات الیاف پلی وینیل الکل و پلی پروپیلن

نوع	طول mm	قطر mm	چگالی gr/cm ³	مقاومت کششی MPa	مدول الاستیسیته GPa
PVA	۶	۰/۰۱۶	۱/۳	۱۳۰۰	۳۰
PP	۱۲	۰/۰۱۸	۰/۹۱	۶۴۰	۱۰



الف ب

شکل ۲- الف) تصویر میکروسکوپ نوری ترمیم بتن فوق توانمند با تاثیر الیاف PVA در جذب یونهای Ca^{2+} برای ترک با عرض حدود ۱۵۰ میکرون و ب) تصویر SEM نمونه بتن فوق توانمند الیافی تاثیر الیاف PP در پل زدن بین دو وجه ترک



شکل ۳- ساختار تتوس

۲-۳- ساخت بتن و نسبت مخلوط بتن فوق توانمند

برای ساخت بتن فوق توانمند ابتدا همه اجزای خشک (مصالح پودری و ماسه) داخل مخلوط کن به مدت ۵ دقیقه مخلوط شد و سپس به تدریج نصف آب به مواد خشک افزوده شد. بقیه آب با فوق روان کننده مخلوط

¹⁸ White spirit

و به داخل مخلوط کن ریخته و به مدت ۵ دقیقه با سرعت پایین مخلوط گردید. سپس الیاف به تدریج اضافه شده و به مدت ۵ دقیقه با سرعت بالا مخلوط کردن ادامه یافت. با این کار الیاف انباشته نشده و بتنی با کارایی مناسب حاصل می‌گردد (شکل ۴). مطابق با الزامات استاندارد ASTM به شماره 17 C1856/C1856M بعد از ساخت، قالب‌ها در یک لایه پر و سپس ۳۰ بار با چکش مخصوص به کناره‌های قالب ضربه زده شده تا نمونه‌ها تحکیم یابند و ظرف ۱ دقیقه پس از اتمام پرداخت، سطح روی نمونه برای جلوگیری از خشک شدن پوشانده شد. در این تحقیق دو طرح اختلاط با دو شیوه مواجهه مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۳ طرح‌های اختلاط به کار رفته برای ساخت بتن فوق توانمند ارائه شده است. طرح شماره ۱ بدون سرباره کوره ذوب آهن و در طرح شماره ۲ به میزان ۱۵ درصد وزنی سیمان با سرباره کوره ذوب آهن جایگزین شده است. در خصوص شیوه‌های مواجهه نیز قابل ذکر است که در شیوه اول بعد از ساخت نمونه‌ها و ایجاد ریزترک، نمونه تا سن ۹۰ روز مستقیماً در مواجهه با آب با دمای محیط (۲۵°C) قرار داده شد. در شیوه دوم بعد از ایجاد ریزترک، وجهی از نمونه‌ها که دارای ترک بود به گونه‌ای در آب قرار داده شد که وجه ترک خورده آن به سمت بالا و حدود ۱ تا ۲ سانتی‌متر از آن خارج از آب باشد و به میزان ۱ CC تتوس بر روی ترک نمونه اسپری شد (شکل ۵). این کار بعد از ۲۴ ساعت یک بار دیگر تکرار شد. نمونه‌های مورد بررسی شامل نمونه‌های منشوری به ابعاد ۱۶۰×۴۰×۴۰ میلی‌متر و نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۵۰×۵۰×۵۰ میلی‌متر بودند. با توجه به تشابه شکل ظاهری و به منظور تشخیص درست، نمونه‌ها نام‌گذاری شدند. نمونه‌های دارای سرباره در مواجهه با تتوس، دارای سرباره غوطه‌ور شده در آب، بدون سرباره در مواجهه با تتوس و بدون سرباره غوطه‌ور شده در آب به ترتیب ^{۱۹}UST، ^{۲۰}USW، ^{۲۱}UNT و ^{۲۲}UNW نام‌گذاری شدند. سه قسمت نام هر نمونه معرف خواص و شرایط مواجهه آن می‌باشد. قسمت اول حرف U معرف بتن فوق توانمند می‌باشد که برای همه نمونه‌ها یکسان و ثابت است. قسمت دوم مربوط به استفاده از سرباره کوره ذوب آهن است. برای استفاده از آن حرف S و برای نمونه‌های فاقد آن حرف N به کار برده شده است. قسمت سوم نیز معرف شرایط

¹⁹ UHPFRC containing Slag, exposed to TEOS

²⁰ UHPFRC containing Slag, immersed in Water

²¹ UHPFRC Non-Slag, exposed to TEOS

²² UHPFRC Non-Slag, immersed in Water

باربرداری با استفاده از میکروسکوپ دیجیتال اندازه‌گیری شد و مقادیری در محدوده 15 ± 150 میکرومتر به دست آمد. این رشد کنترل شده ترک با استفاده از یک دستگاه تست سروو هیدرولیک که برای اعمال نرخ بارگذاری برنامه‌ریزی شده بود، به دست آمد تا اطمینان حاصل شود که عرض ترک با نرخ از پیش تعیین شده افزایش می‌یابد.

۳- بحث

۳-۱- ارزیابی با میکروسکوپ نوری

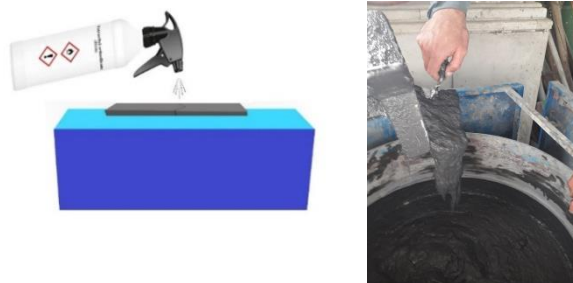
ترمیم سطح ترک در فرایند خودترمیمی با استفاده از یک میکروسکوپ دیجیتال در سنین ۳ روز (سن ایجاد ترک در نمونه‌ها) و ۹۰ روز بررسی شد. پردازش تصویر با تقسیم‌بندی ناحیه ترک از بقیه تصویر قبل و بعد از ترمیم با روش آستانه هیستوگرام با استفاده از نرم افزار ایمج جی^{۲۴} انجام پذیرفت [۲۵]. تصاویر ترک به فرمت دوتایی تبدیل می‌شوند، یعنی ناحیه ترک خورده با پیکسل‌های سیاه (با ارزش ۱) و بقیه نمونه با پیکسل‌های سفید (با ارزش ۰) مشخص می‌شود. نسبت ترمیم کلی ترک با حرف C با رابطه (۱) تعریف می‌گردد:

$$C = \frac{A_b - A_h}{A_b} \quad (1)$$

که در آن A_b و A_h به ترتیب مساحت ترک (مجموع پیکسل‌های سفید) قبل و بعد از ترمیم است. به منظور ارائه عکس‌های باکیفیت، عکس‌های گرفته شده از هر قسمت با استفاده از تکنیک پانوراما به یکدیگر چسبانده شده‌اند. در شکل ۶ تصویر قبل و بعد از ترمیم نمونه‌ها در سنین ۳ و ۹۰ روز با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

کمترین میزان بسته‌شدن ترک‌ها با $43/12$ درصد در نمونه‌های UNW به دست آمد که فاقد سرباره کوره ذوب‌آهن و تتوس می‌باشند. با مواجهه تتوس (نمونه‌های UNT) میزان بسته‌شدن ترک‌ها $58/17$ درصد و با افزودن سرباره کوره ذوب‌آهن به ترکیب بتن (نمونه‌های USW) این میزان به $65/03$ درصد ارتقا یافت. بهترین میزان بسته‌شدن ترک‌ها برای نمونه‌های UST با $98/67$ درصد حاصل گردید.

مواجهه است. برای مواجهه با تتوس حرف T و برای غوطه‌ور شدن در آب از حرف W استفاده شده است.



شکل ۴- ساخت بتن فوق
شکل ۵- مواجهه نمونه بتن فوق توانمند ترک خورده با تتوس

جدول ۳- طرح اختلاط طرح‌های بتن فوق توانمند (kg/m^3)

ترکیبات	طرح ۱	طرح ۲
سیمان ۵۲۵	۸۹۷	۷۶۲
میکروسیلیس	۱۸۰	۱۸۰
سرباره	-	۱۲۵
پودر کوارتز $0.2mm$	۲۶۰	۲۶۰
ماسه کوارتزی $0.6mm$	۷۸۲	۷۸۲
آب	۲۱۵	۲۱۵
فوق‌روان‌کننده	۴۶	۳۲
الیاف PVA	۰/۹۲	۰/۹۲
الیاف PP	۱/۳	۱/۳
نسبت آب به مواد چسباننده	۰/۲	۰/۲

۲-۴- پیش بارگذاری و ایجاد ترک

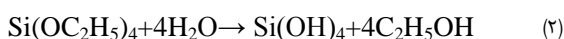
آزمایش‌های کنترل شده برای ارزیابی خودترمیمی و ایجاد ترک در نمونه‌ها در سن ۳ روز پس از خارج کردن از قالب انجام شد. ترک کنترل شده به روش مکانیکی با نرخ باز شدن ترک 0.3 میکرومتر بر ثانیه و تا رسیدن به عرض 200 میکرومتر، ایجاد شد. اندازه‌گیری عرض ترک با استفاده از یک ترانسفورماتور دیفرانسیل متغیر خطی^{۲۳} (LVDT) با دامنه 500 میکرومتر و دقت 1 میکرومتر انجام شد. پس از رسیدن ترک به عرض 200 میکرومتر، باربرداری صورت گرفت. از آنجا که پس از باربرداری، ترک تا حدی بسته می‌شود، عرض ترک بعد از

²⁴ImageJ software

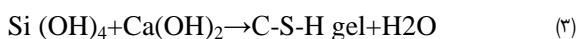
²³ Linear Variable Differential Transformer

نمونه‌های UNW و حتی اندکی نسبت به UNT شده است. در نمونه‌های UST که هم از سرباره کوره ذوب‌آهن و هم در مواجهه با تتوس قرار گرفته است، با افزوده شدن سرباره به مخلوط بتن فوق توانمند، سطح pH قلیایی مخلوط بتن افزایش می‌یابد [۳۰]. محیط قلیایی نقش مهمی در تسریع تشکیل ژل C-S-H، تغییر ساختار آن به سمت زنجیره‌های طولانی‌تر و تغییر مورفولوژی شبکه سیلیس در مواد سیمانی ایفا می‌کند [۳۱]. با افزودن درصدی سرباره کوره ذوب‌آهن به مخلوط بتن فوق توانمند علاوه بر تولید ژل C-S-H اضافی، افزایش قلیابیت مخلوط نیز باعث تسریع در تشکیل ژل C-S-H و تغییر ساختار آن به سمت زنجیره‌های طولانی‌تر خواهد شد و این هم‌افزایی به بهترین نتایج در بسته‌شدن ترک‌ها نسبت به سایر نمونه‌ها منجر شده است.

بر اساس مطالعات انجام شده موضوع خودترمیمی بتن فوق توانمند برای ترک‌های کوچکتر از ۴۰ میکرون، به دلیل وجود ذرات سیمانی هیدراته نشده که در حضور رطوبت، هنگام ترک خوردگی فعال می‌شوند به اثبات رسیده است [۲۶ و ۲۷]. در نمونه‌های UNW ترمیم ایجاد شده ناشی از خودترمیمی ذاتی بتن است. همان‌طور که گفته شد بتن فوق توانمند توانایی طبیعی و ذاتی محدودی برای خودترمیمی دارد و محدود به مکانیسم‌های گفته شده در شکل (۱) و بیشتر به ذرات سیمان هیدراته نشده نزدیک سطوح ترک وابسته است که هنگام تماس با آب هیدراته می‌شود. این محدودیت در ترمیم، دلیل عدم ترمیم کامل ترک‌های با عرض بیشتر از ۴۰ میکرون است. به همین دلیل ترک‌های مورد مطالعه در این تحقیق (حدود ۱۵۰ میکرون) به صورت ناقص ترمیم شده‌اند. در نمونه‌های UNT که در مواجهه با تتوس قرار گرفته‌اند، سطوح بالاتری از ترمیم مشاهده می‌شود. تتوس موجود در جوه ترک در برخورد با آب هیدرولیز می‌شود که واکنش شیمیایی آن به صورت زیر است:

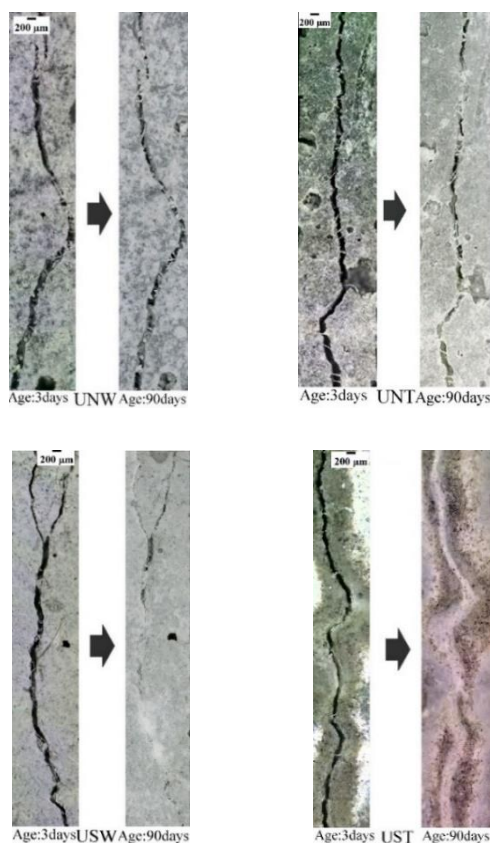


سیس $\text{Si}(\text{OH})_4$ ناشی از هیدرولیز TEOS می‌تواند با هیدروکسید کلسیم ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) واکنش داده و ژل هیدرات کلسیم سیلیکات (C-S-H) به وجود آورد:



این ژل هیدرات کلسیم سیلیکات (C-S-H) که ناشی از مواجهه تتوس با سطوح ترک است باعث افزایش محصولات ترمیم در داخل ترک و در نتیجه بهبود وضعیت ترمیم ترک‌ها نسبت به نمونه‌های UNW می‌گردد.

در نمونه‌های USW درجه کم هیدراسیون سرباره فرصتی را برای فعال کردن ذرات واکنش نداده در هنگام ایجاد ترک فراهم می‌کند و آنها را قادر می‌سازد تا ترک را بهتر ترمیم کنند [۲۸]. همچنین فعالیت پوزولانی سرباره ریزساختار و خواص UHPFRC را با مصرف هیدروکسید کلسیم و تولید ژل C-S-H اضافی بهبود می‌بخشد [۲۹]. تولید ژل C-S-H اضافی توسط فعالیت پوزولانی در بلند مدت به بسته‌شدن بهتر ترک‌ها نیز کمک می‌کند. بررسی ظاهری نمونه‌ها نیز نشان می‌دهد اثر سرباره باعث بهبود بسته‌شدن ترک‌ها نسبت به



شکل ۶- تصویر قبل و بعد از ترمیم نمونه‌ها در سنین ۳ و ۹۰ روز

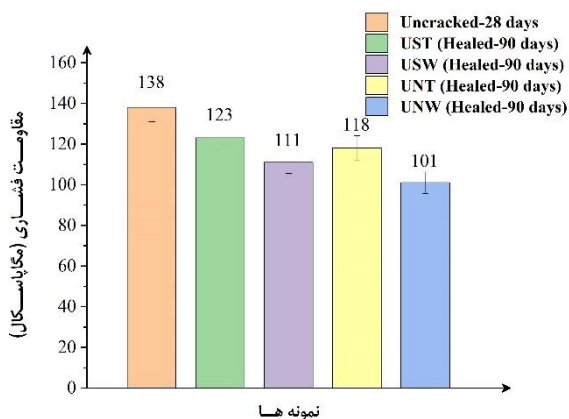
۳-۲- بازایی مقاومت فشاری نمونه‌ها

مقاومت فشاری نمونه‌های ترمیم شده مطابق با روش‌های آزمون ASTM C39/C39M-18 بر روی نمونه‌های مکعبی (۵۰×۵۰×۵۰ میلی‌متر) تعیین گردید. میزان درصد بازایی مقاومت فشاری نمونه‌ها، با نماد C_p (مطابق رابطه ۴) محاسبه شد.

$$C_p = \left(1 + \frac{C_h - C_u}{C_u}\right) \times 100 \quad (4)$$

که در آن C_u و C_h به ترتیب مقادیر متوسط مقاومت فشاری نمونه ترمیم شده در سن ۹۰ روز و نمونه‌های ترک نخورده در سن ۲۸ روز می‌باشد. در شکل ۷ مقادیر متوسط مقاومت فشاری نمونه‌های ترک نخورده و نمونه‌های ترمیم شده نشان داده شده است. منظور از نمونه‌های ترک نخورده در این تحقیق نمونه‌های بتن فوق توانمند فاقد سرباره هستند که در آب با دمای ۲۵ درجه به مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شده‌اند.

بیشترین و کمترین بازایی مقاومت فشاری به ترتیب مربوط به نمونه UST با ۸۷/۸۰ درصد و نمونه UNW به میزان ۷۳/۱۹ درصد حاصل شده که نشان می‌دهد اثر استفاده هم‌زمان سرباره و تنوس در بازایی مقاومت فشاری نیز به بهترین نتیجه منجر شده است. همچنین بازایی مقاومت فشاری در نمونه‌های USW و UNT به ترتیب هر کدام ۸۰/۴۳ و ۸۵/۵۱ درصد به دست آمده است که مشخص می‌سازد اثر تنوس نسبت به پوزولان سرباره در بازایی مقاومت فشاری نمونه‌های ترمیم شده بهتر بوده است. حاصل اندرکنش تنوس با مواد ترمیمی داخل ترک ناشی از فازهای هیدراته سیمان Ca(OH)_2 و ژل C-S-H، تولید محصول جدید است که به بهبود مقاومت فشاری منجر شده است. واکنش بین Ca(OH)_2 ناشی از هیدراسیون بتن و تنوس باعث تولید ژل C-S-H و واکنش دادن تنوس با ژل C-S-H یک ژل با زنجیره طولانی‌تر خواهد بود [۳۲].



شکل ۷: مقایسه مقاومت فشاری در نمونه‌های مختلف در حالت بدون ترک و ترمیم شده

۳-۳- بازایی مقاومت خمشی نمونه‌ها

مقاومت خمشی سه‌نقطه‌ای بر روی نمونه‌های منشوری (۴۰×۴۰×۱۶۰ میلی‌متر) ترمیم شده با روش‌های آزمون ASTM C293 تعیین گردید. بازایی مقاومت خمشی نمونه‌ها، با شاخص F_p و مطابق رابطه ۵ به دست آمد.

$$F_p = \left(1 + \frac{R_h - R_u}{R_u}\right) \times 100 \quad (5)$$

که در آن R_u و R_h به ترتیب مقادیر مدول گسیختگی نمونه ترمیم شده در سن ۹۰ روز و نمونه‌های ترک نخورده فاقد سرباره در سن ۲۸ روز می‌باشد. مدول گسیختگی از رابطه ۶ محاسبه می‌گردد:

$$R = \frac{3 PL}{2bd^2} \quad (6)$$

که در آن R مدول گسیختگی برحسب مگاپاسکال، P حداکثر نیروی به دست آمده از آزمایش خمشی سه‌نقطه‌ای برحسب نیوتن، L طول دهانه بارگذاری برحسب میلی‌متر، b و d به ترتیب متوسط عرض و عمق نمونه مورد آزمایش برحسب میلی‌متر هستند.

نمونه‌ها تحت آزمایش خمشی سه‌نقطه‌ای با فاصله دهانه ۱۲۰ میلی‌متر بین تکیه‌گاه‌ها، از وسط دهانه تا انحراف میانه دهانه ۲/۵ میلی‌متر بارگذاری شدند. در شکل ۸ و ۹ به ترتیب مقادیر میانگین بار تغییر مکان و میانگین مدول گسیختگی نمونه‌های بدون ترک در سن ۲۸ روز و ترمیم شده در سن ۹۰ روز نشان داده شده است.

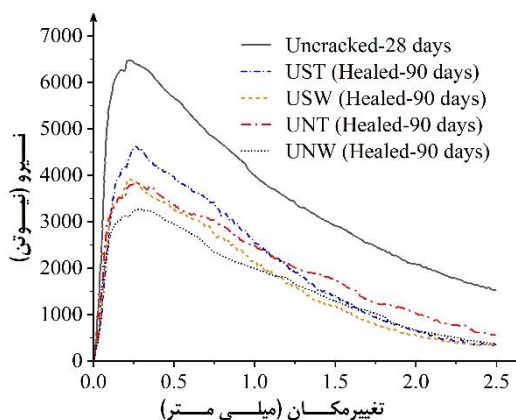
می‌باشد. جایگزینی مواد افزودنی معدنی نظیر سرباره کوره ذوب آهن بر عملکرد بتن فوق توانمند تحت خمش تأثیر مثبت دارد [۳۳]. بررسی نتایج نشان می‌دهد که اثر استفاده از سرباره کوره ذوب آهن و مواجهه با تتوس به تنهایی باعث بهبود حدود ۱۰ درصدی در بازیابی مقاومت خمشی نسبت به نمونه‌های فاقد سرباره و عمل‌آوری شده در آب با دمای محیط می‌گردد و اثر هر کدام تقریباً برابر است. این در حالی است که با استفاده هم‌زمان از سرباره کوره ذوب آهن و مواجهه ترک با تتوس این میزان از بهبودی به حدود ۲۰ درصد افزایش می‌یابد.

۳-۴- بررسی ساختار مواد ترمیمی با میکروسکوپ الکترونی روبشی

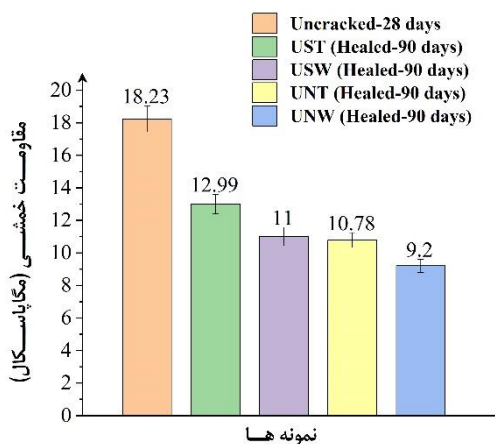
میکروسکوپ‌های الکترونی یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین دستگاه‌ها برای تعیین اندازه و شکل مواد نانو ساختار هستند که بر اساس برهم‌کنش الکترون با ماده کار می‌کنند. روش‌های شناسایی مختلفی در میکروسکوپ‌های الکترونی مورد استفاده قرار می‌گیرد که یکی از مهم‌ترین آن‌ها طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس^{۲۵} (EDS) است. طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس یک روش تحلیلی است که برای تجزیه و تحلیل ساختاری، یا خصوصیات شیمیایی یک نمونه به کار می‌رود. برای این منظور ابتدا یک بخش مکعبی شکل از نمونه شامل ترک ترمیم شده با ابعاد ۱×۱×۱ سانتی متر با استفاده از تیغه اهره الماسی برش داده شد (شکل ۹). به دلیل غیر رسانا بودن بتن، سطح مورد بررسی می‌بایست آماده‌سازی شود. یکی از روش‌های رایج، پوشاندن سطح نمونه با یک لایه نازک طلا (به ضخامت ۲۰-۱۵ نانومتر) است. طلا یک انتخاب عالی برای پوشش نمونه است زیرا از نظر بیولوژیکی بی اثر است و با عناصر یا ترکیبات دیگر واکنش نمی‌دهد. در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ چهار تصویر SEM^{۲۶} مربوط به نمونه‌ها همراه با نتایج EDS ارائه شده است. در نمونه‌های UNW بالاترین قله مربوط به عنصر کلسیم (Ca) می‌باشد. در حالی که در نمونه UST بالاترین قله مربوط به عنصر سیلیس (Si) است. قله بالای سیلیس نشان می‌دهد که مقدار قابل توجهی سیلیس در نتیجه واکنش‌های تتوس با مواد حاصل از هیدراسیون بتن است که ساختار بتن را تقویت و توانایی‌های خودترمیمی آن را افزایش داده است.

²⁵ Energy Dispersive Spectroscopy

²⁶ Scanning Electron Microscopy

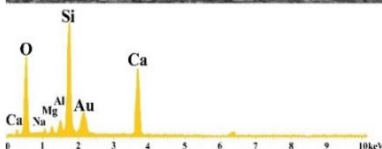
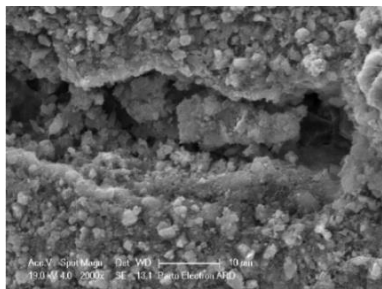


شکل ۸- نمودار مقادیر میانگین بار-تغییر مکان نمونه‌های ترک نخورده و ترمیم شده



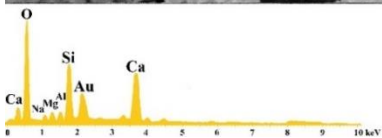
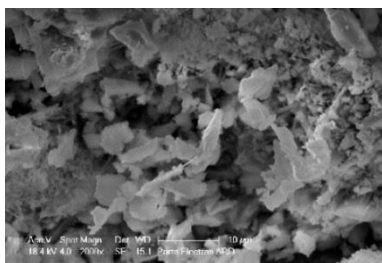
شکل ۹- نمودار مقادیر مدول گسیختگی (مقاومت خمشی) نمونه‌های ترک نخورده و ترمیم شده

بررسی شکل ۸ نشان می‌دهد حداکثر بار در جابه‌جایی بین حدود ۰/۲ تا ۰/۳ میلی‌متر رخ داده است. با افزایش جابه‌جایی از ۰/۳ میلی‌متر کاهش تدریجی بار در تمام نمونه‌ها رخ داده است. میزان بار باقیمانده در جابه‌جایی ۲/۵ میلی‌متر برای نمونه‌های ترک نخورده و نمونه‌های ترمیم شده به ترتیب در حدود ۱۵۰۰ و ۴۰۰ نیوتن به دست آمده است. نمودار شکل ۹ نیز نشان می‌دهد که کمترین و بیشترین بازیابی مقاومت خمشی به ترتیب مربوط به نمونه‌های UNW با ۵۰/۴۶ درصد و UST با ۷۱/۲۵ درصد به دست آمده است. بررسی سایر نمونه‌ها نیز نشان می‌دهد بازیابی مقاومت خمشی در نمونه‌های USW برابر با ۶۰/۳۴ درصد و برای نمونه‌های UNT به میزان ۵۹/۳۱ درصد



شکل ۱۱- تصویر SEM و آنالیز EDS از سطح ترک ترمیم شده

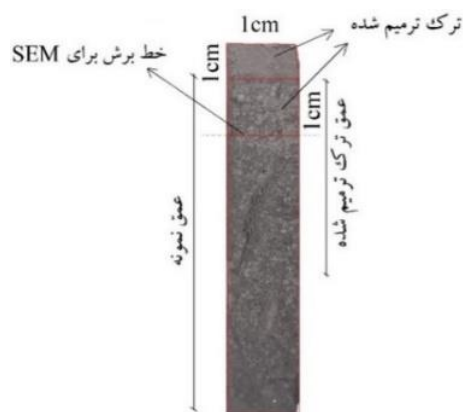
UNT



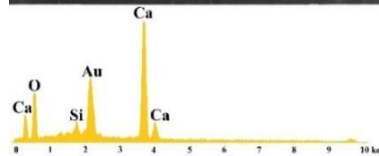
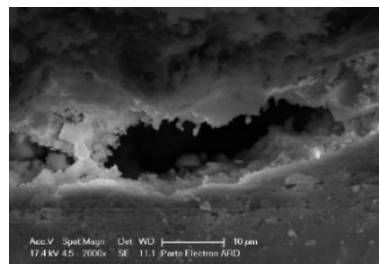
شکل ۱۲- تصویر SEM و آنالیز EDS از سطح ترک ترمیم

شده USW

تصاویر SEM مربوط به مورفولوژی مواد ترمیم کننده داخل ترک و نتایج EDS نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی با نسبت‌های مختلف Ca/Si تغییر می‌کند و بر خواص مکانیکی تأثیر می‌گذارد [۳۴]. به‌طور خاص، نسبت‌های پایین‌تر معمولاً یک فاز C-S-H منسجم‌تر و قوی‌تری ایجاد می‌کنند که برای مقاومت کلی ماده ضروری است [۳۵]. کمترین و بیشترین مقدار Ca/Si در بین نمونه‌ها به ترتیب مربوط به نمونه‌های UST و UNW می‌باشد. این از دلایلی است که نمونه‌های UST به بهترین نتایج از نظر بسته‌شدن ترک‌ها و بازایی مقاومت فشاری و خمشی منجر شده‌اند و برعکس نمونه‌های UNW به ضعیف‌ترین منجر گردیده‌اند.



شکل ۹- برش و آماده سازی نمونه‌ها برای تصویر برداری SEM



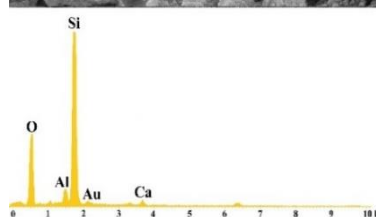
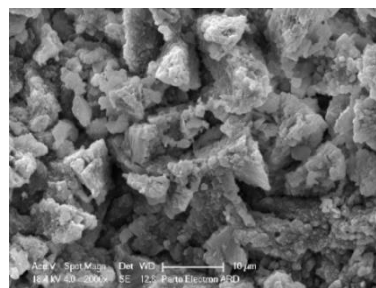
شکل ۱۰- تصویر SEM و آنالیز EDS از سطح ترک ترمیم شده UNW

مقایسه با روش‌های معمول خودترمیمی تسهیل کند. زیرا اندرکنش تتوس با مواد ترمیمی داخل ترک ناشی از فازهای هیدراته سیمان (رسوب $\text{Ca}(\text{OH})_2$ و C-S-H)، منجر به تولید محصولات جدید می‌شود. واکنش بین $\text{Ca}(\text{OH})_2$ و تتوس تولید C-S-H و واکنش بین تتوس و C-S-H یک C-S-H جدید با زنجیره طولانی‌تر خواهد بود. این محصولات جدید علاوه بر بسته‌شدن بهتر ترک‌ها باعث بهبود خصوصیات مکانیکی نمونه‌های ترمیم شده نیز می‌شود.

۳- در نمونه‌های UNT که به بهترین نتایج از نظر بسته‌شدن ترک‌ها و بازیابی خصوصیات مکانیکی منجر گردیده است نسبت Ca/Si به کمترین مقدار منجر شده است. در نمونه‌های UNW که کمترین مقادیر بازیابی مقاومت خمشی و فشاری به دست آمده است، نسبت $\text{Ca/Si} > 1$ می‌باشد. مقدار Ca/Si برای نمونه‌های UNT و USW نیز کمتر از واحد می‌باشد.

۵-مراجع

- [1] Habel K, Gauvreau P. Response of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) to impact and static loading. *Cement and Concrete Composites*. 2008;30(10):938-946. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.09.001>
- [2] De Belie N, Gruyaert E, Al-Tabbaa A, Antonaci P, Baera C, Bajare D, Darquennes A, Davies R, Ferrara L, Jefferson T. A review of self-healing concrete for damage management of structures. *Advanced materials interfaces*. 2018;5(17):1800074. <https://doi.org/10.1002/admi.201800074>
- [3] de Larrard F, Sedran T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. *Cement and Concrete Research*. 1994;24(6):997-1009. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90022-1)
- [4] Ma Z, Li Y, Cao Z, Zhang S, Hou S, Liu J, Ruan X. Early age shrinkage and mechanical effect of ultra-high-performance concrete composite deck: A case study with in situ test and numerical simulation. *Materials*. 2022;15(10):3628. <https://doi.org/10.3390/ma15103628>
- [5] Mihashi H, Nishiwaki T. Development of Engineered Self-Healing and Self-Repairing Concrete-State-of-the-Art Report. *Journal of*



شکل ۱۳- تصویر SEM و آنالیز EDS از سطح ترک ترمیم شده UNT

۴-نتیجه گیری

در این تحقیق برای اولین بار تأثیر مواجهه مستقیم تتوس بر خودترمیمی بتن فوق توانمند حاوی سرباره کوره ذوب آهن بررسی شد. نتایج این مطالعه نشان دهنده تأثیر قابل توجه استفاده هم‌زمان سرباره کوره ذوب آهن و مواجهه مستقیم تتوس بر بسته‌شدن ترک‌ها، بازیابی مقاومت فشاری و خمشی، و ساختار مواد ترمیمی در بتن‌های فوق توانمند است. اهم نتایج به شرح زیر است:

۱- استفاده از تتوس و سرباره کوره ذوب آهن در ترکیب بتن فوق توانمند، فرآیند ترمیم ترک‌ها را بهبود بخشیده است. اندرکنش تتوس با مواد تولید شده از هیدراسیون سیمان منجر به افزایش محصولات ترمیم کننده ترک‌ها می‌شود و افزودن سرباره نیز با افزایش قلیائیت و فعال‌سازی بیشتر ذرات واکنش‌نداده، منجر به تولید C-S-H اضافی و بهبود ریزساختار بتن می‌شود. این هم‌افزایی باعث بسته‌شدن بهتر ترک‌ها در مقایسه با نمونه‌های بدون سرباره عمل‌آوری شده با آب در دمای محیط می‌شود.

۲- اگرچه بازیابی مقاومت در بتن خودترمیم شونده اغلب محدود است، استفاده از تتوس می‌تواند بازیابی بهتر خصوصیات مکانیکی را در

- Concrete Composites. 2012;34(3):313-21.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.021>
- [14] Hou P, Cheng X, Zhou Z. Influence of the Surface Treatment of Hardened Cement Mortar with Colloidal Nano-Silica and TEOS. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2016; 14(5): 123-134.
<https://doi.org/10.5703/1288284316113>
- [15] Barberena-Fernández A, Carmona-Quiroga P, Blanco-Varela MT. Interaction of TEOS with cementitious materials: Chemical and physical effects. *Cement and Concrete Composites*. 2015;55:145-52.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.010>
- [16] Guo Z, Hou P, Huang S, Xie N, Cheng X, Singh L, Valeriya S, Viktoriya N. Surface treatment of concrete with tetraethyl orthosilicate, Na₂SiO₃ and silane: comparison of their effects on durability. *Ceramics-Silikaty*. 2018;62(4):332-41.
<https://doi.org/10.13168/cs.2018.0029>
- [17] Kanellopoulos A, Qureshi T, Al-Tabbaa A. Glass encapsulated minerals for self-healing in cement based composites. *Construction and Building Materials*. 2015;98:780-91.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.127>
- [18] Ma E, Chen X, Lai J, Kong X, Guo C. Self-healing of microcapsule-based materials for highway construction: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2023;10(3):368-84.
<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2023.02.003>
- [19] Pan X, Gencturk B. Self-healing efficiency of concrete containing engineered aggregates. *Cement and Concrete Composites*. 2023;142:105175.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105175>
- [20] Hanna J. Self-Healing Concrete Techniques and Technologies and Applications. *Recent Progress in Materials*. 2024;06(01):006.
<https://doi.org/10.21926/rpm.2401006>
- [21] Olivier K, Darquennes A, Benboudjema F, Gagné R. Early-Age Self-Healing of Cementitious Materials Containing Ground Granulated Blast-Furnace Slag under Water Curing. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2016;14:717-27 .
<https://doi.org/10.3151/jact.14.717>
- Advanced Concrete Technology*. 2012;10(5):170-84.
<https://doi.org/10.3151/jact.10.170>
- [6] Snoeck D, Van Tittelboom K, Steuperaert S, Dubruel P, De Belie N. Self-healing cementitious materials by the combination of microfibres and superabsorbent polymers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2014; 25(1): 13-24.
<https://doi.org/10.1177/1045389X12438623>
- [7] Li V, Herbert E. Robust Self-Healing Concrete for Sustainable Infrastructure. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2012;10:207-18.
<https://doi.org/10.3151/jact.10.207>
- [8] Van Tittelboom K, De Belie N, Van Loo D, Jacobs P. Self-healing efficiency of cementitious materials containing tubular capsules filled with healing agent. *Cement and Concrete Composites*. 2011; 33(4): 497-505.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.01.004>
- [9] Yang Y, Lepech MD, Yang E-H, Li VC. Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles. *Cement and Concrete Research*. 2009;39(5):382-90.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.01.013>
- [10] Huang H, Ye G, Damidot D. Effect of blast furnace slag on self-healing of microcracks in cementitious materials. *Cement and Concrete Research*. 2014;60:68-82.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.03.010>
- [11] Moropoulou A, Cakmak A, Labropoulos KC, Van Grieken R, Torfs K. Accelerated microstructural evolution of a calcium-silicate-hydrate (C-S-H) phase in pozzolanic pastes using fine siliceous sources: Comparison with historic pozzolanic mortars. *Cement and Concrete Research*. 2004;34(1):1-6.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00187-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00187-X)
- [12] Sandrolini F, Franzoni E, Pigino B. Ethyl silicate for surface treatment of concrete-Part I: Pozzolanic effect of ethyl silicate. *Cement and Concrete Composites*. 2012;34(3):306-12.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.12.003>
- [13] Pigino B, Leemann A, Franzoni E, Lura P. Ethyl silicate for surface treatment of concrete - Part II: Characteristics and performance. *Cement and*

- [31] García Lodeiro I, Macphee DE, Palomo A, Fernández-Jiménez A. Effect of alkalis on fresh C-S-H gels. FTIR analysis. *Cement and Concrete Research*.2009;39(3):147-53.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.01.003>
- [32] Zarzuela R, Luna M, Carrascosa LM, Yeste MP, Garcia-Lodeiro I, Blanco-Varela MT, Cauqui MA, Rodríguez-Izquierdo JM, Mosquera MJ. Producing C-S-H gel by reaction between silica oligomers and portlandite: A promising approach to repair cementitious materials. *Cement and Concrete Research*. 2020;130:106008.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106008>
- [33] Yazıcı H, Yardımcı MY, Aydın S, Karabulut AŞ. Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes. *Construction and Building Materials*.2009;23(3):1223-31.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.003>
- [34] Wang J, Hu Z, Chen Y, Huang J, Ma Y, Zhu W, Liu J. Effect of Ca/Si and Al/Si on micromechanical properties of C(-A)-S-H. *Cement and Concrete Research*. 2022; 157: 106811.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106811>
- [35] Fan MX, Chen FX, Zhang XY, Wang RK, Yu R. Effect of Ca/Si ratio on the characteristics of alkali-activated ultra-high performance concrete (A-UHPC): From hydration kinetics to microscopic structure development. *Construction and Building Materials*.2023;394:132158.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132158>
- [22] Shen Y, Li Q, Huang B, Liu X, Xu S. Effects of PVA fibers on microstructures and hydration products of cementitious composites with and without fly ash. *Construction and Building Materials*.2022;360:129533.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129533>
- [23] Kim S, Yoo D-Y, Kim M-J, Banthia N. Self-healing capability of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete after exposure to cryogenic temperature. *Cement and Concrete Composites*. 2019;104:103335.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103335>
- [24] Emblem HG. Ethyl-silicate-bonded refractories. *Materials Chemistry and Physics*. 1983;8(3):265-77.
[https://doi.org/10.1016/0254-0584\(83\)90039-1](https://doi.org/10.1016/0254-0584(83)90039-1)
- [25] Schneider CA, Rasband WS, Eliceiri KW. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature methods*.2012;9(7):671-5.
<https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- [26] Hilloulin B, Van Tittelboom K, Gruyaert E, De Belie N, Loukili A. Design of polymeric capsules for self-healing concrete. *Cement and Concrete Composites*.2015;55:298-307.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.022>
- [27] Zdeb T. Autogenous healing effect of ultra-high performance cementitious composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2018;16(11):549-62. <https://doi.org/10.3151/jact.16.549>
- [28] Gruyaert E, Tittelboom KV, Rahier H, Belie ND. Activation of pozzolanic and latent-hydraulic reactions by alkalis in order to repair concrete cracks. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2015;27(7):04014208.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.022>
- [29] Kumar VRP, Gunasekaran K, Shyamala T. Characterization study on coconut shell concrete with partial replacement of cement by GGBS. *Journal of Building Engineering*. 2019;26:100830.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100830>
- [30] Couvidat J, Diliberto C, Meux E, Cotellet S, Bojic C, Izoret L, Lecomte A. Greening effect of slag cement-based concrete: Environmental and ecotoxicological impact. *Environmental Technology & Innovation*. 2021;22:101467.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101467>