



ارزیابی مشخصات خمشی مصالح پایه سیمانی با عملکرد بالا مسلح به الیاف قلابدار فولادی

احسان اله ضیغمی^{۱*}، فرشید جندقی علایی^۲ و منصور جامعی^۳^۱ دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشگاه شاهرود^۲ دانشیار دانشکده عمران و معماری، دانشگاه شاهرود^۳ کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشگاه شاهرود

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۸/۲۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۳/۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۴/۰۷

چکیده

در تحقیق حاضر، مشخصات مکانیکی کامپوزیت‌های پایه سیمانی مسلح به درصد‌های حجمی مختلف الیاف (۱٪ و ۲٪)، مورد بررسی قرار گرفته است. ماتریس سیمانی، دارای مقاومت فشاری ۴۹ مگاپاسکال و الیاف بکار رفته فولادی و قلابدار هستند. آزمون خمشی بر اساس دو استاندارد ASTM C1609 و ASTM C1801 انجام شده، پارامترهای خمشی شامل، ظرفیت باربری، میزان جذب انرژی، ظرفیت تغییر مکان و نحوه ترک‌خوردگی ارزیابی و مقایسه شده‌اند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که افزایش درصد حجمی الیاف از ۱٪ به ۲٪، سبب تغییر رفتار مصالح از نرم‌شدگی به سخت‌شدگی تغییر مکانی می‌شود. علاوه بر این بروز رفتار سخت‌شدگی، سبب بهبود مشخصات مکانیکی مصالح می‌شود. بیشترین تأثیر رفتار سخت‌شدگی، در افزایش ظرفیت تغییر مکان بوده، هرچند این رفتار ظرفیت باربری و میزان جذب انرژی مصالح را نیز بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. علاوه بر این بروز رفتار سخت‌شدگی، سبب تغییر نحوه ترک‌خوردگی مصالح می‌شود و در این حالت، گسیختگی نمونه‌ها از طریق ایجاد ترک خوردگی‌های متعدد است.

کلمات کلیدی: کامپوزیت‌های پایه سیمانی؛ نرم‌شدگی و سخت‌شدگی تغییر مکانی؛ ظرفیت باربری؛ میزان جذب انرژی؛ ظرفیت تغییر مکان

Flexural behavior of high performance cementitious composites reinforced with hooked steel fibers

E. Zeighami^{1*}, F.J. Alaei² and M. Jamee³¹ Ph.D. Candidate, Structural Eng., Shahrood Univ., Shahrood, Iran² Assoc. Prof., Civil Eng., Shahrood Univ., Shahrood, Iran³ M.Sc., Structural Eng., Shahrood Univ., Shahrood, Iran

Abstract

This research investigates the mechanical properties of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC) with two volume fractions of fiber (1% and 2%). Hooked steel fibers were incorporated into a mortar matrix with 49 MPa compressive strength. Four point bending tests were carried out according to ASTM C1018 and ASTM C1609 Standards. Parameters such as: load carrying capacity (equivalent bending strength), energy absorption capacity (toughness), deflection, and cracking patterns (number of cracks), were evaluated to investigate the flexural behavior of two HPFRCCs. It was found that the increase in fiber volume fraction not only promotes the flexural behavior from deflection softening to deflection hardening, but also improves all mechanical properties. Deflection capacity gains the most from deflection hardening behavior. Besides, substantial increase in load carrying capacity and energy absorption is also achieved. It was observed that HPFRCC with deflection hardening behavior exhibits multiple cracking in the post cracking behavior.

Keywords: Cementitious Matrix; Deflection Softening and Hardening; Load Carrying Capacity; Energy Absorption; Deflection Capacity

۱- مقدمه

اضافه کردن درصد کمی الیاف کوتاه به صورت تصادفی به ماتریس سیمانی، سبب بهبود رفتار مکانیکی آن شده که معمولاً به عنوان کامپوزیت سیمانی مسلح شده با الیاف^۱ (FRCC) شناخته می‌شود. کامپوزیت‌های سیمانی مسلح به الیاف در مقایسه با بتن‌های غیرمسلح، مقاومت و شکل‌پذیری نسبتاً بالاتری از خود نشان می‌دهند. عملکرد کامپوزیت‌های سیمانی مسلح شده با الیاف را می‌توان تا جایی بهبود بخشید که گسیختگی خمشی از طریق ایجاد ترک‌های متعدد^۲ رخ دهد. در صورت بروز چنین رفتاری، این مصالح را کامپوزیت‌های سیمانی مسلح شده با الیاف با سخت‌شدگی تغییرمکانی^۳ (DHFRC) می‌نامند. ارتباط بین کامپوزیت‌هایی با رفتار سخت‌شدگی تغییرمکانی و کامپوزیت‌هایی که از خود رفتار سخت‌شدگی کرنشی نشان می‌دهند، توسط Naaman مورد بررسی قرار گرفته است [۱]. او نشان داد، در صورتی که رفتار خمشی بخواهد سخت‌شدگی تغییرمکانی از خود نشان دهد، متوسط مقاومت پس از ترک‌خوردگی در کشش باید در حدود یک سوم مقاومت ترک‌خوردگی باشد؛ بنابراین برای به دست آوردن پاسخ سخت‌شدگی تغییرمکانی نسبت به رفتار سخت‌شدگی کرنشی، مقدار بسیار کمتری از الیاف مورد نیاز است. علاوه بر این، Naaman به فرمول‌بندی یک رابطه برای محاسبه نسبت حجمی بحرانی الیاف برای رسیدن به رفتار سخت‌شدگی تغییرمکانی پرداخت. در سال‌های اخیر، Soranakom و Mobasher به بررسی رابطه بین پاسخ کششی و پاسخ خمشی FRCC ها پرداخته و معادلاتی را برای پیش‌بینی رفتار خمشی FRCC ها بر اساس پاسخ کششی تک‌محوره و پاسخ فشاری آنها ارائه نمودند [۲]. آنها همچنین به ارائه پیشنهاداتی در خصوص بدست‌آوردن رفتار کششی FRCC ها با استفاده از محاسبات بازگشتی از روی آزمایش خمش پرداختند.

عملکرد FRCC به عوامل بسیاری مانند، خواص الیاف (بطور مثال؛ مقاومت الیاف، سختی و ضریب پواسون)، هندسه

الیاف (مثل؛ صاف^۴، قلابدار^۵، مجعد^۶، تابیده^۷)، نسبت حجمی الیاف، خواص ماتریس (مثل؛ مقاومت ماتریس، سختی و ضریب پواسون) و ویژگی‌های سطح تماس (مانند چسبندگی، اصطکاک و مهار مکانیکی) بستگی دارد. به‌طور آشکار، برای ماتریس مشخص نوع و مقدار الیاف، پارامترهای کلیدی موثر بر عملکرد FRCC و هزینه‌های مربوطه هستند. با این وجود، در شرایط مشخص در صورتی که بتوان با استفاده از نسبت حجمی پایین‌تری از الیاف به رفتار سخت‌شدگی کرنشی یا سخت‌شدن تغییر مکانی دست پیدا کرد، این کار از نظر هزینه بسیار حایز اهمیت است.

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی روی رفتار خمشی کامپوزیت‌های سیمانی مسلح به الیاف (FRCC) در آمریکا و سایر کشورها انجام گرفته است. Soroushian و Bayasi، روی تاثیر نوع الیاف روی عملکرد کلی بتن مسلح به الیاف مطالعاتی را انجام دادند [۳]. این محققان از الیاف مختلف مثل، الیاف مستقیم و مجعد با سطح مقطع دایره‌ای، الیاف مجعد با سطح مقطع مربعی و الیاف قلابدار (با درصد حجمی ۲ درصد) استفاده کردند. آنها گزارش نمودند که بطور کلی کارایی مستقل، از نوع الیاف است (به‌غیر از الیاف مجعد). علاوه بر این، نتایج بدست آمده توسط این محققان نشان می‌دهد که الیاف قلابدار در مقایسه با الیاف مستقیم و مجعد، تاثیر بیشتری در بهبود خصوصیات بتن الیافی دارند.

Kim و Naaman روی تاثیر نوع و درصدهای حجمی مختلف الیاف روی رفتار خمشی (FRCC) ها مطالعاتی را انجام دادند [۴]. این محققان از ۴ نوع الیاف مختلف شامل: الیاف فولادی تابیده، الیاف فولادی قلابدار، الیاف پلی اتیلن و الیاف پلی‌وینیل الکل با درصدهای حجمی ۰/۴ و ۱/۲ درصد استفاده نمودند. نتایج بدست آمده توسط آنها نشان داد که در بین این الیاف، کامپوزیت‌هایی که در آنها از الیاف تابیده استفاده شده بود، بهترین کارایی را از نظر تحمل بار، جذب انرژی و ترک‌خوردگی‌های متعدد داشته، نمونه‌های ساخته شده با الیاف پلی‌وینیل الکل ضعیف‌ترین را از خود نشان دادند. این محققان، همچنین نشان دادند که در ماتریس‌های

⁴ Smooth

⁵ Hooked

⁶ Crimped

⁷ Twisted

¹ Fiber Reinforced Cementitious Composite (FRCC)

² Multiple Cracking

³ Deflection Hardening Fiber Reinforced Cementitious Composite (DHFRC)

مختلف، ترکیبات ماتریس گوناگون و نسبت‌های حجمی متفاوت الیاف پرداختند، با این وجود، اغلب این محققان در انجام آزمایشات خود از روند استاندارد مانند آنچه در آیین نامه ASTM ذکر شده است، استفاده نکرده اند؛ لذا انجام آزمایش خمشی با استفاده از درصدهای مختلف الیاف جدید و بررسی و تحلیل نتایج بدست آمده با روشی استاندارد ضروری می‌نماید.

هدف اصلی این پژوهش، بررسی تاثیر مقدار درصدهای حجمی مختلف الیاف روی پاسخ خمشی کامپوزیت‌های پایه سیمانی (FRCC) مانند، ظرفیت باربری، میزان جذب انرژی، ظرفیت تغییر مکان و نحوه ترک خوردگی است. آزمایشات و تحلیل نتایج براساس ASTM C1609/C1609M-05، انجام شده است. بررسی‌ها روی مخلوط‌هایی با درصدهای نسبتاً کم الیاف (۱ و ۲ درصد) انجام شده است که از خود رفتار سخت شدگی تغییرمکانی نشان می‌دهند.

۲- خصوصیات مکانیکی مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف

خصوصیات مکانیکی مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف توسط سه پارامتر مقاومت خمشی (مدول گسیختگی)، انرژی شکست و نیروی متناظر با تغییر مکان‌های مشخص ارزیابی شده است که در ادامه، با جزییات بیشتری توصیف می‌شود. پارامترهای فوق را می‌توان با استفاده از نتایج حاصل از آزمون خمش، بر اساس استانداردهای ASTM C1018 و ASTM C1609 محاسبه کرد. علاوه بر ارزیابی انجام شده در خصوص رفتار خمشی، خصوصیات مکانیکی ماتریس شامل، مقاومت فشاری، مقاومت کششی دوتیم شدن و مقاومت خمشی نیز به ترتیب براساس استانداردهای ASTM C39، ASTM C496، و ASTM C78 انجام شده است.

۲-۱ پارامترهای توصیف کننده رفتار خمشی

رفتار مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف را می‌توان به دو دسته سخت‌شدگی یا نرم‌شدگی تغییرمکانی دسته‌بندی کرد (شکل ۱). در آزمایش خمش (مدول گسیختگی)، مصالحی با رفتار سخت‌شدگی تغییر مکانی نامیده می‌شود که بعد از ترک خوردگی، ظرفیت باربری بیشتری از خود نشان دهد [۴].

با مقاومت بالا الیاف تابیده نسبت به الیاف قلابدار، عملکرد بهتری دارند.

علایی و نظرعلی روی رفتار بتن‌های مسلح به الیاف مجعد، مطالعاتی را انجام دادند [۵]. این محققان در روند سه‌مرحله‌ای ابتدا به بررسی و انتخاب ماتریس مناسب و پس از آن انتخاب فرم بهینه هندسه الیاف از نظر طول و ارتفاع امواج و درنهایت به ساخت نمونه‌های بتن الیافی با درصد حجمی ۴ درصد پرداختند. این محققان، گزارش کردند که با اضافه کردن این الیاف مجعد به ماتریس انتخابی، می‌توان به بتن مسلح توانمند با مقاومت کششی ۲۴ مگاپاسکال و انرژی شکست ۹۵۰۰ نیوتن-میلی‌متر دست پیدا کرد. این مقدار در مقایسه با انرژی شکست بتن معمولی در حدود ۱۶۰ برابر است.

Hong و Won به بررسی رفتار خمشی کامپوزیت‌های پایه سیمانی مسلح شده با درصدهای مختلف الیاف فولادی با مقاومت بسیار بالا پرداختند [۶]. این محققان، گزارش کردند که با اضافه کردن الیاف با نسبت‌های حجمی ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ درصد، مقاومت خمشی به‌میزان ۲۰، ۳۳، ۳۷، ۴۱ و ۴۷ درصد و طاقت خمشی برای نمونه‌های با نسبت‌های حجمی ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۷ به‌میزان ۳۹، ۴۴ و ۵۶ درصد افزایش یافت.

Nguyen و همکاران، به بررسی تاثیر ابعاد نمونه‌ها روی رفتار خمشی کامپوزیت‌های پایه سیمانی مسلح به الیاف پرداختند [۷]. آن‌ها سه سری نمونه در اندازه‌های کوچک؛ ۱۵۰×۵۰×۱۵۰ میلی‌متر، متوسط؛ ۳۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر و بزرگ؛ ۴۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر را مورد بررسی قرار دادند که در ساخت آنها از الیاف تابیده با درصدهای حجمی ۰/۵ و ۱ درصد استفاده شده بود. این محققان، نشان دادند که رفتار خمشی نمونه‌هایی که شکل‌پذیری کششی کمتری دارند، نسبت به ابعاد آن‌ها حساس تر است.

Banthia و Trottier به بررسی جزئیات و مشکلات مربوط به روش‌های ارزیابی خصوصیات شکل‌پذیری (جذب انرژی) موجود در آیین‌نامه‌های مختلف مثل ASTM C1018 و JSCE SF-4 پرداخته، راهکارهایی را نیز در این خصوص ارائه کردند [۸].

اگرچه در سال‌های اخیر، محققان به انجام آزمون خمش FRCC و گزارش پاسخ خمشی آن برای نمونه‌های با ابعاد

d_3 : نقطه‌ی نظیر تغییر مکان ۳ برابر δ_{LOP}

d_{10} : نقطه‌ی نظیر تغییر مکان ۵/۵ برابر δ_{LOP}

d_{20} : نقطه‌ی نظیر تغییر مکان ۱۰/۵ برابر δ_{LOP}

L/600: نقطه‌ی نظیر تغییر مکان ۱/۶۰۰ برابر طول دهانه

L/150: نقطه‌ی نظیر تغییر مکان ۱/۱۵۰ برابر طول دهانه

L/100: نقطه‌ی نظیر تغییر مکان ۱/۱۰۰ برابر طول دهانه

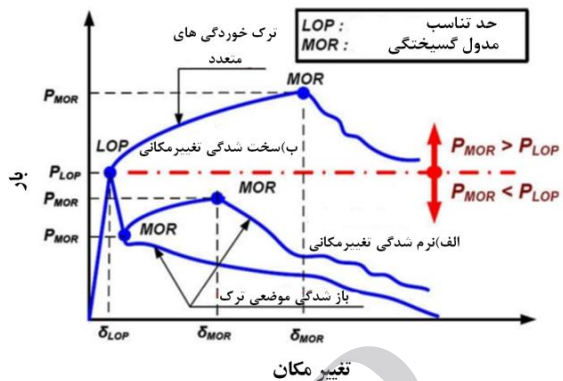
استاندارد ASTM C1609، نقاط L/150 و L/600 را به منظور ارزیابی رفتار خمشی نمونه‌ها پیشنهاد می‌نماید. نقطه L/100 علاوه بر نقاط پیشنهاد شده، به منظور ارزیابی صحیح‌تر رفتار خمشی این مصالح در نظر گرفته شده است. برای تمامی نقاط فوق نیرو، تنش و انرژی براساس نتایج بدست آمده از آزمایشات محاسبه شده است. به منظور سهولت نام‌گذاری این کمیت‌ها از پیشوندهای P و f و δ و Tough به ترتیب، برای نیرو، تنش، تغییرمکان و انرژی در نقاط ذکر شده استفاده می‌کنیم.

در تحقیق حاضر، نقطه نظیر ایجاد اولین ترک روی نمودار نیرو-تغییر مکان، نقطه‌ی شروع رفتار غیرخطی در نظر گرفته می‌شود. که بر اساس ASTM C1018 این نقطه حد تناسب^۱ یا LOP نامگذاری می‌شود.

۳- برنامه آزمایشگاهی

جدول ۱، نسبت‌های وزنی ماتریس مورد استفاده در این تحقیق را ارائه می‌کند. مقاومت فشاری این ماتریس، برابر با ۴۹ مگاپاسکال است. الیاف مورد استفاده در ساخت این کامپوزیت‌ها از نوع قلابدار و جنس فولادی با نام تجاری DOULOC 36/0.8 بوده است که با دو درصد حجمی مختلف، مورد استفاده قرار گرفته است (۱٪ و ۲٪) که در مجموع منجر به ساخت ۶ سری نمونه مختلف گردیده است. (۳ سری نمونه ۱٪ و ۳ سری نمونه ۲٪).

استفاده از درصد‌های مختلف الیاف علاوه بر اینکه امکان ارزیابی و مقایسه مشخصات مکانیکی این کامپوزیت‌ها را فراهم می‌کند، امکان بررسی بهبود رفتار مصالح به‌کمک دستیابی به رفتار سخت شدگی تغییر مکانی را نیز میسر می‌سازد. در شکل ۲، الیاف مورد استفاده و در جدول ۲



شکل ۱- دیاگرام نیرو-تغییر مکان مصالح پایه سیمانی مسلح به الیاف [۴]

در استاندارد جدید ASTM C1609، نقطه ای با شیب صفر به عنوان حد تناسب در نظر گرفته می‌شود. این تعریف برای مصالحی با رفتار سخت‌شدگی تغییر مکانی و ترک‌خوردگی‌های متعدد مناسب نیست [۴]؛ در صورتی که مصالح رفتار سخت‌شدگی تغییر مکانی را بروز دهند، تعیین این نقطه براساس تعریف ASTM C1609، بسیار دشوار است. به همین دلیل و بر اساس ASTM C1018، حد تناسب به عنوان مقاومت نظیر، اولین ترک‌خوردگی در نظر گرفته می‌شود. نیرو و تغییر مکان نظیر این نقطه به ترتیب، P_{LOP} و δ_{LOP} نامیده می‌شوند. تنش ایجاد شده ناشی از نیروی P_{LOP} به عنوان مقاومت نظیر اولین ترک در نظر گرفته شده و با استفاده از رابطه (۱) تعیین می‌شود. سطح زیر منحنی نیرو-تغییر مکان تا نقطه‌ی حد تناسب، انرژی نظیر ایجاد اولین ترک یا $Tough_{LOP}$ در نظر گرفته می‌شود. بر اساس ASTM C1609 تنش در نقطه حد تناسب از رابطه (۱) تعیین می‌شود:

$$f_{LOP} = P_{LOP} \frac{L}{bh^2} \quad (1)$$

که در این رابطه، L طول دهانه و b و h به ترتیب، عرض و ارتفاع مقطع تیر هستند.

مدول گسیختگی یا MOR، نقطه شروع رفتار نرم‌شدگی و بعد از نقطه حد تناسب در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱). علاوه بر نقاط حد تناسب و مدول گسیختگی، ۶ نقطه دیگر روی منحنی نیرو تغییر مکان تعریف می‌شوند:

^۱ Limit Of Proportionality

سیمان به آن‌ها اضافه شده، مصالح خشک در حدود ۲ دقیقه دیگر، به‌طور کامل مخلوط می‌شوند. فوق‌روان‌کننده با ۷۰ درصد آب مورد نیاز اختلاط، مخلوط می‌شود. به کمک این روش توزیع آن در مخلوط یکنواخت‌تر و عملکرد بهتری در افزایش کارایی بتن خواهد داشت. پس از اختلاط کامل مصالح خشک، محلول آب و فوق‌روان‌کننده به تدریج و در طی مدت زمان ۵ دقیقه به آن اضافه می‌شود. با اضافه کردن این محلول، مخلوط حالت خمیری پیدا کرده، ولیکن کارایی آن برای اضافه کردن الیاف مناسب نیست. با افزودن ۳۰ درصد آب باقی‌مانده در طی مدت زمان ۵ دقیقه، کارایی لازم برای افزودن الیاف به‌دست خواهد آمد. دلیل طولانی بودن مدت زمان افزودن آب و فوق‌روان‌کننده، این است که با افزایش زمان اختلاط، تاثیر فوق‌روان‌کننده افزایش می‌یابد. با توجه به بالا بودن حجم مصالح خمیری (سیمان و میکروسیلیس)، افزایش زمان اختلاط سبب کاهش یکنواختی و جداشدگی ذرات نمی‌شود. شکل ۳، روند اختلاط را به‌طور خلاصه نشان می‌دهد. پس از دستیابی ماتریس به کارایی مناسب، الیاف بتدریج به مخلوط اضافه می‌شود، اضافه کردن الیاف طوری انجام می‌شود که از توزیع یکنواخت الیاف در مخلوط اطمینان حاصل شود. ریختن مخلوط بداخل قالب‌ها به‌نحوی انجام می‌شود که این توزیع یکنواخت و تصادفی حفظ گردد (استفاده از یک پیمانه حتی الامکان بزرگ).



شکل ۳- روند طرح اختلاط

پس از ریختن مخلوط داخل قالب، عملیات متراکم کردن آن با استفاده از میز لرزان انجام می‌شود. به همین منظور،

مشخصات مکانیکی این الیاف نشان داده شده است. برای بارگذاری نمونه‌ها در آزمون خمش، از جک هیدرولیکی با نام تجاری Zwick با قابلیت اعمال بار به‌صورت کنترل تغییر مکان استفاده گردیده است. سرعت بارگذاری نمونه‌ها بر اساس ASTM C1609، ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- طرح اختلاط ماتریس سیمانی

فوق‌روان‌کننده ^۱	آب	سنگدانه	میکروسیلیس	سیمان ^۲	ماتریس
۰/۱۲	۰/۲۵	۱/۵۸	۰/۲۵	۱/۰۰	نسبت وزنی
^۱ فوق‌روان‌کننده PCE				^۲ سیمان پرتلند تیپ II	



شکل ۲- الیاف مورد استفاده

جدول ۲- مشخصات الیاف

مقاومت کششی (MPa)	وزن مخصوص (Kg/m ³)	طول (mm)	قطر (mm)	مهار مکانیکی	نام الیاف
۱۲۰۰	۷۸۵۰	۳۶	۰/۸	قلاب‌دار	Duoloc 36/0.8

دو مجموعه از تست‌های مصالح روی کامپوزیت‌های ساخته شده انجام گردید که بخش اول شامل، تست‌های انجام شده روی کامپوزیت بدون الیاف (شامل آزمون‌های مقاومت فشاری، مقاومت دو نیم شدن و آزمون خمش) و بخش دوم شامل، آزمایشات انجام شده روی نمونه‌های کامپوزیت دارای الیاف (آزمون تیر خمشی) با هدف برآورد خصوصیات رفتاری این کامپوزیت‌ها است.

۳-۱ ساخت و عمل آوری نمونه‌ها

ساخت نمونه‌ها با استفاده از مخلوط‌کن ELE انجام گردیده است. روند اختلاط بدین ترتیب است که ابتدا سنگدانه‌ها همراه با میکروسیلیس به‌صورت خشک و در حدود ۲ دقیقه با یکدیگر مخلوط می‌شوند. چسبیدن ذرات میکروسیلیس به سنگدانه‌ها سبب بهبود توزیع یکنواخت آن در مخلوط نهایی می‌شوند. بعد از اختلاط کامل سنگدانه‌ها و میکروسیلیس،

بر اساس ASTM C1609، ابعاد نمونه‌ها $۱۰۰ \times ۱۰۰ \times ۳۵۰$ میلی‌متر و دهانه خالص بارگذاری ۳۰۰ میلی‌متر است. هنگام قرارگیری نمونه‌ها روی تکیه‌گاه، آن‌ها را نسبت به وضعیت‌شان هنگام بتن‌ریزی، ۹۰ درجه می‌چرخانیم. به این ترتیب، می‌توان آثار ناشی از جهت بتن‌ریزی در نتایج آزمایشات را به حداقل رساند. همان‌گونه که در شکل ۴ قابل مشاهده است، به منظور اندازه‌گیری تغییر مکان وسط دهانه تیر، از قاب فلزی استفاده شده است. به کمک این قاب، می‌توان تغییر شکل‌های ناشی از نشست‌های تکیه‌گاهی و چرخش نمونه هنگام بارگذاری را از بین برد. قاب در وسط ارتفاع مقطع و به کمک ۴ پیچ در نقاط A و B به نمونه متصل می‌شود. تنها ۲ پیچ از ۴ پیچ به طور ثابت عمل کرده، ۲ 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^۱ اندازه‌گیری می‌شود که در دو وجه تیر به قاب متصل هستند. متوسط مقادیر این تغییر مکان سنج‌ها به عنوان تغییر مکان خالص وسط دهانه در نظر گرفته می‌شود. نیروی وارده بر نمونه به کمک نیروسنج متصل به بازوی محرک دستگاه اندازه‌گیری می‌شود. به منظور ثبت اطلاعات نیروسنج و تغییر مکان سنج‌ها، از دستگاه ثبت داده‌ها^۲ استفاده شده است. این دستگاه با فرکانس ۱ هرتز، داده‌ها را هنگام آزمایش ثبت می‌کند. برای بارگذاری نمونه‌ها، جک هیدرولیکی با قابلیت اعمال بار به صورت کنترل تغییر مکان، مورد استفاده قرار گرفته است. سرعت بارگذاری نمونه‌ها بر اساس ASTM C1609، $۰/۱$ میلی‌متر بر دقیقه است.

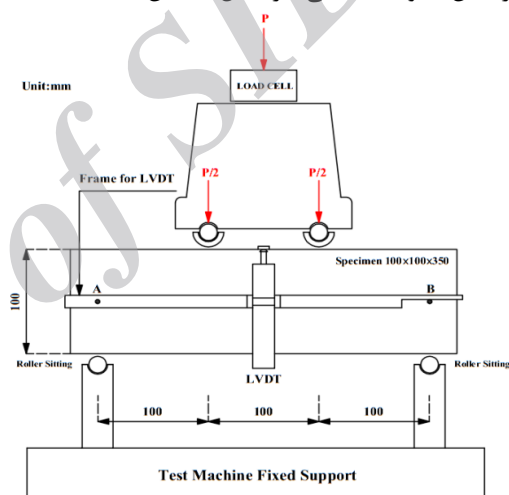
۳-۳ نتایج آزمایشات

مقاومت فشاری و مقاومت کششی دو نیم شدن ماتریس سیمانی بکار رفته به ترتیب، ۴۹ و $۵/۴$ مگاپاسکال است. در هر یک از موارد فوق، ۳ نمونه مورد آزمون قرار گرفته، متوسط مقادیر بدست آمده به عنوان مقاومت فشاری و کششی دو نیم شدن در نظر گرفته شده است.

قالب‌ها در حدود ۱۰ دقیقه روی میز لرزان قرار داده می‌شوند. سپس سطح نمونه‌ها پرداخت شده برای جلوگیری از تبخیر سطحی، روی قالب‌ها با استفاده از پوشش‌های پلاستیکی پوشانده می‌شود. قالب‌ها بعد از مدت زمان ۲۴-۲۰ ساعت باز شده، نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز داخل حوضچه آب قرار می‌گیرند.

۲-۳ نحوه انجام آزمایشات

مقاومت فشاری و مقاومت کششی دو نیم شدن ماتریس سیمانی به وسیله آزمون نمونه‌های استوانه‌ای ۱۰۰×۲۰۰ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. هندسه نمونه‌ها و چیدمان آزمایش مقاومت خمشی، در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- هندسه نمونه‌ها و چیدمان آزمایش مقاومت خمشی

^۱ Linear Variable displacement Transducer (LVDT)

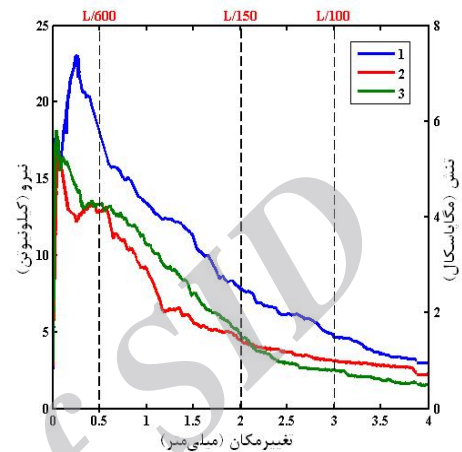
^۲ Data Logger

با توجه به نمودارهای اشکال ۵ و ۶ افزایش درصد حجمی الیاف سبب تغییر رفتار مصالح شده است. تمامی نمونه‌های مسلح به ۱ درصد حجمی الیاف رفتار نرم‌شدگی تغییر مکانی را بروز داده‌اند، در حالی که در نمونه‌های مسلح به ۲ درصد الیاف این رفتار به سخت‌شدگی تغییر مکانی تغییر کرده است. همچنین این رفتار در هر سه نمونه آزمایش شده، مشهود بوده، این امر نشان دهنده ثبات رفتار مصالح است.

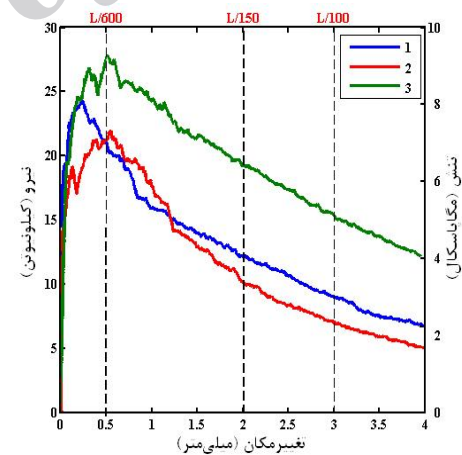
جدول ۳- جزئیات نتایج آزمایش نمونه های مسلح به یک درصد الیاف

VF=۱.۰ %		UNIT	Specimen Number		
			1	2	3
LOP	P_{LOP}	N	$1/766 \times 10^3$	$1/694 \times 10^3$	$1/8181 \times 10^3$
	f_{LOP}	MPa	۵/۲۹۸	۵/۰۸۲	۵/۴۵۴
	δ_{LOP}	mm	۰/۰۳۷۵	۰/۰۵۸۷	۰/۰۳۵۰
	$Tough_{LOP}$	N-mm	$2/3194 \times 10^3$	$6/4664 \times 10^3$	$3/8413 \times 10^3$
d5	P_{d5}	N	$1/587 \times 10^3$	$1/2895 \times 10^3$	$1/64 \times 10^3$
	f_{d5}	MPa	۴/۷۶۱	۳/۸۶۹	۴/۹۲۰
	δ_{d5}	mm	۰/۰۸۲۵	۰/۱۷۶۲	۰/۱۰۵
	$Tough_{d5}$	N-mm	$1/119 \times 10^3$	$3/1602 \times 10^3$	$1/5467 \times 10^3$
d10	P_{d10}	N	$1/9396 \times 10^3$	$1/2851 \times 10^3$	$1/5293 \times 10^3$
	f_{d10}	MPa	۵/۸۱۰۰	۳/۸۵۵۳	۴/۵۸۷۹
	δ_{d10}	mm	۰/۱۵۱۳	۰/۳۲۳۱	۰/۱۹۲۵
	$Tough_{d10}$	N-mm	$2/3131 \times 10^3$	$4/2085 \times 10^3$	$2/7475 \times 10^3$
d20	P_{d20}	N	$2/1600 \times 10^3$	$1/2193 \times 10^3$	$1/3279 \times 10^3$
	f_{d20}	MPa	۶/۴۸۰۰	۳/۶۵۷۶	۳/۹۸۳۷
	δ_{d20}	mm	۰/۲۸۸۹	۰/۶۱۶۹	۰/۳۶۷۵
	$Tough_{d20}$	N-mm	$5/0855 \times 10^3$	$7/6475 \times 10^3$	$5/3868 \times 10^3$
L/600	P_{L600}	N	$1/7968 \times 10^3$	$1/2875 \times 10^3$	$1/3366 \times 10^3$
	f_{L600}	MPa	۵/۳۹۰۴	۳/۸۶۲۵	۴/۰۰۹۸
	δ_{L600}	mm	۰/۵۰۰۰	۰/۵۰۰۰	۰/۵۰۰۰
	$Tough_{L600}$	N-mm	$1/0964 \times 10^3$	$6/5778 \times 10^3$	$7/1873 \times 10^3$
L/150	P_{L150}	N	$7/8058 \times 10^3$	$4/4265 \times 10^3$	$4/8786 \times 10^3$
	f_{L150}	MPa	۲/۳۴۱۷	۱/۳۲۷۹	۱/۴۶۳۶
	δ_{L150}	mm	۲/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰
	$Tough_{L150}$	N-mm	$2/8797 \times 10^3$	$1/7982 \times 10^3$	$2/929 \times 10^3$
L/100	P_{L100}	N	$4/724 \times 10^3$	$3/1414 \times 10^3$	$2/475 \times 10^3$
	f_{L100}	MPa	۱/۴۱۷۲	۰/۹۴۲۴	۰/۷۴۲۵
	δ_{L100}	mm	۳/۰۰۰۰	۳/۰۰۰۰	۳/۰۰۰۰
	$Tough_{L100}$	N-mm	$3/4148 \times 10^3$	$2/1668 \times 10^3$	$2/4169 \times 10^3$
MOR	P_{MOR}	N	$2/306 \times 10^3$	$1/694 \times 10^3$	$1/8181 \times 10^3$
	f_{MOR}	MPa	۶/۹۱۸	۵/۰۸۲	۵/۴۵۴
	δ_{MOR}	mm	۰/۲۶۰۰	۰/۰۵۸۷	۰/۰۳۵
	$Tough_{MOR}$	N-mm	$4/6931 \times 10^3$	$6/4664 \times 10^3$	$3/8413 \times 10^3$

رفتار خمشی نمونه‌ها به کمک نمودار نیرو-تغییر مکان و تنش-تغییر مکان توصیف شده که در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. شکل ۵، مربوط به نمونه‌های با ۱٪ درصد حجمی الیاف و شکل ۶، رفتار نمونه‌های مسلح به ۲٪ درصد الیاف را نشان می‌دهد.



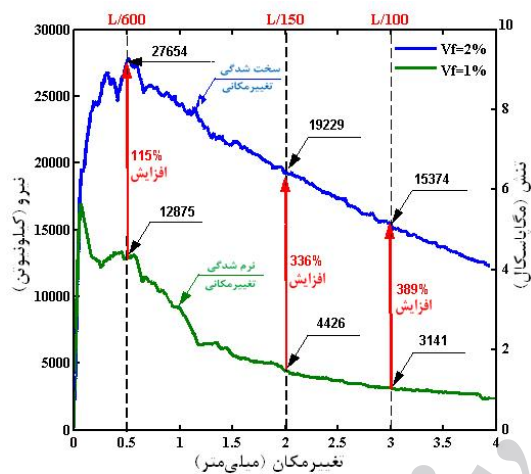
شکل ۵- منحنی نیرو- تغییر مکان و تنش- تغییر مکان نمونه های مسلح به ۱ درصد



شکل ۶- منحنی نیرو- تغییر مکان و تنش- تغییر مکان نمونه های مسلح به ۲ درصد الیاف

همان‌گونه که در این اشکال قابل ملاحظه است، به ازای هر درصد الیاف، ۳ نمونه خمشی مورد آزمایش قرار گرفته است. مقادیر عددی پارامترهای توصیف کننده خصوصیات مصالح در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است که هر یک از این پارامترها در ۸ نقطه تعریف شده، محاسبه شده‌اند.

نتایج را با توجه به نمودار نیرو- تغییر مکان نشان داده، توصیف گردیده است. ظرفیت باربری نمونه‌های مسلح به ۱ درصد ییاف پس از ایجاد اولین ترک کاهش یافته، این روند نزولی تا گسیختگی کامل نمونه ادامه خواهد داشت. در این حالت، با افزایش بار ترک اولیه ایجاد شده، باز گردیده و نمونه به تدریج گسیخته می‌شود. با این حال ذکر این نکته حائز اهمیت است که رفتار نرم‌شدگی، ظرفیت تحمل نیرو بعد از ایجاد ترک را در مصالح به وجود می‌آورد که در مقایسه با بتن غیرمسلح به ییاف، منجر به رفتار شکل‌پذیر نمونه‌ها می‌شود.



شکل ۷- منحنی مقایسه ای نیرو- تغییر مکان و تنش- تغییر مکان نمونه های مسلح به ۱ و ۲ درصد ییاف

در نمونه‌های مسلح به ۲ درصد ییاف، پس از ایجاد اولین ترک، ظرفیت باربری افزایش یافته، ترک‌های متعدد در نمونه ایجاد می‌شود. با افزایش نیرو ترک‌های ریز ایجاد شده، به هم متصل شده، با تشکیل ترک بزرگ نمونه گسیخته می‌شود.

۳-۴ ظرفیت باربری (تنش‌های خمشی معادل)

تأثیر درصد حجمی ییاف بکار رفته بر تنش‌های خمشی معادل، در شکل ۸ نشان داده شده است. مقادیر این تنش‌ها با استفاده از رابطه مشابه رابطه ۱ در تمامی نقاط منحنی، محاسبه شده‌اند. مقادیر بدست آمده، مقادیر متوسط نتایج سه نمونه هستند که در نقاط LOP, d₅, d₁₀, d₂₀, L/600, L/150 و MOR محاسبه گردیده‌اند.

جدول ۴- جزئیات نتایج آزمایش نمونه های مسلح به

۲ درصد ییاف

VF=۲.۰ %		Specimen Number			
		UNIT	1	2	3
LOP	P_{LOP}	N	$1/928 \times 10^3$	$1/426 \times 10^3$	$1/954 \times 10^3$
	f_{LOP}	MPa	۵/۷۸۴	۴/۲۷۸	۵/۸۶۲
	δ_{LOP}	mm	۰/۰۳۷۵	۰/۰۲۲۵	۰/۰۷۲۵
	Tough	N-mm	$۵/۳۳۸۳ \times 10^3$	$۲/۱۸۶۷ \times 10^3$	$۸/۷۷۵۶ \times 10^3$
d5	P_{d5}	N	$۲/۲۵۶ \times 10^3$	$1/۶۵۴ \times 10^3$	$۲/۴۳۴ \times 10^3$
	f_{d5}	MPa	۶/۷۶۸۳	۴/۹۶۲	۷/۳۰۲۸
	δ_{d5}	mm	۰/۱۱۲۵	۰/۰۶۷۵	۰/۲۱۷۵
	Tough	N-mm	$۲/۰۷۸۹ \times 10^3$	$۹/۰۱۱۸ \times 10^3$	$۳/۱۴۳۲ \times 10^3$
d10	P_{d10}	N	$۲/۳۹۱۷ \times 10^3$	$1/۹۰۶۲ \times 10^3$	$۲/۴۷۲۶ \times 10^3$
	f_{d10}	MPa	۷/۱۷۵۱	۵/۷۱۸۶	۷/۴۱۸۷
	δ_{d10}	mm	۰/۳۰۶۳	۰/۱۲۳۸	۰/۳۹۸۸
	Tough	N-mm	$۴/۳۱۰۱ \times 10^3$	$1/۸۳۷۳ \times 10^3$	$۸/۹۷۸۷ \times 10^3$
d20	P_{d20}	N	$۲/۳۳۷ \times 10^3$	$1/۸۹۶۷ \times 10^3$	$۲/۵۶۳۱ \times 10^3$
	f_{d20}	MPa	۶/۷۱۱	۵/۶۹۰۱	۷/۶۸۹۳
	δ_{d20}	mm	۰/۳۹۳۸	۰/۲۳۶۳	۰/۷۶۱۳
	Tough	N-mm	$۸/۶۰۸۳ \times 10^3$	$۳/۹۳۱۲ \times 10^3$	$1/۸۴۱۴ \times 10^3$
L/600	$P_{L/600}$	N	$۲/۰۹۶۶ \times 10^3$	$۲/۱۲۰۴ \times 10^3$	$۲/۷۶۵۴ \times 10^3$
	$f_{L/600}$	MPa	۶/۲۸۹۸	۶/۳۶۱۲	۸/۲۹۶۲
	$\delta_{L/600}$	mm	۰/۵۰۰۰	۰/۵۰۰۰	۰/۵۰۰۰
	Tough	N-mm	$1/1۰۳۰ \times 10^3$	$۹/۳۵۵۳ \times 10^3$	$1/۱۴۶۹ \times 10^3$
L/150	$P_{L/150}$	N	$1/۲۲۰۹ \times 10^3$	$1/۰۲۰۹ \times 10^3$	$1/۹۲۲۹ \times 10^3$
	$f_{L/150}$	MPa	۳/۶۶۲۷	۳/۰۶۲۷	۵/۷۶۸۷
	$\delta_{L/150}$	mm	۲/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰	۲/۰۰۰۰
	Tough	N-mm	$۳/۴۱۶۸ \times 10^3$	$۳/۲۴۸۵ \times 10^3$	$۴/۵۹۵۴ \times 10^3$
L/100	$P_{L/100}$	N	$۸/۹۷۱۹ \times 10^3$	$۶/۹۹۶۷ \times 10^3$	$1/۵۳۷۴ \times 10^3$
	$f_{L/100}$	MPa	۲/۶۹۱۶	۲/۰۹۹۰	۴/۶۱۲۲
	$\delta_{L/100}$	mm	۳/۰۰۰۰	۳/۰۰۰۰	۳/۰۰۰۰
	Tough	N-mm	$۴/۴۷۹۹ \times 10^3$	$۴/1۰۵۱ \times 10^3$	$۶/۳۲۸۷ \times 10^3$
MOR	P_{MOR}	N	$۲/۴۳۵ \times 10^3$	$۲/1۹۴۲ \times 10^3$	$۲/۷۸۴۴ \times 10^3$
	f_{MOR}	MPa	۷/۳۰۵	۶/۵۸۲۶	۸/۳۵۳۲
	δ_{MOR}	mm	۰/۲۲۷۵	۰/۵۵۲۵	۰/۵۱۲۵
	Tough	N-mm	$۴/۷۹۱۶ \times 10^3$	$1/۰۵۱۰ \times 10^3$	$1/1۸۱۵ \times 10^3$

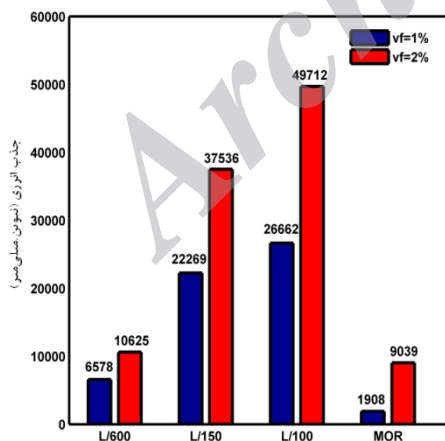
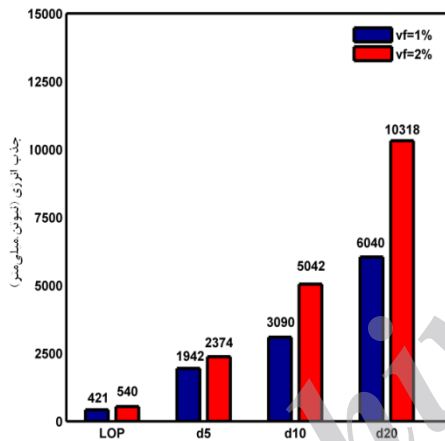
تمامی نمونه‌های مسلح به ۲ درصد ییاف، ظرفیت باربری و مدول گسیختگی و جذب انرژی بیشتری نسبت به نمونه‌های مسلح به ۱ درصد ییاف نشان داده‌اند.

شکل ۷، رفتار نرم‌شدگی و سخت‌شدگی تغییر مکانی نمونه‌های مسلح به ۱ و ۲ درصد، ییاف را مقایسه می‌کند. رفتار نرم‌شدگی نمونه‌های مسلح به ۱ درصد ییاف، با استفاده از نمودار نمونه شماره ۲ توصیف گردیده که دارای ضعیف‌ترین نتایج بوده، رفتار سخت‌شدگی نمونه‌های مسلح به ۲ درصد ییاف، با استفاده از نمودار شماره ۳ که بهترین

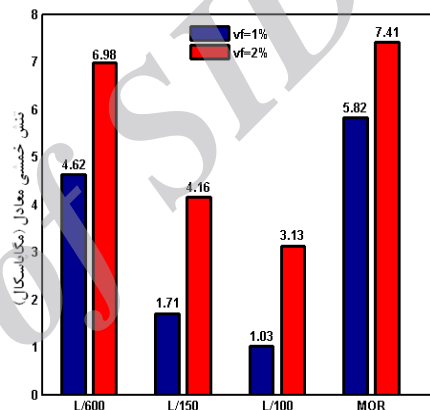
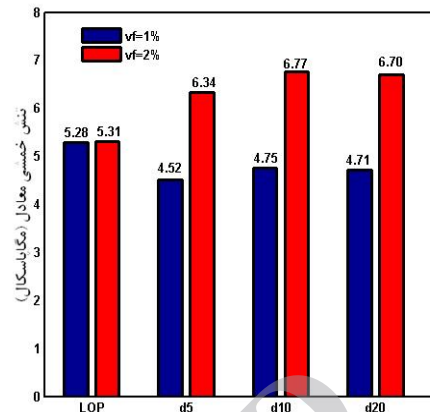
تاثیر افزایش درصد حجمی الیاف در نقطه‌ی $L/150$ است و مقاومت نظیر اولین ترک‌خوردگی، کمترین تغییر را داشته است.

۳-۵ جذب انرژی

کاربرد مصالح با قابلیت جذب انرژی بالا می‌تواند سبب کاهش خطرات ناشی از بارهای دینامیکی مانند، زلزله، ضربه و انفجار شود؛ بنابراین مقایسه این کمیت در درک بهتر کاربرد این مصالح در موارد فوق اهمیت دارد. تاثیر افزایش درصد حجمی الیاف در قابلیت جذب انرژی در شکل ۹ آمده است. سطح زیر نمودار منحنی نیرو-تغییر مکان تا نقطه‌ای مشخص، به عنوان میزان جذب انرژی تعریف می‌شود.



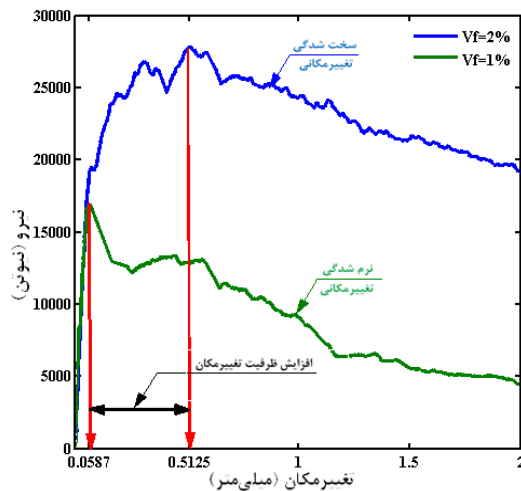
شکل ۹- تاثیر افزایش درصد حجمی الیاف در میزان جذب انرژی



شکل ۸- تاثیر افزایش درصد حجمی الیاف بر تنش‌های خمشی معادل

همان‌گونه که در شکل ۸ قابل مشاهده است، افزایش درصد حجمی الیاف، تاثیری بر مقدار تنش در نقطه‌ی حد تناسب نداشته، تغییرات قابل ملاحظه تنش بعد از این نقطه رخ می‌دهد. این مطلب، بیانگر آن است که الیاف، تاثیری بر رفتار قبل از ترک خوردگی ماتریس نداشته، بیشترین تاثیر آن‌ها بعد از ایجاد ترک و از طریق پل زنی بین سطوح ترک است. علاوه بر این، میزان تاثیرگذاری الیاف به درصد حجمی آن وابسته است.

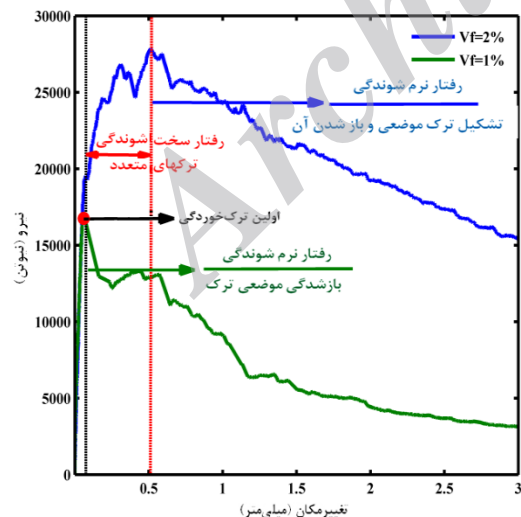
در نمونه‌های مسلح به ۱ درصد الیاف، نقاط $L/600$ ، $L/150$ و $L/100$ در محدوده رفتار نرم‌شدگی قرار گرفته‌اند؛ درحالی‌که نمونه‌های مسلح به ۲ درصد الیاف، نقطه‌ی $L/600$ در محدوده رفتار سخت‌شدگی قرار گرفته است. این امر، نشان‌دهنده تاثیر رفتار سخت‌شدگی در افزایش باربری، در تغییر مکان‌های کوچک و بعد از ترک‌خوردگی است. بیشترین



شکل ۱۰- تاثیر افزایش درصد حجمی الیاف در ظرفیت تغییر مکان

۳-۷ ترک خوردگی

شکل ۱۱، مراحل مختلف ترک خوردگی نمونه‌های مسلح به ۱٪ و ۲٪ الیاف را با توجه به نمودار نیرو-تغییر مکان نشان می‌دهد. با توجه به نمودار نمونه‌های مسلح به ۱٪ الیاف پس از ایجاد اولین ترک، همان ترک شروع به باز شدن نموده، نمونه گسیخته می‌شود. در نمونه‌های مسلح به ۲٪ الیاف بدلیل بروز رفتار سخت‌شدگی، پس از ایجاد اولین ترک، ترک‌های متعدد دیگری با فواصل نیز تشکیل می‌شود.



شکل ۱۱- مراحل مختلف ترک خوردگی نمونه‌های مسلح به ۱٪ و ۲٪ الیاف

همان‌گونه که در این اشکال قابل ملاحظه است، میزان جذب انرژی تا نقطه d_{20} تغییر چندانی با افزایش درصد حجمی الیاف نمی‌نماید. با افزایش تغییر مکان، میزان جذب انرژی مصالح به طور قابل توجهی با افزایش درصد حجمی الیاف افزایش می‌یابد. وجود سخت‌شدگی تغییر مکانی در رفتار خمشی نمونه‌ها سبب افزایش ظرفیت باربری و در نتیجه افزایش سطح زیر نمودار می‌شود. بیشترین تاثیر افزایش درصد حجمی الیاف در نقطه‌ی $L/100$ مشاهده گردیده که نشان دهنده تاثیر قابل ملاحظه رفتار سخت‌شدگی تغییر مکانی در عملکرد مصالح است. با مقایسه نمودارهای مربوط به درصد‌های حجمی الیاف ۱٪ و ۲٪ برآمی‌توان دریافت که الیاف، تاثیر قابل ملاحظه ای روی میزان شکل‌پذیری مصالح دارند.

۳-۶ تغییر مکان

از آنجا که میزان شکل‌پذیری به ظرفیت تغییر مکان وابسته است، بررسی این خصوصیت از اهمیت خاصی برخوردار است. با توجه به نتایج بدست آمده (شکل ۱۰)، تغییر مکان نظیر نقطه‌ی LOP، به درصد حجمی الیاف وابسته نیست؛ در حالی که تغییر مکان نظیر حداکثر نیرو به مقدار زیادی به رفتار مصالح وابسته است. میزان این وابستگی به حدی است که با تغییر رفتار مصالح از نرم‌شدگی به سخت‌شدگی، مقدار δ_{MOR} از تغییر مکان نظیر نقطه $L/600$ نیز بیشتر می‌شود. در مصالح با رفتار نرم‌شدگی، تغییر مکان نظیر حداکثر نیرو مربوط به نقطه LOP است؛ در حالی که رفتار سخت‌شدگی، پس از ترک خوردگی اولیه همراه با افزایش ظرفیت باربری، ظرفیت تغییر مکان نیز افزایش می‌یابد.

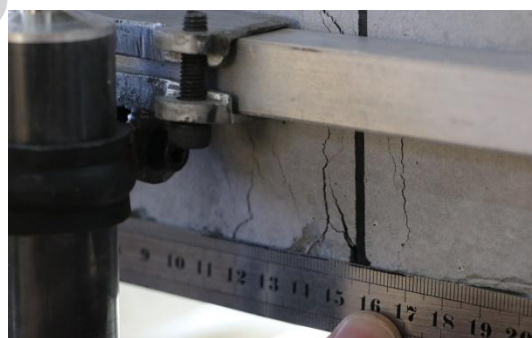
صعود و نزول‌های قسمت سخت‌شدگی نمودار، مربوط به ایجاد همین ترک‌ها است. اشکال ۱۲ و ۱۳ به ترتیب، نحوه ترک‌خوردگی نمونه‌های ۱٪ و ۲٪ را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲- نحوه ترک خوردگی نمونه‌ها

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مشخصات مکانیکی کامپوزیت‌های پایه سیمانی مسلح به الیاف فولادی، مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱۳- ترک خوردگی‌های متعدد نمونه‌ها

الیاف فولادی بکار رفته، قلابدار بوده که با دو درصد حجمی متفاوت (۱٪ و ۲٪) به ماتریس سیمانی اضافه شده است. نمونه‌های خمشی مسلح به ۱٪، الیاف رفتار نرم‌شدگی تغییرمکانی و نمونه‌های مسلح به ۲ درصد، الیاف رفتار سخت‌شدگی تغییرمکانی را بروز داده‌اند. ارزیابی مشخصات مکانیکی این کامپوزیت از طریق بررسی پارامترهای خمشی شامل، ظرفیت باربری (تنش خمشی معادل)، میزان جذب

انرژی، ظرفیت تغییر مکان و نحوه ترک‌خوردگی به عنوان تابعی از درصد حجمی الیاف صورت گرفته است. بر همین اساس، نتایج و مشاهدات ذیل قابل استنباط است:

- تمامی نمونه‌های مسلح به ۲٪، الیاف فولادی قلابدار رفتار سخت‌شدگی تغییرمکانی بروز داده‌اند. به عبارت دیگر، افزایش درصد حجمی الیاف از ۱٪ به ۲٪، سبب تغییر رفتار مصالح از حالت نرم‌شدگی به حالت سخت‌شدگی تغییرمکانی می‌شود.
- بروز رفتار سخت‌شدگی سبب افزایش ظرفیت باربری مصالح بعد از ایجاد اولین ترک گشته؛ ولیکن تأثیری بر مقاومت نظیر اولین ترک‌خوردگی ندارد. افزایش ظرفیت باربری با افزایش تغییرمکان، بارزتر شده به طوری که میزان این افزایش در نقاط $L/100$ و $L/150$ و $L/600$ به ترتیب، ۱۱۵٪، ۳۳۶٪ و ۳۸۹٪ است.
- میزان جذب انرژی مصالح (شکل‌پذیری) با تغییر رفتار مصالح به میزان قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد. افزایش جذب انرژی با افزایش تغییر مکان نمود بیشتری داشته به طوری که این افزایش در نقاط $L/150$ و $L/600$ و $L/100$ به ترتیب، ۶۱٪، ۶۸٪ و ۸۶٪ است.
- ظرفیت تغییرمکان (تغییر مکان نظیر حداکثر نیرو) با بروز رفتار سخت‌شدگی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. تغییر مکان نظیر، حداکثر نیرو در نمونه‌های مسلح به ۲٪ درصد الیاف در حدود ۱۰ برابر نمونه‌های مسلح به ۱٪ الیاف می‌شود.
- بروز رفتار سخت‌شدگی، سبب تغییر نحوه ترک‌خوردگی مصالح می‌شود. در نمونه‌های مسلح به ۲٪، الیاف ابتدا ترک‌خوردگی متعدد رخ داده، سپس این ترک‌ها به یکدیگر متصل شده، نمونه گسیخته می‌شود؛ درحالی که در نمونه‌های مسلح به ۱٪، الیاف گسیختگی نمونه از طریق ایجاد ترک و بازشدگی موضعی، همان ترک است.

۵- مراجع

- [1] Naaman AE (2002) Toughness, ductility surface energy and deflection-hardening FRC composites. In: Proceedings of JCI workshop on ductile fiber reinforced cementitious composites (DFRCC) – application and evaluation, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, p. 33–57.

- [2] Soranakom C, Mobasher B (2008) Correlation of tensile and flexural responses of strain softening and strain hardening cement composites. *Cement Concrete Compos*;30(6):465–77.
- [3] Soroushian P, Bayasi Z (1991) Fiber-type effects on the performance of steel fiber reinforced concrete. *ACI Mater J*;88(2):129–34.
- [4] Kim D., Naaman AE., Tawil SE (2008) Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites. *Cement & Concrete Composites* 30 917–928.
- [5] Alae F., nazrali G (2007) high performance fiber reinforced cementitious composite with crimped fiber. *Fibre Concrete*, Prague, September 2007.
- [6] Won J., Hong B., Joon C (2012) Flexural behaviour of amorphous micro-steel fibre-reinforced cement composites, *Composite Structures* 94 1443–1449.
- [7] Nguyen D., Kim D., Ryu G (2012) Size effect on flexural behavior of ultra-high-performance hybrid fiber-reinforced concrete, *Composites: Part B*
- [8] Banthia N, Trottier J-F (1995) Test methods for flexural toughness characterization of fiber reinforced concrete: some concerns and a proposition. *ACI Mater J*;92(1):1–10.
- [9] ASTM C 1609/C 1690M-05 (2006) Standard test method for flexural performance of fiber reinforced concrete (using beam with third-point loading). American Society of Testing and Materials, January. p. 1–8.
- [10] ASTM C 1018-97 (1998) Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber reinforced concrete (using beam with third-point loading). American Society of Testing and Materials, October. p. 544–51.
- [11] Caijun Shi , Mo Y. L. High performance construction materials Science and Applications, *Engineering Materials for Technological Needs*, Vol.1