



تعیین پارامترهای شکست کامپوزیت‌های سیمانی الیافی دارای نانو سیلیس با استفاده از پردازش تصویر

حسین کریم پور، موسی مظلوم*

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۹

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۱۹

ارائه آنلاین:

کلمات کلیدی:

کامپوزیت سیمانی الیافی

مکانیک شکست

نانو سیلیس

پردازش تصویر

کامپوزیت سیمانی مهندسی شده

خلاصه: استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی الیافی ایده‌ای نو در صنعت ساختمان محسوب می‌شود. به دلیل انعطاف‌پذیری بالای کامپوزیت‌های سیمانی الیافی نسبت به بتن معمولی، استفاده از این نوع مصالح در المان‌های سازه‌ای از جذابیت زیادی به ویژه در مناطق زلزله‌خیز برخوردار است. بنابراین بررسی رفتار و خواص شکست آن‌ها به منظور تسهیل در روند طراحی و استفاده در صنعت ساختمان امری ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش نوع جدیدی از کامپوزیت‌های سیمانی دارای الیاف پلی‌پروپیلن با رفتار سخت‌شوندگی کرنشی مورد بررسی قرار گرفت. در این نوع کامپوزیت به منظور کاهش اثرهای منفی زیست‌محیطی استفاده از سیمان، از سرباره ی آهن‌گدازی استفاده شد. استفاده از این نوع پوزولان علیرغم اثرات مثبت آن باعث دیرگیری و مقاومت فشاری و خمشی کم در سنین پایین می‌گردد که با افزودن نانو سیلیس به خمیر سیمان، این مشکل رفع گردید. در این پژوهش تأثیر استفاده از نانو سیلیس در رفتار شکست کامپوزیت‌های سیمانی الیافی مورد بررسی قرار گرفت. در همین راستا ۵ طرح اختلاط شامل طرح بدون نانو سیلیس و طرح‌های حاوی ۱-۴ درصد نانو سیلیس ساخته شد. آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی جهت تعیین ویژگی‌های مکانیکی و شکست انجام شد. رفتار شکست و گسترش ترک در این کامپوزیت سیمانی الیافی با استفاده از روش ضریب شدت تنش دوتایی تحلیل شد و تأثیر نانو سیلیس بر طاقت شکست در زمان شروع ترک‌خوردگی و همچنین نحوه‌ی گسترش ترک (در حالت ناپایدار) بررسی شد. به دلیل محدودیت تجهیزات متداول اندازه‌گیری جابه‌جایی و کرنش، برای محاسبه ی بازشدگی دهانه ی ترک و بار نظیر ترک‌خوردگی اولیه از روش پردازش تصویر استفاده شد. نتایج نشان داد که افزودن ۳ درصد نانو سیلیس باعث بهبود رفتار مکانیکی (شامل مقاومت فشاری و مقاومت خمشی) شده و همچنین افزایش طاقت پل زدن الیاف و کاهش تردی کامپوزیت سیمانی الیافی را در پی دارد.

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده (ECC^۲) نوع منحصر به فردی از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند هستند که از مهم‌ترین ویژگی‌های بارز آن‌ها در مقایسه با بتن الیافی معمولی (FRC^۳) به رفتار سخت‌شوندگی کرنشی، شکل‌پذیری، ظرفیت جذب انرژی، وزن پایین به علت حذف سنگدانه‌های درشت‌دانه و دوام زیاد می‌توان اشاره کرد [۳]. علاوه بر ویژگی‌های ذکر شده، این نوع کامپوزیت‌های سیمانی با کنترل عرض ترک به نسبت بتن‌های معمولی (عرض ترک کمتر از ۱۰۰ میکرومتر) علاوه بر ایجاد تأخیر در تماس عوامل مهاجم با میلگردهای فولادی، ایجاد تغییر در ماهیت خوردگی فولاد و مقاومت در برابر پوسته پوسته شدن کاور بتنی، خاصیت خودترمیم‌شوندگی نیز دارند.

در دهه‌های اخیر با گسترش و پیشرفت تحقیقات انجام شده در صنعت ساختمان، مصالح ساختمانی جدیدی با عنوان کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند (HPFRCC^۱) معرفی شده‌اند. این بتن‌ها دسته‌ی خاصی از کامپوزیت‌های سیمانی الیافی را تشکیل می‌دهند که برخلاف بتن معمولی و کامپوزیت سیمانی الیافی، در بارگذاری پس از اولین ترک‌خوردگی رفتار سخت‌شوندگی کرنشی همراه با ترک‌خوردگی‌های متعدد را قبل از تمرکز ترک و گسیختگی نهایی از خود نشان می‌دهند (شکل ۱) [۱ و ۲].

1 High performance fiber reinforced cementitious composites

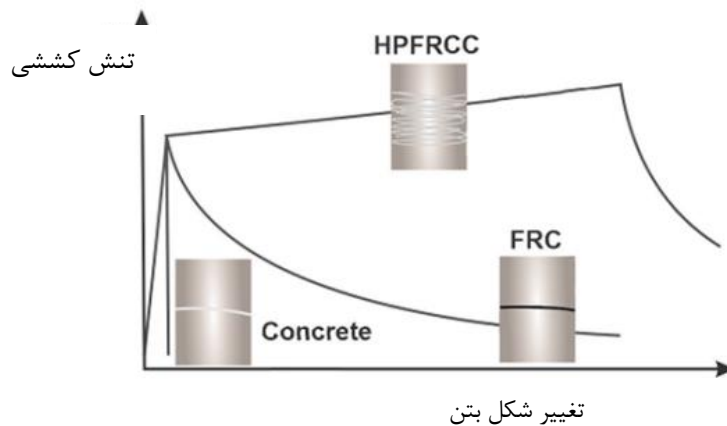
2 Engineered cementitious composite

3 Fiber reinforced concrete

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mazloom@sr.u.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.





شکل ۱. منحنی تنش کششی تک‌محوری - تغییر شکل بتن معمولی، بتن تقویت شده با الیاف و کامپوزیت سیمانی مهندسی شده [۲]

Fig. 1. Schematic uniaxial tensile stress vs. deformation curves of plain concrete, FRCC, and ECC [2]

در ECC از کاربرد درشت‌دانه‌ها اجتناب شده است که حاصل آن مخلوطی با مقدار مواد سیمانی بیشتر در مقایسه با بتن معمولی است [۷]. مقدار زیاد مواد سیمانی در ECC موجب کنترل مقدار کارایی برای توزیع هر چه بهتر الیاف در آن می‌شود و همچنین، برای بروز رفتار کرنش سخت شونده و افزایش چقرمگی خمیر سیمانی در ناحیه‌ی پساترک ضروری است [۷]. در واقع، مواد ECC ترکیبی از خمیر سیمان یا ملات با مواد پرکننده‌ی ریزدانه است و عیار سیمان آن، ۸۳۰ تا ۱۲۰۰ کیلوگرم در هر متر مکعب است که در مقایسه با بتن معمولی، به طور قابل توجهی دارای مقدار سیمان بیشتری، به طور متوسط دو تا سه برابر، هست [۸]. بنابراین یکی از رویکردهای مهم در کاهش هزینه‌ی تولید و افزایش بهره‌وری زیست‌محیطی به منظور تسهیل هر چه بیشتر استفاده از این نوع کامپوزیت سیمانی در صنعت ساختمان، استفاده از مصالح پوزولانی و در دسترس به عنوان جایگزین بخشی از وزن سیمان عنوان می‌شود [۶].

در چند دهه‌ی گذشته، از مواد افزودنی معدنی، مانند خاکستر بادی^۱ و سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی^۲ به عنوان جایگزین بخشی از وزن سیمان، به دلیل داشتن مزایا و آثار مثبت بر بتن و فرآورده‌های سیمانی استفاده شده است. در سال‌های اخیر استفاده از این مواد در ECC نیز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. جایگزینی بخشی از سیمان با خاکستر بادی و سرباره‌ی آهن‌گدازی باعث کاهش مصرف سیمان و به دنبال آن اثرات مثبت

از مهم‌ترین کاربردهای ECC می‌توان به استفاده از این نوع کامپوزیت الیافی در ساخت روسازی، دال‌های بتنی، ساختمان‌های بلندمرتبه و تعمیر سازه‌ها اشاره کرد. استفاده از ECC در ساخت المان‌های سازه‌ای تا حد زیادی می‌تواند ابعاد آن‌ها را کاهش دهد. علاوه بر کاربردهای سازه‌ای ECC می‌توان از آن به عنوان لایه‌ی محافظ برای سازه‌های بتن‌آرمه به منظور افزایش دوام و جلوگیری از خوردگی میلگردها نیز استفاده کرد. همچنین با توجه به جذب انرژی بالای ECC و مقاومت بالا در برابر ترک‌خوردگی، می‌توان از آن به عنوان المان جاذب انرژی در سازه استفاده کرد [۴].

نام کامپوزیت سیمانی مهندسی شده (ECC) به منظور تأکید بر استفاده از اصول میکرو مکانیسم در انتخاب طرح مخلوط، انتخاب شده است [۵]. در ساخت ECC به طور معمول از الیاف پلی وینیل الکل به دلیل مدول الاستیسیته‌ی بالای آن استفاده می‌شود. مظلوم و میرزامحمدی بر تأثیر استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن، آرامید، شیشه و بازالت بر رفتار شکست کامپوزیت‌های سیمانی الیافی مطالعه کردند. در این مطالعه مشخص شد که کامپوزیت‌های سیمانی حاوی الیاف پلی‌پروپیلن در دماهای متفاوت از خواص مکانیکی و شکست بهتری نسبت به کامپوزیت‌های سیمانی حاوی سایر الیاف برخوردار هستند [۵]. همچنین کریم پور و مظلوم با مطالعه بر خواص شکست و پارامترهای میکرو مکانیک کامپوزیت‌های سیمانی الیافی دارای الیاف پلی‌پروپیلن نشان دادند که افزایش حجم الیاف تا ۲ درصد و افزایش طول الیاف تا ۱۲ میلی‌متر باعث بهبود خواص شکست و خواص میکرومکانیک کامپوزیت‌های سیمانی الیافی می‌گردد [۶].

1 Fly ash (FA)
2 Blast furnace slag (BFS)

قرار گرفته است. نانو ذرات با توجه به ابعاد بسیار ریز و ساختار شیمیایی خود، دارای چهار عملکرد جداگانه در خمیر سیمانی هستند. البته بایستی توجه داشت که بسیاری از نانو ذرات دارای هر چهار قابلیت نمی‌باشند و از میان انواع نانو ذرات به کار گرفته شده، تاکنون تنها نانو ذرات سیلیس قابلیت عملکرد چهارگانه را دارا می‌باشند که شدت این عملکردها به سطح ویژه، شکل و ویژگی‌های سطحی نانو ذرات سیلیس بستگی دارد. عملکرد چهارگانه نانو ذرات در خمیر سیمانی عبارت‌اند از [۱۷ و ۱۶]:

الف- تولید کلسیم سیلیکات هیدرات^۵ در طی واکنش پوزولانی: اجزای پوزولانی نظیر سیلیکا^۶ می‌توانند یا برقراری واکنش با بلورهای کلسیم هیدروکسید به تولید کلسیم سیلیکات هیدرات متراکم منجر گردند.

ب- توسعه واکنش هیدراسیون از طریق عملکرد بذری: نانو ذرات با قرارگیری بر روی سطح دانه‌های سیمانی (ذرات آلیت و بلایت) و به سبب سطح ویژه بالا و فعال منجر به فعال‌تر شدن سطح ذرات سیمان شده و بر همین اساس در ساعات اولیه پس از شروع هیدراسیون می‌توانند حجم محصولات تولیدی توسط واکنش ذرات سیمان و آب را افزایش دهند.

پ- اثر نانو پرکنندگی: نانو ذرات به سبب ابعاد دانه بسیار ریز می‌توانند در خلل و فرج نانومتری محصولات هیدراسیون نظیر کلسیم سیلیکات هیدرات قرار گیرند و از این طریق به افزایش استحکام آن‌ها کمک نمایند.

ت- کنترل رشد بلوری: نانو ذرات با توزیع مناسب در خمیر سیمانی می‌توانند بر روی و در میان بلورهای تولید شده در طی واکنش هیدراسیون قرار گرفته و با اشغال فضاهای خالی و ایجاد فشار بر بلورهای مضر از رشد سریع آن‌ها جلوگیری نمایند.

به طور خلاصه می‌توان گفت که افزودن نانو سیلیس به مخلوط بتن باعث می‌گردد که به دلیل سطح مخصوص بالای آن با محلول هیدروکسید کلسیم آزاد موجود در منافذ موئین بتن ترکیب گردد و کریستال سیلیکات کلسیم نامحلول تولید نماید و در نهایت باعث تراکم ساختار خمیر سیمان و کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت بتن گردد. این ویژگی‌ها منجر به ایجاد مزیت‌هایی از جمله افزایش مقاومت فشاری و خمشی و کششی بتن، افزایش مقاومت بتن در برابر فرسایش، کاهش قابل توجه نفوذپذیری بتن، جلوگیری از نفوذ یون کلر و سولفات‌ها و سایر مواد شیمیایی مخرب به داخل بتن گردد. در این پژوهش نوع جدیدی از کامپوزیت‌های سیمانی الیافی با رفتار سخت‌شوندگی کرنشی ارائه شده است که در آن به منظور کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی استفاده از سیمان، از مواد پوزولانی جایگزین سیمان مانند

بر محیط زیست خواهد شد چرا که تولید سیمان با تولید کربن دی‌اکسید^۱ همراه است.

سرباره‌ی آهن‌گذاری که یکی از محصولات جانبی در تولید آهن است به عنوان جایگزین اصلی سیمان محسوب می‌شود. سرباره‌ی آهن‌گذاری به علت میکرو ساختار شبیه به شیشه که دارای ساختاری مونوسلیکاتی است پتانسیل واکنش پوزولانی دارد و با ترکیب با سیمان پرتلند، هیدراتاسیون سیمان پرتلند را شتاب بخشیده و با کلسیم هیدروکسید^۲ که یکی از محصولات هیدراتاسیون سیمان است واکنش می‌دهد [۹ و ۶]. اگر چه افزودن سرباره‌ی آهن‌گذاری باعث کاهش مقاومت در سنین اولیه می‌شود ولی مطالعات نشان می‌دهد جایگزینی سرباره‌ی آهن‌گذاری تا ۷۰ درصد، اثر منفی بر روی مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی بتن ندارد [۱۰]. افزودن پودر سرباره‌ی آهن‌گذاری می‌تواند دوام بتن را بهبود بخشد به عنوان مثال مقاومت در برابر حمله سولفاتی را بهبود می‌بخشد و شتاب نفوذ یون کلر را کم می‌کند [۱۲ و ۱۱]. علاوه بر این افزودن پودر سرباره‌ی آهن‌گذاری باعث می‌شود توزیع الیاف یکنواخت‌تر صورت بگیرد. به دلیل آن که ذرات سرباره آهن‌گذاری نیروی دافعه‌ای برای توزیع الیاف ایجاد می‌کنند [۱۳]. لیم و همکاران^۳ [۱۴] کامپوزیت سیمانی الیافی حاوی پودر سرباره آهن‌گذاری را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه، مشاهده شد که با افزایش جایگزینی پودر سرباره‌ی آهن‌گذاری به جای سیمان (بین ۵۰ تا ۷۰ درصد جایگزینی)، ظرفیت کرنش کششی افزایش می‌یابد. آن‌ها توانستند با استفاده از اصول میکرو مکانیک، کامپوزیتی با ظرفیت کرنش ۳/۳ درصد و مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی ۳۸ مگاپاسکال با عرض ترک ۵۷ میکرومتر طراحی کنند. آدینسا و داس^۴ [۱۵] کامپوزیت سیمانی الیافی با استفاده از سرباره‌ی آهن‌گذاری فعال شده با کربنات سدیم، به منظور حذف استفاده از سیمان پرتلند را توسعه دادند. مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی به ترتیب برابر با ۳۸/۶ مگاپاسکال، ۲/۱ مگاپاسکال و ۴/۹ مگاپاسکال بود که با توجه به حذف کامل مواد سیمانی نتیجه‌ای قابل قبول به نظر می‌رسید [۱۵].

در راستای رفع مشکل تأخیر در گیرش بتن‌ها و کامپوزیت‌های الیافی حاوی مقادیر بالای پوزولان طبیعی و غیرطبیعی، تحقیقات و مطالعاتی در سالیان اخیر انجام شده و تأثیر افزودن برخی نانو ماده‌های معدنی به ملات حاوی مقادیر بالای پوزولان در جهت برطرف شدن این مشکل مورد بررسی

- 1 Carbon dioxide (CO₂)
- 2 Calcium hydroxide Ca(OH)₂
- 3 Lim et al.
- 4 Adesina and Das

5 Calcium silicate hydrate (C₃S₂H₃)
6 Silicon dioxide (SiO₂)

پارامترهای روش ضریب شدت تنش دوتایی طبق رابطه زیر با یکدیگر ارتباط دارند:

$$K_{IC}^{un} = K_{IC}^{ini} + K_{IC}^C \quad (1)$$

که در رابطه‌ی فوق، K_{IC}^C ضریب شدت تنش بحرانی ایجاد شده توسط تنش چسبندگی^۷ است. همچنین پارامتر بی‌بعد تردی بتن با استفاده از روش دو پارامتری شکست به صورت زیر تعریف گردید. در رابطه فوق پارامتر تردی عددی بین صفر و یک خواهد بود.

$$\beta_B = \frac{K_{IC}^{ini}}{K_{IC}^{un}} = 1 - \frac{K_{IC}^C}{K_{IC}^{un}} \quad (2)$$

فرآیند ایجاد و رشد ترک در نمونه‌ی بتنی در شکل ۲ نمایش داده شده است. مطابق شکل ۲، در ناحیه‌ی OB نمونه دارای رفتار الاستیک خطی است. نمونه‌ی بتن در منطقه‌ی BC رفتار غیرخطی خواهد داشت و خطوط مماسی در این منطقه از خط مماسی اولیه در ناحیه‌ی OB انحراف خواهد داشت. این منطقه‌ی غیرخطی مربوط به عملکرد پل‌زنی سنگدانه‌ها^۸ در منطقه‌ی آسیب دیده نوک ترک^۹ هست. نقطه‌ی B، نقطه‌ی شروع شکل‌گیری منطقه‌ی آسیب دیده نوک ترک و شکل‌گیری ترک موضعی در خمیر سیمانی است. پیش از رسیدن به نقطه‌ی B، ماده رفتاری الاستیک و خطی دارد. رشد و بازشدگی نوک ترک در این منطقه صفر است. با این فرضیه بار متناظر با نقطه‌ی B بار شروع ترک‌خوردگی و ضریب شدت تنش متناظر با این نقطه، طاقت ترک‌خوردگی اولیه K_{IC}^{ini} شناخته می‌شود.

رشد ناپایدار ترک در بار بیشینه مشاهده می‌شود. این نقطه جایی است که هم طول ترک و هم میزان بازشدگی نوک ترک به مقدار بحرانی خود می‌رسند. بنابراین معیار روش ضریب شدت تنش دوتایی می‌تواند شروع ترک‌خوردگی، رشد ترک پایدار و فرآیند شکست ناپایدار را پیش‌بینی کند. مطابق با این معیار، دو پارامتر تحت عنوان طاقت ترک‌خوردگی اولیه K_{IC}^{ini} و طاقت شکست ناپایدار K_{IC}^{un} مراحل شکست بتن را پیش‌بینی می‌کنند [۲۰].

سرباره‌ی آهن‌گذاری استفاده شده است. البته این نوع پوزولان (سرباره‌ی آهن‌گذاری)، زمان گیرشی طولانی‌تر دارد که سبب می‌شود در مقایسه با سیمان معمولی مقاومت فشاری و خمشی پایین‌تری در سنین اولیه در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی داشته باشد. هدف از این پژوهش امکان‌سنجی استفاده از نانو سیلیس در جهت برطرف شدن این مشکل هست. از همین رو تأثیر استفاده از نانو سیلیس در رفتار شکست کامپوزیت‌های سیمانی الیافی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین به منظور کاهش هزینه‌ی تولید این کامپوزیت‌های سیمانی الیافی که موضوعی تعیین‌کننده در استفاده از این نوع کامپوزیت‌های سیمانی در صنعت ساختمان است از الیاف پلی‌پروپیلن^۱ به جای الیاف پلی‌وینیل الکل^۲ استفاده شده است. در این مقاله پس از معرفی روش ضریب شدت تنش دوتایی و معرفی مشخصات مصالح، طرح مخلوط، روش ساخت، روش انجام آزمایش و محاسبات به بررسی و تحلیل تأثیر نانو سیلیس بر پتانسیل جریان، رفتار مکانیکی و مکانیک شکست کامپوزیت سیمانی الیافی پرداخته شده است.

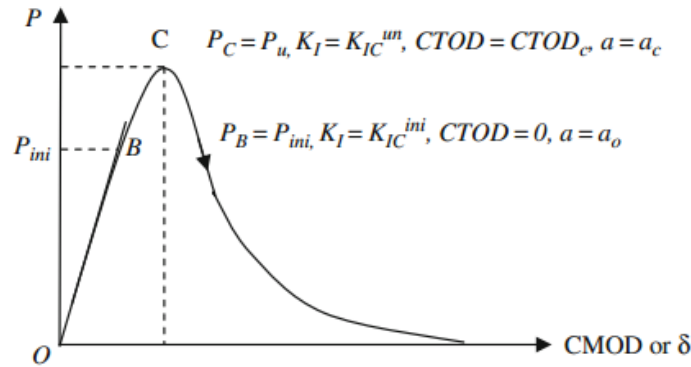
۲- روش ضریب شدت تنش دوتایی برای تحلیل رفتار شکست کامپوزیت‌های سیمانی الیافی

وجود منطقه‌ی آسیب دیده‌ی نوک ترک باعث به وجود آمدن رفتار غیرخطی قابل توجهی در مواد شبه ترد می‌شود. مدل‌های متعددی برای پیش‌بینی شروع و رشد ترک در سازه‌های بتنی و کامپوزیت‌های سیمانی ارائه شده است [۱۸]. ژو و رینهارت^۳ [۱۹] روش ضریب شدت تنش دوتایی را برای مطالعه‌ی نحوه‌ی شکست بتن ابداع کردند. آن‌ها در مطالعات خود سه مرحله برای شکل‌گیری و رشد ترک در بتن در نظر گرفتند که عبارت‌اند از شروع ترک‌خوردگی^۴، گسترش پایدار^۵، و گسترش ناپایدار ترک^۶. آن‌ها مدلی جدید برای تحلیل شکست سازه‌های بتنی ارائه دادند که برخلاف مدل‌های قبلی نه تنها می‌تواند گسترش شکست ناپایدار سازه را بررسی کند بلکه هر سه مرحله ترک‌خوردگی را می‌تواند پیش‌بینی کند. آن‌ها با بررسی نتایج آزمایشگاهی، دو امتر مستقل از ابعاد و هندسه‌ی نمونه را مطرح کردند. K_{IC}^{ini} : طاقت ترک‌خوردگی اولیه (توان ذاتی ماده در جلوگیری از ایجاد ترک تحت بارگذاری)

K_{IC}^{un} : طاقت شکست ناپایدار (توان کل ماده در شرایط بحرانی).

- 1 Polypropylene (PP)
- 2 Polyvinyl alcohol (PVA)
- 3 Xu and Reinhardt
- 4 Initial cracking
- 5 Stable crack propagation
- 6 Unstable crack propagation

- 7 Cohesive stress
- 8 Aggregate bridging action
- 9 Fracture Process Zone (FPZ)



شکل ۲. نمودار بار - بازشدگی دهانه‌ی ترک و مراحل شکست سازه در روش ضریب شدت تنش دوتایی

Fig. 2. Graphical representation of points on the P-CMOD or P-δ curve in the double-k model

در مطالعات انجام شده توسط ژو و رینهارت، برای اندازه‌گیری رشد ترک از روش پوشش‌دهی فتوالاستیک^۷ و نصب کرنش‌سنج استفاده شده است و در نهایت با استفاده از تداخل‌سنجی لیزری^۸ اطلاعات مورد نیاز برداشت شده است [۱۹].

۳- مشخصات مصالح، طرح مخلوط، روش ساخت، روش انجام آزمایش و محاسبات

در این پژوهش از سیمان پرتلند نوع یک کارخانه سیمان تهران، فوق روان کننده و فوق کاهنده‌ی آب بر پایه‌ی پلی‌کربوکسیلات، پودر سنگ آهک و سرباره‌ی آهن کارخانه‌ی ذوب‌آهن اصفهان استفاده شده است. نانو سیلیس به صورت پودری با ذراتی به اندازه‌ی متوسط تقریبی 20 ± 5 نانومتر به منظور بررسی تأثیر آن بر خواص مکانیکی و شکست کامپوزیت‌های سیمانی استفاده شد.

در شکل ۳ نتیجه‌ی آنالیز پراش اشعه‌ی ایکس^۹ (XRD) و در شکل ۴ تصویر میکروسکوپی^{۱۰} (SEM) مربوط به نانو سیلیس، نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۳ مشاهده می‌شود، الگوی پراش اشعه ایکس در ذرات نانو سیلیس پیک‌های بلوره‌ای مشخصی را نشان نمی‌دهد که نشان می‌دهد ذرات نانو سیلیس ماهیتی غیربلوره‌ای^{۱۱} دارند. مشخصات فیزیکی مصالح پودری در جدول ۱ و مشخصات شیمیایی آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

پارامتر طاقت ترک‌خوردگی اولیه به صورت مستقیم با استفاده از بار ترک‌خوردگی اولیه^۱ و طول ترک اولیه^۲ با استفاده از فرمول‌های مکانیک شکست الاستیک خطی^۳ محاسبه می‌شوند. طاقت ترک‌خوردگی اولیه تحت عنوان چقرمگی ذاتی مواد نیز شناخته می‌شود و نشان دهنده‌ی حالتی است که مواد به صورت الاستیک رفتار می‌کنند و ترک‌خوردگی در آن‌ها بدون به وجود آمدن ترک ماکرو به ترک‌خوردگی‌های میکرو در مقیاس کوچک محدود می‌شود. پارامتر طاقت ترک‌خوردگی اولیه در سازه‌های مهم مانند سدهای بتنی وزنی، لوله‌های بتنی تحت فشار و سازه راکتورهای هسته‌ای از اهمیت زیادی برخوردار است. پارامتر طاقت شکست نهایی به وسیله بار حداکثر و طول ترک مؤثر متناظر با آن با استفاده از فرمولاسیون مکانیک شکست الاستیک خطی پیدا می‌شود [۲۰]. ژو و رینهارت^۴ از نتایج آزمایشگاهی نتیجه گرفتند که مقادیر K_{IC}^{un} و K_{IC}^{ini} مستقل از شکل و ابعاد نمونه بوده و تابعی از خواص ماده است. همچنین در این پژوهش مشاهده شد که ضخامت نمونه‌ها تفاوت معناداری در مقادیر K_{IC}^{un} و K_{IC}^{ini} ایجاد نمی‌کند. آن‌ها فرمول‌های عددی برای استفاده در این مدل را توسعه دادند. مزیت روش ضریب شدت تنش دوتایی به روش دو پارامتری^۵ آن است که در این روش نیازی به باربرداری و بارگذاری‌های متعدد نیست و در نتیجه نیازی به سیستم آزمایش حلقه‌ی بسته^۶ نیست. البته در این روش پیدا کردن بار ترک‌خوردگی اولیه و طول ترک بحرانی از پیچیدگی برخوردار است و

7 Photo elastic coating

8 Laser interferometry

9 X-Ray Diffraction (XRD)

10 Scanning Electron Microscope (SEM)

11 Amorphous

1 Initial cracking load

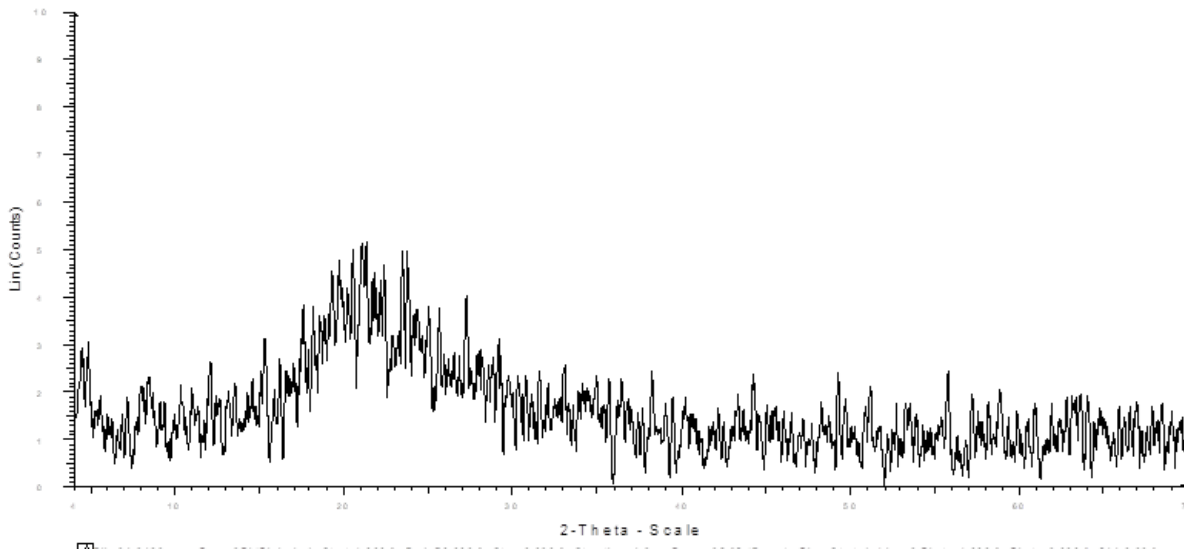
2 Initial crack length

3 Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM)

4 Xu and Reinhardt

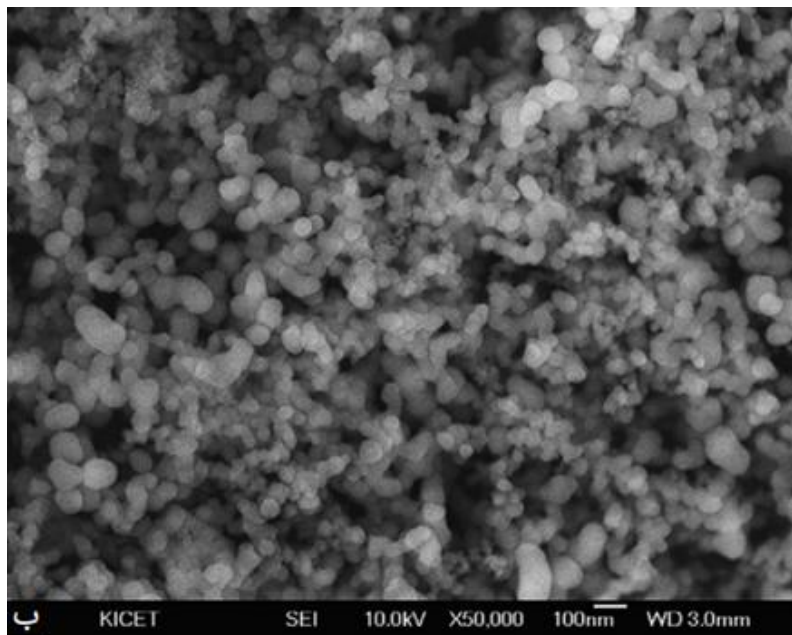
5 Two parameter fracture model (TPFM)

6 Closed-loop



شکل ۳. نتیجه‌ی آنالیز XRD نانو سیلیس

Fig. 3. The XRD pattern of nano-silica



شکل ۴. تصویر تهیه شده به وسیله میکروسکوپ الکترونی با ۵۰۰۰۰ برابر بزرگنمایی از نانو سیلیس

Fig. 4. SEM image of nano-silica at magnification 50000x

جدول ۱. خواص فیزیکی سیمان و سرباره آهن‌گذاری

Table 1. The physical properties of cement and GGBFS

| حالت غیر بلوره‌ای ^۱ | نرمی ^۲ (cm ² /gr) | وزن مخصوص ^۳ (g/m ³) | |
|--------------------------------|---|--|-------------------------|
| ٪۹۰ | ۳۸۰۰ | ۲/۵۸ | پودر سرباره‌ی آهن‌گذاری |
| - | ۳۳۰۷ | ۳/۱۵ | سیمان |

جدول ۲. آنالیز شیمیایی سیمان، سرباره آهن‌گذاری و نانو سیلیس و پودر سنگ‌آهک

Table 2. Chemical properties of cement, GGBFS, nano-silica, and limestone powder

| L.O.I* | SO ₃ (%) | K ₂ O (%) | Na ₂ O (%) | MgO (%) | CaO (%) | Fe ₂ O ₃ (%) | Al ₂ O ₃ (%) | SiO ₂ (%) | مواد پودری |
|--------|---------------------|----------------------|-----------------------|---------|---------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------|-------------------------|
| ۲/۴ | ۲/۰۹ | ۰/۷۱ | ۰/۴۲ | ۳/۴۴ | ۶۲/۰۲ | ۲/۹۶ | ۳/۸۳ | ۲۱/۳۲ | سیمان |
| ۲/۱ | ۰/۸۵ | ۰/۳۵ | ۰/۵ | ۱۰/۲۵ | ۳۷-۳۵ | ۰/۸۵ | ۱۰/۳۶ | ۳۵/۰۵ | پودر سرباره‌ی آهن‌گذاری |
| ۴۲/۷۳ | ۰/۰۵ | ۰/۰ | ۰/۰۷ | ۰/۱۳ | ۵۶/۹ | ۰/۰۲ | ۰/۰ | ۰/۰۷ | پودر سنگ‌آهک |
| - | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰۹ | ۰/۲۱ | ۰/۰ | ۰/۰۲ | ۰/۳۸ | ۹۹/۱۷ | نانو سیلیس |

کاهش جرم در برابر دمای بالا^۴*

جدول ۳. خواص الیاف پلی‌پروپیلن

Table 3. The properties of polypropylene fibers

| | | | |
|---------|---------------------------------|---------|-----------------------------|
| ۰/۹۱ | وزن مخصوص (gr/cm ³) | ۳۰۰-۴۰۰ | مقاومت کششی (MPa) |
| ۱۲ | طول (mm) | ۳-۳/۵ | مدول الاستیسیته (GPa) |
| ۰/۰۳۵ | قطر (mm) | ۲۰ | کشیدگی ^۵ (%) |
| سفید | رنگ | عالی | مقاومت در برابر اسید و قلیا |
| ۱۶۰-۱۷۰ | نقطه‌ی ذوب (C°) | ندارد | جذب آب |

پلی‌پروپیلن به ترتیب ۱۲ میلی‌متر و ۲ درصد حجمی پیدا شد. جدول ۵ نسبت مواد به کار گرفته شده در ساخت کامپوزیت‌های الیافی حاوی پودر نانو سیلیس را نشان می‌دهد. در طرح مخلوط‌های ارائه شده، مقدارهای متفاوت نانو سیلیس بر اساس درصدی از سیمان به سایر مواد تشکیل دهنده‌ی کامپوزیت سیمانی الیافی اضافه شده است. در نام‌گذاری مخلوط‌ها، حرف NS نشان دهنده‌ی درصد نانو سیلیس است.

همچنین مشخصات الیاف پلی‌پروپیلن و فوق روان کننده به ترتیب در جدول ۳ و ۴ قابل مشاهده است. در این پژوهش به منظور افزایش پایداری کامپوزیت‌های سیمانی الیافی و کاهش هزینه از پودر سرباره آهن‌گذاری و پودر سنگ‌آهک استفاده شد. در پژوهش ژو و همکاران [۱۲] نسبت بهینه‌ی پودر سرباره‌ی آهن‌گذاری به سیمان و پودر سنگ‌آهک به سیمان به ترتیب ۲/۳۳ و ۳/۳۳ به دست آمد. همچنین در پژوهش کریم‌پور و مظلوم [۶] بر اساس مطالعات آزمایشگاهی و عددی، مقدار بهینه‌ی طول و حجم الیاف

جدول ۴. مشخصات فوق روان کننده ی ABAPLAST SRT-2912

Table 4. Properties of superplasticizer manufactured by ABAPLAST company called SRT-2912

| شکل ظاهری | مایع قهوه‌ای روشن |
|---------------------------------|-------------------|
| وزن مخصوص (gr/cm ³) | ۱/۱ |
| یون کلر | ندارد |
| PH | ۵-۶ |
| درجه اشتعال | غیر آتشزا |
| درجه انجماد | +۳ |

جدول ۵. طرح مخلوط کامپوزیت سیمانی الیافی دارای مقادیر متفاوت نانو سیلیس بر اساس وزن مصالح در یک مترمکعب برحسب کیلوگرم

Table 5. Mixtures of fiber-reinforced cementitious composites containing different amounts of nano-silica (material weight per 1m³ of composite)

| نام طرح | سیمان | پودر سنگ آهک | پودر سرباره ی آهن‌گذاری | نسبت آب به مواد پودری | روان کننده | الیاف پلی پروپیلن | نانو سیلیس |
|---------|-------|--------------|-------------------------|-----------------------|------------|-------------------|------------|
| NS-0 | ۳۴۲/۶ | ۱۱۴۲ | ۷۹۹/۵ | ۰/۲۶ | ۶/۸۵ | ۱۸/۲ | ۰/۰ |
| NS-1 | ۳۴۲/۶ | ۱۱۴۲ | ۷۹۹/۵ | ۰/۲۶ | ۶/۸۵ | ۱۸/۲ | ۳/۴۳ |
| NS-2 | ۳۴۲/۶ | ۱۱۴۲ | ۷۹۹/۵ | ۰/۲۶ | ۶/۸۵ | ۱۸/۲ | ۶/۸۵ |
| NS-3 | ۳۴۲/۶ | ۱۱۴۲ | ۷۹۹/۵ | ۰/۲۶ | ۶/۸۵ | ۱۸/۲ | ۱۰/۲۸ |
| NS-4 | ۳۴۲/۶ | ۱۱۴۲ | ۷۹۹/۵ | ۰/۲۶ | ۶/۸۵ | ۱۸/۲ | ۱۳/۷ |

در نانو مواد به دلیل نیروهای بالای واندروالسی آنها رایج است که سبب کاهش عملکرد نانو مواد می‌شود. تابش امواج فراصوت^۳ (اولتراسونیکشن) به داخل محلول و استفاده از سورفکتنت^۴ ها اغلب برای پراکندگی مواد نانو استفاده می‌شود. برای پراکندگی ذرات، اولتراسونیکشن متکی بر ارتعاشات مکانیکی است که سطوح بالایی از انرژی (ارتعاشات با فرکانس بالا) تولید می‌کند اما سورفکتنت‌ها با افزایش دافعه‌ی شیمیایی بین ذرات از تجمع مجدد نانو ذرات جلوگیری می‌کنند. شایان توجه است که استفاده از سورفکتنت‌ها ممکن است بر خواص شیمیایی و فیزیکی ماده و در نتیجه بر عملکرد آن در خمیر سیمانی تأثیر بگذارد [۲۲]. در این پژوهش برای اطمینان از پراکندگی نانو سیلیس و عدم تغییر در خواص فیزیکی و شیمیایی مواد از دستگاه همگن‌ساز اولتراسونیک^۵ استفاده شد. در شکل ۵ دستگاه همگن‌ساز اولتراسونیک، با پروب تیتانیومی و توان ۸۰ درصد نشان داده شده است.

فرآیند اختلاط مواد تأثیر بسزایی بر رفتار کامپوزیت‌های سیمانی الیافی دارد. طبق تحقیقات انجام شده فرآیند اختلاط مواد، یک راه حل مناسب برای دستیابی به ویسکوزیته‌ی بیشتر خمیر سیمانی و در نتیجه بهبود در پراکنده شدن یکنواخت الیاف است. ژو و همکاران^۱ توصیه کردند که مقداری از آب برای بالا بردن ویسکوزیته‌ی خمیر سیمانی در هنگام اضافه کردن الیاف نگه داشته شود و پس از اینکه الیاف به طور همگن مخلوط شدند، بقیه آب به آن اضافه شود. این تغییر در توالی اختلاط مواد ممکن است ساده به نظر برسد، اما ظرفیت کرنش کششی کامپوزیت سیمانی الیافی را به طور چشمگیری تحت تأثیر قرار می‌دهد. تجزیه و تحلیل توزیع الیاف در سطح مقطع نمونه‌ها نشان دهنده‌ی ارتباط معنی‌داری بین بهبود پراکندگی الیاف و افزایش ظرفیت کرنش کششی با استفاده از فرآیند اختلاط پیشنهادی، بود [۲۱].

پراکندگی نانو مواد یکی از جنبه‌های ضروری فرآیند تولید کامپوزیت‌های اصلاح شده با نانو است. روش‌های ناهمگون توزیع نانو مواد در خمیر سیمانی می‌تواند منجر به اختلال در یافته‌های پژوهشی شود. پدیده‌ی آگلومره شدن^۲

3 Ultra Sonication
4 Surfactant
5 Ultrasonic Homogenizer

1 Zhou et al.
2 Agglomeration



شکل ۵. ترکیب آب و نانو سیلیس به وسیله‌ی یک همگن‌ساز اولتراسونیک

Fig. 5. Mixing water and nano-silica using an ultrasonic homogenizer

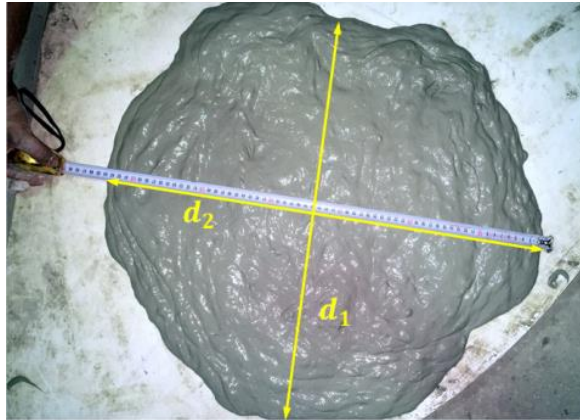
۳-۱- تعیین خواص کامپوزیت سیمانی الیافی در حالت تازه
برای بررسی روانی کامپوزیت سیمانی الیافی اصلاح شده با نانو پیش
از گیرش (خواص تازه^۲) از آزمایش جریان اسلامپ^۳ بر اساس استاندارد
ASTM C1611M استفاده شد. برای بررسی اثر نانو سیلیس بر ویژگی‌های
کامپوزیت سیمانی الیافی اصلاح شده با نانو در حالت تازه و سخت شده،
میزان آب به مواد سیمانی و مقدار افزودنی در همه طرح‌ها یکسان در نظر
گرفته شد. پس از توقف جاری شدن کامپوزیت سیمانی الیافی بر روی صفحه
غیرجاذب، دو قطر متعام جرم کامپوزیت سیمانی الیافی تازه اندازه‌گیری
می‌شود (شکل ۶). جریان اسلامپ برابر با میانگین دو قطر است.

۳-۲- تعیین خواص کامپوزیت سیمانی الیافی در حالت سخت شده
در این تحقیق، برای بررسی خواص شکست کامپوزیت‌های سیمانی
الیافی، ۱۵ تیر دارای شکاف با ابعاد $100 \times 100 \times 350$ (عرض \times ارتفاع \times
طول) میلی‌متر مکعب ساخته شد. شکاف نمونه‌ها در وسط طول نمونه با
استفاده از صفحه‌ای به ضخامت ۳ میلی‌متر و ارتفاع ۲۵ میلی‌متر در هنگام

ال نجار و همکاران^۱ یک رویه‌ی کلی را برای ترکیب مواد پیشنهاد
داده‌اند. روند پیشنهادی آن‌ها بدین صورت است که ابتدا مواد پودری شامل
سیمان و سرباره و پودر سنگ آهک در همزن کاملاً مخلوط می‌شوند. در
مرحله‌ی بعد باید آب به مواد پودری اضافه شود. تمام آب مورد نیاز برای
طرح اختلاط به همراه نانو ماده و یک‌چهارم از فوق روان کننده در دستگاه
همگن‌ساز اولتراسونیک به مدت ۵ دقیقه مخلوط شده تا محلول همگن نانو
حاصل شود. سپس چهارپنجم این محلول به مواد خشک که قبلاً کاملاً در
همزن مخلوط شده‌اند اضافه می‌شود تا یک خمیر کامپوزیت یکدست حاصل
شود. در این مرحله الیاف را از حالت گلوله‌ای و به هم چسبیده خارج کرده
و به صورت رشته رشته در حجم‌های کم به خمیر سیمان اضافه می‌کنیم.
اضافه شدن تدریجی الیاف برای جلوگیری از پدیده‌ی گلوله شدن الیاف در
خمیر سیمان ضروری است. در پایان باقی‌مانده‌ی محلول نانو به کامپوزیت
افزوده شده و سپس فوق روان کننده‌ی باقی‌مانده در صورت نیاز به کامپوزیت
نهایی در همزن افزوده می‌شود [۲۳].

2 Fresh properties
3 Slump flow

1 Al-Najjar et al.



شکل ۶. آزمایش جریان اسلامپ کامپوزیت الیافی در حالت تازه

Fig. 6. The flow slump test of fiber-reinforced cementitious composite at the fresh state

ثانیه انجام شد. شایان ذکر است که محل قرارگیری دوربین بایستی کاملاً عمود بر نمونه باشد تا حتی‌الامکان از به وجود آمدن خطای اعوجاج^۲ در تصاویر جلوگیری شود. دستگاه یونیورسال، نمونه‌های تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای و تجهیزات مورد استفاده جهت ثبت تصاویر، در شکل ۸ قابل مشاهده است.

برای تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار DIC، میزان بازشدگی دهانه ترک^۳ متناظر با بارگذاری و بار نظیر شروع ترک خوردگی^۴ پیدا شد. در شکل ۹ میزان شدگی دهانه ترک با استفاده از تکنیک DIC قابل مشاهده است.

۳-۴- محاسبه پارامترهای شکست با روش ضریب شدت تنش دوتایی^{۵۳}
برای تعیین خواص شکست به روش ضریب شدت تنش دوتایی تیرهای دارای شکاف با دهانه‌ی آزاد ۳۰۰ میلی‌متر مورد آزمایش خمش چهار نقطه‌ای قرار گرفتند. آزمایش‌های انجام گرفته جابه‌جایی - کنترل بوده و از دستگاه یونیورسال برای این منظور استفاده شد. نرخ بارگذاری دستگاه ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه مطابق با استاندارد ASTM C۱۶۰۹ در نظر گرفته شد. بر اساس این استاندارد، تغییر شکلی برابر با $L/150$ به عنوان نقطه پایان آزمایش برای بتن الیافی تلقی می‌شود که این نقطه در این مطالعه برابر با ۲ میلی‌متر است [۲۴]. اما به دلیل ظرفیت بالای کامپوزیت سیمانی تقویت شده با الیاف در مقایسه با بتن الیافی، آزمایش‌ها زمانی پایان یافت که طول ترک به ۸۰

ساخت نمونه‌ها ایجاد شد. همچنین برای یافتن مقاومت فشاری برای هر طرح اختلاط، سه نمونه‌ی استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر ساخته شد. تمام نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز به منظور عمل‌آوری، در دمای 20 ± 2 درجه سانتی‌گراد داخل حوضچه‌ی آب قرار گرفتند.

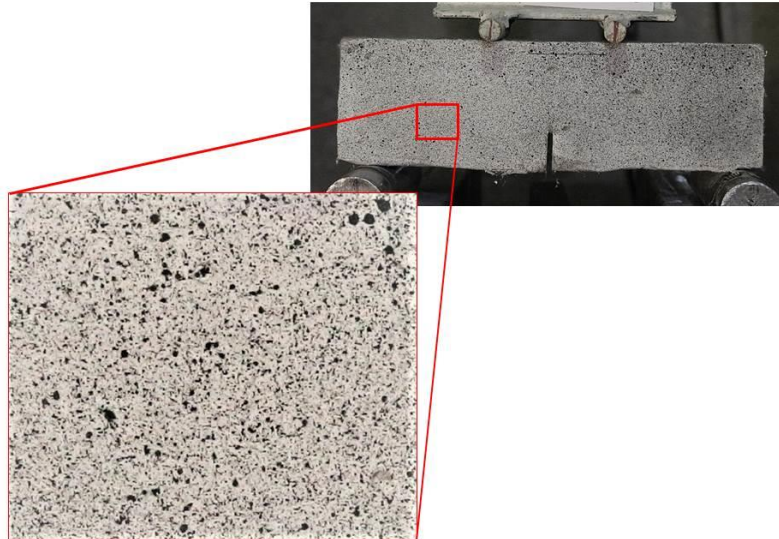
۳-۳- روش هم‌بستگی تصویر دیجیتال (DIC) در تحلیل شکست کامپوزیت‌های سیمانی الیافی

روش هم‌بستگی تصویر دیجیتال (DIC)، یک روش اپتیکی اندازه‌گیری جابه‌جایی است که امروزه کاربرد فراوانی در تحقیقات مهندسی یافته است. رویکرد این روش بر اساس مقایسه‌ی تصاویر گرفته شده به صورت متوالی از نمونه‌های تحت بارگذاری هست. پیش از انجام تست نمونه‌ها بایستی به نحو تصادفی نقطه‌گذاری شوند تا امکان ردیابی نقاط برای نرم‌افزار مهیا شود. الگوی نقطه‌گذاری در شکل ۷ نمایش داده شده است. شایان ذکر است برای مقیاس‌بندی تصاویر تحلیل شده توسط نرم‌افزار، کافی است که فاصله دو نقطه از پیش تعیین شده (مثلاً فاصله دو تکیه‌گاه) به نرم‌افزار معرفی شود. نرم‌افزار با استفاده از فاصله این دو نقطه معیاری برای ارزیابی سایر فاصله‌ها می‌سازد.

جهت عکس‌برداری متوالی در حین آزمایش، از یک دوربین عکاسی DSLR^۱ از نمونه‌ها استفاده شد. سرعت تصویربرداری با توجه به تردی و یا شکل‌پذیری کامپوزیت می‌تواند متفاوت باشد. با توجه به شکل‌پذیری بالای کامپوزیت بررسی شده در این پژوهش عکس‌برداری با فاصله‌ی زمانی ۱

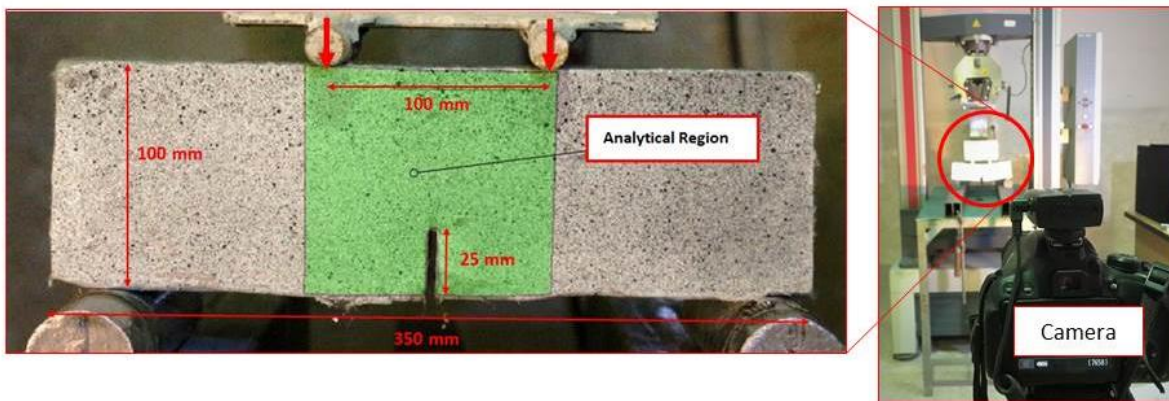
2 Distortion
3 Crack mouth opening (CMOD)
4 First crack load
5 3 Double-K Fracture Method (DKFM)

1 Digital single-lens reflex camera



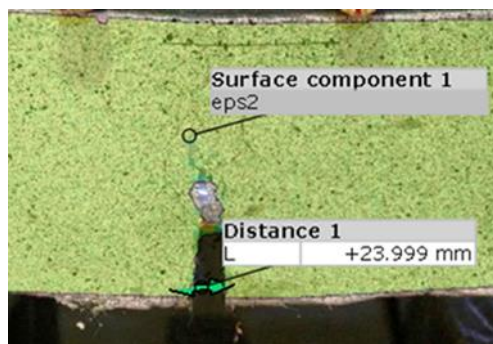
شکل ۷. الگوی نقاط تصادفی بر روی نمونه آزمایشگاهی

Fig.7. The pattern of random points on the beam's surface



شکل ۸. نمایی از دستگاه آزمایش خمش چهار نقطه‌ای و تجهیزات مورد استفاده جهت عکس برداری متوالی از نمونه حین بارگذاری

Fig. 8. The four-point bending test setup and the camera for taking consecutive pictures



شکل ۹. نمایش میزان بازشدگی دهانه ترک متناظر با بارگذاری

Fig. 9. The amount of crack opening displacement due to specific loading

$$V(\beta) = 0.76 - 2.28\beta + 3.87\beta^2 + \frac{0.66}{(1-\beta)^2} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{a_c}{D} \quad (8)$$

$$CTOD = CMOD_C \left\{ \left(1 - \frac{a_0}{a_c} \right) + \right. \quad (9)$$

$$\left. \left(1.081 - 1.149 \frac{a_0}{a_c} \right) \left[\frac{a_0}{a_c} - \left(\frac{a_0}{a_c} \right)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

برای محاسبه‌ی طاق‌ترک خوردگی اولیه از روابط ۳-۵ استفاده می‌شود

با این تفاوت که در محاسبه‌ی K_{IC}^{ini} ، $P = P_{ini}$ و همچنین $\alpha = \frac{a_0}{D}$ خواهد بود که a_0 طول ترک اولیه است. بار نظیر اولین ترک خوردگی هست که از روش پردازش تصویر استخراج می‌شود.

۴- نتایج آزمایشگاهی

۴-۱- نتایج آزمایش جریان اسلامپ در کامپوزیت‌های سیمانی الیافی دارای نانو سیلیس

نتایج اندازه‌گیری میزان قطر متوسط پهن‌شدگی در طرح‌های مختلف در جدول ۶ آورده شده است. مطابق با جدول ۶ پخش اسلامپ برای مخلوط‌ها در محدوده ۶۸۵ میلی‌متر تا ۷۵۰ میلی‌متر است که با شرایط خود متراکمی سازگار است. نتایج نشان داد که افزودن ذرات نانو سیلیس به کامپوزیت الیافی باعث افزایش چسبندگی^۷ در حالت تازه و کاهش جریان اسلامپ شد. سنف و همکاران [۲۵] روند مشابهی را برای خمیر سیمانی اصلاح شده با افزودن ۱ تا ۲/۵ درصد ذرات نانو سیلیس گزارش کردند. از آنجا که ذرات نانو سیلیس سطح ویژه‌ی بالایی دارند، افزودن آن‌ها به مخلوط‌های سیمانی نیاز به افزودن آب بیشتر یا افزودنی‌های شیمیایی به منظور حفظ کارایی کامپوزیت سیمانی الیافی دارد [۲۸-۲۶].

درصد عمق تیر رسید. منحنی بار - تغییر مکان به صورت خودکار حین بارگذاری توسط کامپیوتر متصل به دستگاه یونیورسال ثبت شد. بعد از ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی و انجام تست‌های آزمایشگاهی، برای تحلیل داده‌ها با استفاده از پردازش تصویر میزان بازشدگی دهانه ترک^۱ متناظر با بارگذاری و بار نظیر شروع ترک خوردگی^۲ پیدا شد.

طاق‌ترک شکست^۳ پارامتری کمی برای ارزیابی مقاومت ترک خوردگی مواد است. برای تعیین پارامترهای طاق‌ترک شکست^۴، روش ضریب شدت تنش دوتایی، به عنوان مثال شدت تنش بحرانی^۴ K_{IC}^{un} ، از روش پیشنهاد شده توسط ژو و رینهارت [۱۹] استفاده شد. برای تیرهای خمشی چهار نقطه‌ای، پارامترهای شکست روش ضریب شدت تنش دوتایی را می‌توان با فرمول‌های زیر بر اساس منحنی‌های بار-بازشدگی دهانه ترک^۵ محاسبه کرد [۲۰]. رابطه‌ی ضریب شدت تنش بحرانی^۶ K_{IC}^{un} با بار بیشینه P_U و طول ترک بحرانی^۶ a_c عبارت است از:

$$K_{IC}^{un} = \sigma_N \sqrt{D} k(\alpha) \quad (3)$$

که در آن ضریبی تجربی و متناسب با هندسه‌ی نمونه و بارگذاری هست.

$$k(\alpha) = \sqrt{\alpha} \frac{1.99 - \alpha(1-\alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.97\alpha^2)}{(1+2\alpha)(1-\alpha)^{\frac{3}{2}}} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{a_c}{D} \quad (5)$$

برای محاسبه بازشدگی دهانه ترک و بازشدگی نوک ترک در حالت بحرانی روابط زیر ارائه شده است:

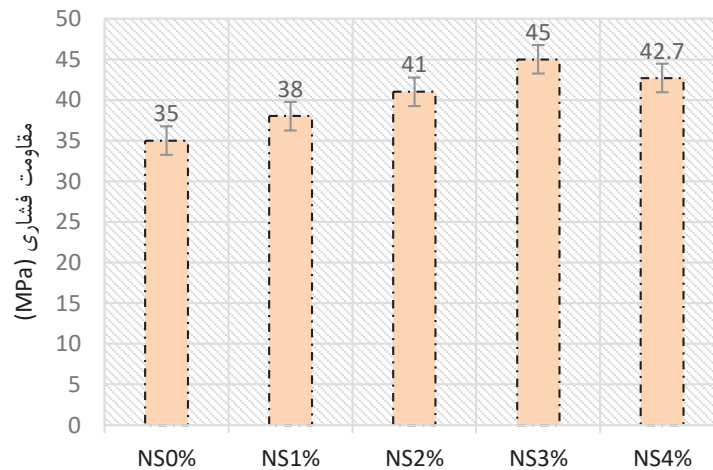
$$CMOD_C = \frac{6P_u S a_c}{BD^2 E} V(\beta) \quad (6)$$

- 1 Crack mouth opening (CMOD)
- 2 First crack load
- 3 Fracture toughness
- 4 Critical stress intensity factor
- 5 Load-CMOD curve
- 6 Critical crack length

جدول ۶. پخش اسلامپ برای مخلوطهایی با درصدهای متفاوت نانو سیلیس

Table 6. The results of Slump flow test for the mixtures containing different percentages of nano-silica

| نام طرح | مقدار پهن شدگی اسلامپ | |
|---------|-----------------------|---------------|
| | d_1 (mm) | d_2 (mm) |
| NS-0 | ۷۵۲ | ۷۴۸ |
| NS-1 | ۷۳۶ | ۷۳۴ |
| NS-2 | ۷۲۴ | ۷۲۰ |
| NS-3 | ۷۱۳ | ۷۰۹ |
| NS-4 | ۶۸۷ | ۶۸۳ |

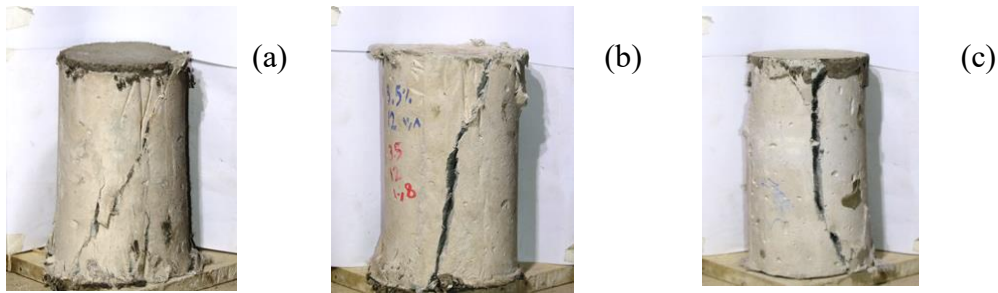
$$* S = \frac{d_1 + d_2}{2}$$


شکل ۱۰. مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای دارای درصدهای مختلف نانو سیلیس

Fig. 10. The amounts of compressive strength in samples with different percentages of nano-silica

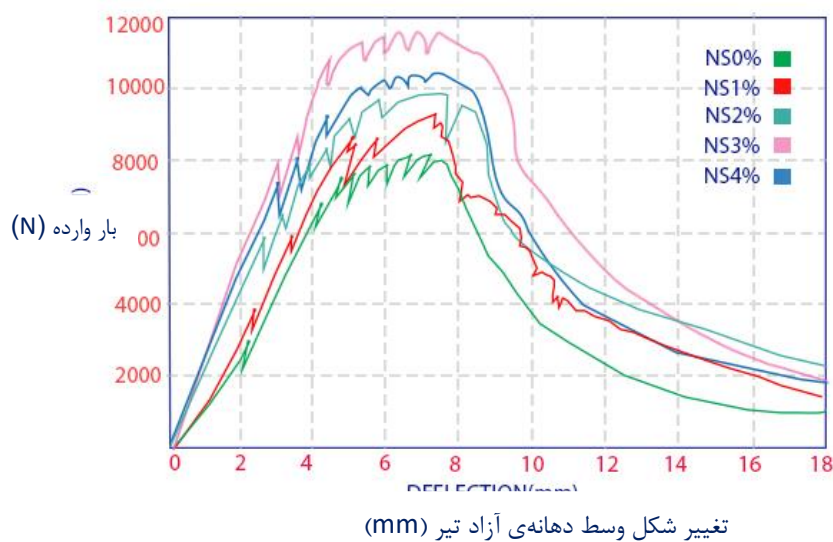
بین ذرات ژل کلسیم سیلیکات هیدرات را پر کنند. علاوه بر این، در نتیجه واکنش پوزولانی نانو سیلیس با هیدروکسید کلسیم مقدار کلسیم سیلیکات هیدرات افزایش می‌یابد که منجر به چگالی بیشتر خمیر سیمانی می‌شود که استحکام و دوام ماده را افزایش می‌دهد [۳۰ و ۲۹]. افت مقاومت فشاری کامپوزیت الیافی با ۴ درصد نانو سیلیس را می‌توان ناشی از مشکل در پراکندگی یکنواخت و آگلومره شدن نانو ذرات در کامپوزیت سیمانی الیافی دانست. شکل ۱۱ حالت‌های شکست نمونه‌های استوانه‌ای تحت فشار را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه‌های استوانه‌ای تحت بار فشاری، به دلیل اثر پل زدن الیاف، ترک‌ها به صورت موازی ایجاد شدند.

۴-۲- مقاومت فشاری کامپوزیت‌های الیافی دارای نانو سیلیس
مقاومت فشاری ۲۸ روزه کامپوزیت‌های الیافی دارای مقادیر متفاوت نانو سیلیس در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، افزودن نانو سیلیس تا ۳ درصد وزن سیمان، باعث افزایش مقاومت فشاری کامپوزیت‌های سیمانی تا ۲۸/۶ درصد نسبت به نمونه‌ی بدون نانو سیلیس شد. با افزایش مقدار نانو سیلیس از ۳ درصد به ۴ درصد، مقاومت فشاری به میزان ۵/۱ درصد در مقایسه با نمونه‌ی دارای ۳ درصد نانو سیلیس کاهش یافت. اثر پر کنندگی و همچنین اثر واکنش‌زایی مرتبط با نانو سیلیس، می‌تواند دلیل افزایش مقاومت کامپوزیت الیافی سیمانی باشد. در واقع نانو ذرات به دلیل ابعادی که دارند به عنوان یک پر کننده‌ی نانو می‌توانند فضای



شکل ۱۱. مودهای شکست نمونه‌های استوانه‌ای تحت بار فشاری

Fig. 11. The failure modes of compressive samples



شکل ۱۲. منحنی‌های نیرو-جابجایی نمونه‌های دارای مقادیر متفاوت نانو سیلیس در آزمایش خمش ۴ نقطه‌ای

Fig. 12. The load vs displacement curves of specimens containing different percentages of nano-silica

با توجه به شکل ۱۴، مشخص می‌شود که مقاومت خمشی نیز روندی مشابه بار بیشینه‌ی خمشی دارد. با افزودن ۳ درصد نانو سیلیس به خمیر سیمانی، مقاومت خمشی تا ۴۲/۵ درصد افزایش می‌یابد و سپس با افزایش ۴ درصد نانو سیلیس، تا ۲۷/۳۶ درصد کاهش می‌یابد. علت این مسئله را می‌توان همراه بودن گسیختگی الیاف با بیرون کشیدگی در نمونه‌های دارای ۳ درصد نانو سیلیس و گسیختگی الیاف همراه با پاره شدن آن‌ها در نمونه‌های دارای ۴ درصد نانو سیلیس دانست. طبق مطالعات انجام شده، افزایش نانو سیلیس باعث افزایش چقرمگی شکست ماتریس سیمانی می‌شود. میزان چقرمگی شکست ماتریس سیمانی بر رفتار خمشی کامپوزیت‌های سیمانی الیافی همانند رفتار آن‌ها در کشش، بسیار مؤثر است. به طوری که با افزایش بیش از حد چقرمگی شکست ماتریس سیمانی، اندرکنش اصطکاکی ماتریس

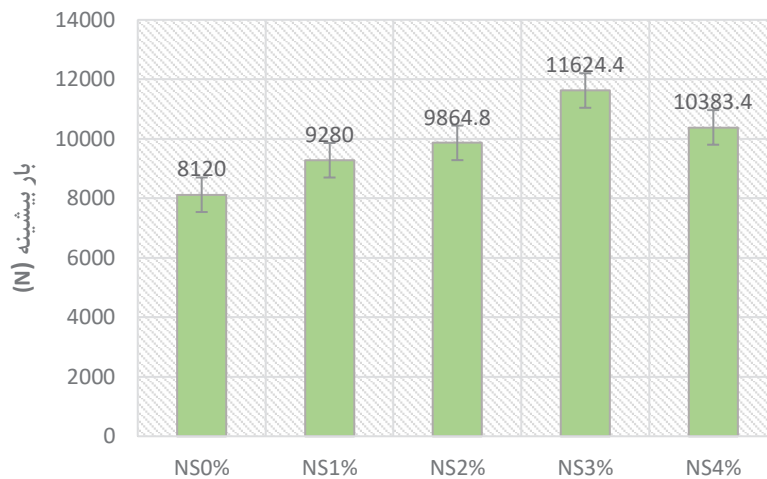
۳-۴ رفتار خمشی تیرهای دارای ترک اولیه

همان‌طور که اشاره شد برای هر طرح ۳ تیر دارای ترک اولیه‌ای به طول تحت آزمایش خمش ۴ نقطه‌ای قرار گرفت. منحنی‌های میانگین بار - تغییر شکل وسط دهانه‌ی تیر در شکل ۱۲ قابل مشاهده است. با استفاده از روش همبندی تصویر دیجیتال (DIC) بار نظیر اولین ترک‌خوردگی و بازشدگی دهانه‌ی ترک نظیر آن و همچنین بازشدگی دهانه‌ی ترک نظیر بار بیشینه به دست آمد. جدول ۷ مقادیر نیروی بیشینه و مقاومت خمشی طرح‌های دارای درصد‌های مختلف نانو سیلیس را نشان می‌دهد. از شکل ۱۳ می‌توان دریافت که بار بیشینه‌ی تحمل شده توسط نمونه‌ی خمشی دارای ۳ درصد نانو سیلیس به میزان ۴۳/۱۶ درصد افزایش یافته است و در نمونه‌ی خمشی دارای ۴ درصد نانو سیلیس به میزان ۱۱ درصد کاهش پیدا کرده است.

جدول ۷. مقادیر بار بیشینه و مقاومت خمشی در طرح‌های مختلف

Table 7. the amounts of maximum load and flexural strength in the mixtures containing different percentages of nano-silica

| Flexural Strength (MPa) | p_{max} | نام طرح |
|-------------------------|-----------|---------|
| ۴/۳۳ | ۸۱۲۰ | NS-0 |
| ۴/۹۵ | ۹۲۸۰ | NS-1 |
| ۵/۲۶ | ۹۸۶۴/۸ | NS-2 |
| ۶/۲۰ | ۱۱۶۲۴/۴ | NS-3 |
| ۵/۵۴ | ۱۰۳۸۳/۴ | NS-4 |



شکل ۱۳. نیروی بیشینه‌ی تحمل شده نمونه‌های دارای مقادیر متفاوت نانو سیلیس در آزمایش خمشی ۴ نقطه‌ای

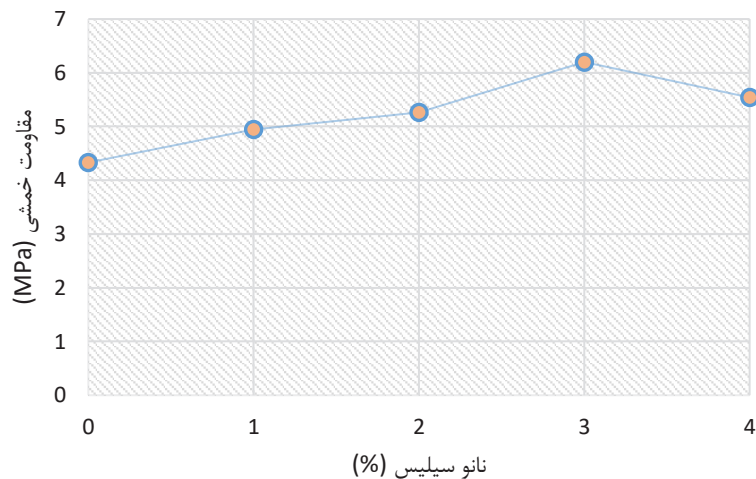
Fig. 13. The amounts of maximum loads in the four-point bending tests on samples containing different percentages of nano-silica

از روش ضریب شدت تنش دوتایی بهره گرفته شد. در این روش لازم است که بار نظیر اولین ترک‌خوردگی در خمیر سیمانی و بازشدگی نظیر آن تعیین شود. روش‌های متعددی برای تعیین بار نظیر اولین ترک‌خوردگی پیشنهاد شده است که در همه‌ی انواع کامپوزیت‌های سیمانی و به خصوص کامپوزیت‌های الیافی شمول کافی ندارند [۳۲]. از این رو در این پژوهش از روش پردازش تصویر و هم‌بندی تصویر دیجیتال برای مشخص کردن مقدار بار نظیر ترک‌خوردگی اولیه، مقدار بازشدگی دهانه ترک متناظر با بار ترک‌خوردگی اولیه و مقدار بازشدگی دهانه ترک متناظر با بار بیشینه استفاده شده است. آنچه این روش را از روش‌های دیگر متمایز می‌کند دقت بالای روش در عین سادگی و هزینه‌ی کم هست. تعیین جابه‌جایی در نقاط مختلف

سیمانی و الیاف نیز افزایش پیدا می‌کند که می‌تواند باعث پارگی الیاف شود. در واقع افزایش اندرکنش ماتریس سیمانی و الیاف مقدار بهینه‌ای دارد که بیش از آن رفتار کامپوزیت سیمانی الیافی به سمت تردشان میل می‌کند [۳۱].

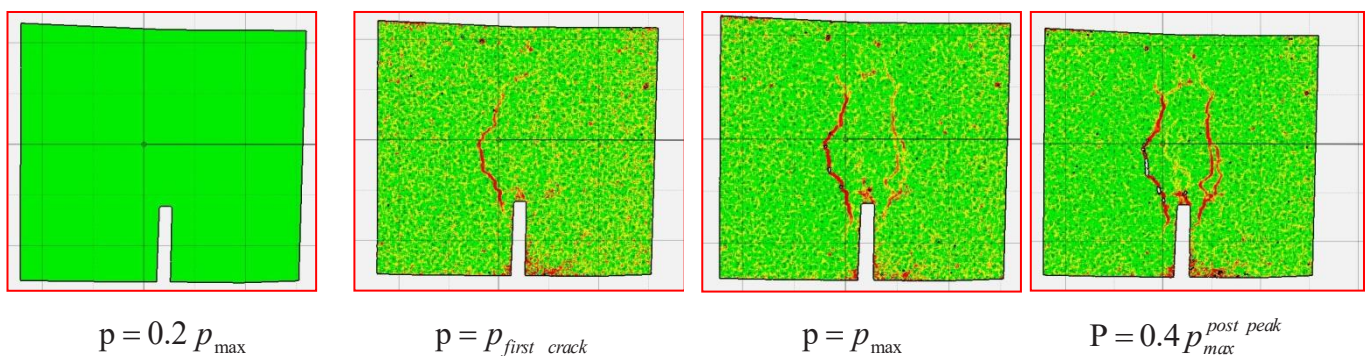
۴-۴ رفتار شکست کامپوزیت‌های الیافی با استفاده از روش ضریب شدت تنش دوتایی

به منظور بررسی طاق‌شکست کامپوزیت سیمانی الیافی و تأثیر افزودن ذرات نانو سیلیس بر خواص شکست و شکل‌پذیری این نوع از کامپوزیت‌ها



شکل ۱۴. مقاومت خمشی نمونه‌های دارای مقادیر متفاوت نانو سیلیس در آزمایش خمشی ۴ نقطه‌ای

Fig. 14. The amounts of flexural strength in the four-point bending tests on samples containing different percentages of nano-silica



شکل ۱۵. مراحل شروع ترک‌خوردگی و نحوه‌ی رشد ترک‌ها در طول بارگذاری با استفاده از تکنیک همبندی تصویر دیجیتال (DIC)

Fig. 15. monitoring the crack initiation and the growing stages of crack growth using the digital image correlation (DIC) technique

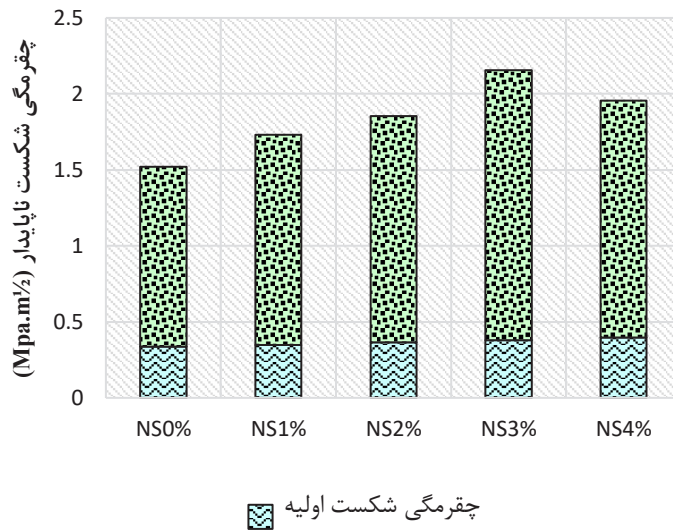
با مشخص شدن مقدار بازشدگی ترک نظیر بار بیشینه و مساوی قرار دادن با رابطه‌ی ۶ مقدار طول بحرانی ترک پیدا شد و در ادامه با استفاده از روابط ۲-۵ طاقت نظیر شکست در حالت ناپایدار محاسبه شد. همچنین با داشتن بار نظیر ترک‌خوردگی اولیه و مقدار جابه‌جایی متناظر با آن مقدار طاقت شکست اولیه و طاقت نظیر پل زدن الیاف محاسبه شد. مقادیر پارامترهای شکست در جدول ۸ ارائه شده است. با توجه به ارتباط بین سه پارامتر شکست (یعنی $K_{IC}^C = K_{IC}^{mi} + K_{IC}^C$)، شکل ۱۶ نشان دهنده‌ی روند تغییرات این سه پارامتر با افزودن نانو سیلیس است. از این نمودار

نمونه، در صورت عدم استفاده از پردازش تصویر نیازمند استفاده از ابزار دقیق مکانیکی و الکترونیکی برای تعیین کرنش و جابه‌جایی است. شکل ۱۵ مراحل تشکیل و رشد ترک را در قسمت میانی تیر با ترک اولیه، با کمک روش همبندی تصویر دیجیتال نمایش می‌دهد. با توجه به جدول ۸ می‌توان دریافت که با افزودن نانو سیلیس بر کامپوزیت‌های سیمانی الیافی بار نظیر اولین ترک‌خوردگی تا ۱۷ درصد افزایش یافته است. دلیل این موضوع را قوی شدن خمیر سیمانی و افزایش اصطکاک در اندرکنش خمیر سیمانی و الیاف می‌توان دانست.

جدول ۸. مقادیر بار اولین ترک خوردگی، بار بیشینه و بازشدگی دهانه‌ی ترک نظیر آن‌ها

Table 8. The amounts of the first cracking load, the maximum load, and their corresponding crack mouth opening displacement

| نام طرح | P_{ini} | p_{max} | $CMOD_{ini}$ (mm) | $CMOD_C$ (mm) |
|---------|-----------|-----------|-------------------|---------------|
| NS-0 | ۲۹۰۰ | ۸۱۲۰ | ۳/۷۵ | ۱۱/۶۹ |
| NS-1 | ۳۰۰۰ | ۹۲۸۰ | ۴/۰۷ | ۱۲/۵۳ |
| NS-2 | ۳۱۵۰ | ۹۸۶۴/۸ | ۴/۵۴ | ۱۳/۳۶ |
| NS-3 | ۳۲۵۰ | ۱۱۶۲۴/۴ | ۵/۱۷ | ۱۳/۶۹ |
| NS-4 | ۳۴۰۰ | ۱۰۳۸۳/۴ | ۵/۱۶ | ۱۴/۲۰ |



شکل ۱۶. چقرمگی شکست ناپایدار برحسب چقرمگی شکست اولیه K_{IC}^{ini} و ضریب شدت تنش بحرانی ایجاد شده توسط تنش چسبندگی K_{IC}^C نمونه‌های دارای مقادیر متفاوت نانو سیلیس

Fig. 16. The amounts of unstable fracture toughness, initial fracture toughness, and cohesive toughness in specimens containing different amounts of nano-silica

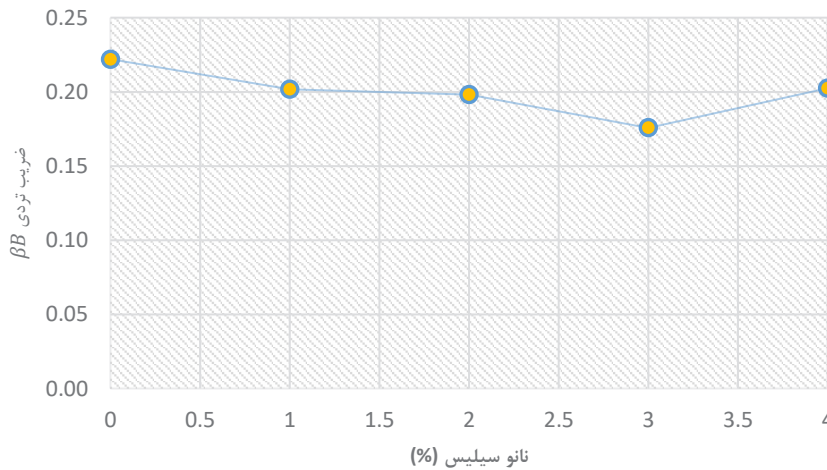
و همچنین چقرمگی شکست ناپایدار داشته است. همچنین با افزایش نانو سیلیس از ۳ درصد به ۴ درصد مقدار چقرمگی شکست ناپایدار و چقرمگی ناشی از پل زنی الیاف به ترتیب برابر ۴۱/۴۴، ۱۱/۷۶ و ۱۲/۳۶ درصد نسبت به کامپوزیت الیافی دارای ۳ درصد نانو سیلیس کاهش یافت. این مسئله نشان دهنده‌ی این نکته است که افزایش بیش از مقدار بهینه‌ی نانو سیلیس باعث افت مقاومت در برابر رشد ترک در کامپوزیت‌های الیافی خواهد شد. ضریب تردی عددی بین صفر و یک است و هر چقدر به صفر نزدیک‌تر باشد نشان دهنده‌ی آن است که کامپوزیت الیافی شکل‌پذیری بیشتری دارد.

مشهود است که با افزایش درصد نانو سیلیس به میزان ۳ درصد بر چقرمگی شکست در حالت ناپایدار، چقرمگی شکست اولیه و چقرمگی ناشی از پل زدن الیاف افزوده می‌شود. این افزایش به ترتیب برابر ۴۱/۴۴، ۱۱/۷۶ و ۵۰/۵۸ درصد برای طاقت شکست در حالت ناپایدار، طاقت شکست در حالت ترک‌خوردگی اولیه و طاقت شکست ناشی از پل زدن الیاف هست. همان‌طور که مشهود است بیشترین افزایش مربوط به طاقت ناشی از پل زدن الیاف هست که آن را می‌توان در نتیجه افزایش اصطکاک در اندرکنش خمیر سیمانی و الیاف پلی‌پروپیلن دانست. با توجه به شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که افزایش نانو سیلیس تأثیر بیشتری بر چقرمگی ناشی از پل زدن الیاف

جدول ۹. مقادیر خواص شکست کامپوزیت سیمانی الیافی با استفاده از روابط روش دو پارامتری شکست

Table 9. The amounts of fracture properties of fiber-reinforced cementitious composites using the double-K fracture model

| $\beta_B = \frac{K_{IC}^{ini}}{K_{IC}^{un}}$ | K_{IC}^C | K_{IC}^{ini} | K_{IC}^{UN} | CT0D _C (mm) | a_c/D | a_0/D | نام طرح |
|--|------------|----------------|---------------|---------------------------|---------|---------|---------|
| ۰/۲۲۲ | ۱/۱۸ | ۰/۳۴ | ۱/۵۲ | ۷/۷۳ | ۰/۶۰۳ | ۰/۲۵ | NS-0 |
| ۰/۲۰۲ | ۱/۳۸ | ۰/۳۵ | ۱/۷۳ | ۸/۲۷ | ۰/۵۹۹ | ۰/۲۵ | NS-1 |
| ۰/۱۹۸ | ۱/۴۹ | ۰/۳۷ | ۱/۸۵ | ۸/۸۵ | ۰/۶۰۶ | ۰/۲۵ | NS-2 |
| ۰/۱۷۶ | ۱/۷۸ | ۰/۳۸ | ۲/۱۵ | ۸/۹۹ | ۰/۵۹۲ | ۰/۲۵ | NS-3 |
| ۰/۲۰۲ | ۱/۵۶ | ۰/۴۰ | ۱/۹۶ | ۹/۴۲ | ۰/۶۱۰ | ۰/۲۵ | NS-4 |



شکل ۱۷. پارامتر بی بعد تردی نمونه‌های دارای مقادیر متفاوت نانو سیلیس

Fig. 17. Dimensionless brittleness number of specimens containing different percentages of nano-silica

۵- نتیجه‌گیری

بر اساس آزمایش‌های انجام‌شده نتایج حاصله به شرح زیر است.

- افزودن ذرات نانو سیلیس به کامپوزیت الیافی باعث افزایش چسبندگی در حالت تازه و کاهش جریان اسلامپ شد. دلیل این مسئله سطح ویژه‌ی بالای ذرات نانو سیلیس است. با اضافه کردن پودر نانو سیلیس به مخلوط کامپوزیت سیمانی الیافی به افزودن آب بیشتر یا افزودنی‌های شیمیایی به منظور حفظ کارایی نیاز هست.
- افزودن نانو سیلیس تا ۳ درصد باعث بهبود مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه شد. در درصدهای بیشتر نانو سیلیس، مقاومت فشاری کاهش یافت.

مقادیر ضریب تردی با استفاده از رابطه‌ی ۲ برای طرح‌های با درصدهای مختلف نانو سیلیس محاسبه شد که در جدول ۹ آورده شده است. با توجه به شکل ۱۷ مشاهده می‌شود که افزایش نانو سیلیس به مقدار ۳ درصد باعث کاهش ضریب تردی تا ۲۰/۷۲ درصد شده است. همچنین با افزایش بیش از ۳ درصد (یعنی ۴ درصد نانو سیلیس) ضریب تردی به مقدار ۱۴/۷۷ درصد رسیده است. در واقع این نکته بسیار حائز اهمیت است که افزایش نانو سیلیس تا مقدار بهینه باعث افزایش شکل‌پذیری و با افزودن بیش از مقدار بهینه باعث کاهش شکل‌پذیری و افزایش تردی خواهد شد.

gineered Cementitious Composites (Ecc) With Polyvinyl Alcohol Fibers, Sharif Journal of Civil Engineering, 30-2(1.1), (2014), 45-57.

[4] V.C. Li, T. J. J. o. M. i. C. E. Kanda, Innovations forum: engineered cementitious composites for structural applications, Journal of Materials in Civil Engineering, 10(2), (1998), 66-69.

[5] M. Mazloom, and S. Mirzamohammadi, Fracture of fibre-reinforced cementitious composites after exposure to elevated temperatures, Magazine of Concrete Research, 73(14), (2021), 701-713.

[6] H. Karimpour, and M. Mazloom, Pseudo-strain hardening and mechanical properties of green Cementitious composites containing polypropylene fibers. Structural Engineering and Mechanics, 81(5), (2022), 575.

[7] M. Mazloom, and S. Mirzamohammadi, Computing the fracture energy of fiber reinforced cementitious composites using response surface methodology, Advances in Computational Design, 6(3), (2021), 225-239.

[8] Q. Zhang, V. C. Li, Development of durable spray-applied fire-resistive engineered cementitious composites (SFR-ECC), Cement and Concrete Composites, 60, (2015), 10-16.

[9] S. Tsivilis, G. Batis, E. Chaniotakis, G. Grigoriadis, and D. Theodossis, Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar, Cement Concrete Research, 30(10), (2000), 1679-1683.

[10] Swaddiwudhipong, S., Lu, H.-R., & Wee, T.-H, Direct tension test and tensile strain capacity of concrete at early age. Cement and Concrete Research, 33(12), (2003), 2077-2084.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00231-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00231-X)

[11] Li, V. C. (2019). Engineered cementitious composites (ECC): bendable concrete for sustainable and resilient infrastructure. Springer.

[12] Zhou, J., Qian, S., Sierra Beltran, M. G., Ye, G., van

این مسئله می‌تواند ناشی از انباشتگی و توده‌ای شدن ذرات نانو سیلیس در خمیر سیمانی باشد.

۳- افزودن نانو سیلیس تا ۳ درصد در خمیر سیمانی باعث بهبود نیروی حداکثر تحمل شده در خمش و مقاومت خمشی شد. بهبود اندرکنش خمیر سیمانی و الیاف می‌تواند دلیل بهبود رفتار خمشی باشد. با افزودن نانو سیلیس بیش از ۳ درصد نیروی بیشینه‌ی تحمل شده در خمش و مقاومت خمشی کاهش یافت.

۴- با افزودن نانو سیلیس تا ۳ درصد در خمیر سیمانی، به طاق شکست اولیه و طاق نظیر پل زدن الیاف و طاق شکست در حالت ناپایدار افزوده شد. البته نسبت افزایش طاق ناشی از پل زدن الیاف بیشتر از طاق شکست اولیه است. در واقع افزایش طاق شکست نهایی را می‌توان عمدتاً ناشی از افزایش طاق پل زدن الیاف دانست. این مسئله نشان دهنده‌ی بهبود اندرکنش سطوح الیاف پلی‌پروپیلن با خمیر سیمانی است. با بهبود اندرکنش الیاف و خمیر سیمانی، گسیختگی نمونه و رشد ترک ماکرو با بیرون کشیدگی الیاف همراه خواهد بود و پارگی الیاف اتفاق نمی‌افتد.

۵- با افزودن نانو سیلیس تا ۳ درصد به خمیر سیمان، ضریب تردی کاهش یافت. کاهش ضریب تردی، نشان دهنده‌ی افزایش شکل‌پذیری کامپوزیت سیمانی در اثر بهبود اندرکنش خمیر سیمانی و الیاف است. با افزودن بیش از ۳ درصد نانو سیلیس، ضریب تردی افزایش یافت. افزایش ضریب تردی می‌تواند ناشی از افزایش بیش از حد سختی خمیر سیمانی باشد. افزایش سختی خمیر سیمانی اثر پل زدن الیاف را تحت الشعاع قرار داده و باعث می‌شود که رشد ترک با پارگی الیاف همراه باشد.

منابع

[1] E. Yang, V.C. Li, Strain-hardening fiber cement optimization and component tailoring by means of a micromechanical model, Construction and Building Materials, 24, (2010), 130-9.

[2] M. Wu, M. B. Johansson, and M. Geiker, A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material, Construction and Building Materials 28, (2012) 571-583.

[3] A. Dehghani, F. Nateghi Elahi, Experimental And Analytical Estimation Of Mechanical Properties Of En

- applications, Springer Science and Business Media, (2011).
- [21] J. Zhou, S. Qian, G. Ye, O. Copuroglu, K. van Breugel, and V. C. Li, Improved fiber distribution and mechanical properties of engineered cementitious composites by adjusting the mixing sequence, *Cement and Concrete Composites*, 34(3), (2012), 342-348.
- [22] S. P. Shah, M. S. Konsta-Gdoutos, Z. S. Metaxa, and P. Mondal, Nanoscale modification of cementitious materials. In *Nanotechnology in construction 3*, Springer, (2009), 125-130.
- [23] Y. Al-Najjar, S. Yeşilmen, A. M. Al-Dahawi, M. Şahmaran, G. Yıldırım, M. Lachemi, and L. Amleh, Physical and Chemical Actions of Nano-Mineral Additives on Properties of High-Volume Fly Ash Engineered Cementitious Composites, *ACI Materials Journal*, 113(6), (2016).
- [24] ASTM C1609/C1609M-05, Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading), American Society for Testing and Materials, (2005).
- [25] L. Senff, J. A. Labrincha, V. M. Ferreira, D. Hotza, and W. L. Repette, Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars, *Construction and Building Materials*, 23(7), (2009), 2487-2491.
- [26] P. Mehta and P. Monteiro, *Concrete: microstructure, properties and materials*, McGraw-Hill Education (2017).
- [27] A. M. Neville, *Properties of Concrete*, ELBS with Addison Wesley Longman Limited. England, (1996).
- [28] M. Mazloom, and S. Mirzamohammadi, Thermal effects on the mechanical properties of cement mortars reinforced with aramid, glass, basalt and polypropylene fibers, *Advances in materials research*, 8(2), (2019), 137-154.
- [29] J. Björnström, A. Martinelli, A. Matic, L. Börjesson, and I. Panas, Accelerating effects of colloidal Breugel, K., & Li, V. C., Development of engineered cementitious composites with limestone powder and blast furnace slag. *Materials and structures*, 43(6), (2010), 803-814.
- [13] J.K. Kim, J.S. Kim, G.J. Ha, and Y.Y. Kim, Tensile and fiber dispersion performance of ECC (engineered cementitious composites) produced with ground granulated blast furnace slag, *Cement Concrete Research*, 37(7), (2007), 1096-1105.
- [14] I. Lim, J.C. Chern, T. Liu, and Y.W. Chan, Effect of ground granulated blast furnace slag on mechanical behavior of PVA-ECC, *Journal of Marine Science and Technology*, 20(3), (2012), 319-324.
- [15] A. Adesina, and S. Das, Mechanical performance of engineered cementitious composite incorporating glass as aggregates, *Journal of Cleaner Production*, 260, (2020), 121113.
- [16] P.Hosseini, A. Booshehrian, and S. Farshchi, Influence of nano-SiO₂ addition on microstructure and mechanical properties of cement mortars for ferrocement, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2141, (2010), 15-20.
- [17] A. Abna, and M. Mazloom, Flexural properties of fiber-reinforced concrete containing silica fume and nano-silica., *Materials Letters*, 316, (2022), 132003
- [18] V. Broujerdian, H. Karimpour, and S. Alavikia, Predicting the shear behavior of reinforced concrete beams using non-linear fracture mechanics, *International Journal of Civil Engineering*, 17(5), (2019), 597-605.
- [19] Xu, S., & Reinhardt, H. W. (1999). Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-Brittle fracture, Part I: Experimental investigation of crack propagation, *International Journal of Fracture*, 98(2), 111-149.
- [20] S. Kumar, and S. V. Barai, Concrete fracture models and

mechanical properties and microstructure of lightweight engineered cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 298, (2021), 123788.

[32] D. J. Kim, S. H. Park, G. S. Ryu, and K. T. Koh, Comparative flexural behavior of hybrid ultra-high-performance fiber-reinforced concrete with different macro fibers, *Construction and Building Materials*, 25(11), (2011), 4144-4155.

nano-silica for beneficial calcium-silicate-hydrate formation in cement, *Chemical physics letters*, 392(1-3), (2004), 242-248.

[30] G. Li, Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂, *Cement and Concrete Research*, 34(6), (2004), 1043-1049.

[31] Fu, C., Guo, R., Lin, Z., Xia, H., Yang, Y., & Ma, Q., Effect of nanosilica and silica fume on the

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Karimpour, M. Mazloom, Determination of fracture parameters of fiber-reinforced cementitious composites containing nano-silica using image processing, Amirkabir J. Civil Eng., 54(12) (2023) 4729-4750.

DOI: 10.22060/ceej.2022.21354.7689



