

بررسی اثر حضور نانوسیلیس در ترک‌های ناحیه ITZ در بتن

احسان عدیلی*، محمدرضا سهرابی و مهدی شفیعی افارانی

دانشگاه سیستان و بلوچستان، گروه مهندسی عمران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۱/۰۵/۰۶، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۱/۱۰/۰۹، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۱/۱۲/۲۲

چکیده

نحوه شکست بتن و بررسی ایجاد و رشد ترک‌های آن مدت‌هاست که مورد توجه محققین بوده است. از طرفی اثبات شده است که با حضور درصد مناسبی از نانوسیلیس مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد. از دیرباز محققان می‌دانستند که علت شکست بتن غالباً جدایی سنگدانه از ملات است و کمتر پیش می‌آید که شکست در اثر تخریب سنگدانه اتفاق بیافتد. بنابراین نخستین ترک‌ها در محل اتصال سنگدانه به ملات اتفاق می‌افتند و با رشد این ترک‌ها که یک جریان پیوسته است، ترک‌های بزرگتر ایجاد شده و تخریب سازه بتنی انجام می‌گردد. بنابراین جلوگیری از ایجاد میکروتکرک‌ها در ناحیه انتقال مرزی بین سنگدانه و ملات که به ITZ موسوم است نقش بسیار مهمی در به تعویق افتادن تخریب بتن دارد. به ناحیه‌ای به ضخامت ۳۰ میکرومتر در اطراف سنگدانه ITZ می‌گویند. در این تحقیق اثر افزودن نانوسیلیس در ضخامت ترک‌های ناحیه انتقال مرزی مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که حضور درصد مناسبی از نانوسیلیس می‌تواند تا حد زیادی ضخامت ترک‌های ناحیه ITZ را کاهش دهد. برای بررسی ترک‌ها در این ناحیه از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شده است. در این تحقیق از پرتوهای الکترون‌های ثانویه برای مشاهده ناحیه ITZ بهره گرفته شده است.

واژه‌های کلیدی: نانوسیلیس، بتن، ITZ، میکروسکوپ الکترونی روبشی.

۱- مقدمه

می‌گویند. غالب تحقیقاتی که در بررسی این ناحیه و نحوه عملکرد آن انجام گردیده بر اساس مشاهداتی از میکروسکوپ‌های نوری بوده است. در این ناحیه به دلیل پدیده‌ای به نام اثر دیواری (Wall Effect) مقدار سیمان از مابقی قسمت‌های توده ماتریس کمتر و تخلخل آن بیشتر است. ضخامت ناحیه ITZ غالباً برابر با ۳۰ میکرومتر از حاشیه سنگدانه در نظر گرفته می‌شود [۵-۱]. تاکنون چندین مدل برای ساختار ناحیه ITZ ارائه گردیده است. معروفترین آنها این ناحیه را بصورت پوسته یکنواختی در نظر می‌گیرند [۱۰-۶]. در قسمت‌های مرزی

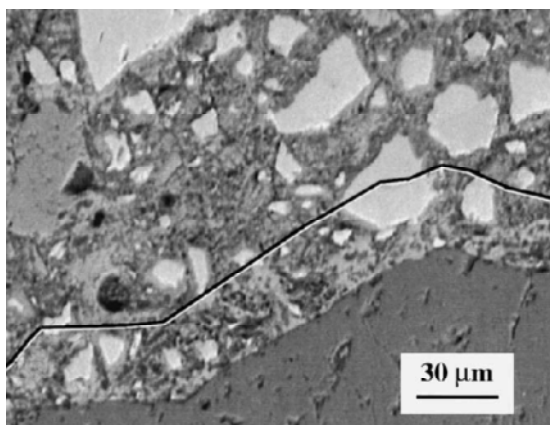
از دیرباز بحث شکست بتن در اثر جداسازی سنگدانه از ماتریس در تکنولوژی بتن به اثبات رسیده است. در واقع غالباً شکست بتن در اثر شکست سنگدانه اتفاق نمی‌افتد، بلکه در اثر جدا شدن سنگدانه از ماتریس روی می‌دهد. مهمترین ترک‌های مخرب بتن در محل اتصال سنگدانه به ماتریس ایجاد می‌شوند و پس از یک رشد پیوسته تبدیل به ترک‌های مخرب می‌گردند. به ناحیه انتقال مرزی بین سنگدانه و ماتریس (Interfacial Transition Zone: ITZ)

* عهده‌دار مکاتبات: احسان عدیلی

نشانی: زاهدان، بلوار دانشگاه، دانشگاه سیستان و بلوچستان، گروه مهندسی عمران

تلفن: ۰۵۴۱-۲۴۴۶۲۵۱، دورنگار: ۰۵۴۱-۲۴۴۶۲۵۱، پست الکترونیکی: ehsan_adili2006@yahoo.com

ناحیه مورد بررسی قرار گرفته و مشخص گردیده که افزودن درصد مناسبی از نانوسیلیس باعث کاهش ضخامت ترک‌ها شده و در نتیجه تخریب بتن به تعویق افتاده است. تقریباً تمامی تصاویری که تاکنون از ناحیه انتقال مرزی بتن تهیه شده بوده است بصورت کیفی و از نوع پرتو الکترون‌های بازگشتی بوده‌اند [۲۱-۲۵]. اگرچه محققان برای بررسی اثر حضور مصالح مختلف تصاویری با پرتو الکترون‌های ثانویه از بتن گرفته‌اند، اما استفاده از پرتوهای الکترون‌های ثانویه برای مشاهده ترک‌های ناحیه ITZ در این تحقیق حقیقتاً اقدامی کم سابقه می‌باشد [۲۶-۳۱]. نکته دیگر اینکه در این تحقیق ضخامت ترک‌ها در ناحیه مذکور بصورت کمی مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته‌اند.

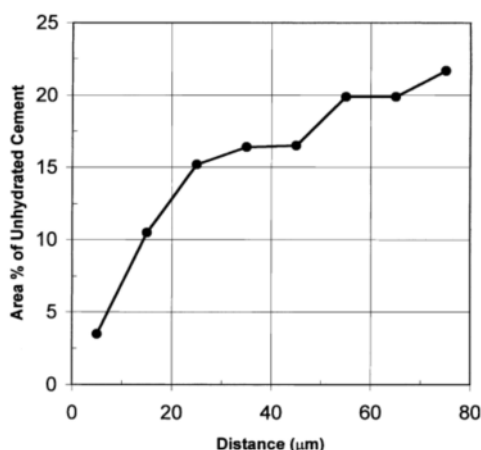


شکل ۲: تصویری از ناحیه ITZ که با پرتو الکترون‌های بازگشتی و برای نشان دادن سیمان در آن ناحیه گرفته شده است [۱].

۲- فعالیت‌های تجربی

در آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق دو نمونه بتن که به ترتیب معمولی و حاوی نانوسیلیس (Nano-SiO_2) بودند در نظر گرفته شدند. برای ساخت بتن از ماسه استاندارد استفاده گردید. طرح اختلاط استفاده شده برای نمونه‌ها و توزیع اندازه ذرات نانوسیلیس که از شرکت وند شیمی تهیه شده به ترتیب در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند. نمونه‌ها به ابعاد $5 \times 5 \times 5$ cm و با ماسه استاندارد در بسته‌بندی‌های کارخانه‌ای (موسوم به آتاوا) ساخته شدند و برای تعیین دقت کار از هر نمونه سه عدد تهیه گردید. قسمت‌هایی که برای مشاهده در دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی انتخاب گردیدند از میانه و

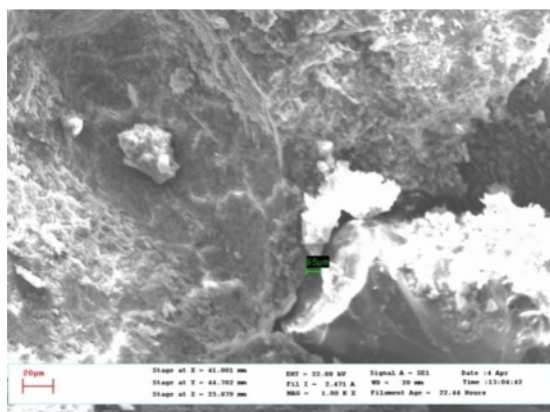
ناحیه انتقال مرزی مشخصات و تخلخل مصالح به توده ماتریس نزدیکتر می‌گردد. ضخامت این ناحیه مرزی که بین ITZ و توده ماتریس واقع است حدود ۵ میکرومتر می‌باشد [۱۱-۱۵]. این ناحیه که بصورت هاله‌ای دور سنگدانه را دربرگرفته یکی از ضعیف‌ترین قسمت‌های بتن می‌باشد و ظرفیت زیادی برای آغاز ترک دارد. یکی از دلایل این مهم حضور مقدار بیشتری از سیمان هیدراته نشده در ITZ است [۴،۵].



شکل ۱: میانگین سیمان هیدراته نشده بر حسب درصد در برابر فاصله از سنگدانه [۱].

با توجه به حساسیت ناحیه ITZ و اثر مهم آن در رفتار بتن محققان فراوانی به بررسی این ناحیه و خواص آن پرداخته‌اند. غالب تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده بر مبنای تصاویر تهیه شده با پرتوهای الکترون‌های بازگشتی بوده است. در اکثر مواقع حضور یک ماده در ناحیه ITZ بررسی شده و یا اینکه تلاش گردیده که مدلی برای تحلیل این ناحیه ارائه شود [۲۰-۱۶]. شکل ۲ یک تصویر گرفته شده با پرتو الکترون‌های بازگشتی از ناحیه ITZ را نشان می‌دهد. این پرتوها پستی و بلندی‌های سطح را نشان داده و در نتیجه قادر به نشان دادن ترک نیستند بلکه تنها نوع فازهای مختلف را نشان می‌دهند. در این تحقیق نمونه‌های بتنی، مبتنی بر مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران (آیین‌نامه بتن) شامل نانوسیلیس ساخته شده‌اند و سپس تصاویری از ترک‌های ناحیه ITZ به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تهیه شده است. در نهایت اثر نانوسیلیس بر عرض ترک‌های موجود در این

نانوسیلیس می‌تواند به اثبات مقاومت بیشتر بتن‌های حاوی این افزودنی منجر شود. شکل ۳ رخداد ترک در ناحیه ITZ در یک نمونه که از میانه مکعب بتنی اخذ شده است را نشان می‌دهد. این نمونه فاقد نانوسیلیس می‌باشد. رخداد ترک در ناحیه انتقال مرزی سنگدانه استوانه‌ای شکل کاملاً مشهود است. همچنین ملاحظه می‌گردد که ماتریس کاملاً از سنگدانه جدا شده است. قطر ترک در این تصویر حدود ۹/۵ میکرومتر برآورد گردیده است که در حدود یک سوم کل ناحیه ITZ می‌باشد.



شکل ۳: یک سنگدانه و ترک جانبی آن در نمونه اخذ شده از میانه مکعب بدون نانوسیلیس.

شکل ۴ همان ناحیه را با پنج برابر بزرگنمایی بیشتر نشان می‌دهد. سنگدانه در این شکل کاملاً برهنه از ملات بوده و جدایش بصورت کامل رخ داده است که این مهم غالباً به دلیل رخداد پدیده دیواری به دلیل حضور یون‌های کلسیم و ایجاد نیروی دافعه از طرف سنگدانه بر ملات می‌باشد. مقایسه مورفولوژی این تصویر با تصاویر نمونه‌های حاوی نانوسیلیس یکنواختی کمتری را در این تصاویر نشان می‌دهد. حضور نقاط تیز گوشه فراوان در تصویر دیده می‌شود و ایجاد جدایش‌های کامل به دلیل کم بودن سیمان در نواحی نزدیک سنگدانه‌ها می‌باشد.

در شکل ۵ ترک در ناحیه ITZ در بتنی که حاوی نانوسیلیس است نشان داده شده است. در این تصویر مورفولوژی پیوسته سنگدانه مسطح و ماتریس کاملاً مشخص و واضح است. دانه‌های ریز سفید رنگ حاوی نانوسیلیس باعث یکنواختی بیشتر ملات گردیده همانند چسب عمل می‌نماید.

لبه مکعب‌های بتنی جدا و در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفتند. دستگاه SEM مورد استفاده از نوع Philips XL30 واقع در دانشگاه صنعتی اصفهان بوده است.

جدول ۱: ترکیب نمونه‌های بتنی.

| ردیف | مصالح | مقدار (گرم) |
|------|-----------|-------------|
| ۱ | ماسه | ۱۸۰۰ |
| ۲ | سیمان | ۶۰۰ |
| ۳ | آب | ۳۰۰ |
| ۴ | نانوسیلیس | ۶۰ |

جدول ۲: مشخصات نانوسیلیس مصرفی.

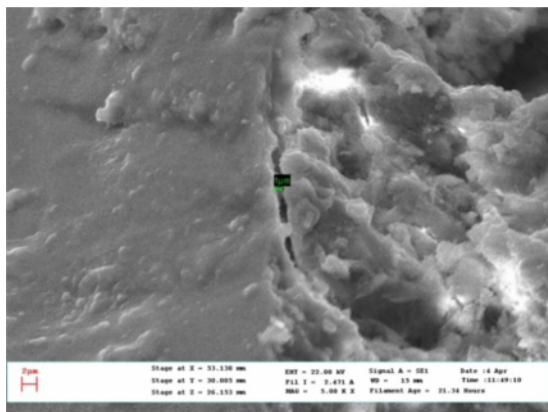
| پارامتر | مقدار | روش آزمایش |
|--------------------|-------------|------------|
| چگالی (g/cm^3) | ۱/۲۰۳-۱/۲۱۵ | AP-005D |
| سیلیس | ۲۹/۶-۳۱ | AP-054 |
| pH | ۹/۶-۱۰/۲ | AP-009 |
| ویسکوزیته | ماکزیمم ۷ | AP-014 |
| سطح مخصوص | ۲۰۰-۲۴۰ | AP-011 |

به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها نخست تمامی آنها کاملاً خشک شدند و سپس با روکشی از جنس طلا پوشانده شدند. با توجه به اینکه ناحیه ITZ مرز ۳۰ میکرومتری سنگدانه‌ها می‌باشد، تصاویر از این ناحیه گرفته شدند. طبیعتاً برای نشان دادن ترک از پرتو الکترون ثانویه استفاده گردید.

۳- نتایج و بحث

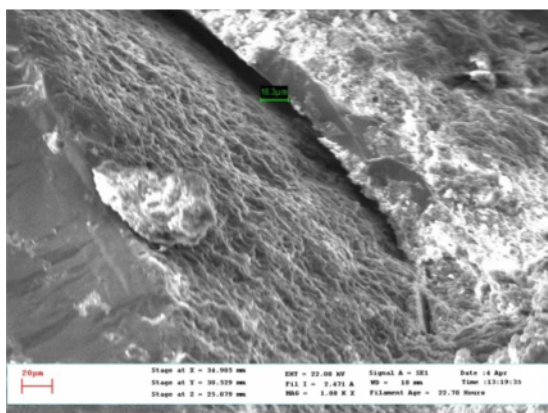
اثر مثبت نانوسیلیس بر مقاومت فشاری بتن امری اثبات شده است. البته اگر مقدار نانوذرات بیش از حد باشد، به دلیل اینکه، جایگزین سیمان گردیده و مانع از عمل هیدراتاسیون بتن می‌شود از مقاومت بتن کم خواهد نمود. در این پژوهش اثبات می‌گردد که یکی از دلایل افزایش مقاومت فشاری بتن در اثر افزودن نانوسیلیس اثر آن بر یکپارچگی و کاهش قطر ترک‌های بتن در ناحیه ITZ است. شکست بتن غالباً در اثر شکست سنگدانه رخ نمی‌دهد، بلکه غالباً عامل اصلی شکست جدا شدن سنگدانه و ملات است که با رخداد ترک‌های ITZ آغاز می‌گردد. بنابراین بررسی اثر تقویت ناحیه ITZ با

قابل مشاهده است حضور نانوسیلیس مانند یک لایه براق همه بافت‌های ملات را به یکدیگر چسبانده و ترکیب یکنواختی را پدید آورده که از خاصیت تردی ملات نیز کاسته است.

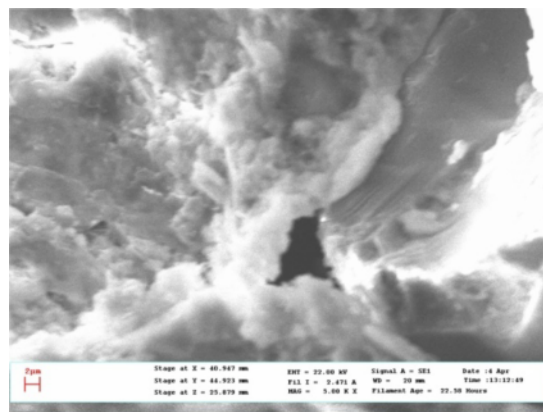


شکل ۶: سنگدانه شکل ۵ با تصویری ۵ برابر بزرگتر از محل ترک.

بنابراین مشخص است حضور نانوسیلیس توانسته است قطر ترک در ناحیه ITZ برای نمونه‌هایی که از میانه مکعب‌های بتنی جدا شده‌اند را به میزان تقریباً ۱۰ برابر کاهش دهد. در واقع دلیل مقاومت بیشتر نمونه‌های حاوی نانوسیلیس نیز می‌تواند همین عامل باشد. نانوسیلیس همانند یک چسب در ناحیه ITZ باعث پیوستگی بیشتر سنگدانه و ماتریس می‌شود. شکل ۷ نمونه‌ای را نشان می‌دهد که از لبه مکعب بتنی جداسازی شده و بدون نانوسیلیس می‌باشد. تصویرگیری از نمونه‌های لبه‌ای با توجه به مسطح بودن یک وجه آنها ساده‌تر می‌باشد.

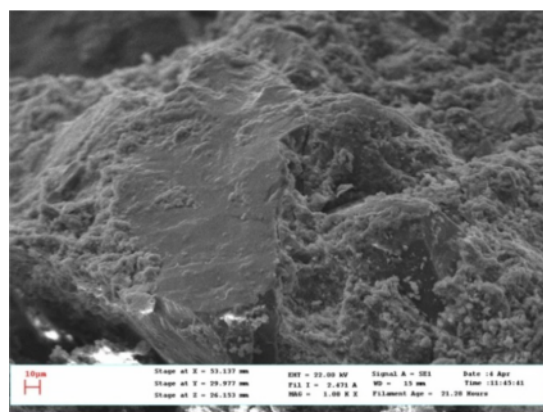


شکل ۷: یک سنگدانه و ترک جانبی آن در نمونه اخذ شده از لبه مکعب بتنی بدون نانوسیلیس.



شکل ۴: سنگدانه شکل ۳ با تصویری ۵ برابر بزرگتر از گوشه ترک.

تصویر با ۵ برابر بزرگنمایی بیشتر از ترک شکل ۵، در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به پیوستگی مناسب سنگدانه با ماتریس ملاحظه می‌گردد که ضخامت ترک در ناحیه ITZ به حدود ۱ میکرومتر کاهش یافته است. کاهش قطر ترک در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس به دلیل حضور بیشتر سیمان در ناحیه ITZ نیست بلکه به علت حضور نانوسیلیس در ساختار بتن می‌باشد. با مقایسه این نمونه‌های حاوی نانوسیلیس با نمونه‌های قبلی مشخص است که در این نمونه‌ها یکنواختی ساختاری بیشتری ملاحظه می‌شود. البته باید به این نکته اشاره نمود که نانوسیلیس به عنوان فیلر یا پرکننده در ناحیه ITZ ظاهر نمی‌گردد چرا که ضخامت ترک‌ها در حد میکرون می‌باشد که هزار بار بزرگتر از مقیاس نانو است.

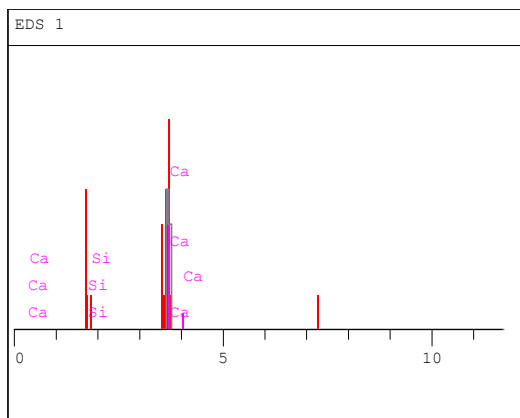


شکل ۵: ترک بسیار کوچکتر در ناحیه ITZ در بتن حاوی نانوسیلیس.

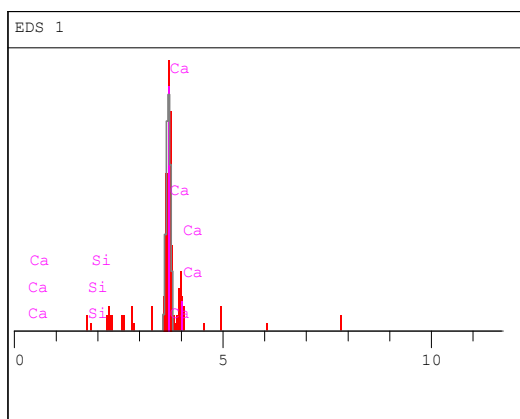
بلکه ترکیب نانوذرات با ملات باعث چسبیدن بیشتر به سنگدانه گردیده است. همانگونه که در شکل ۶ به خوبی

و از لبه مکعب بتنی جدا گردیده است. باز هم مثل شکل ۵ دانه‌های ریز سفید رنگ که در اثر حضور نانوسیلیس ایجاد شده‌اند به چشم می‌خورد.

قطر ترک آن در حدود ۱/۴ میکرومتر برآورد گردیده که نشان می‌دهد نانوسیلیس حدوداً ۱۰ برابر ضخامت ترک را کاهش داده است. با دقت در مورفولوژی اتصال بتن و سنگدانه در این تصویر، پیوستگی مناسب بین ماتریس و سنگدانه و عملکرد چسب گونه نانوسیلیس مشخص می‌گردد. برای اطمینان از حضور نانوسیلیس در ناحیه ITZ و ایجاد اتصال بین سنگدانه و ماتریس از نمونه‌های حاوی نانوسیلیس و بدون آن، در محل ترک تست EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) گرفته شد که نتیجه آن در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده‌اند. دستگاه EDX مورد استفاده از نوع Seron ALS2300 می‌باشد.

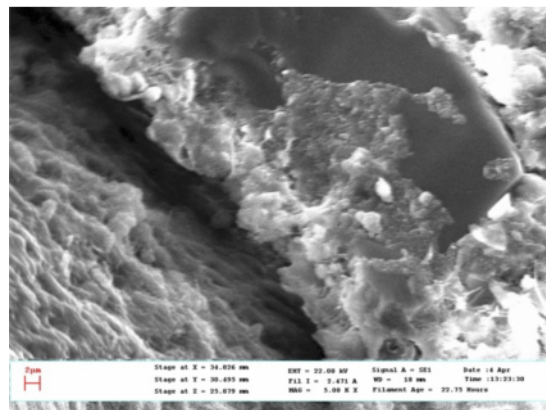


شکل ۱۰: مقدار سیلیس در محل ترک ناحیه ITZ در نمونه حاوی نانوسیلیس.



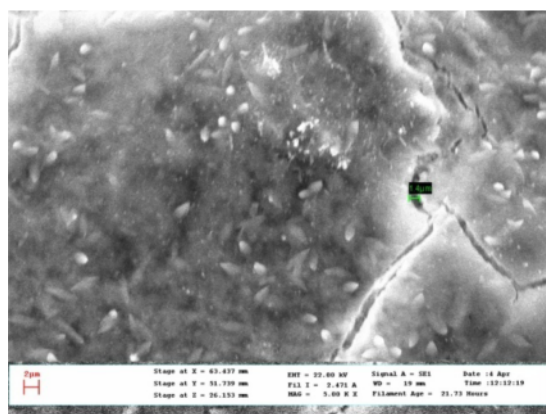
شکل ۱۱: مقدار سیلیس در محل ترک ناحیه ITZ در نمونه بدون نانوسیلیس.

در این تصویر جداسازی ماتریس از یک سنگدانه ورقه‌ای کاملاً واضح است. شکل ۸ همین ترک را البته با ۵ برابر بزرگنمایی بیشتر نشان می‌دهد.



شکل ۸: سنگدانه شکل ۷ با تصویری ۵ برابر بزرگتر از محل ترک.

ملاحظه می‌گردد که در شکل ۷ قطر افقی ترک حدود ۱۸ میکرومتر است که البته قطر واقعی آن حدود ۱۴ میکرومتر بدست می‌آید. فضای مابین سنگدانه و ملات کاملاً خالی است و جدایش کامل بین سنگدانه و ملات اتفاق افتاده است. قسمت عظیمی از سنگدانه کاملاً برهنه است. برعکس در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس (شکل ۹) حضور تار و پودی در داخل ترک به چشم می‌خورد.



شکل ۹: سنگدانه و ترک جانبی آن در نمونه اخذ شده از لبه مکعب بتنی حاوی نانوسیلیس.

مشابه نمونه‌هایی که از میانه بتن گرفته شده بودند حضور لایه چسبناک روشن حاوی نانوسیلیس کاملاً در شکل مشخص است. در واقع شکل ۹ نشانگر ترک در ناحیه انتقال مرزی برای نمونه‌ای است که حاوی نانوسیلیس بوده

ITZ نقش فیلر یا پرکننده را ایفا نماید. بلکه با افزایش چسبندگی بین ماتریس و سنگدانه باعث بهبود و کاهش قطر ترک‌ها می‌گردد.

مراجع

- [1] S. Diamond, J. Huang, *Cement & Concrete Composites*, **23**, 2001, 179.
- [2] J.P. Ollivier, J.C. Maso, B. Bourdette, *Adv. Cement-Based Matter*, **2**, 1995, 8.
- [3] J. Grandet, J.P. Ollivier, "New method for the study of cement-aggregate interfaces", *7th International Congress on Chem. of Cement*, Paris, France, 1975.
- [4] K.A. Snyder, D.P. Bentz, E.J. Garboczi, D.N. Winslow, *Interfaces in Cementitious Composites*, **18**, 1992, 259.
- [5] A. Goldman, A. Bentur, "Effect of Pozzolan and Non-Reactive Microfillers on the Transition Zone in High Strength Concretes", Rilem Publications, 1992.
- [6] G. Escadeillas, J.C. Maso, "Approach of the Initial State in Cement Paste, Mortar and Concrete", American Ceramic Society, 1991.
- [7] T. Akcaoglu, M. Tokyay, T. Celic, *Cement and Concrete Composites*, **35**, 2005, 358.
- [8] Y. Ke, S. Ortola, A.L. Beaucour, H. Dumontet, *Cement and Concrete Research*, **32**, 2010, 1590.
- [9] H. Azimah, C. Poole, *Construction and Building Materials*, **25**, 2011, 2298.
- [10] P. Rangaraju, J. Olek, S. Diamond, *Cement and Concrete Research*, **32**, 2010, 1601.
- [11] J. Zheng, X. Zhou, X. Jin, *Cement and Concrete Composites*, **34**, 2012, 716.
- [12] T. Akcaoglu, M. Tokyay, T. Celic, *Cement and Concrete Research*, **26**, 2004, 633.
- [13] J. Zheng, H. Wong, N.R. Buenfeld, *Cement and Concrete Research*, **31**, 2009, 805.
- [14] A. Leemann, R. Loser, B. Munch, *Cement and Concrete Composites*, **32**, 2010, 116.
- [15] F. Belad, G. Arliguie, R. Francois, *Cement and Concrete Research*, **23**, 2001, 1561.
- [16] T. Akcaoglu, M. Tokyay, T. Celic, *Cement and Concrete Composites*, **26**, 2004, 633.
- [17] D. Kong, T. Lei, J. Zheng, C. Ma, J. Jiang, *Construction and Building Materials*, **24**, 2010, 701.
- [18] J.C. Nadeau, *Cement and Concrete Research*, **33**, 2003, 103.
- [19] C. Carde, R. Francois, *Cement and Concrete Research*, **19**, 1997, 971.
- [20] C.S. Poon, Z. Shui, L. Lam, *Construction and Building Materials*, **18**, 2004, 461.
- [21] J. Xiao, J. Ying, L. Shen, *Construction and Building Materials*, **29**, 2012, 12.
- [22] W. Li, J. Xiao, Z. Sun, S. Kawashima, S. Shah, *Construction and Building Materials*, **35**, 2012, 1045.
- [23] L. Basheer, M. Basheer, A. Long, *Construction and Building Materials*, **19**, 2005, 682.
- [24] A. Delagrave, J. Bigas, J. Ollivier, J. Marchand, M. Pigeon, *Advanced Cement Based Materials*, **5**, 1997, 86.
- [25] H. Wonsong, J. Jung, V. Sarawathy, K. Byun, *Building and Environment*, **42**, 2007, 1358.
- [26] K. Scrivener, *Cement and Concrete Composites*, **26**, 2004, 935.
- [27] S. Erdem, A. Dawson, N. Thom, *Cement and Concrete Research*, **34**, 2012, 447.
- [28] J. Xiao, J. Ying, L. Shen, *Construction and Building Materials*, **29**, 2012, 12.
- [29] J.M. Fernandez, A. Duran, I. Navarro, J. Lanas, R. Sirera, J.I. Alvarez, *Cement and Concrete Research*, **37**, 2013, 12.

طیف‌هایی که از دستگاه EDS تا محدوده ۱۰ الکترون ولت گرفته می‌شوند قادر می‌باشند که نه تنها عناصر سنگین بلکه عناصر سبک را نیز نشان دهند. زیرا علاوه بر خطوط K عناصر سبک، خطوط M یا L عناصر سنگین نیز می‌توانند در این محدوده نشان داده شوند. اساساً تشخیص عناصر منفرد از طیف‌های EDS ساده است. چرا که هر خط مشخصه ایجاد شده توسط یک عنصر خاص، یک انرژی پرتو X منحصر بفرد را نشان می‌دهد. بنابراین علی‌رغم اینکه نسبت سیگنال به نویز در EDS کمتر از دستگاه مشابه WDS است، لذا قدرت تفکیک آن کمتر است اما روش بسیار مناسبی برای آنالیز کیفی عناصر می‌باشد.

در نمودارهای گرفته شده در این تحقیق نیز حضور کلسیم در ناحیه ITZ امری بدیهی و قابل پیش‌بینی بوده است اما با مقایسه نمودارهای شکل ۱۰ و ۱۱ ملاحظه می‌گردد که در نمونه حاوی نانوسیلیس، این ماده به درستی به ناحیه ITZ هدایت شده و مقدار آن در این ناحیه چندین برابر نمونه‌های بدون نانوسیلیس است. دلیل کم شدن قطر ترک‌ها نیز به دلیل حضور همین ماده بوده است.

۴- نتیجه‌گیری

- ترک‌های ناحیه انتقال مرزی ITZ با استفاده از پرتوهای الکترون‌های ثانویه در میکروسکوپ الکترونی روبشی قابل رویت هستند. با توجه به اینکه ناحیه انتقال مرزی مانند هاله‌ای به ضخامت ۳۰ میکرومتر دور سنگدانه می‌باشد، تمامی ترک‌هایی با کمتر از این قطر که در حاشیه سنگدانه قرار می‌گیرند در ناحیه ITZ واقع خواهند بود.

- در تمامی نمونه‌های اخذ شده از میانه و لبه مکعب‌ها غالب ترک‌ها در ناحیه ITZ اتفاق افتاده بوده و دارای شرایط مشابه می‌باشند. اما تصویرگیری از نمونه‌های لبه به دلیل دارا بودن یک سطح صاف ساده‌تر می‌باشد.

- افزودن نانوسیلیس به بتن باعث کاهش قطر ترک در ناحیه ITZ و افزایش مقاومت فشاری آن گردید. کاهش قطر ترک به میزان ۱۰ برابر هم در نمونه‌های اخذ شده از لبه و هم میانه مکعب‌های بتنی رخ داده است.

- نانوسیلیس به دلیل دارا بودن قطری در حد نانو بسیار کوچکتر از آن است که در ترک‌های میکرومتری ناحیه

[31] Y. Hao, H. Hao, X.H. Zhang, *International Journal of Impact Engineering*, **39**, 2012, 51.

[30] C. Duret, N. Wauthoz, T. Sebti, F. Vanderbist, K. Amighi, *International Journal of Pharmaceutics*, **428**, 2012, 103.