

بررسی مقاومت خمشی بتن فوق توانمند تقویت شده با الیاف فولادی با استفاده از مدل المان محدود چندمقیاسه

امیر ابراهیم اکبری بقال

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

احمد ملکی*

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

رامین وفایی پور سرخابی

استادیار، گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

A.Maleki@iau-maragheh.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۴ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۰۵/۰۴

چکیده

هدف اصلی تحقیق حاضر، توسعه مدل المان محدود به منظور مطالعه تأثیر الیاف فولادی شکل بر مقاومت خمشی بتن فوق توانمند الیافی است. بدین منظور، به منظور شبیه‌سازی عددی، مدل المان محدود چندمقیاسه توسعه داده شد که در آن بتن به صورت ماده همگن و یکنواخت مدل‌سازی شده و الیاف فولادی به صورت تصادفی در داخل آن توزیع شده است. به منظور در نظر گرفتن فرضیات واقع‌بینانه‌تر، ناحیه چسبندگی بین الیاف و بتن نیز لحاظ شده است. پس از صحت‌سنجی نتایج مدل المان محدود با نتایج تست‌های تجربی، تأثیر پارامترهای مانند کسر حجمی و چسبندگی الیاف فولادی بر استحکام مشخصه‌های مقاومت خمشی بتن‌های فوق توانمند تقویت شده با الیاف مورد مطالعه عددی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر استفاده از الیاف بر میزان جذب انرژی توسط بتن فوق توانمند الیافی بسیار بیشتر از تأثیر آن بر سایر مشخصه‌های این نوع بتن‌ها می‌باشد و مخصوصاً استفاده از الیاف در حجم‌های پایین الیاف، تأثیری بسیار قابل ملاحظه بر قابلیت جذب انرژی دارد به طوری که به ازای ۰/۵ درصد کسر حجمی الیاف فولادی در حدود ۱۷ برابر نسبت به نمونه بتن فوق توانمند بدون الیاف افزایش می‌یابد.

کلید واژگان: بتن فوق توانمند، الیاف فولادی، مدل المان محدود چندمقیاسه، تست خمش چهار نقطه‌ای، استهلاک انرژی

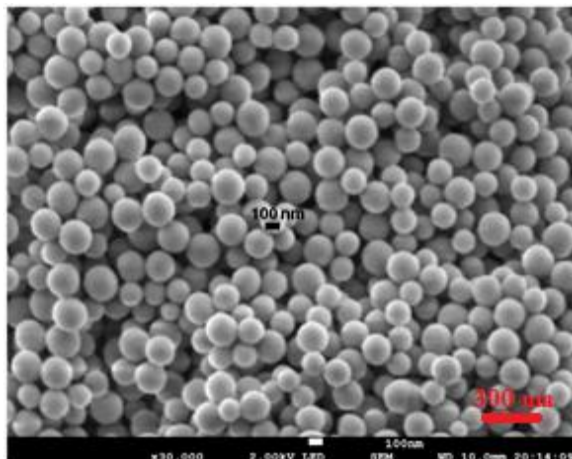
۱- مقدمه

با توجه به اینکه بتن و ملات سیمان عمدتاً دارای رفتاری ترد و شکننده بوده و در مقابل نیروهای کششی بسیار ضعیف هستند، بنابراین در سال‌های اخیر بکارگیری روش‌ها و افزودنی‌های مختلف مانند استفاده از نانو مواد، مواد پلیمری و الیاف در بهبود ضعف‌های بتن مورد توجه گرفته است [۴-۱]. مطالعات آزمایشگاهی نشان داده‌اند که استفاده از الیاف با حجم و اندازه‌های مختلف در ملات یا بتن باعث افزایش مقاومت آن‌ها به میزان زیاد نمی‌گردد. با این وجود پژوهشگران، بهبود زیادی را در رفتار بتن‌های الیافی، در مرحله پس از ترک خوردگی پیدا کرده‌اند.

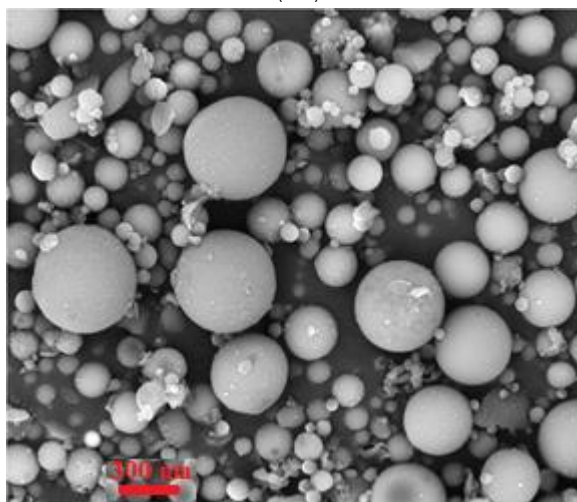
بتن‌های فوق توانمند دارای مقاومت فشاری در محدوده ۱۵۰ تا ۲۰۰ مگا پاسکال می‌باشند [۵]. این نوع بتن به دلیل تخلخل و موئینگی کم، تقریباً غیر قابل نفوذ است و همین امر باعث شده است تا بسیاری از ضعف‌های بتن معمولی مانند ضعف در برابر سیکل‌های یخبندان، خوردگی آرماتور و حمله یون‌های کلر در بتن فوق توانمند اصلاح شود [۸-۶]. Korpa و Trettin [۹] استفاده از سیلیس کلوئیدی مصنوعی را در ساخت بتن مقاومت بالا و بتن فوق توانمند مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی خاطر نشان می‌کنند، استفاده از سیلیس کلوئیدی به همراه خاکستر بادی مزیت بیشتری نسبت به میکروسیلیس دارد. همچنین Rougeau و همکاران [۱۰] از اجزاء پوزولانی دیگری مانند خاکستر بادی، پرکننده‌های ریزسنگ آهکی یا افزودنی‌های آلومینا سلیکات در ساخت بتن فوق توانمند استفاده کردند. Graybeal [۱۱] برای ساخت نمونه‌های بتن فوق توانمند علاوه بر مصرف حجم میکروسیلیس بالا، از حجم سیمان زیادی نیز استفاده کردند. مستوفی‌نژاد و همکاران [۱۲]، به بررسی عمل‌آوری‌های مختلف و تغییر در پارامترهای تشکیل دهنده بتن فوق توانمند پرداخته و تأثیر آنها را بر روی مقاومت فشاری بتن تعیین کرده‌اند. بندیا و همکاران [۱۳]، تأثیر الیاف فولادی و الیاف میکرو سلولز را بر مقاومت فشاری مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق الیاف به صورت تنها و ترکیبی در نمونه استفاده شده است. پان و همکاران [۱۴]، به بررسی تأثیر الیاف پلی‌وینیل الکل معمولی و روغنی بر روی خواص مکانیکی بتن پرداختند. نتایجی که از این تحقیق به دست آمده نشان می‌دهد که الیاف پلی‌وینیل الکل معمولی باعث افزایش مقاومت بتن در برابر ترک خوردن می‌شود و الیاف پلی‌وینیل الکل روغنی باعث افزایش شکل‌پذیری می‌شود. بیلدریم و همکاران [۱۵]، اثر الیاف فولادی، سلولز و پلی‌پروپیلن، به صورت هیبریدی بر مقاومت در برابر ضربه را مورد

بررسی قرار دادند. Kim و همکاران [۱۶] با انجام تست‌های تجربی بیرون کشیدگی به بررسی چسبندگی الیاف با رزین پلیمری پرداختند. ساخت و آزمایش کامپوزیت‌های سیمانی، با توجه به چالش‌های پخش ذرات در بستر سیمان و هزینه‌های تولید، مقرون به صرفه نمی‌باشد. بنابراین با توجه به پیچیدگی‌ها و هزینه‌های زیاد آزمایشات و نتایج تجربی، در سال‌های اخیر با گسترش تکنولوژی و روش‌های حل عددی تکنیک‌های مدل‌سازی برای محاسبه خواص مکانیکی بتن و مصالح ساختمانی روشی مناسب برای این مواد می‌باشند [۲۰-۱۷]. اما ابعاد واقعی ذرات و نسبت طول به قطر آنها، مدل‌سازی المان محدود را در ابعاد ماکرو و میکرو با مشکل مواجه می‌کند [۲۳-۲۱]. یکی دیگر از روش‌های پیش‌بینی خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها که اخیراً با توسعه روش‌های المان محدود ارائه شده است، مدل‌سازی کامپوزیت به صورت میکروساختار می‌باشد. در این روش فاز زمینه و ذرات تقویت کننده به صورت مجزا شبیه‌سازی شده و با تعریف اندرکنش بین زمینه و ذرات مدل واقع‌بینانه‌تر از کامپوزیت ایجاد می‌شود. در این روش با تعریف خواص مجزای هر دو جزء تشکیل دهنده کامپوزیت می‌توان رفتار مکانیکی مجموعه را تعیین نمود. Khani و همکاران [۲۴] با استفاده از روش المان محدود به بررسی خواص الاستیک کامپوزیت‌های تقویت شده با نانو لوله‌های کربنی مارییج و رشته‌ای پرداختند. Pashaki و همکاران [۲۵] به بررسی رفتار نانو کامپوزیت‌های تقویت شده با نانولوله‌های کربنی با استفاده از روش المان محدود میکرو پرداختند. آنها با شبیه‌سازی دو بعدی و در نظر گرفتن اندرکنش بین نانو ذرات و ماتریس رفتار مکانیکی این نوع کامپوزیت‌های را مورد مطالعه قرار دادند.

بررسی مطالعات انجام شده در زمینه تقویت بتن با استفاده از الیاف نشان می‌دهد که تاکنون تأثیر الیاف بر رفتار مکانیکی بتن‌های فوق توانمند تقویت شده با این الیاف کمتر مطالعه شده است و هنوز تأثیر استفاده از این الیاف در بتن فوق توانمند نیازمند مطالعات بیشتر می‌باشد. علاوه بر این، اکثر این مطالعات با استفاده از تست‌های زمان‌بر و پر هزینه تجربی بوده است و تاکنون استفاده از روش‌های المان محدود در این زمینه مورد توجه قرار نگرفته است. بر این اساس، در تحقیق حاضر با استفاده از تست‌های تجربی و همچنین روش المان محدود چند مقیاسه، مقاومت خمشی بتن فوق توانمند الیافی با استفاده از آزمون بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای مطالعه خواهد شد. در این روش بتن به صورت ماده همگن و یکنواخت مدل‌سازی شده و الیاف به صورت تصادفی در داخل آن توزیع خواهد شد. مدل المان محدود به کمک نرم‌افزار ABAQUS ایجاد شده است. به منظور شبیه‌سازی



(الف)



(ب)

شکل ۱ (الف) تصویر SEM ماسه سیلیسی و (ب) تصویر SEM پودر سیلیسی مورد استفاده در ساخت بتن فوق توانمند مطابق دیتاشیت شرکت پارس سیلیس

چسبندگی الیاف با بتن از مدل CZM استفاده خواهد شد. در این روش ثوابت مدل CZM به نحوی تعیین خواهند شد که منحنی نیرو-جابجایی حاصل از مدل المان محدود و تجربی بر هم منطبق شوند. پس از کالیبره کردن و صحت‌سنجی مدل المان محدود به مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف مانند کسر حجمی الیاف و چسبندگی الیاف با بتن مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

۲- تست‌های تجربی

در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ ۲ شرکت سیمان صوفیان تبریز استفاده شده است. این سیمان مطابق با مشخصات مطرح شده در استاندارد ایران به شماره ISIRI-398 تولید می‌شود. از فوق روان کننده Auramix4450 بر پایه پلی‌کربوکسیلات شرکت فسروک استفاده شده که ۶۱ درصد آن آب می‌باشد [۲۶]. در شکل ۱ الف تصویر SEM ماسه سیلیسی مورد استفاده مطابق دیتاشیت شرکت پارس سیلیس آورده شده است. از میکرو سیلیس zirconia ساخت شرکت فرولیس ایران با مساحت سطح مخصوص ۸ مترمربع بر گرم، به عنوان چسباننده استفاده شده است و در شکل ۱ ب تصویر SEM آن نشان داده شده است. همچنین، پرکننده سیلیسی خالص متشکل از بیش از ۹۹ درصد SiO_2 با قطر متوسط ۲/۲ میکرومتر، برای افزایش جریان‌پذیری و مقاومت بکار گرفته شده است. اندازه پرکننده مابین اندازه سیمان و میکرو سیلیس zirconia بوده است. درشت‌دانه‌ها حذف شده‌اند زیرا آن‌ها منجر به سفتی بیشتر ماتریس می‌شوند که باعث شرایط ترک‌خوردگی حالت پایدار کمتر می‌شوند. فوق‌روان کننده مورد استفاده در این آزمایش، Super Plasticizer 260 محصول شرکت نامیکاران می‌باشد. این ماده، فوق‌روان کننده و کاهنده آب موثری است که برای تولید بتن مرغوب به کار می‌رود و مطابق با ASTM C494 و استاندارد ۳۹۳۰ می‌باشد. با استفاده از این ماده افزودنی، مقاومت اولیه و نهایی بتن افزایش یافته و بدون نیاز به آب اضافی کارایی بتن به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد. الیاف فلزی مورد استفاده در این تحقیق (شکل ۲) از نوع داخلی و تولید شده در شرکت شیمی بتن بهینه می‌باشد. دانسیته واقعی الیاف برابر ۷۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ویژگی‌های فیزیکی این الیاف، در جدول ۱ آمده است. میزان مصالح مصرفی در این طرح برای ساخت یک مترمکعب بتن در جدول ۲ ارائه شده است.

^۱ Cohesive Zone Model

شده و از روی این منحنی‌ها مقاومت خمشی نمونه‌های مختلف با در نظر گرفتن میانگین سه نمونه تعیین نمونه به دست آمده است. در جدول ۳ نامگذاری نمونه‌های تحت تست تجربی مقاومت خمشی ارائه شده است.



شکل ۳ (الف) نمای کلی بارگذاری چهار نقطه‌ای برای تعیین مقاومت خمشی و (ب) نحوه قرارگیری نمونه بتن فوق توانمند در دستگاه یونیورسال

نام نمونه	ابعاد	کسر حجمی الیاف
Flex-01	50 mm×50 mm×350 mm	0%
Flex-02	50 mm×50 mm×350 mm	0.5%
Flex-03	50 mm×50 mm×350 mm	1%

۳- مدل‌سازی المان محدود چندمقیاسه خمشی چهار نقطه‌ای

در این قسمت به شبیه‌سازی خمشی چهار نقطه‌ای تیر بتنی فوق توانمند الیافی در نرم افزار آباکوس پرداخته می‌شود. ابعاد و مشخصات هندسی تیر شبیه‌سازی شده مشابه شرایط آزمایشگاهی مربوط به تعیین مقاومت خمشی نمونه‌ها می‌باشد. مدل‌سازی تیر بتنی فوق توانمند به صورت سه‌بعدی و دو جسم صلب در نقش جک به صورت صلب می‌باشد. در شکل ۴ نحوه قرارگیری اجزا در محیط نرم‌افزار نمایش داده شده است.

جدول ۱ مشخصات فیزیکی الیاف فولادی شرکت شیمی بتن بهینه

قطر الیاف	طول الیاف	ضریب شکل	مقاومت کششی	مدول یانگ	نسبت پواسون
0.4 mm	50 mm	42.85	122.8 MPa	210 GPa	0.28

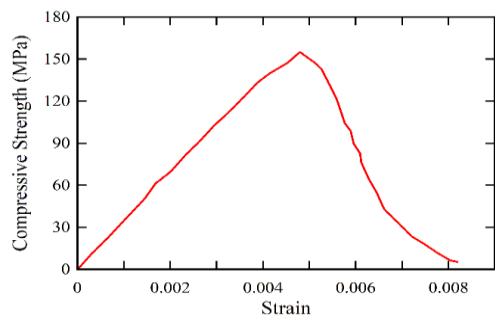


شکل ۲ هندسه الیاف فولادی شرکت شیمی بتن بهینه

جدول ۲ طرح اختلاط بتن فوق توانمند مورد استفاده در تست‌های تجربی تحقیق حاضر

سیمان	میکروسیلیس	آب	فوق روان‌ساز	سنگدانه
(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)
788.5	236.6	224	52.6	867.4
نسبت	چگالی	بازشدگی	قطر	مقاومت
آب به سیمان	(kg/m ³)	(mm)	(mm)	(MPa)
0.2	2425	194.3	150.6	

مقاومت خمشی نمونه‌های مکعب مستطیلی بتن فوق توانمند مسلح به الیاف فولادی با استفاده از آزمایش بارگذاری چهار نقطه‌ای مطابق شکل ۳ مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج با یکدیگر و نمونه بدون الیاف مقایسه می‌شود. ابعاد نمونه‌های مکعب مستطیلی به ابعاد ۳۵۰×۵۰×۵۰ میلی‌متر می‌باشد. در شکل ۳ نحوه قرارگیری نمونه بتن فوق توانمند در دستگاه یونیورسال نشان داده شده است. در این تحقیق برای انجام تست خمشی چهار نقطه‌ای از دستگاه یونیورسال صنتام موجود در آزمایشگاه سازه دانشگاه تبریز استفاده شد. این دستگاه دارای ظرفیت ۱۰ تن و دقت ۰/۱ می‌باشد. در این تحقیق بارگذاری جابجایی کنترل بوده و نرخ بارگذاری برابر 0.2 mm/s انتخاب شده است. با اعمال نیرو، منحنی نیرو-جابجایی رسم

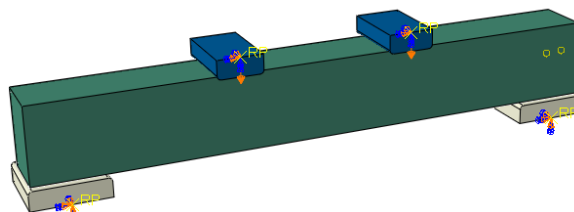


(ب)

شکل ۵ (الف) منحنی تنش-کرنش کشش تک محوره و (ب) منحنی تنش-کرنش فشاری بتن فوق توانمند تحت بررسی

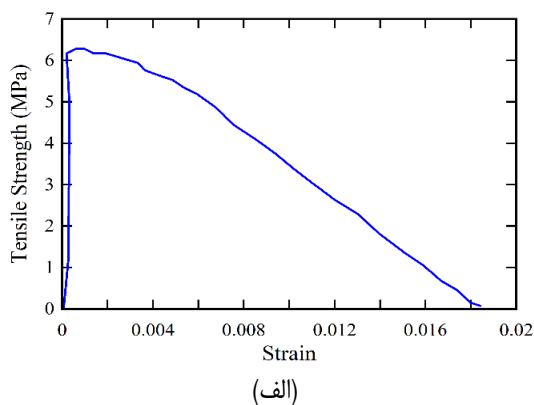
همانطور که بیان شد، یکی دیگر از نوآوری‌های تحقیق حاضر استفاده از مدل المان محدود چندمقیاسه به منظور مطالعه رفتار مکانیکی بتن‌های فوق توانمند تقویت شده با الیاف می‌باشد. در این روش در مدل‌های هندسی سه بعدی، الیاف با توزیع‌های مختلف و پراکنده‌ی تصادفی به صورت مجزا در کنار یکدیگر قرار داده می‌شوند. در تحقیق حاضر، برخلاف تحقیقات انجام شده، اثر جهت‌گیری و همچنین تعداد الیاف به صورت نامنظم و تصادفی جانمایی شده‌اند تا شرایط واقعی حضور الیاف در بتن فوق توانمند ایجاد گردد. برای تعریف اندرکنش بین سطوح مشترک الیاف با زمینه از مفهوم المان‌های چسبنده (CZM) در نرم‌افزار آباکوس استفاده خواهد شد. برای ایجاد مدل هندسی سه‌بعدی توزیع الیاف در داخل زمینه بتنی، یک برنامه در نرم‌افزار MATLAB و همچنین محیط Script نرم‌افزار آباکوس نوشته شد. در مدل سه بعدی، الیاف با توجه به شکل هندسی آنها به صورت استوانه‌ای شکل در داخل ماده زمینه ایجاد خواهند شد. در این نوع مدل‌سازی در واقع بار اعمالی به الیاف به ماتریس منتقل شده و سپس بین ماتریس و الیاف انتقال نیرو و جابجایی انجام می‌شود و بر این اساس می‌توان رفتار مکانیکی بتن الیافی را مورد مطالعه قرار داد.

برای مدل‌سازی آسیب و پدیده جدایش در ناحیه تماس بین الیاف و بتن از تئوری مدل ناحیه چسبنده که بر پایه نمودارهای نیرو-جابجایی هستند، استفاده شده است. در شکل ۵ منحنی نیرو-جابجایی این مدل نشان داده شده است. رفتار مکانیکی مربوط به سطوح تماس الیاف با بتن با استفاده از قانون تنش-جدایش و مبتنی بر مدل نمایی آن شبیه‌سازی می‌شود. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، در این مدل فرض می‌شود که تمامی مکانیزم‌های ساختار مایکرو و و فرایند شکست را می‌توان به

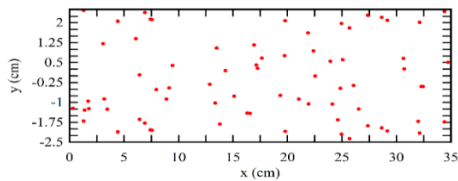


شکل ۴ - نحوه قرارگیری اجزای مختلف شبیه‌سازی المان محدود خمش چهار نقطه‌ای در محیط نرم‌افزار

برای بتن الیافی از مدل رفتاری Concrete Damaged Plasticity که رفتار کششی و فشاری بتن را به صورت جداگانه دریافت می‌نماید، استفاده شده است. در شکل ۵ منحنی تنش-کرنش کششی و فشاری بتن فوق توانمند تحت بررسی به دست آمده با استفاده از انجام تست‌های تجربی کشش ساده بر روی نمونه مستطیلی شکل و فشاری انجام شده بر اساس استاندارد ASTM C39 بر روی نمونه استوانه‌ای با ابعاد $100\text{mm} \times 200\text{mm}$ ، آمده است. برای انجام تحلیل‌های المان محدود از روش حل دینامیکی با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی‌های هندسی استفاده شده است. برای تعریف تماس بین تیر و اجزای صلب می‌توان تماس به صورت تماس سطح به سطح به همراه خواص تماسی تعریف شده است. شرط مرزی ساده به دو سر تیر و شرط مرزی جابه‌جایی به دو جسم صلب اعمال شده و برای انجام تحلیل‌ها از آنالیز دینامیکی استفاده شده است.

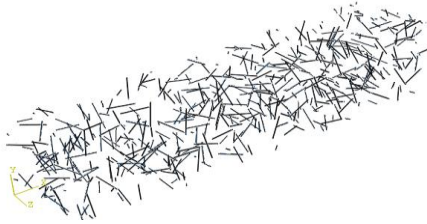


(الف)

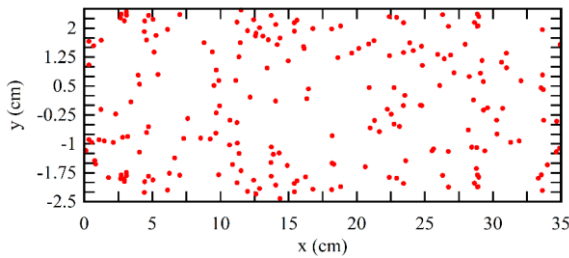


(ب)

شکل ۷ (الف) مدل هندسی پخش الیاف با کسر حجمی 0.5 wt.%. (ب) مختصات مرکز هندسی الیاف ایجاد شده در xy



(الف)



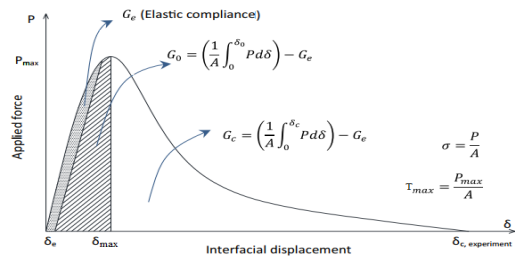
(ب)

شکل ۸ (الف) مدل هندسی پخش الیاف با کسر حجمی 1 wt.%. (ب) مختصات مرکز هندسی الیاف ایجاد شده در xy



(الف)

وسیله سه پارامتر مورد توجه قرار داد که عبارتند از: (۱) استحکام ناحیه چسبنده (τ_{\max})، (۲) طول جدایش بحرانی S_{\max} ، که به ازای مقادیر بیشتر از آن سطح چسبنده ظرفیت تحمل تنش خود را از دست داده و ترک رشد می‌کند، (یا δ_n یعنی جدایش در نقطه تنش ماکزیمم)، (۳) پارامتر n که نشان دهنده تغییرات نمایی بخش ناحیه شکست می‌باشد. علاوه بر این، G_c که انرژی جدایش می‌باشد نیز به عنوان یکی دیگر از پارامترهای مدل ناحیه چسبنده می‌باشد. پس از کالیبره کردن مدل المان محدود با نتایج تست‌های تجربی و تعیین پارامترهای مدل ناحیه چسبنده و ثوابت مدل رفتار چسبندگی بین الیاف و بتن فوق توانمند به مطالعه المان محدود تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار بتن‌های فوق توانمند تقویت شده با الیاف پرداخته می‌شود.

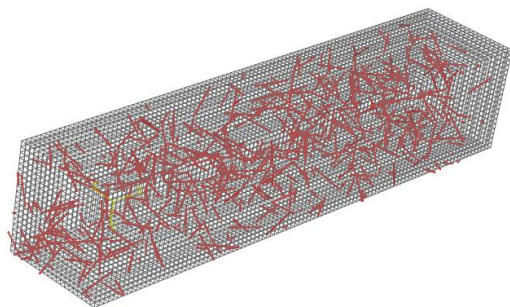


شکل ۶ تغییرات تنش برشی ناحیه چسبندگی برحسب میزان لغزش

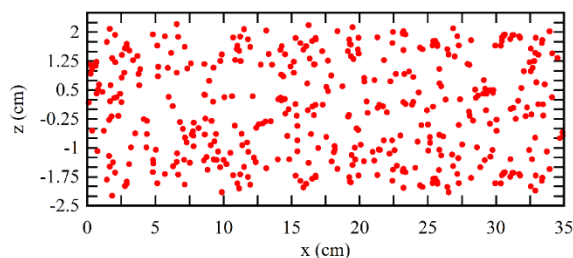
در شکل‌های ۷ تا ۹ مدل‌های هندسی از توزیع تصادفی الیاف که با استفاده از الگوریتم ذکر شده در بخش قبل ایجاد شده‌اند، به ترتیب به ازای 0.5 wt.%, 1 wt.% و 2 wt.% کسر وزنی الیاف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود هندسه سه‌بعدی این اجازه را می‌دهد که الیاف در جهت‌گیری مختلف و طول‌های متفاوت و جایگاه‌های مختلف در فضا قرار گیرد. در شکل‌های ۶ب، ۷ب و ۸ب موقعیت قرارگیری الیاف در صفحه نشان داده شده است. بر اساس این شکل‌های مشاهده می‌شود که پراکندگی الیاف ایجاد شده با استفاده از کد نوشته شده برای تولید الیاف به صورت تصادفی در ماتریس بتنی قرار گرفته و از این جهت، این نوع توزیع می‌تواند با دقت مناسبی توزیع الیاف در حالت تجربی را پیش‌بینی نماید.



(الف)



شکل ۱۰ مدل المان محدود چند مقیاسه بتن فوق توانمند تقویت شده ۲ درصد کسر حجمی الیاف ایجاد شده در ABAQUS



(ب)

شکل ۹ (الف) مدل هندسی پخش الیاف با کسر حجمی 2 wt. %، (ب) مختصات مرکز هندسی الیاف ایجاد شده در xy

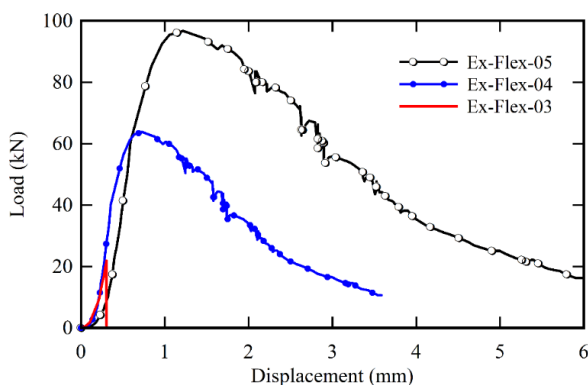
۵- بررسی نتایج

آزمایش خمش چهار نقطه‌ای بر روی سه نمونه بتن فوق توانمند بدون الیاف، بتن فوق توانمند دارای ۱ درصد الیاف فولادی انجام پذیرفته است. در شکل ۱۱ نحوه شکست نمونه بتن فوق توانمند الیافی تحت بارگذاری خمشی نمایش داده شده است. در نمونه‌های بدون الیاف، گسترش ترک، آنی و سریع بوده و شکست بلافاصله بعد از به وجود آمدن اولین ترک رخ داد، ولی در نمونه‌های دارای الیاف، بعد از به وجود آمدن ترک، الیاف موجود در بتن فوق توانمند، مانع گسترش آن شده و با پل زدن بین دو طرف ترک، گسترش آن را به تأخیر انداخته و طاقت خمشی یا چقرمگی بتن را افزایش دادند.



شکل ۱۱ نحوه شکست نمونه بتن فوق توانمند الیافی تحت بارگذاری خمشی

پس از ایجاد مدل هندسی الیاف با کسرهای حجمی و اندازه‌های مختلف، الیاف داخل ماتریس جایگذاری شده و با اعمال شرایط چسبندگی در مرزهای مشترک الیاف با ماتریس بتن فوق مستحکم و همچنین اعمال شرایط مرزی و بارگذاری به تحلیل اعمال محدود رفتار مقاومت خمشی بتن فوق توانمند تقویت شده با الیاف پرداخته می‌شود. در شکل ۹ نمونه‌ای از مدل المان محدود چندمقیاسه بتن فوق توانمند تقویت شده با الیاف که با توزیع تصادفی الیاف در نرم‌افزار ABAQUS ایجاد شده، نشان داده شده است. به منظور مطالعه پارامتری، بتن فوق توانمند تقویت شده با صفر تا ۱۵ درصد الیاف مورد مطالعه قرار داده می‌شود که مدل المان محدود تعدادی از این نمونه‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به پیچیدگی هندسی سازه، به منظور مش‌بندی بتن از المان‌های مکعبی شکل غیرخطی شش گرهی C3D20R برای الیاف و از المان‌های هرمی شکل غیرخطی ده گرهی C3DPE10M برای مدل‌های سه‌بعدی ماتریس استفاده شد. در نهایت با اعمال بارگذاری استاتیکی به نمونه‌های ساخته شده به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف مانند مشخصات هندسی و مکانیکی الیاف و همچنین درصد حجمی آنها بر مقاومت خمشی این مواد پرداخته می‌شود.

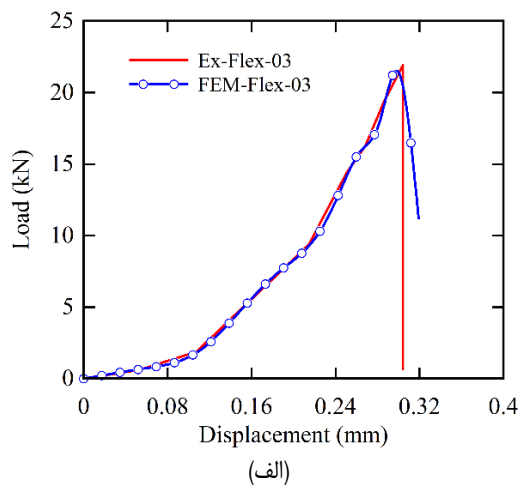


شکل ۱۲ نمودارهای بار-تغییرمکان به دست آمده از آزمایش مقاومت خمشی برای نمونه‌های بتن فوق توانمند بدون الیاف، بتن فوق توانمند دارای فولادی

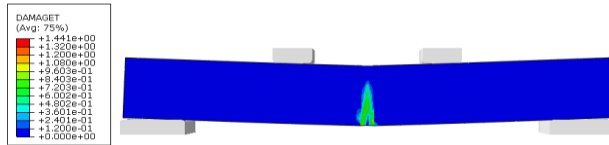
جدول ۴ پارامترهای مدل ناحیه چسبنده به منظور تعریف اندرکنش میکرو

الیاف فولادی با بتن پلیمری

	T_{max}	δ_{max}	G_c
Steel fiber	8.23MPa	2.8×10^{-3} mm	0.23 MPa.mm



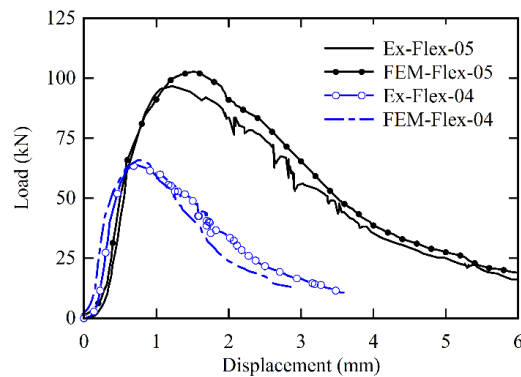
نمودارهای بار-تغییرمکان به دست آمده از آزمایش مقاومت خمشی برای نمونه‌های بتن فوق توانمند بدون الیاف، بتن فوق توانمند دارای الیاف فولادی یعنی نمونه‌های بتنی Ex-Flex-01، Ex-Flex-02 و Ex-Flex-03 در شکل ۱۲ ارائه شده است. مساحت زیر این نمودارها بیانگر مقدار جذب انرژی یا چقرمگی می‌باشد. همانطور که انتظار می‌رفت افزودن الیاف سبب افزایش چقرمگی شده است. سطح زیر منحنی بار-تغییرمکان در نمونه دارای الیاف فولادی در حدود 119.5 N.m در نمونه بدون الیاف در حدود 2.07 N.m است که این مطلب نشانگر اثر قابل ملاحظه الیاف بر چقرمگی بتن فوق توانمند الیافی می‌باشد. پس می‌توان نتیجه گرفت که هر چند الیاف تأثیر اندکی در بهبود مقاومت فشاری بتن‌های فوق توانمند دارند ولی مقاومت خمشی و چقرمگی آن را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهند. همچنین، با توجه به شکل مشاهده می‌شود که با افزایش درصد الیاف‌ها در بتن فوق توانمند، شاهد افزایش چشم‌گیر مقاومت‌های خمشی و به دنبال آن حداکثر بار قابل تحمل توسط نمونه‌های تیر خواهیم بود. همچنین، با توجه به اینکه استفاده از الیاف باعث افزایش جابجایی وسط دهانه تیر به ازای مقادیر حداکثر نیرو را دارد، بنابراین بتن فوق توانمند دارای الیاف شکل‌پذیری بیشتری را قبل از شکست الیاف خواهد داشت. همانطور که بیان شد، اندرکنش بین الیاف و بتن با استفاده از قید تماسی و تعریف المان‌های چسبنده صورت پذیرفت که پارامترهای مدل ناحیه چسبنده به نحوی تعیین شدند که منحنی نیرو-جابجایی به دست آمده از مدل المان محدود بر نتایج تجربی منطبق باشد. پس از کالیبره کردن نتایج مربوط به تست خمش چهار نقطه‌ای، مشخصات رفتاری مدل ناحیه چسبنده مورد استفاده مطابق جدول ۴ به دست آمده است. با استفاده از مقادیر جدول ۴، منحنی نیرو- لغزش مدلهای نهایی المان محدود و نتایج تست تجربی نمونه‌های Flex-02 در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود همپوشانی مطلوبی بین نتایج نمونه آزمایشگاهی و مدل المان محدود برقرار است.



شکل ۱۴ سطح شکست خمشی نمونه بتن فوق توانمند الیافی با ۱ درصد کسر حجمی الیاف فولادی به ازای نیروی 65 kN

به منظور بررسی تأثیر الیاف بر تغییر شکل‌های ایجاد شده در نمونه تیر بتن فوق توانمند تحت بررسی در شکل ۱۵ تغییر شکل نمونه تیر بتن فوق توانمند بدون الیاف، تیر بتن فوق توانمند دارای ۱ درصد الیاف فولادی به ازای نیروی اعمالی 20 kN نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که به ازای مقدار نیروی اعمالی ثابت، نمونه بدون الیاف دارای تغییر شکل بسیار بیشتر بوده و حداکثر خیز آن برابر 2.65 mm به دست می‌آید. اضافه کردن الیاف باعث کاهش قابل توجهی در تغییر شکل نمونه تحت بررسی شده به طوری که به ازای ۱ درصد کسر حجمی الیاف فولادی، حداکثر خیز به ازای نیروی ۲۰ کیلو نیوتنی در حدود 0.24 mm به دست می‌آید که این مقادیر نسبت به نمونه بدون الیاف بسیار کمتر می‌باشند.

در شکل ۱۶ توزیع تنش در بخش‌های مختلف بتن فوق توانمند خالص و بتن فوق توانمند تقویت شده با ۱ و ۲ درصد کسر حجمی الیاف فولادی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین تنش ایجاد شده در الیاف مورد استفاده می‌باشد و علاوه بر این، بخش قابل توجهی از نیروی اعمالی بر بتن توسط الیاف تحمل می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که تحت نیروی اعمالی یکسان بر بتن فوق توانمند تحت بررسی، حداکثر تنش ایجاد شده در بتن تقویت شده با ۱ و ۲ درصد کسر حجمی الیاف فولادی به ترتیب در حدود ۴۵٪ و ۵۷٪ کمتر از میزان حداکثر تنش ایجاد شده در بتن خالص می‌باشد. بنابراین، تقویت این نوع بتن‌ها با استفاده از الیاف باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در مشخصه‌های مکانیکی آنها می‌شود.

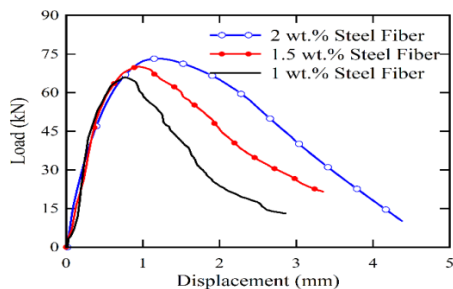


(ب)

شکل ۱۳ مقایسه منحنی نیرو-جابجایی بین نتایج تجربی و المان محدود چندمقیاسه (الف) نمونه بتن توانمند بدون الیاف و (ب) نمونه‌های بتن توانمند تقویت شده با الیاف

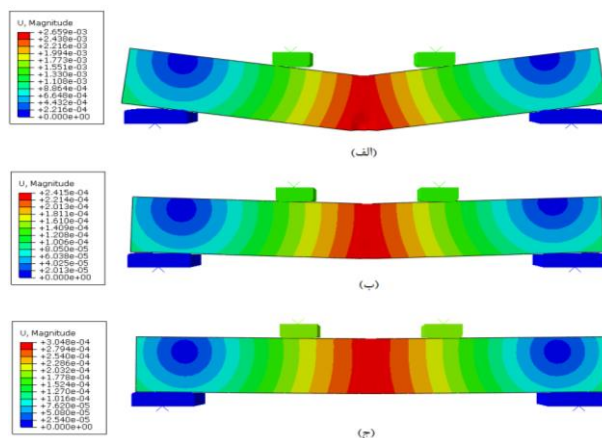
به منظور بررسی توانایی روش المان محدود چندمقیاسه ارائه شده در پیش‌بینی موقعیت شکست تیر بتنی فوق توانمند تحت بارگذاری خمشی چهار نقطه‌ای، در شکل ۱۴ تغییر شکل تیر از جنس بتن فوق توانمند الیافی با ۱ درصد کسر حجمی الیاف فولادی و به ازای نیروی 65 kN نشان داده شده است. با مقایسه این شکل با نحوه شکست نتایج تجربی نمونه متناظر بتن فوق توانمند الیافی تحت بررسی که در شکل ۱۱ نشان داده شده است مشاهده می‌شود که مدل المان محدود ارائه شده با دقت مناسبی نحوه شکست و موقعیت رشد ترک را در این نوع مصالح پیش‌بینی می‌کند. بر این اساس می‌توان بیان نمود که مدل المان محدود چند مقیاسه ارائه شده در تحقیق حاضر با دقت بسیار مناسبی رفتار خمشی بتن‌های فوق توانمند الیافی را در بارگذاری خمشی چهار نقطه‌ای شبیه‌سازی می‌کند و نتایج آن قابل استناد می‌باشد. با توجه به شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که نیروی لازم برای ایجاد اولین ترک در بتن برای نمونه‌هایی که در آنها از الیاف استفاده شده افزایش یافته است و این افزایش رابطه‌ی مستقیمی با افزایش کسر حجمی الیاف دارد. دلیل افزایش نیرو برای ایجاد اولین ترک این می‌باشد. همین چسبندگی از لغزش الیاف در بتن جلوگیری کرده و اجازه ترک خوردن را نمی‌دهد تا زمانی که خود الیاف پاره گردد یا از بتن بیرون کشیده شوند.

جابجایی ۳ میلیمتر آورده شده است. با بررسی منحنی‌های نیرو-تغییر مکان حاصل از تست خمش چهار نقطه‌ای مشاهده می‌شود که افزایش درصد الیافها در بتن فوق توانمند، باعث افزایش چشمگیر حداکثر بار قابل تحمل توسط تیرهای منشوری و به دنبال آن افزایش جابجایی وسط دهانه مربوط به این حداکثر بار می‌باشد، که شکل‌پذیری بیشتری را قبل از شکست نمونه‌ها به دنبال دارد. با بررسی منحنی‌های بار-تغییر مکان مربوط به نمونه‌های تحت بررسی مشاهده می‌شود شاخه نزولی منحنی نمونه شاهد با افزایش درصد الیاف، کرنش نرم شدگی قابل توجهی پیدا کرده که این رفتار در نمونه‌های حاوی الیاف به صورت شکست نرم‌تر اصلاح شده و سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان بیشتری به وجود آورده که عمدتاً بعد از بار حداکثر بوده و در نتیجه قابلیت جذب انرژی بتن شاهد را افزایش می‌دهد.

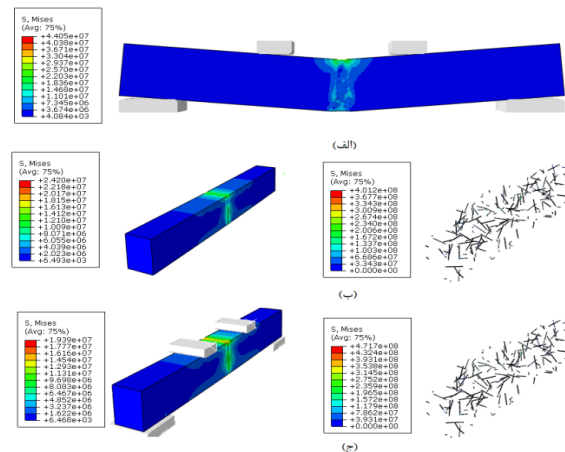


شکل ۱۷ منحنی نیرو-جابجایی بتن فوق توانمند الیافی تقویت شده با الیاف فولادی

خلاصه‌ای از نتایج منحنی‌های نیرو-جابجایی شامل حداکثر بار قابل تحمل در آزمایش خمش چهار نقطه‌ای و تغییر مکان مربوط به این حداکثر بار نیز، مقاومت خمشی و چقرمگی به دست آمده از مدل المان محدود چندمقیاسه در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد اثر مهمی که افزودن الیاف به بتن ایجاد می‌کند افزایش چقرمگی و قدرت جذب انرژی می‌باشد؛ که نقش مهمی در شکست بتن ایفا می‌کند. همان‌گونه که در جدول ملاحظه می‌شود؛ استفاده از الیاف، مقاومت خمشی بتن را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد و با اضافه کردن ۳ درصد کسر حجمی الیاف این میزان افزایش برای الیاف فولادی در حدود ۲/۶ برابر به دست می‌آید که مقدار قابل توجهی می‌باشد. نکته مهم در این باره این است که تأثیر استفاده از الیاف بر میزان جذب انرژی توسط بتن فوق توانمند الیافی بسیار بیشتر از تأثیر آن بر سایر مشخصه‌های این نوع بتن‌ها می‌باشد و مخصوصاً استفاده از الیاف در حجم‌های پایین الیاف تأثیری بسیار قابل ملاحظه بر



شکل ۱۵ تغییر شکل نمونه تیر بتن فوق توانمند به ازای نیروی اعمالی 20 kN (الف) بدون الیاف، (ب) دارای ۱ درصد الیاف فولادی و (ج) تیر بتن فوق توانمند دارای ۲ درصد الیاف



شکل ۱۶ توزیع تنش در دو فاز ماتریس (بتن فوق توانمند) و تقویت‌کننده‌ها (الیاف) برای سه حالت (الف) بتن فوق توانمند، (ب) بتن فوق توانمند دارای ۱ درصد کسر حجمی الیاف فولادی و (ج) بتن فوق توانمند دارای ۲ درصد کسر حجمی الیاف فولادی

منحنی‌های نیرو-تغییر مکان حاصل از تست خمش چهار نقطه‌ای برای نمونه‌های مختلف بتن فوق توانمند الیافی با الیاف فولادی و به ازای مقادیر مختلف الیاف مورد استفاده در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود منحنی نیرو-تغییر مکان طرح‌های مختلف تا

جابجایی شکست این دو نوع الیاف فولادی نسبت به بتن شاهد فاقد الیاف همانطور که در جدول نشان داده شده برابر است با ۱۰/۳ برابر می‌باشد. همچنین، بر اساس نتایج جدول مشاهده می‌شود که تأثیر افزایش الیاف بر ظرفیت جذب انرژی و شکل‌پذیری بتن بسیار با اهمیت‌تر از تأثیر این افزایش بر مقاومت بتن است.

قابلیت جذب انرژی دارد به طوری که به ازای ۰/۵ درصد کسر حجمی الیاف فولادی قابلیت جذب انرژی به ترتیب در حدود ۱۷ برابر نسبت به نمونه بتن فوق توانمند بدون الیاف افزایش می‌یابد. همانطور که در جدول ۵ نشان داده شده نرخ تغییر جابجایی متناظر با حداکثر نیرو با افزایش درصد حجمی هر دو نوع الیاف فولادی صعودی است و میزان ماکزیمم این افزایش برای الیاف فولادی به ازای ۳ درصد حجمی برابر ۱/۲۶ میلی‌متر می‌باشد که میزان حداکثر درصد افزایش

جدول ۵ خلاصه‌ای از نتایج منحنی‌های نیرو-جابجایی شامل حداکثر بار قابل تحمل در آزمایش خمش چهار نقطه‌ای و تغییر مکان مربوط به این حداکثر بار نیز، مقاومت خمشی و چقرمگی به دست آمده از مدل المان محدود چندمقیاسه

ردیف	نوع الیاف	کسر حجمی الیاف	حداکثر نیرو (kN)	جابجایی متناظر با حداکثر نیرو (mm)	میزان جذب انرژی (N.m)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت خمشی (MPa)
۱	-	0	۲۲/۶۹	۰/۳	۵/۸	۱۴۸/۵۶	۱۵/۲
۲		۰/۵	۵۴/۱	۰/۶۲	۹۸/۴	۱۵۰/۱۶	۱۸/۸
۳		۱	۶۵/۳	۰/۷۶	۱۰۲/۶	۱۵۲/۷۱	۲۱/۷
۴	Steel	۱/۵	۶۹/۹	۰/۸۹	۱۱۷/۵	۱۶۸/۴۳	۲۳/۴
۵		۲	۷۴/۲	۱/۱۷	۱۲۱/۷	۱۷۹/۸۵	۲۴/۷
۶		۲/۵	۷۸/۷	۱/۲۰	۱۳۴/۲	۱۸۴/۶۷	۲۶/۳
۷		۳	۸۲/۱	۱/۲۶	۱۴۲/۱	۱۸۷/۳۴	۲۷/۵

عددی قرار گرفت. بر اساس نتایج ارائه شده، خلاصه‌ای از نتایج مهم تحقیق حاضر را می‌توان به اختصار به صورت زیر بیان نمود:
- رفتار بتن فوق مستحکم فاقد الیاف (شاهد) تحت خمش، بعد از نقطه حداکثر تنش و در شاخه نزولی بدون نرم‌شدگی و تقریباً عمودی است و به عبارتی نوعی شکست انفجاری اتفاق می‌افتد که این افزایش تردی باعث شکست‌های ناگهانی و فاجعه باری در معرض زلزله می‌شود که این رفتار با استفاده از الیاف به طور قابل ملاحظه‌ای به صورت شکست نرم‌تر اصلاح شده و قابلیت جذب انرژی آنها را بالاتر می‌برد.

- سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان در نمونه دارای الیاف فولادی در حدود 119.5 N.m، در نمونه بدون الیاف در حدود 2.07 N.m است که این مطلب نشانگر اثر قابل ملاحظه الیاف بر چقرمگی بتن فوق توانمند الیافی می‌باشد.

- نکته مهم در این باره این است که تأثیر استفاده از الیاف بر میزان جذب انرژی توسط بتن فوق توانمند الیافی بسیار بیشتر از تأثیر آن بر سایر

۶- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر با استفاده از تست‌های تجربی و همچنین روش المان محدود چند مقیاسه، رفتار مقاومت خمشی بتن فوق توانمند الیافی با استفاده از آزمون خمش چهار نقطه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. با استفاده از معیار ناحیه چسبنده که در آن رفتار چسبندگی بین الیاف و ماتریس به صورت منحنی نیرو-جابجایی بیان می‌شود، در این روش المان محدود چند مقیاسه بتن به صورت ماده همگن و یکنواخت مدل‌سازی شده و الیاف به صورت تصادفی در داخل آن توزیع شد. به منظور در نظر گرفتن فرضیات واقع‌بینانه‌تر، ناحیه چسبندگی بین الیاف و بتن با استفاده از مدل CZM نیز لحاظ شد. ثوابت مدل CZM به نحوی تعیین شدند که منحنی نیرو-جابجایی حاصل از مدل المان محدود و تجربی بر هم منطبق شوند. پس از صحت‌سنجی نتایج مدل المان محدود با نتایج تجربی، تأثیر کسر حجمی الیاف بر مشخصه‌های بتن‌های فوق توانمند تقویت شده با الیاف مورد مطالعه

- [7] Chun B, Yoo D-Y, Banthia N . Achieving slip-hardening behavior of sanded straight steel fibers in ultra-high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2020; 24: 91-123.
- [8] Amin M , Tayeh B A , Agwa I S . Effect of using mineral admixtures and ceramic wastes as coarse aggregates on properties of ultrahigh-performance concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 273: 12-34.
- [9] Korpa A , Trettin R . *The use of synthetic colloidal silica dispersions for making high performance and ultra high performance systems (HPC/UHPC)*. in *International symposium on Ultra High Performance Concrete*. 2004.
- [10] Rougeau P, Borys B . *Ultra high performance concrete with ultrafine particles other than silica fume*. in *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*. 2004.
- [11] Graybeal BA. *Material property characterization of ultra-high performance concrete*. United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure , 2006.
- [12] Mostofinejad D, Nikoo MR , Hosseini SA . Determination of optimized mix design and curing conditions of reactive powder concrete (RPC). *Construction and Building Materials*. 2016; 123: 754-767.
- [13] Banthia N, Majdzadeh F, Wu J, Bindiganavile V. Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in flexure and direct shear. *Cement and Concrete Composites*. 2014; 48: 91-97.
- [14] Pan Z , Wu C , Liu J, Wang W, Liu J. Study on mechanical properties of cost-effective polyvinyl alcohol engineered cementitious composites (PVA-ECC). *Construction and Building Materials*. 2015; 78: 397-404 .
- [15] Yildirim ST, Ekinçi C E , Findik F. Properties of hybrid fiber reinforced concrete under repeated impact loads. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2010; 46(7): 538-546.
- [16] Kim E -H , Lee H , Kim J -H , Bae S -M , Hwang H , Yang H , Choi E , Hwang J -H . Electrical/Mechanical Monitoring of Shape Memory Alloy Reinforcing Fibers Obtained by

مشخصه‌های این نوع بتن‌ها می‌باشد و مخصوصاً استفاده از الیاف در حجم‌های پایین الیاف تأثیری بسیار قابل ملاحظه بر قابلیت جذب انرژی دارد به طوری که به ازای ۰/۵ درصد کسر حجمی الیاف فولادی در حدود ۱۷ برابر نسبت به نمونه بتن فوق توانمند بدون الیاف افزایش می‌یابد. - به ازای استفاده از ۲ درصد کسر حجمی الیاف فولادی بار نهایی شکست به ترتیب در حدود ۶۴٪ افزایش می‌یابد.

مراجع

- [1] Guo S-Y, Luo H-H , Tan Z , Chen J-Z , Zhang L, Ren J. Impermeability and interfacial bonding strength of TiO₂-graphene modified epoxy resin coated OPC concrete. *Progress in Organic Coatings*. 2021; 151: 56-73.
- [2] Mudasir P , Naqash J. The effect of water cement ratio on the characteristics of multi-walled carbon nanotube reinforced concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 45(6): 67-87.
- [3] Vahidi Pashaki P, Pouya M , Maleki V A . High-speed cryogenic machining of the carbon nanotube reinforced nanocomposites : Finite element analysis and simulation . *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers . Part C : Journal of Mechanical Engineering Science*. 2018; 232(11): 1927-1936.
- [4] Rezaee M , Maleki V A . An analytical solution for vibration analysis of carbon nanotube conveying viscose fluid embedded in visco-elastic medium. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers . Part C : Journal of Mechanical Engineering Science*. 2015; 229(4) : 644-650.
- [5] Li J , Wu Z , Shi C , Yuan Q , Zhang Z . Durability of ultra-high performance concrete—A review. *Construction and Building Materials*. 2020; 255: 119-126.
- [6] Roberti F, Cesari VF, de Matos P R , Pelisser F, Pilar R. High-and ultra-high-performance concrete produced with sulfate-resisting cement and steel microfiber . Autogenous shrinkage, fresh-state, mechanical properties and microstructure characterization . *Construction and Building Materials*. 2020 ; 34: 56-78.

- Engineering Fracture Mechanics. 2021; 247: 107-136.
- [22] Du X, Jin L , *Methodology . Meso-Scale Simulation Approach, in Size Effect in Concrete Materials and Structures*. 2021, Springer. p. 27-76.
- [23] Naderi S, Tu W, Zhang M. Meso-scale modelling of compressive fracture in concrete with irregularly shaped aggregates. *Cement and Concrete Research*. 2021; 140: 106-117.
- [24] Khani N , Yildiz M , Koc B. Elastic properties of coiled carbon nanotube reinforced nanocomposite: a finite element study. *Materials & Design*. 2016; 109: 123-132.
- [25] Vahidi Pashaki P, Pouya M , Maleki VA . High-speed cryogenic machining of the carbon nanotube reinforced nanocomposites: Finite element analysis and simulation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2017: 89; 67-84.
- [26] Yazıcı H , Yardımcı MY , Yiğiter H , Aydın S , Türkel S . Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag. *Cement and Concrete Composites*. 2010; 32(8): 639-648.
- Pullout Tests in SMA/Cement Composite Materials. *Materials*. 2018; 11(2): 315-331.
- [17] Esmaili J , Sharifi I , Andalibi K , and Kasaei J. Effect of Different Matrix Compositions and Micro Steel Fibers on Tensile Behavior of Textile Reinforced Concrete. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 246, no. 1, p. 012031. IOP Publishing, 2017.
- [18] Ghaderi M , Maleki V A , Andalibi K. Retrofitting of unreinforced masonry walls under blast loading by FRP and spray on polyurea. *Cumhuriyet Science Journal* . 2015; 36.4: 462-477.
- [19] Esmaili J , Andalibi K , Gencel O , Maleki F K , Maleki V A . Pull-out and bond-slip performance of steel fibers with various ends shapes embedded in polymer-modified concrete. *Construction and Building Materials*. 2021; 271: 121-145.
- [20] Hasani M , Nejad F M , Sobhani J , Chini M. Mechanical and durability properties of fiber reinforced concrete overlay: experimental results and numerical simulation . *Construction and Building Materials*. 2021; 268: 121-133.
- [21] Wu Z , Zhang J, Fang Q, Yu H , Ma H .3D mesoscopic modelling on the dynamic properties of coral aggregate concrete under direct tension.

Investigation of Flexural Strength of ultra-high Performance Concrete Reinforced with Steel fibers using multiscale finite element model

Amir Ebrahim Akbari Bagal

Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran

Ahmad Maleki

Department of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran

Ramin vafaeipoor sorkhabi

Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

a.maleki@iau-maragheh.ac.ir

Abstract

The main purpose of this study is to develop a finite element model to study the effect of steel-shaped fibers on the flexural strength of ultra-high performance fiber concrete. For this purpose, in order to numerically simulate, a multi-scale finite element model was developed in which concrete was modeled as a homogeneous and uniform material and steel fibers were randomly distributed inside it. In order to make more realistic assumptions, the area of adhesion between the fibers and the concrete is also considered. After validating the results of finite element model with the results of experimental tests, the effect of parameters such as volume fraction and adhesion of steel fibers on the strength characteristics of flexural strength of ultra-high performance concrete reinforced with fibers has been studied numerically. The results indicate that the effect of using fibers on the amount of energy absorption by fiber reinforced concrete is much greater than its effect on other characteristics of this type of concrete and especially the use of fibers in low fiber volumes has a very significant effect on energy absorption so that for 0.5% of the volume fraction of steel fibers, an increase of about 17 times compared to the sample of super-reinforced concrete without fibers can be resulted.

Key words: ultra-high performance concrete; steel fibers; multiscale finite element model; four point flexural bending test; energy absorption