



## بررسی مشخصات خمشی مصالح پایه سیمانی با عملکرد زیاد مسلح به الیاف فولادی درامیکس

سید امیرحسین مدنی<sup>۱</sup>، سید محمد میرحسینی<sup>۱\*</sup>، احسان اله ضیغمی<sup>۱</sup>، علیرضا نظام آبادی<sup>۲</sup>

۱- گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران.

۲- گروه مهندسی مکانیک، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۳

بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۷/۱۵

### کلمات کلیدی:

کامپوزیت های پایه سیمانی

رفتار سخت شونده و نرم شونده

کرنشی

ترک های متعدد

خانواده درامیکس

**خلاصه:** بتن دارای مقاومت زیادی در فشار می باشد ولی مقاومت کششی بسیار پایین و شکنندگی نسبتاً زیاد آن باعث گردیده که در آیین نامه های طراحی، مقاومت کششی برای بتن منظور نگردد. استفاده از الیاف فولادی در ماتریس های بتنی باعث کاهش ضعف شکنندگی و تردی بتن می گردد. بهبود مشخصات مکانیکی، ماتریس های بتنی مسلح به الیاف فولادی را به مصالحی مناسب برای کاربردهای سازه ای تبدیل می نماید. در تحقیق حاضر، مشخصات مکانیکی کامپوزیت های پایه سیمانی مسلح به درصد های حجمی مختلف الیاف (۱٪ و ۲٪) مورد بررسی قرار گرفته است. ماتریس پایه سیمانی، دارای مقاومت فشاری ۶۴ مگاپاسکال و الیاف به کار رفته از خانواده درامیکس در سه حالت ۳D, ۴D, ۵D می باشند. در این پژوهش جهت بررسی مقاومت خمشی، آزمون خمش ۴ نقطه ای روی المان های خمشی مسلح به درصد های مختلف الیاف فولادی انجام گرفته است. پارامترهای خمشی شامل نمودار نیرو-تغییر مکان، نحوه ترک خوردگی، میزان جذب انرژی و تنش خمشی ارزیابی و مقایسه شده اند. نتایج نشان می دهند در برخی از نمونه ها رفتار سخت شونده کرنشی تا قبل از تمرکز ترک و گسیختگی و سپس رفتار نرم شونده کرنشی اتفاق می افتد. بروز رفتار سخت شدگی باعث بهبود مشخصات مکانیکی مصالح می شود. در این حالت گسیختگی نمونه ها از طریق ایجاد ترک های متعدد اتفاق می افتد.

### ۱- مقدمه

کامپوزیت های سیمانی مسلح الیافی توانمند دسته خاصی از کامپوزیت های سیمانی الیافی را تشکیل می دهند که در بارگذاری کششی مستقیم پس از اولین ترک خوردگی، رفتار سخت شونده کرنشی همراه با ترک خوردگی های متعددی را قبل از تمرکز ترک و گسیختگی نهایی از خود نشان می دهند [۱]. به طور کلی هدف از به کار بردن واژه توانمند برای این مواد، متمایز کردن آن ها از مواد سنتی است که در حال حاضر به طور گسترده در ساخت سازه ها استفاده می شوند و فرآیند ساخت و یا تولید آن ها شناخته شده و در دسترس است. اضافه کردن درصد کمی الیاف کوتاه به صورت توزیع تصادفی به ماتریس سیمانی، سبب بهبود رفتار مکانیکی آن شده که به طور معمول به عنوان کامپوزیت سیمانی مسلح شده با الیاف شناخته می شود. عملکرد کامپوزیت های سیمانی مسلح شده با الیاف را می توان تا جایی بهبود بخشید که گسیختگی خمشی از طریق ترک های متعدد رخ

دهد. عملکرد FRCC<sup>۱</sup> به عوامل بسیاری مانند خواص مکانیکی الیاف شامل مقاومت الیاف، سختی و نسبت پواسون، همچنین هندسه الیاف (صاف، قلاب دار، مجعد)، نسبت حجمی الیاف، خواص ماتریس (مقاومت ماتریس، سختی و نسبت پواسون) و ویژگی های سطح تماس (چسبندگی، اصطکاک و مهار مکانیکی) بستگی دارد. برای ماتریس مشخص، نوع و مقدار الیاف، پارامتر کلیدی موثر بر عملکرد FRCC و هزینه های مربوطه می باشند. در سال های اخیر مطالعات متعددی در خصوص ماتریس های مسلح به الیاف توسط پژوهشگران صورت گرفته است. در پژوهشی که توسط هان<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۹ به انجام رسید اثر طول الیاف فولادی و دانه بندی درشت بر خواص مکانیکی بتن مسلح شده با الیاف فولادی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجربی نشان می دهد که کارایی مخلوط، استحکام کششی، مقاومت خمشی، انرژی شکست با افزایش طول الیاف فولادی افزایش می یابد. با افزایش اندازه ماکزیمم سنگ دانه درشت، مقاومت فشاری مخلوط

1 Fiber Reinforced Cementitious Composite

2 Han

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: m-mirhoseini@iau-arak.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.



فولادی در رفتار خمشی ماتریس‌های بتنی مسلح به الیاف پرداختند نتایج حاصل از آن نشان داد که افزایش مقاومت فشاری و میزان الیاف فولادی باعث بهبود رفتار خمشی ماتریس‌های بتنی مسلح به الیاف می‌شود [۹]. در مطالعه‌ای آزمایشگاهی که توسط وانگ<sup>۸</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۳ انجام شد، به بررسی بتن‌هایی با مقاومت زیاد و سنگ‌دانه‌های سبک پرداخته شد. در این پژوهش ۵ گروه مختلف از نمونه‌هایی بدون الیاف و با درصد مختلف الیاف فولادی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که رابطه‌ای لگاریتمی بین شکل‌پذیری و چقرمگی برقرار می‌باشد [۱۰]. مایکل<sup>۹</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی اثر اندازه نمونه‌ها در رفتار بعد از ترک خوردگی و انرژی شکست بتن‌های مسلح به الیاف فولادی پرداخته‌اند. در این پژوهش از آزمون خمش ۴ نقطه‌ای برای حصول نتایج استفاده شده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که نمونه‌هایی که دارای ابعاد بزرگ‌تر می‌باشند، مقاومت کششی و انرژی شکست کمتری دارند [۱۱]. بنکاردینو<sup>۱۰</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۳ به انجام آزمایشاتی به منظور مقایسه بین نتایج حاصل از آزمون خمش سه نقطه‌ای و آزمون خمش چهار نقطه‌ای در تیرهای بتنی مسلح به درصد‌های مختلف الیاف فولادی پرداختند. نتایج به دست آمده از این آزمایش نشان دهنده آن بود که با افزایش درصد‌های الیاف فولادی، شکل‌پذیری ماتریس‌های بتنی مسلح به الیاف افزایش می‌یابد [۱۲]. نوین<sup>۱۱</sup> و همکاران، در سال ۲۰۱۳ به بررسی تاثیر ابعاد نمونه‌ها روی رفتار خمشی کامپوزیت‌های پایه سیمانی مسلح به الیاف پرداختند. در این پژوهش از الیاف تابیده با درصد‌های حجمی مختلف در ماتریس بتنی استفاده شده است. نتایج نشان داد که رفتار خمشی نمونه‌هایی که مقاومت کششی کمتری دارند، نسبت به ابعاد نمونه‌ها وابستگی بیشتری دارد [۱۳]. در پژوهشی که توسط لاگرانژی<sup>۱۲</sup> در سال ۲۰۱۰ به انجام رسید، جهت‌گیری الیاف از طریق تجزیه و تحلیل‌های آماری با جزئیات مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان دهنده آن است که رفتار ماتریس‌های مسلح به الیاف فولادی به طور مستقیم مرتبط با متوسط جهت‌گیری الیاف و همچنین نوع توزیع جهت‌گیری الیاف می‌باشد [۱۴]. شی<sup>۱۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۹ به بررسی رابطه بین مقاومت کششی، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی در بتن‌های مسلح به الیاف پرداخته‌اند. نمونه‌ها، مسلح به درصد‌های مختلف

کمی افزایش می‌یابد، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و انرژی شکست ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد [۲]. یو<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۹ تاثیر نوع و درصد‌های حجمی مختلف الیاف روی رفتار خمشی FRCC ها را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش از ۴ نوع الیاف فولادی تابیده، قلاب‌دار و پلی اتیلن و پلی وینیل الکل با درصد‌های حجمی ۰/۴ و ۱/۲ درصد استفاده شده است. نتایج به دست آمده توسط آن‌ها نشان داد بهترین کارایی از نظر تحمل بار، جذب انرژی و ترک خوردگی‌های متعدد مربوط به کامپوزیت‌های مسلح به الیاف تابیده می‌باشد [۳]. آگوستینو کارل<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی رفتار چرخه‌ای بتن‌های مسلح با الیاف فولادی به میزان ۲، ۱ و ۳ درصد پرداخته درصد‌های مختلف و تاثیر افزایش درصد حجمی الیاف فولادی را در ماتریس‌های بتنی بررسی کردند. در نهایت یک مدل سازه‌ای برای کامپوزیت‌های فوق توانمند پیشنهاد نمودند [۴]. یانگ<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی اثر مقدار الیاف فولادی و میزان مسلح بودن در رفتار خمشی و برشی ماتریس‌های بتنی با مقاومت زیاد پرداختند. در نهایت دو مدل آزمایشگاهی برای پیش بینی رفتار خمشی و برشی ماتریس‌های مذکور پیشنهاد نمودند [۵]. لی<sup>۴</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۸ با استفاده از آزمون خمش ۴ نقطه‌ای به بررسی شکل‌پذیری ماتریس‌های بتنی مسلح به الیاف پلی پروپیلن و الیاف فولادی پرداختند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که ماتریس‌های بتنی مسلح به الیاف فولادی قلاب‌دار دارای شکل‌پذیری بیشتری می‌باشند [۶]. هان<sup>۵</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی ارتباط بین خصوصیات انتقال بار و چقرمگی در ماتریس‌های مسلح به الیاف فولادی بعد از ترک خوردگی پرداختند. نتایج حاصل از پژوهش آن‌ها نشان داد که نوع الیاف، تعداد الیاف و کاهش سطح مقطع بار در رفتار بعد از ترک خوردگی ماتریس‌های مسلح به الیاف فولادی موثر است [۷]. در پژوهشی که توسط لی<sup>۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۶ به انجام رسید رفتار کششی بتن‌های مسلح به الیاف فولادی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش نشان داد که با افزایش درصد حجمی و نسبت طول به قطر الیاف ماتریس‌های بتنی مسلح به درصد‌های مختلف الیاف شکل‌پذیری بیشتری را از خود نشان می‌دهند [۸]. یوول یو<sup>۷</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی اثر مقاومت فشاری ماتریس بتنی و میزان الیاف

8 Wang  
9 Michels  
10 Bencardino  
11 Nguyen  
12 Laranjeira  
13 Shi

1 Yoo<sup>۱</sup>  
2 Augusto Krahl  
3 Yang  
4 Li  
5 Han  
6 Lee  
7 Yeol Yoo

جدول ۱. طرح اختلاط ماتریس سیمانی با نسبت‌های وزنی به سیمان

Table 1. mix design matrix with cement weight ratio

ماتریس	سیمان	میکروسیلیس	نسبت سنگ‌دانه به سیمان	آب	فوق روان کننده
نسبت وزنی	۱	۰/۲۵	۱/۵۸	۰/۲۵	۰/۰۰۸

الیاف فولادی می‌باشند. میزان الیاف فولادی در محدوده ۰/۵ تا ۱ درصد حجم بتن به صورت تصادفی در ماتریس‌های پایه سیمانی توزیع شده است. ضرایب ۰/۹۴ و ۰/۹ به ترتیب برای رابطه بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی و همچنین رابطه بین مقاومت کششی و مقاومت خمشی به دست آمده است [۱۵]. دهقانی و همکاران در سال ۲۰۰۸ به بررسی خصوصیات کششی، فشاری و خمشی کامپوزیت‌های توانمند سیمانی مهندسی ECC<sup>۱</sup> پرداخته‌اند. در این پژوهش برای بررسی رفتار خمشی این کامپوزیت‌ها از آزمون خمش چهار نقطه‌ای استفاده شده است. نتایج حاصل نشان دهنده رفتار بسیار مطلوب این کامپوزیت‌ها در جهت مقاوم‌سازی سازه‌ها می‌باشد [۱۶].

کیم<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۸ بر تاثیر نوع و درصد‌های حجمی مختلف الیاف روی رفتار خمشی FRCC<sup>۲</sup> ها، مطالعاتی را انجام دادند. در این پژوهش از ۴ نوع الیاف مختلف شامل الیاف فولادی تاییده، الیاف فولادی قلاب‌دار، الیاف پلی اتیلن و الیاف پلی وینیل الکل با درصد‌های حجمی ۰/۴ و ۱/۲ درصد استفاده نمودند. نتایج به دست آمده نشان داد کامپوزیت‌هایی که در آن‌ها از الیاف تاییده استفاده شده است بهترین کارایی را از نظر تحمل بار و جذب انرژی دارا می‌باشد [۱۷]. در راستای کامل نمودن تحقیقات گذشته مطالعه اثر سه نوع متفاوت از الیاف فولادی درامیکس و مقادیر متفاوت آن‌ها در ماتریس بتنی همچنین مطالعه اثر همخوانی مقاومت فشاری ماتریس بتنی و مقاومت کششی انواع الیاف فولادی درامیکس در ماتریس‌های بتنی مسلح به الیاف ضروری می‌باشد.

مختلف الیاف روی رفتار خمشی FRCC<sup>۲</sup> ها، مطالعاتی را انجام دادند. در این پژوهش از ۴ نوع الیاف مختلف شامل الیاف فولادی تاییده، الیاف فولادی قلاب‌دار، الیاف پلی اتیلن و الیاف پلی وینیل الکل با درصد‌های حجمی ۰/۴ و ۱/۲ درصد استفاده نمودند. نتایج به دست آمده نشان داد کامپوزیت‌هایی که در آن‌ها از الیاف تاییده استفاده شده است بهترین کارایی را از نظر تحمل بار و جذب انرژی دارا می‌باشد [۱۷]. در راستای کامل نمودن تحقیقات گذشته مطالعه اثر سه نوع متفاوت از الیاف فولادی درامیکس و مقادیر متفاوت آن‌ها در ماتریس بتنی همچنین مطالعه اثر همخوانی مقاومت فشاری ماتریس بتنی و مقاومت کششی انواع الیاف فولادی درامیکس در ماتریس‌های بتنی مسلح به الیاف ضروری می‌باشد.

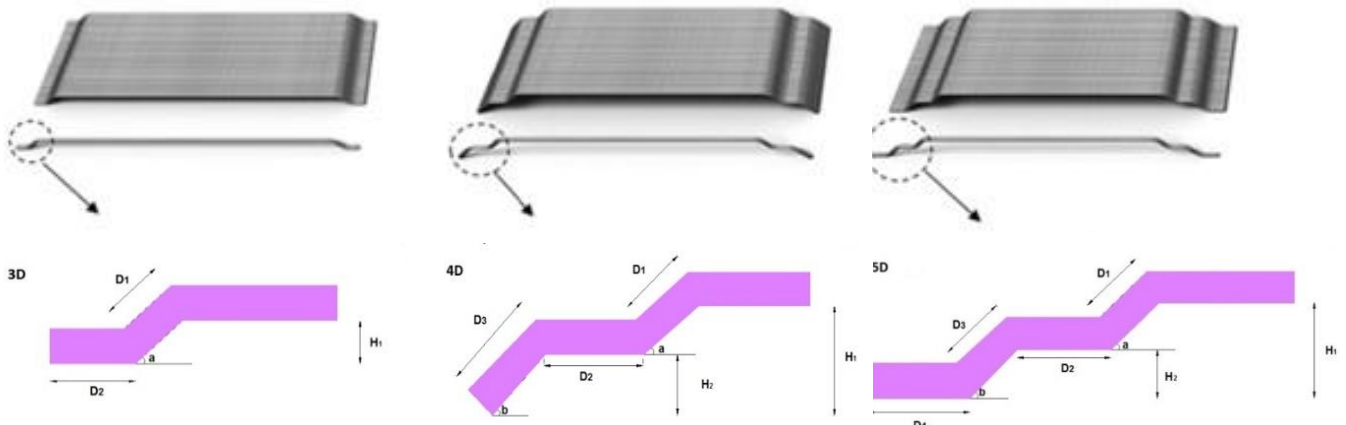
۲-۱- نحوه انجام آزمایش

همان گونه که در شکل ۳ قابل مشاهده است، به منظور اندازه‌گیری تغییر مکان وسط دهانه تیر، از قاب فلزی استفاده شده است. به کمک این قاب می‌توان از تغییر شکل‌های ناشی از نشست‌های تکیه‌گاهی و چرخش نمونه هنگام بارگذاری جلوگیری نمود. قاب در وسط ارتفاع مقطع به کمک چهار پیچ در نقاط A و B به نمونه متصل می‌شود. تنها دو پیچ از چهار پیچ به طور ثابت عمل نموده، دو پیچ دیگر اجازه تغییر مکان افقی را به قاب می‌دهند. بدین ترتیب هنگام بارگذاری، تغییر شکلی در قاب ایجاد نمی‌شود. تغییر مکان وسط دهانه به کمک دو تغییر مکان سنج اندازه‌گیری می‌شود که در دو وجه تیر به قاب متصل هستند. متوسط مقادیر این تغییر مکان‌سنج‌ها به عنوان تغییر مکان خالص وسط دهانه در نظر گرفته می‌شود. نیروی وارده

۲- برنامه آزمایشگاهی

در جدول ۱، نسبت‌های وزنی ماتریس مورد استفاده، ارائه شده است. به دلیل اینکه الیاف فولادی مورد استفاده دارای مقاومت کششی بالایی هستند،

- 1 Engineered Cementitious Composite
- 2 Kim



شکل ۱. الیاف مورد استفاده

Fig. 1. Applied fiber

جدول ۲. مشخصات هندسی و مکانیکی الیاف

Table 2. Geometrical and mechanical characteristics of fiber

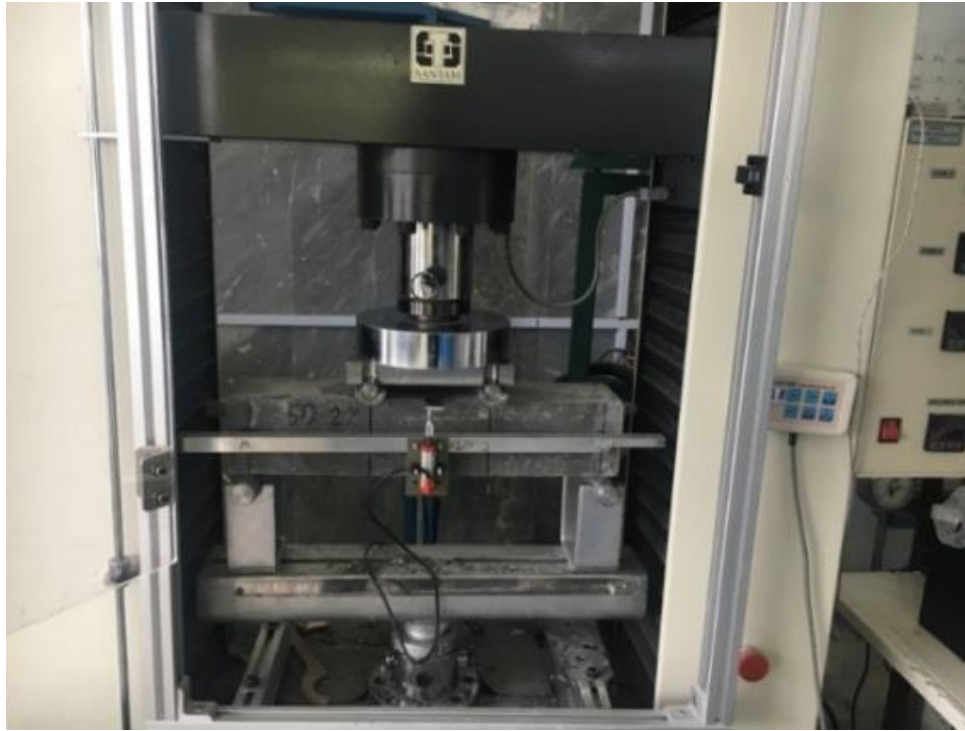
طول قلاب (mm)				زاویه قلاب (درجه)		ارتفاع قلاب (mm)		مقاومت کششی (Mpa)	مدول یانگ (GPa)	نوع الیاف
D1	D2	D3	D4	a	b	H1	H2			
۲/۱۲	۲/۹۵	-	-	۴۵/۷	۴۵/۵	۱/۸۵	-	۱۱۶۰	۲۱۰	3D 65/60 BG
۲/۹۸	۲/۶۲	۳/۰۵	-	۳۰/۱	۳۰/۸	۴/۳۷	۲/۲	۱۵۰۰	۲۱۰	4D 65/60 BG
۲/۵۷	۲/۳۸	۲/۵۷	۲/۵۶	۲۷/۹	۲۸/۲	۲/۹۶	۱/۵۷	۲۳۰۰	۲۱۰	5D 65/60 BG

آزمایش‌ها در مرکز تحقیقات نوین مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی اراک انجام شده است.

### ۳- نتایج آزمون خمشی

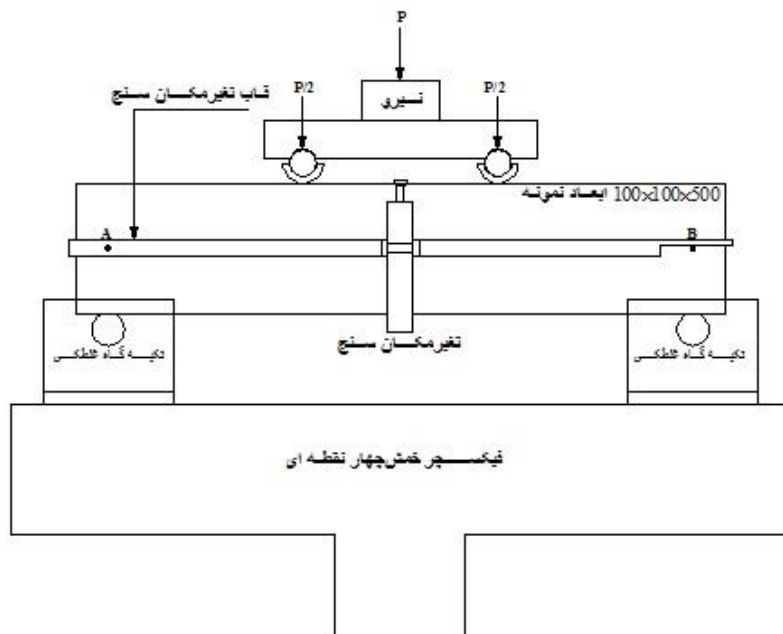
ارزیابی مشخصات مکانیکی ماتریس‌های بتنی مسلح به الیاف از طریق بررسی پارامترهایی شامل ظرفیت تغییر مکان، نحوه ترک خوردگی، میزان جذب انرژی و ظرفیت باربری صورت گرفته است.

بر نمونه به کمک نیروسنج متصل به بازوی محرک دستگاه اندازه‌گیری می‌شود. به منظور ثبت نیروسنج و تغییر مکان‌سنج‌ها از دستگاه ثبت داده‌ها استفاده شده است. برای بارگذاری نمونه‌ها، جک هیدرولیکی با قابلیت بار به صورت کنترل تغییر مکان، مورد استفاده قرار گرفته است. سرعت بارگذاری نمونه‌ها ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه می‌باشد. ابعاد نمونه‌ها ۵۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر مکعب و دهانه خالص بارگذاری ۴۵۰ میلی‌متر می‌باشد. در انجام آزمایشات از ASTM C۱۶۰۹ استفاده شده است. جهت انجام آزمایش از دستگاه مدل STM-۲۵۰ ساخت شرکت سنتام استفاده شده است.



شکل ۲. نحوه بارگذاری آزمایش مقاومت خمشی

Fig.2. Method of loading the flexural strength test



شکل ۳. چیدمان آزمایش مقاومت خمشی

Fig. 3. Setup of flexural strength

جدول ۳. نمونه‌های مسلح به ۱ درصد الیاف

Table 3. 1% fiber reinforced specimen

نوع الیاف	نیروی ترک خوردگی (kN)	تغییر مکان متناظر (μm)	حداکثر نیرو (kN)	تغییر مکان متناظر (μm)
3D	۱۰/۸۸	۱	۲۱/۷۷	۲۱۵
4D	۱۱/۵۷	۱	۲۲/۱۰	۳۵۸
5D	۱۰/۷۰	۲	۲۱/۴۲	۲۸۱

جدول ۴. نمونه‌های مسلح به ۲ درصد الیاف

Table 4. 2% fiber reinforced specimen

نوع الیاف	نیروی ترک خوردگی (kN)	تغییر مکان متناظر (μm)	حداکثر نیرو (kN)	تغییر مکان متناظر (μm)
3D	۱۶/۸۲	۱/۵	۲۱/۷۷	۴۵۵
4D	۱۸/۳۶	۱/۵	۲۲/۱۰	۵۳۶
5D	۱۳/۸۳	۲	۲۱/۴۲	۶۱۷

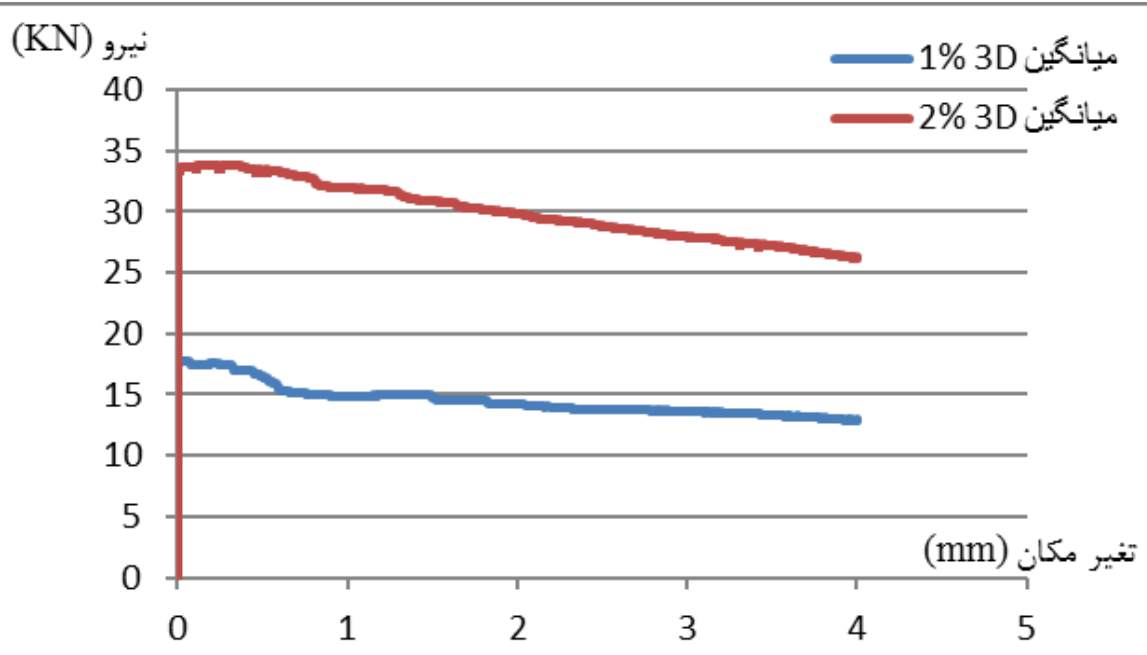
### ۳-۱- رفتار خمشی نمونه‌ها

رفتار خمشی نمونه‌های مسلح به ۱ و ۲ درصد الیاف فولادی ۳D، ۴D و ۵D به کمک جداول و نمودار نیرو- تغییر مکان توصیف و تفسیر شده است.

با توجه به جداول ۳ و ۴، تمامی نمونه‌های مسلح به یک درصد حجمی الیاف ۳D با افزایش ظرفیت باربری رفتار سخت شوندگی محدود تغییر مکانی و سپس نرم شدگی تغییر مکانی را بروز داده‌اند در حالی که در نمونه‌های مسلح به دو درصد حجمی الیاف ۳D این رفتار بهبود یافته و با افزایش ظرفیت باربری رفتار سخت شدگی تغییر مکانی صورت گرفت. در نمونه‌های مسلح به یک و دو درصد حجمی الیاف ۴D و ۵D به دلیل وجود مهارهای مکانیکی بیشتر، با افزایش ظرفیت باربری، رفتار سخت شدگی تغییر مکانی صورت پذیرفت. با توجه به جداول ۳ و ۴، تغییر مکان نظیر ترک خوردگی به درصد حجمی الیاف وابسته نیست در حالی که تغییر مکان نظیر

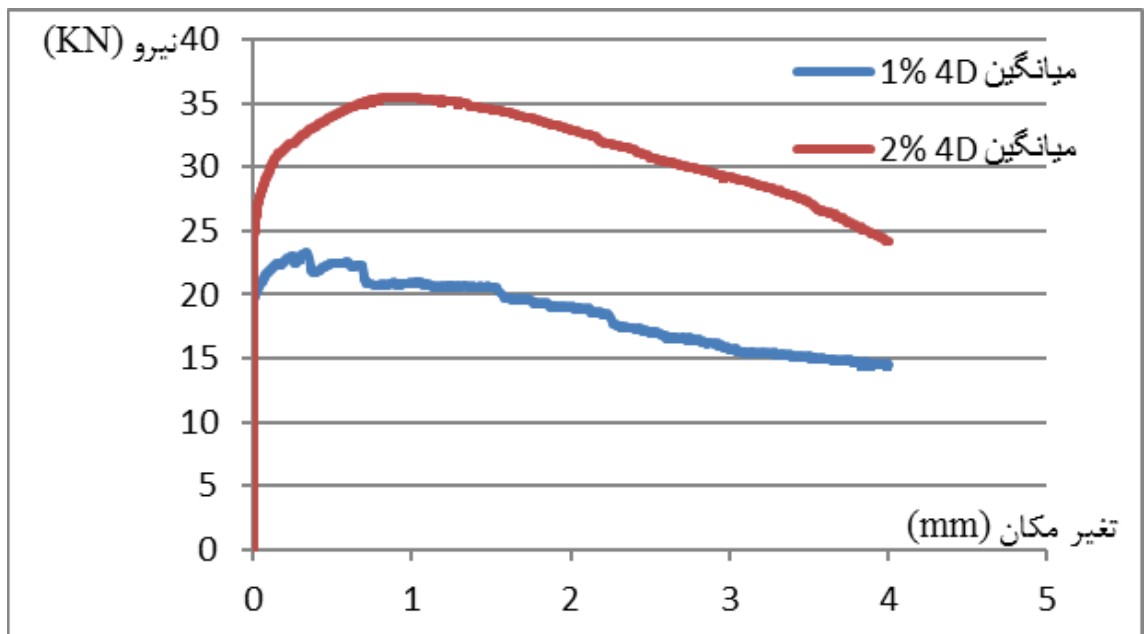
حداکثر نیرو به میزان زیادی به رفتار مصالح وابسته است، به طوری که با به وجود آمدن رفتار سخت شدگی پس از ترک خوردگی اولیه همراه با افزایش ظرفیت باربری، ظرفیت تغییر مکان نیز افزایش می‌یابد.

همان‌گونه که در نمودارهای فوق مشاهده می‌شود با افزایش درصد حجمی الیاف به دلیل افزایش ظرفیت پل زنی ترک، در تمام المان‌های خمشی مسلح به الیاف ۳D، ۴D و ۵D نمونه ظرفیت باربری بیشتری دارد پل نی ترک را در شکل ۷ نشان داده شده است. در نمونه‌های مسلح به الیاف ۴D به دلیل وجود مفاصل پلاستیک بیشتر نسبت به نمونه‌های مسلح به الیاف ۳D نمونه بار بیشتری تحمل می‌نماید. در نمونه‌های مسلح به الیاف ۵D با توجه به میزان مقاومت فشاری ماتریس بتنی و مقاومت کششی بسیار بالای الیاف فولادی ۵D قبل از اینکه الیاف فولادی به حد تسلیم خود برسند و تمام مفاصل پلاستیک در الیاف ۵D تشکیل شوند، ماتریس بتنی در وجه فشاری دچار خرد شدگی می‌گردد و ظرفیت باربری کاهش می‌یابد.



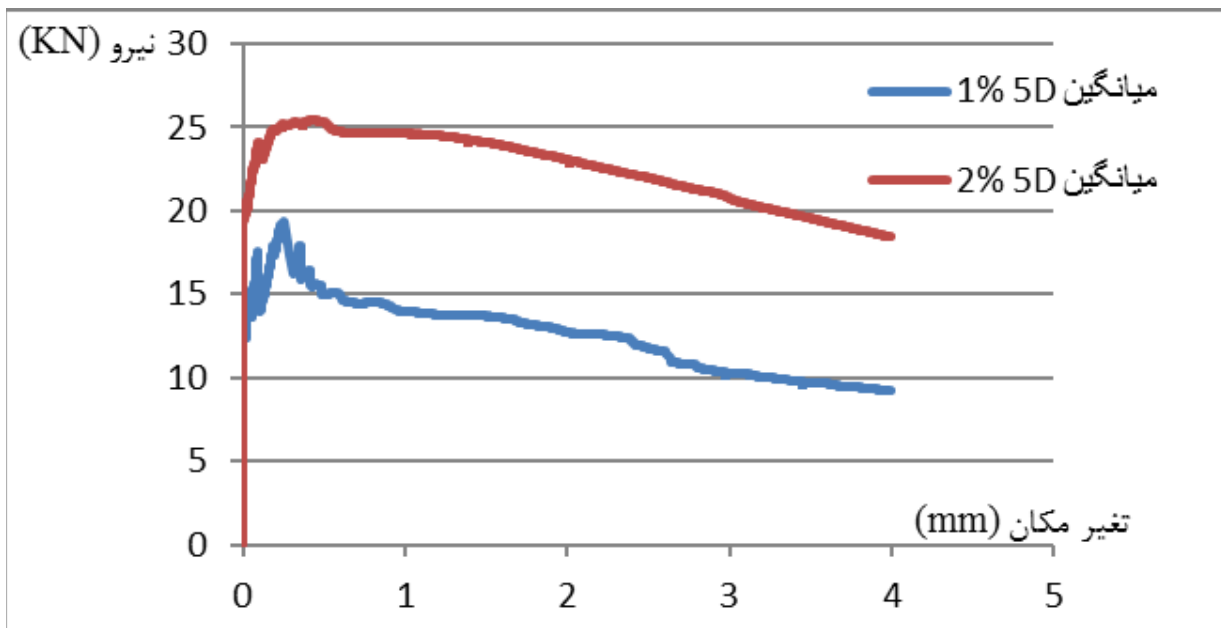
شکل ۴. تاثیر درصد الیاف در منحنی نیرو- تغییر مکان نمونه‌های مسلح به الیاف ۳D

Fig. 4. Effect of fiber percentage on load-displacement curve in 3D fiber-reinforced specimen



شکل ۵. تاثیر درصد الیاف در منحنی نیرو- تغییر مکان نمونه‌های مسلح به الیاف ۴D

Fig. 5. Effect of fiber percentage on load-displacement curve in 4D fiber-reinforced specimen



شکل ۶. تاثیر درصد الیاف در منحنی نیرو- تغییر مکان نمونه‌های مسلح به الیاف ۵D

Fig. 6. Effect of fiber percentage on load-displacement curve in 5D fiber-reinforced specimen



شکل ۷. پل زنی ترک

Fig. 7. Bridging the crack

ترک، به دلیل بروز رفتار سخت شدگی محدود نمونه گسیخته می‌شود. در نمونه‌های مسلح به دو درصد الیاف ۳D و در نمونه‌های مسلح به یک و دو درصد الیاف ۴D و ۵D به دلیل بروز رفتار سخت شدگی، پس از ایجاد اولین ترک، ترک‌های متعدد دیگری نیز تشکیل شده و ظرفیت باربری افزایش یافته و با افزایش نیرو ترک‌های ریز در جهات مختلف ایجاد و به هم متصل شده، با تشکیل ترک بزرگ نمونه گسیخته می‌شود.

۳-۲- ترک خوردگی

شکل ۸ نحوه ترک خوردگی نمونه‌های مسلح به ۱ و ۲ درصد الیاف ۳D، ۴D و ۵D را نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود قسمت الف ترک خوردگی اولیه نمونه‌ها و قسمت ب ترک‌های ایجاد شده پس از اتمام آزمایش را نشان می‌دهد. در نمونه‌های مسلح به یک درصد الیاف ۳D پس از ایجاد اولین





(الف)

(ب)

شکل ۸. نحوه ترک خوردگی نمونه‌ها

Fig. 8. Crack line in specimen

جدول ۵. میانگین میزان جذب انرژی برای ماتریس‌های بتنی مسلح به ۱ و ۲ درصد الیاف ۳D، ۴D و ۵D

Table 5. Mean tension absorption for 1% and 2% 3D, 4D, and 5D fiber reinforced concrete matrix

نوع الیاف	میزان الیاف	میانگین میزان جذب انرژی (J)
3D	٪۱	۱۸۴۶۶/۷
	٪۲	۵۸۲۳۳/۳
4D	٪۱	۲۴۶۳۳/۳
	٪۲	۷۰۳۳۳/۳
5D	٪۱	۱۸۴۳۳/۳
	٪۲	۲۳۹۶۶/۷

۳-۳- جذب انرژی

تأثیر افزایش درصد حجمی الیاف در قابلیت جذب انرژی در جدول ۵ نشان داده شده است. سطح زیر نمودار نیرو - تغییر مکان، به عنوان میزان جذب انرژی تعریف می‌شود.

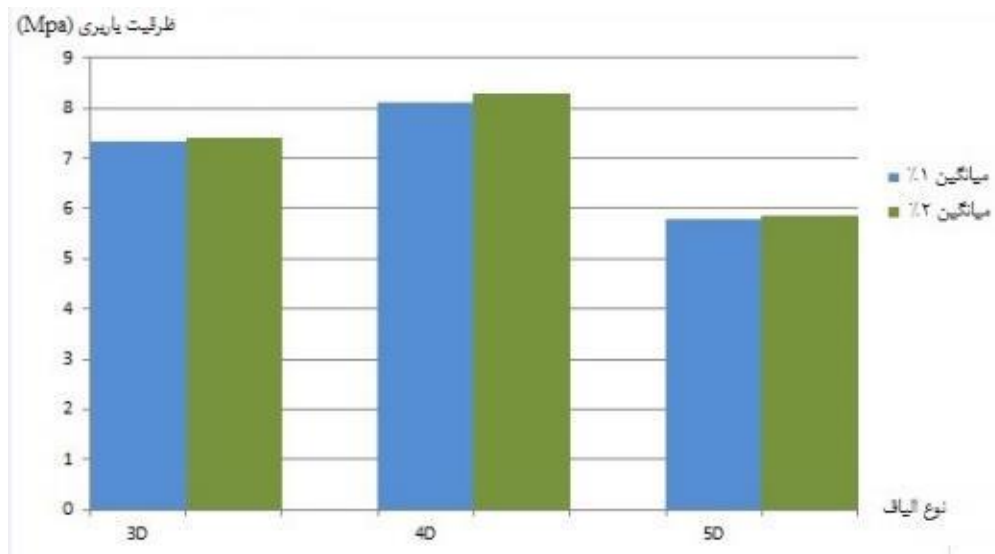
همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود با افزایش درصد حجمی الیاف در ماتریس بتنی، به دلیل این که انرژی لازم جهت بیرون کشیدگی الیاف فولادی و گسیختگی الیاف در مراحل شکست افزایش می‌یابد، میزان جذب انرژی نیز افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر به دلیل این که بعد از ترک خوردگی میزان پل زنی ترک در ماتریس بتنی افزایش می‌یابد میزان جذب انرژی نیز افزایش می‌یابد به طوری که میانگین میزان جذب انرژی در نمونه‌های مسلح به دو درصد الیاف ۳D نسبت به نمونه‌های مسلح به یک درصد الیاف ۳D، تقریباً ۶۸ درصد افزایش یافته است. میانگین میزان جذب انرژی در نمونه‌های مسلح به دو درصد الیاف ۴D نسبت به نمونه‌های مسلح به یک درصد الیاف ۴D، تقریباً ۶۵ درصد افزایش یافته است. همچنین میانگین میزان جذب انرژی در نمونه‌های مسلح به دو درصد الیاف ۵D نسبت به نمونه‌های مسلح به یک درصد الیاف ۵D، تقریباً ۲۳ درصد افزایش یافته است.

همچنین با توجه به مقاومت فشاری ماتریس بتنی و به دلیل اینکه الیاف ۵D مقاومت کششی بسیار بالایی دارند، قبل از اینکه در الیاف مذکور مفاصل پلاستیک تشکیل و جاری شوند، ماتریس بتنی دچار خرد شدگی در وجه فشاری خود می‌گردد که باعث می‌شود ماتریس‌های بتنی مسلح به الیاف ۵D قابلیت جذب انرژی کمتری را داشته باشند. همچنین مشاهده می‌شود بیشترین میزان جذب انرژی به دلیل تشکیل مفاصل پلاستیک در الیاف و جاری شدن آن‌ها در نمونه‌های مسلح به الیاف ۴D اتفاق افتاده است.

۳-۴- ظرفیت باربری

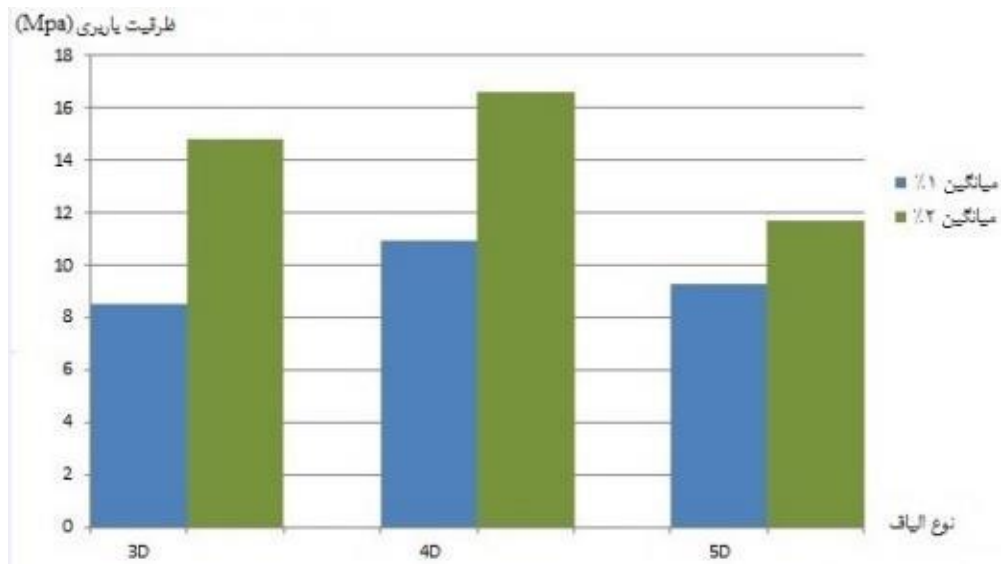
همان‌طور در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود تأثیر میزان افزایش درصد حجمی الیاف فولادی بر ظرفیت باربری قبل و بعد از ترک خوردگی قابل ملاحظه می‌باشند.

همان‌گونه که در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده است، افزایش درصد حجمی الیاف تأثیر چندانی بر مقدار تنش در نقطه حد تناسب نداشته، تغییرات قابل ملاحظه تنش بعد از این نقطه رخ می‌دهد. با مقایسه نمونه‌های مسلح به یک درصد الیاف ۳D قبل از ترک خوردگی با نمونه‌های مسلح به ۱ درصد الیاف ۳D بعد از ترک خوردگی مشاهده می‌شود میزان ظرفیت باربری تقریباً



شکل ۹. تاثیر افزایش درصد حجمی الیاف فولادی بر ظرفیت باربری بعد از ترک خوردگی

Fig.9. Effect of increased percentage of steel fiber in loading capacity before cracking



شکل ۱۰. تاثیر افزایش درصد حجمی الیاف فولادی بر ظرفیت باربری قبل از ترک خوردگی

Fig. 10. Effect of increased percentage of steel fiber in loading capacity after cracking

به الیاف ۳D با افزایش ظرفیت باربری، رفتار سخت شدگی تغییر مکانی صورت پذیرفت.

به دلیل اینکه بروز رفتار سخت شدگی سبب افزایش ظرفیت باربری مصالح بعد از ایجاد اولین ترک می‌شود در نمونه‌های مسلح به ۱ درصد الیاف ۳D پس از ایجاد اولین ترک، با توجه به بروز رفتار سخت شدگی محدود نمونه گسیخته می‌شود. در نمونه‌های مسلح به ۲ درصد الیاف ۳D و در نمونه‌های مسلح به ۱ و ۲ درصد الیاف ۴D و ۵D به دلیل بروز رفتار سخت شدگی، پس از ایجاد اولین ترک، ترک‌های متعدد دیگری نیز تشکیل شده و ظرفیت باربری افزایش یافته و با افزایش نیرو ترک‌های ریز ایجاد شده به هم متصل شده، با تشکیل ترک بزرگ نمونه گسیخته می‌شود.

با افزایش درصد حجمی الیاف به دلیل این که بعد از ترک خوردگی میزان پل زنی ترک در ماتریس بتنی افزایش می‌یابد میزان جذب انرژی نیز افزایش یافته به طوری که میانگین میزان جذب انرژی در نمونه‌های مسلح به ۲ درصد الیاف ۳D نسبت به نمونه‌های مسلح به ۱ درصد الیاف ۳D، افزایش یافته و میانگین میزان جذب انرژی در نمونه‌های مسلح به ۲ درصد الیاف ۴D نسبت به نمونه‌های مسلح به ۱ درصد الیاف ۴D، افزایش یافته و همچنین میانگین میزان جذب انرژی در نمونه‌های مسلح به ۲ درصد الیاف ۵D نسبت به نمونه‌های مسلح به ۱ درصد الیاف ۵D، افزایش یافته است. به دلیل اینکه میزان تاثیرگذاری الیاف به درصد حجمی آن وابسته می‌باشد و افزایش درصد حجمی الیاف قبل از ترک خوردگی تاثیری در افزایش ظرفیت باربری نمونه‌ها نمی‌گذارد و همچنین پس از ایجاد ترک با افزایش درصد حجمی الیاف فولادی، ظرفیت باربری نیز افزایش می‌یابد، مشاهده می‌شود که ظرفیت باربری نمونه مسلح به ۲ درصد الیاف ۳D، تقریباً به میزان ۴۲ درصد نسبت به نمونه مسلح به ۱ درصد الیاف ۳D افزایش یافته، همچنین ظرفیت باربری نمونه مسلح به ۲ درصد الیاف ۴D تقریباً به میزان ۳۴ درصد نسبت به نمونه مسلح به ۱ درصد الیاف ۴D افزایش پیدا کرده و ظرفیت باربری نمونه مسلح به ۲ درصد الیاف ۵D تقریباً به میزان ۲۱ درصد نسبت به نمونه مسلح به ۱ درصد الیاف ۵D افزایش یافته است.

## منابع

- [1] A.E. Naaman, High performance fiber reinforced cement composites: classification and applications, CBM-CI international workshop, Karachi, Pakistan, (2007) 389–401.
- [2] J. Han, M. Zhao, J. Chen, X. Lan, Effects of steel fiber

۱۴ درصد افزایش یافته، همچنین ظرفیت باربری نمونه‌های مسلح به ۱ درصد الیاف ۴D بعد از ترک خوردگی تقریباً ۲۶ درصد نسبت به نمونه‌های مشابه قبل از ترک خوردگی افزایش یافته و ظرفیت باربری نمونه‌های مسلح به ۱ درصد الیاف ۵D بعد از ترک خوردگی تقریباً ۳۸ درصد بیشتر از نمونه‌های مشابه قبل از ترک خوردگی می‌باشند. همچنین ظرفیت باربری نمونه‌های مسلح به ۲ درصد الیاف ۳D، ۴D و ۵D، بعد از ترک خوردگی تقریباً ۵۰ درصد بیشتر از نمونه‌های مسلح به ۲ درصد الیاف مذکور قبل از ترک خوردگی می‌باشند. این مطالب بیانگر آن است که الیاف، تاثیر چندانی بر رفتار قبل از ترک خوردگی ماتریس نداشته‌اند، بلکه بیشترین تاثیر آن‌ها بعد از ایجاد ترک و از طریق پل زنی بین سطوح ترک می‌باشد. همانطور که در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود ظرفیت باربری نمونه مسلح به ۲ درصد الیاف ۳D، تقریباً به میزان ۴۲ درصد نسبت به نمونه مسلح به ۱ درصد الیاف ۳D افزایش یافته، همچنین ظرفیت باربری نمونه مسلح به ۲ درصد الیاف ۴D تقریباً به میزان ۳۴ درصد نسبت به نمونه مسلح به ۱ درصد الیاف ۴D افزایش پیدا کرده و ظرفیت باربری نمونه مسلح به ۲ درصد الیاف ۵D تقریباً به میزان ۲۱ درصد نسبت به نمونه مسلح به ۱ درصد الیاف ۵D افزایش یافته است. بنابراین، میزان تاثیرگذاری الیاف به درصد حجمی آن وابسته می‌باشد. به طوری که افزایش درصد حجمی الیاف قبل از ترک خوردگی تاثیری در افزایش ظرفیت باربری نمونه‌ها نداشته اما پس از ایجاد ترک با افزایش درصد حجمی الیاف فولادی، ظرفیت باربری افزایش می‌یابد.

## ۴- نتیجه گیری

در این مقاله مشخصات مکانیکی کامپوزیت‌های پایه سیمانی مسلح به الیاف فولادی، مورد بررسی قرار گرفت. الیاف فولادی به کار رفته ۳D، ۴D و ۵D که با درصد‌های حجمی متفاوت (۱٪ و ۲٪) به ماتریس سیمانی اضافه شده است. ارزیابی مشخصات مکانیکی این کامپوزیت‌ها از طریق بررسی پارامترهایی شامل ظرفیت تغییر مکان، نحوه ترک خوردگی، میزان جذب انرژی و ظرفیت باربری صورت گرفته است.

در نمونه‌های مسلح به الیاف ۳D تمامی نمونه‌های مسلح به ۱ درصد حجمی الیاف با افزایش ظرفیت باربری رفتار سخت شونده محدود تغییر مکانی و سپس نرم شدگی تغییر مکانی را بروز داده‌اند، در حالی که در نمونه‌های مسلح به ۲ درصد حجمی الیاف ۳D با افزایش ظرفیت باربری، رفتار سخت شدگی تغییر مکانی صورت گرفته است. در نمونه‌های مسلح به ۱ و ۲ درصد الیاف ۴D و ۵D به دلیل وجود مهارهای مکانیکی بیشتر نسبت

- and dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 38 (2013) 1146-1151.
- [11] J. Michels, R. Christen, D. Waldmann, Experimental and numerical investigation on postcracking behavior of steel fiber reinforced concrete, *Engineering Fracture Mechanics*, 98 (2013) 326-349.
- [12] F. Bencardino, L. Rizzuti, G. Spadea, R.N. Swamy, Implications of test methodology on post-cracking and fracture behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete, *Composites Part B: Engineering*, 46 (2013) 31-38.
- [13] D.L. Nguyen, D.J. Kim, G.S. Ryu, K.T. Koh, Size effect on flexural behavior of ultra-high-performance hybrid fiber-reinforced concrete, *Composites Part B: Engineering*, 45(1) (2013) 1104-1116.
- [14] F. Laranjeira de Oliveira, Design-oriented constitutive model for steel fiber reinforced concrete, *Universitat Politècnica de Catalunya*, 2010.
- [15] B.W. Xu, H.S. Shi, Correlations among mechanical properties of steel fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 23(12) (2009) 3468-3474.
- [16] a. Dehghani, Nateghi, f and Alaei, f, Experimental estimation of pva fiber reinforced cement composite engineering parameters, *shahrood University*, (2008).
- [17] D. Kim, j., Naaman, AE, & El-Tawil, S.(2008). Comparitive flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites, *Cement and Concrete Composites*, 30(10) 917-928.
- length and coarse aggregate maximum size on mechanical properties of steel fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 209 (2019) 577-591.
- [3] D.-Y. Yoo, S. Kim, J.-J. Kim, B. Chun, An experimental study on pullout and tensile behavior of ultra-high-performance concrete reinforced with various steel fibers, *Construction and Building Materials*, 206 (2019) 46-61.
- [4] P.A. Krahl, G.d.M.S. Gidrão, R. Carrazedo, Cyclic behavior of UHPFRC under compression, *Cement and Concrete Composites*, 104 (2019) 103363.
- [5] J.-M. Yang, J.-K. Kim, D.-Y. Yoo, Flexural and shear behaviour of high-strength SFRC beams without stirrups, *Magazine of Concrete Research*, 71(10) (2019) 503-518.
- [6] B. Li, Y. Chi, L. Xu, Y. Shi, C. Li, Experimental investigation on the flexural behavior of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 191 (2018) 80-94.
- [7] Y.-J. Han, S.-K. Oh, B. Kim, Effect of Load Transfer Section to Toughness for Steel Fiber-Reinforced Concrete, *Applied Sciences*, 7(6) (2017).
- [8] S.-C. Lee, J.-H. Oh, J.-Y. Cho, Fiber efficiency in SFRC members subjected to uniaxial tension, *Construction and Building Materials*, 113 (2016) 479-487.
- [9] D.-Y. Yoo, Y.-S. Yoon, N. Banthia, Flexural response of steel-fiber-reinforced concrete beams: Effects of strength, fiber content, and strain-rate, *Cement and Concrete Composites*, 64 (2015) 84-92.
- [10] H.T. Wang, L.C. Wang, Experimental study on static

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. A. H. Madani, S. M. Mirhosseini, E. Zeighamie, A. Nezamabadi, *The Study of Characteristics of High-Performance Cement Base Material Reinforced with Dramix Steel Fiber*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(1) (2022) 363-376.

DOI: 10.22060/ceej.2021.18287.6970

