

بررسی عملکرد خمشی بتن الیافی با ترکیب‌های مختلف الیاف ماکروسینتتیک

محمد دانشفر، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
ابوالفضل حسنی*، استاد راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
محمد رضا محمد علیها، استادیار دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

Email: hassani@modares.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۳۱ - پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۰۴

چکیده

بتن به‌عنوان یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی رفتاری شکننده دارد. فاکتور طراحی روسازی بتنی، مقاومت خمشی ۲۸ روزه بتن است. افزودن الیاف به بتن بر رفتار شکل‌پذیری، مقاومت در برابر ضربه، میزان جذب انرژی، مقاومت پس از ترک خوردگی، مقاومت سایشی و مقاومت کششی بتن اثرگذار بوده و از گسترش ترک جلوگیری می‌کند. به همین منظور، پژوهشی آزمایشگاهی جهت بررسی تأثیر ترکیبات مختلف الیاف ماکروسینتتیک بر عملکرد خمشی بتن الیافی شامل مقاومت خمشی، میانگین مقاومت باقیمانده و طاق خمشی انجام شد. در این پژوهش، نمونه‌های بتنی طبق استانداردهای ASTM C1609، ASTM C1399 و ASTM C79 با چهار ترکیب مختلف الیاف ماکروسینتتیک پلیمری ساخته شده و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داد که با افزودن الیاف به نمونه‌های تیرچه بتنی، مقاومت خمشی به میزان ۳/۳۱-۱۶/۹۶ درصد افزایش می‌یابد. همچنین، طاق خمشی و میانگین مقاومت باقیمانده با افزودن الیاف افزایش می‌یابد. ضمناً، به دلیل شکست ترد نمونه‌های بتن معمولی، طاق خمشی و میانگین مقاومت باقیمانده در چارچوب استاندارد قابل محاسبه نشد.

واژه‌های کلیدی: بتن الیافی، الیاف ماکروسینتتیک، مقاومت خمشی، میانگین مقاومت باقیمانده، طاق خمشی

۱. مقدمه

کششی و خمشی)، کنترل ترک‌های ثانویه/حرارتی بتن، جلوگیری از گسترش ترک‌ها به عمق، قابلیت بارپذیری پس از ایجاد ترک و کاهش نفوذپذیری در مقابل یون‌های کلر و سولفات (تولدو- فیلهو و سانجوان، ۱۹۹۹). پژوهش‌های متعددی در زمینه بتن الیافی انجام گرفته است. در اغلب این پژوهش‌ها، بتن الیافی با استفاده از الیاف فولادی، پلیمری و یا ترکیبی از آنها مورد ارزیابی قرار گرفته است.

آلبرتی و همکاران (۲۰۱۷) مطالعه‌ای در مورد بتن الیافی خودتراکم با ترکیب الیاف پلی‌اولفین و فلزی انجام داده و گزارش دادند که ترکیب الیاف پلی‌اولفین و فلزی عملکرد بهتری در زمینه خمش و چقرمگی شکست نسبت

بتن الیافی یکی از انواع بتن می‌باشد که با الیاف ترکیب شده است. الیاف مختلفی برای تهیه بتن الیافی استفاده می‌شود، مانند الیاف شیشه، پلیمری، کربن و فولاد (لی، ۲۰۱۱).

در این پژوهش، از الیاف پلیمری ماکروسینتتیک استفاده شد. از کاربردهای الیاف ماکروسینتتیک در بتن می‌توان به کاهش میزان جمع‌شدگی بتن تازه و سخت، افزایش شکل‌پذیری، ضربه‌پذیری و سختی بتن، افزایش مقاومت در برابر تنش‌های خستگی، افزایش دوام و طول عمر بتن، بهبود ویژگی‌های مکانیکی بتن (مقاومت

بیشتری بر کاهش نشست نسبت به الیاف چندرشته‌ای و تأثیر کمتری بر کاهش اسلامپ در یک درصد مساوی دارند. در مقاومت سایشی، عملکرد الیاف شبکه‌ای و چندرشته شبیه هم هستند. سینگ و همکاران (۲۰۱۰) مقاومت و طاقت خمشی بتن مسلح شده با درصدهای متفاوت ترکیبی از الیاف پلی‌پروپیلن و فولادی، با درصد کل ۱٪، را مورد بررسی قرار داده و گزارش دادند که ترکیب ۷۵٪ الیاف فلزی و ۲۵٪ پلی‌پروپیلن، نتایج بهتری در مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و طاقت خمشی دارد. ویراگاد و همکاران (۲۰۱۲) رفتار کششی و فشاری نمونه‌های بتن مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن شبکه‌ای را بررسی کردند. این مطالعات، افزایش مقاومت‌های کششی و فشاری ۷ و ۲۸ روزه را نشان دادند. جیابائو و همکاران (۲۰۰۴) طاقت و کنترل ترک بتن الیافی و مزایا و ویژگی‌های اضافه کردن الیاف ماکروسینتتیک به بتن را تحقیق کردند. بر اساس نتایج، اضافه کردن الیاف میکرو به میزان ۰/۱ درصد حجم بتن، بر جمع‌شدگی پلاستیک تأثیرگذار بود و اضافه کردن به میزان ۱٪ حجم بتن بر طاقت خمشی، مقاومت ضربه و مقاومت خستگی بتن سخت شده تأثیر داشت. همچنین، مقاومت خمشی معادل را برای مقاومت پس از ترک خوردگی برای نمونه‌های مختلف اندازه‌گیری کردند. راثو و راثو (۲۰۱۰) در مورد شاخص‌های چقرمگی بتن الیافی فولادی با بارگذاری مد ۲ مطالعه‌ای انجام داده و نشان دادند که مقاومت و طاقت بتن در مد ۲ بارگذاری با افزودن الیاف به بتن بهبود یافته و مقاومت برشی بتن الیافی با افزایش حجم الیاف افزایش می‌یابد. بتن مسلح به الیاف توسط بوردلن و روسلر (۲۰۰۹) مطالعه شده است. ایشان در این پژوهش، الیاف فولادی، مصنوعی و شبکه مش فولادی را مورد بررسی قرار داده و گزارش کردند که استفاده از الیاف موجب افزایش ظرفیت باربری و کاهش ضخامت روسازی بتنی می‌گردد. خلاصه‌ای از پژوهش‌های دیگر صورت گرفته در خصوص بتن مسلح به الیاف در جدول ۱ نشان داده شده است.

به استفاده از الیاف به صورت تکی دارد. یو و همکاران (۲۰۱۷) مطالعه‌ای روی مقایسه رفتار خمشی بتن با عملکرد بالا با الیاف فلزی ترکیبی انجام داده و نشان دادند که الیاف با طول متوسط و بلند، عملکرد خمشی را بهبود می‌بخشند. همچنین، استفاده از الیاف ترکیبی کوتاه و بلند، چقرمگی و رفتار ترک خوردگی را بهبود می‌بخشند. پاکروان و همکاران (۲۰۱۷) مرور منابعی در رابطه با استفاده از الیاف مرکب در بتن انجام دادند. ایشان گزارش کردند که ترکیب انواع مختلف الیاف نتایج بهتری در چقرمگی و جذب انرژی بتن به همراه دارد. جاداو و کولی (۲۰۱۳) روی عملکرد خمشی تیرهای بتنی مسلح به الیاف مرکب مطالعه کردند و گزارش دادند که استفاده از این الیاف عملکرد خمشی تیر بتن مسلح به الیاف را بهبود می‌بخشند. ویبوتی و راداکریشنا (۲۰۱۳) روی مشخصات مکانیکی بتن مسلح به الیاف مرکب برای روسازی مطالعه کرده و تأثیر افزودن الیاف به صورت تکی و مرکب را به بتن بررسی نموده و گزارش کردند که الیاف مرکب، مقاومت فشاری را در مقایسه با الیاف تکی بهبود می‌دهند؛ همچنین، الیاف مرکب به طور قابل ملاحظه‌ای مقاومت خمشی را بهبود می‌دهند. اسواری (۲۰۱۵) عملکرد خمشی بتن مسلح به الیاف مرکب را بررسی آزمایشگاهی کرده و اثر مقادیر مختلف الیاف پلیمری و فلزی را در مقاومت و عملکرد خمشی نمونه‌های بتن الیافی مورد ارزیابی قرار داده و گزارش داده که اضافه نمودن الیاف، پارامترهای مورد ارزیابی را به نسبت بتن معمولی بهبود می‌بخشد. لی و همکاران (۲۰۱۷) ظرفیت خمشی بتن الیافی را با در نظر گرفتن مقاومت بتن و مقدار الیاف فلزی مورد استفاده مطالعه نموده و گزارش کردند که نسبت مقاومت خمشی معادل و ظرفیت جذب انرژی با افزایش مقدار مصرف الیاف افزایش می‌یابد. کومار و همکاران (۲۰۱۳) تأثیر افزودن الیاف پلی‌پروپیلن گسسته و شبکه‌ای را بر مخلوط‌های بتنی با مقادیر الیاف ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۱۵ درصد مطالعه کرده و پارامترهای نشست، مقاومت فشاری، جمع‌شدگی خشک و مقاومت سایش بتن اندازه‌گیری کردند. ایشان گزارش دادند که الیاف شبکه‌ای تأثیر

جدول ۱. خلاصه‌ای از تأثیر الیاف بر مشخصات مکانیکی بتن الیافی (روح‌الامینی و همکاران، ۲۰۱۸)
(NS بدون تأثیر، ↓ کاهش، ↑ افزایش)

مقاومت فشاری	کشش غیر مستقیم	مقاومت خمشی	جذب انرژی	نوع بتن	مشخصات الیاف			سال	نویسنده
					درصد حجمی الیاف	طول (mm)	نوع		
(۴.۵۷-۲۶.۳۲)% ↓	(۰.۸۴-۳۴.۲۹)% ↑	(۱۹.۶-۸۱.۶۹)% ↑	-	بتن معمولی	۰.۴۰،۴۰،۶	۳۸	پلی پروپیلن	۲۰۱۷	دانشفر و همکاران
۸%↑، ۳%↑، ۴%↓	(۸، ۹، ۲۷)% ↑	-	-	پرمقاومت	۰.۲۵،۰.۷۵،۱.۲۵	۳۹	پلی پروپیلن	۲۰۱۷	فلاح و نعمت زاده
-	-	حداقل ۲۰.۸% ↑	↑	معمولی	۰.۲۵،۰.۳۷۵،۰.۵	۲۰.۳۰،۴۰	فلزی	۲۰۱۷	لی و همکاران
↓	↑	↑	↑	خود تراکم	۰.۳۳	۳۵	فلزی	۲۰۱۷	آبرتی و همکاران
					۰.۵	۶۰	پلی پروپیلن		
۲%↑، ۵%↓	(۱۹، ۲۷)% ↑	(۲۶، ۳۲)%	-	خود تراکم	۰.۱۰، ۱.۲	۶۰	پلی پروپیلن	۲۰۱۶	حسامی و همکاران
۲%↓	۹۸%↑	-	-	معمولی	۴(درصد سیمان)	۵۰	فلزی	۲۰۱۶	سیدانی و همکاران
۵%↓	۶۵%↑	-	-		۴(درصد سیمان)	۵۰	پلی پروپیلن		
(۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۹)% ↑	(۱۵، ۲۲، ۳۸، ۵۷)% ↑	(۱۴، ۲۸، ۳۶، ۶۱)% ↑	-	پر مقاومت	۰.۲۵،۰.۵۰،۰.۴۵،۱	۶۰	فلزی	۲۰۱۵	افروغ ثابت و ازبک‌الگلو
(۵.۱۱، ۱۵)% ↑	(۸.۲۴، ۳۳)% ↑	(۲۹.۳۱، ۴۰)% ↑	-	سبک	۰.۲۵،۰.۳۷۵،۰.۵	۵۴	پلی پروپیلن(درهم تنیده)	۲۰۱۵	یثو و همکاران
(۳، ۱۰، ۱۴)% ↑	(۱۰، ۱۹، ۲۷)% ↑	(۱۸، ۲۲، ۳۰)% ↑	-		۰.۲۵،۰.۳۷۵،۰.۵	۳۰			
(۴، ۱۰، ۱۴)% ↑	(۱۳، ۱۴، ۲۱)% ↑	(۶، ۱۰، ۲۰)% ↑	-		۰.۲۵،۰.۳۷۵،۰.۵	۲۰	پلی پروپیلن(صاف)		
N.S	-	۲۴% ↑	-	آر سی سی	۱.۵	۵۰	فلزی	۲۰۱۵	کارادلیس و یوگو
۲۴% ↑	۳۳% ↑	۱۹% ↑	-	متخلخل	۰.۵	۳۶	فلزی	۲۰۱۴	حسامی و همکاران
۲۸% ↑	۳۷% ↑	۲۱% ↑	-		۰.۳	۵۴			
۳۲% ↑	۲۸% ↑	۱۷% ↑	-		۰.۲	۱۲			
(۳۴، ۳۲، ۲۰)% ↑	-	۵۵% ، ۱۵۱% ، ۳۳۹% ↑	-	خود تراکم	۰.۵،۱.۱،۱.۵	۳۰	فلزی	۲۰۱۳	پژاک و پونیکوسکی
۱۸% ↑	-	۸۰% ↑	↑	معمولی	۱	۳۵ ۶۰	پلی پروپیلن (شبکه‌ای)	۲۰۱۰	سینگ و همکاران
-	-	-	۸۰% ↑	ژئوپلیمر	۲.۳،۵	۲۰	پشم سنگ	۲۰۰۲	سیلوا و تاماتورگو

(ASTM C1609) و مقاومت پس از ترک خوردگی (طبق استاندارد ASTM C1399). الیاف مورد استفاده با ترکیبی از سه شکل درهم تنیده، شبکه‌ای و بارچپ و یک نوع الیاف درهم تنیده از جنس نایلون با مقدار مصرف یک کیلوگرم بر متر مکعب به مخلوط بتنی اضافه شد. برای هر کدام از پارامترهای مورد نظر سه نمونه ساخته شد و نتایج میانگین‌گیری و در جداول مربوطه درج گردید.

با توجه به اینکه الیاف ماکروسینتتیک به تازگی در داخل کشور در حال تولید می‌باشد، لزوم بررسی عملکرد خمشی این مواد و مصالح به منظور استفاده در روسازی-های بتنی ضروری گردید. با توجه به مرور منابع صورت گرفته، در این پژوهش، تأثیر الیاف مختلف ماکروسینتتیک بر مقاومت خمشی، طاقت خمشی و مقاومت باقیمانده بتن الیافی مورد ارزیابی قرار گرفت. پارامترهای مورد ارزیابی این پژوهش عبارتند از مقاومت خمشی (طبق استاندارد ASTM C78)، طاقت خمشی

۲. برنامه آزمایشگاهی

۲-۱. متغیرهای آزمایش و مصالح مصرفی

در این پژوهش، برای ارزیابی تأثیر الیاف بر مشخصات خمشی نمونه‌های بتن الیافی، مقادیر مقاومت خمشی (ASTM C78)، طاق خمشی (ASTM C1609) و مقاومت پس از ترک خوردگی (ASTM C1399) نمونه اندازه‌گیری و نتایج مورد بحث قرار گرفت. مصالح مصرفی با مشخصات زیر مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۱-۱. سیمان

سیمان استفاده شده در این پژوهش، سیمان تیپ ۱ پرتلند معمولی کارخانه سیمان آبیگ می‌باشد که مشخصات آنالیز شیمیایی و فیزیکی آن در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۲. مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان تیپ ۱ مورد استفاده در پژوهش

ب- ترکیبات شیمیایی												الف- مقاومت فشاری	
LOI	MnO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Oxide (%)	Compressive strength (MPa)	days
۰/۳۵	۰/۲	۰/۲۷	۰/۶۳	۰/۱۵	۳/۷۹	۲/۰۷	۶۴/۷۳	۴/۱۱	۳/۵	۱۹/۹۸	(/)	۲۴/۳	۳
												۲۵/۶	۷
												۳۵/۱	۲۸

۳ و مشخصات الیاف در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به پیشنهاد ACI 360 مقدار یک کیلوگرم بر متر مکعب به عنوان میزان مصرف الیاف برای همه نمونه‌ها انتخاب شد.

۲-۱-۲. الیاف

در این پژوهش، از ترکیب الیاف با شکل‌های شبکه-ای، سوزنی و درهم‌تنیده و یک نوع الیاف از جنس نایلون استفاده شد. ترکیبات مختلف الیاف در شکل ۱ و جدول



ب- الیاف نوع ۲

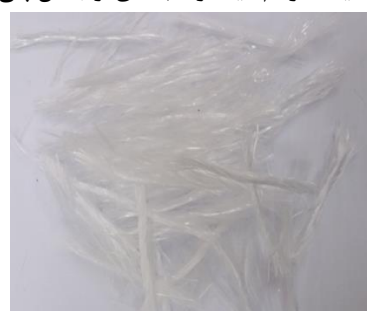


الف- الیاف نوع ۱

(ترکیبی از الیاف درهم‌تنیده و شبکه‌ای از جنس پلی‌پروپیلن) (ترکیبی از الیاف سوزنی و شبکه‌ای از جنس پلی‌پروپیلن)



د- الیاف نوع ۴



ج- الیاف نوع ۳

(درهم‌تنیده از جنس نایلون) (ترکیبی از الیاف درهم‌تنیده و شبکه‌ای از جنس پلی‌پروپیلن)

شکل ۱. الیاف مورد استفاده در پژوهش

جدول ۳. ترکیبات انواع الیاف مورد استفاده در پژوهش از نظر شکل

نوع الیاف	جنس الیاف	مقدار درهم تنیده (%)	مقدار شبکه‌ای (%)	مقدار سوزنی (%)
نوع ۱	پلی پروپیلن	۷۰	۳۰	۰
نوع ۲	پلی پروپیلن	۰	۳۰	۷۰
نوع ۳	نایلون	۱۰۰	۰	۰
نوع ۴	پلی پروپیلن	۶۰	۴۰	۰

جدول ۴. مشخصات الیاف مورد استفاده در پژوهش

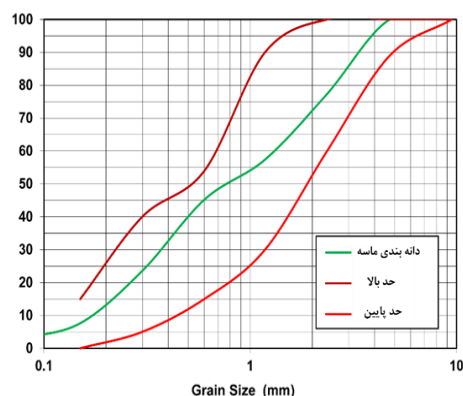
جنس	شکل	رنگ	چگالی gr/cm ³	طول mm	قطر mm	مقاومت کششی MPa	مدول الاستیسیته GPa	نقطه اشتعال °C	نقطه ذوب °C	جذب آب	مقاومت در محیط‌های اسیدی و قلیایی
پلی الیفین	تک رشته ماکرو متشکل از ریزرشته‌های به هم چسبیده	طوسی	۰/۹۶- ۰/۹۱	۳۸	≥ ۰/۳	۶۶۰- ۵۷۰	≥ ۴/۲	≥ ۵۹۰	≥ ۱۲۰	ندارد	عالی
نایلون	تک رشته ماکرو متشکل از ریزرشته‌های به هم چسبیده	سفید	۰/۹۰	۳۸	≥ ۰/۳	۴۸۰	۳/۶	۲۲۵	۱۷۲	ندارد	عالی

بوده که با توجه به شکستگی آن‌ها در یک وجه گوشه‌ها غالباً گرد گوشه می‌باشد. مشخصات دانه‌بندی مصالح درشت‌دانه و ریزدانه در شکل ۲ ارائه شده است. سایر مشخصات الزام‌آور و مورد نیاز برای طرح اختلاط بتن در جدول ۵ مشخص شده است.

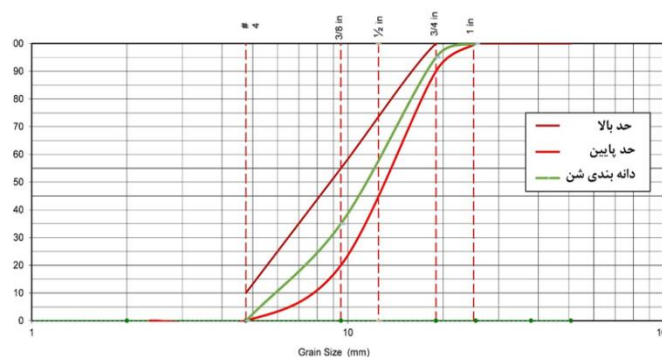
۳-۱-۲. مصالح سنگدانه‌ای درشت‌دانه و ریزدانه

بتن

مصالح سنگدانه‌ای درشت‌دانه و ریزدانه برای ساخت بتن از معادن رودخانه‌ای منطقه شهریار کرج تهیه شده بود که توسط سنگ‌شکن شکسته شده‌اند. شکل سنگدانه‌ها به صورت نامنظم



ب- دانه‌بندی مصالح ریزدانه



الف- دانه‌بندی مصالح درشت‌دانه

شکل ۲. نمودار دانه‌بندی درشت‌دانه و ریزدانه

جدول ۵. مشخصات فیزیکی، دوام و مکانیکی مصالح درشت دانه و ریزدانه مصرفی در بتن

مشخصات سنگدانه‌ها	استاندارد مربوطه	درشت دانه	ریزدانه
حداکثر اندازه اسمی سنگدانه (mm)	ASTM C136	۱۲/۵	-
وزن حجمی (kg/m ³)	ASTM C127	۱۶۴۸	-
جذب آب در حالت اشباع با سطح خشک (%)	ASTM C127	۱/۲	۲/۴
مدول نرمی	ASTM C136	-	۲/۸۸
ارزش ماسه‌ای (%)	ASTM D2419	-	-
وزن مخصوص	ASTM C127,128	۲/۶۷	۲/۶۵
کلوخه‌های رسی و ذرات سست (%)	ASTM C142	۰/۰۷	۰/۱
سایش (%)	ASTM C131	۱۱/۳	-
سلامت سنگدانه‌ها (درصد افت وزنی در سولفات سدیم)	ASTM C88	۵/۲	-
ضریب تورق (%)	ASTM D4791	۱۶/۶	-
ضریب تطویل (%)	ASTM D4791	۱۷/۸	-

۴-۲. ساخت نمونه

تمام نمونه‌های بتنی با یک طرح اختلاط یکسان و با ترکیب مختلف الیاف و با میزان مصرف یکسان ساخته شدند. طراحی مخلوط بتنی بر مبنای استاندارد ACI 211 و با نسبت آب به سیمان ۰/۵ انجام شد و با استفاده از مشخصات مصالح یاد شده، طرح اختلاط نمونه‌های بتنی

طبق جدول ۶ انتخاب و نمونه‌ها ساخته شده و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در حمام آب مورد آزمایش قرار گرفتند. شکل ۳، تصویر قرارگیری نمونه‌ها در حمام آب را نشان می‌دهد.

جدول ۶. طرح اختلاط نمونه‌های مورد پژوهش

مصالح	شن	ماسه	سیمان	آب	الیاف
وزن واحد حجم (کیلوگرم بر متر مکعب)	۸۸۰	۸۳۵	۴۰۰	۲۰۰	۱



شکل ۳. عمل‌آوری نمونه‌های بتنی در حمام آب

۲-۲. تنظیمات آزمایشگاهی و اندازه‌گیری‌ها

۲-۲-۱. مقاومت خمشی

طبق استاندارد ASTM C78، بارگذاری چهارنقطه‌ای و ابعاد تیرچه ۳۵۰*۱۰۰*۱۰۰ میلی‌متر انتخاب شد.

فاصله دو تکیه‌گاه بالایی ۱۰۰ میلی‌متر و فاصله دو تکیه‌گاه پایینی ۳۰۰ میلی‌متر انتخاب شد. بار عمودی با نرخ بارگذاری ۰/۵ میلی‌متر در دقیقه اعمال شد. نحوه تنظیم دستگاه و نمونه در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. نحوه تنظیم دستگاه UTM و نمونه بتنی

می کند، ترک می خورد. دلیل استفاده از این ورق فولادی، کمک به کنترل نرخ جابه جایی، وقتی که تیرچه ترک می خورد، بود. بعد از اینکه تیرچه با روش مشخصی ترک خورد، ورق فولادی خارج شده و تیرچه ترک خورده برای به دست آوردن اطلاعات منحنی بار-جابه جایی دوباره بارگذاری می شود. مقادیر بار در مقادیر جابه جایی های مشخص شده در منحنی بارگذاری مجدد میانگین گیری شده و برای محاسبه میانگین مقاومت باقیمانده تیرچه استفاده می شود. نحوه تنظیم دستگاه و نمونه جهت آزمایش های میانگین مقاومت باقیمانده در شکل ۵ نشان داده شده است

۲-۲-۲. مقاومت پس از ترک خوردگی

طبق استاندارد ASTM C1399، بارگذاری چهارنقطه ای و ابعاد تیرچه ۳۵۰*۱۰۰*۱۰۰ میلی متر انتخاب شد. فاصله دو تکیه گاه بالایی ۱۰۰ میلی متر و فاصله دو تکیه گاه پایینی ۳۰۰ میلی متر انتخاب شد. بار عمودی با نرخ بارگذاری ۰/۶ میلی متر در دقیقه اعمال شد. طبق استاندارد ASTM C1399، تیرچه قالب بندی شده یا برش خورده از بتن الیافی با استفاده از دستگاه بارگذاری چهارنقطه ای با استفاده از ورق فولادی، که به نگهداشتن نمونه بتنی در سیکل بارگذاری اولیه کمک



شکل ۵. نحوه تنظیم دستگاه و نمونه جهت آزمایش های میانگین مقاومت باقیمانده

تغییرمکان نمونه تیر منشوری با ابعاد مشخص از داده-هایی که از تست خمش چهارنقطه ای حاصل می شود رسم شده و در نهایت مؤلفه های جذب انرژی یا چقرمگی با محاسبه سطح زیر نمودار تا تغییرمکان مشخص به دست می آید.

۲-۲-۳. طاقت خمشی

جذب انرژی یا چقرمگی بر اساس آزمون استاندارد ASTM C1609 به دست می آید. مشخصات نمونه و آماده-سازی دستگاه مشابه ASTM C1399 می باشد. با این تفاوت که در این استاندارد بارگذاری در یک مرحله و با نرخ ۰/۰۵ میلی متر در دقیقه انجام می گردد. نمودار نیرو-

۳. نتایج آزمایشگاهی و بحث

۳-۱. مقاومت خمشی

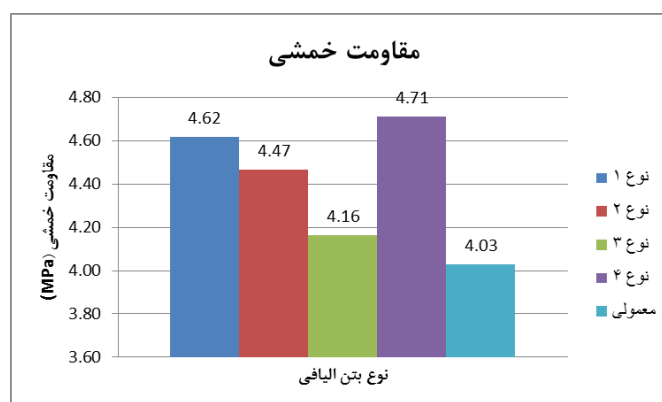
$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (1)$$

که R مدول شکست یا مقاومت خمشی (MPa)، P ماکزیمم نیروی نشان داده شده توسط دستگاه (N)، L دهانه دستگاه (mm)، b عرض نمونه (mm) و d ضخامت نمونه (mm) می باشد. جدول ۷ و شکل ۵ مقاومت خمشی برای نمونه های مختلف بتن الیافی را نشان داده شده اند.

برای به دست آوردن مقاومت خمشی نمونه های بتن الیافی، نمونه ها طبق ASTM C78 ساخته شده و پس از ۲۸ روز از عمل آوری و قرار گرفتن در حمام آب، تحت بارگذاری خمشی چهارنقطه ای قرار می گیرند. نمودار بار-جابه جایی مرکز دهانه برداشت شده و با استفاده از ماکزیمم نیروی خمشی و رابطه (۱)، ماکزیمم مقاومت خمشی به دست می آید:

جدول ۷. نتایج مقاومت خمشی نمونه های بتنی

ردیف	نوع نمونه	ماکزیمم نیرو (kN)	مقاومت خمشی (MPa)	مقاومت خمشی (میانگین)	درصد تغییر
۱		۱۵/۴۴	۴/۶۳		
۲	نوع ۱	۱۵/۳۸	۴/۶۱	۴/۶۲	۱۴/۶۴
۳		۱۵/۳۳	۴/۶۰		
۴		۱۵/۴۴	۴/۶۳		
۵	نوع ۲	۱۴/۳۴	۴/۳۰	۴/۴۷	۱۰/۸۴
۶		۱۴/۹۰	۴/۴۷		
۷		۱۳/۷۳	۴/۱۲		
۸	نوع ۳	۱۳/۸۹	۴/۱۷	۴/۱۶	۳/۳۱
۹		۱۴/۰۰	۴/۲۰		
۱۰		۱۶/۶۲	۴/۹۹		
۱۱	نوع ۴	۱۴/۸۹	۴/۴۷	۴/۷۱	۱۶/۹۶
۱۲		۱۵/۶۰	۴/۶۸		
۱۳		۱۳/۱۰	۳/۹۳		
۱۴	معمولی	۱۲/۵۰	۴/۰۵	۴/۰۳	۰/۰
۱۵		۱۳/۷۰	۴/۱۱		



شکل ۵. مقاومت خمشی نمونه های بتن الیافی

آمده از تیری که در یک روش استاندارد ترک خورده محاسبه می‌شود. میانگین مقاومت باقیمانده برای هر تیر با استفاده از بارهای تعیین شده در بارگذاری مجدد و در جابه‌جایی مرکز دهانه ۰/۵، ۰/۷۵، ۱/۰۰ و ۱/۲۵ میلی‌متر و از رابطه (۲) به دست می‌آید. نتایج میانگین مقاومت باقیمانده در جدول ۸ و نمودار بار- جابه‌جایی مرحله دوم بارگذاری نمونه‌های بتنی در شکل ۶ نشان داده شده‌اند.

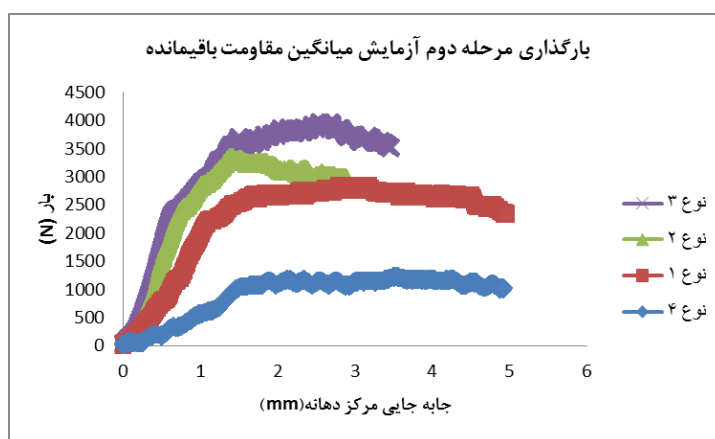
$$ARS = ((P_A + P_B + P_C + P_D) / 4) * L / bd^2 \quad (2)$$

که P نیروی ثبت شده در جابه‌جایی‌های مشخص (N)، L طول دهانه (mm)، b عرض تیر (mm) و d ضخامت تیر (mm) می‌باشد.

نتایج جدول ۷ و شکل ۵ نشان داد که افزودن الیاف به مخلوط بتنی موجب افزایش مقاومت خمشی به میزان ۳۱/۳-۱۶/۹۶ درصد نسبت به مقاومت خمشی بتن معمولی می‌گردد. در این میان، نمونه‌های بتنی حاوی ترکیب الیاف نوع ۴ که ترکیبی از الیاف درهم‌تنیده و شبکه‌ای از جنس پلی‌پروپیلن بودند بیشترین افزایش مقاومت خمشی را با ۱۶/۹۶ درصد نسبت به بتن معمولی نشان دادند.

۲-۳. میانگین مقاومت باقیمانده^۱

میانگین مقاومت باقیمانده طبق استاندارد ASTM C1399 و با استفاده از جابه‌جایی مشخص تیر (به دست



شکل ۶. نمودار بار- جابه‌جایی مرحله دوم بارگذاری نمونه‌های بتنی با الیاف درهم‌تنیده

جدول ۸. نتایج مقاومت پس از ترک خوردگی برای نمونه‌های مختلف بتن الیافی

ردیف	نمونه	میانگین مقاومت باقیمانده (MPa)
۱	نوع ۱	۰/۴۷
۲	نوع ۲	۰/۷۳
۳	نوع ۳	۰/۷۷
۴	نوع ۴	۰/۱۳

حاوی الیاف نوع ۳ پس از شکست، ۱۸/۵۱ درصد از مقاومت خمشی اولیه را حفظ می‌کنند. مقادیر مقاومت بعد از ترک خوردگی نمونه‌های بتن الیافی در جدول ۹ ارائه شده است.

به دلیل اینکه شکست بتن معمولی ترد بوده و نمونه در بارگذاری اولیه می‌شکند، اندازه‌گیری میانگین مقاومت باقیمانده برای نمونه‌های معمولی بدون الیاف میسر نشد. نتایج نشان داد که الیاف نوع ۳ میانگین مقاومت باقیمانده بیشتری را در مقایسه با دیگر الیاف دارد. نمونه‌های بتنی

1 Average residual strength

جدول ۹. مقاومت بعد از ترک خوردگی نمونه های بتن الیافی

بتن الیافی	مقاومت خمشی (MPa)	میانگین مقاومت باقیمانده (MPa)	مقاومت بعد از ترک خوردگی (%)
نوع ۱	۴/۶۲	۰/۴۷	۱۰/۱۷
نوع ۲	۴/۴۷	۰/۷۳	۱۶/۳۳
نوع ۳	۴/۱۶	۰/۷۷	۱۸/۵۱
نوع ۴	۴/۷۱	۰/۱۳	۲/۷۶

نمودار بار- جابه جایی مرکز دهانه برداشت شده و مساحت زیر نمودار بار- جابه جایی مرکز دهانه به عنوان طاقت خمشی اندازه گیری می شود. جدول ۱۰، طاقت خمشی برای نمونه های مختلف بتن الیافی را نشان می دهد.

۳-۳. طاقت خمشی^۱

برای ارزیابی عملکرد خمشی نمونه های بتن الیافی، طبق ASTM 1609 نمونه های تیرچه بتنی ساخته شده و تحت بارگذاری خمشی چهارنقطه ای قرار می گیرند.

جدول ۱۰. نتایج طاقت خمشی نمونه های بتن الیافی

ردیف	نوع نمونه	شماره نمونه	طاقت خمشی (Jul)	طاقت خمشی (میانگین)
۱		۱	۶/۴۵	
۲	نوع ۱	۲	۶/۵۲	۶/۴۵
۳		۳	۶/۳۹	
۴		۱	۶/۷۴	
۵	نوع ۲	۲	۶/۷۰	۶/۶۹
۶		۳	۶/۶۳	
۷		۱	۶/۵۰	
۸	نوع ۳	۲	۵/۹۱	۶/۲۱
۹		۳	۶/۲۳	
۱۰		۱	۶/۳۶	
۱۱	نوع ۴	۲	۵/۹۵	۶/۱۶
۱۲		۳	۶/۱۷	
۱۳	معمولی	-	-	-

توجه به نتایج مندرج در جدول ۱۰، بتن های حاوی الیاف نوع ۴ بیشترین طاقت خمشی را نتیجه دادند.

به دلیل شکست ترد نمونه های بتن معمولی، امکان اندازه گیری طاقت خمشی میسر نشد. همچنین، بررسی نتایج نشان داد که به طور کلی، با افزایش مقدار مصرف الیاف، عملکرد خمشی و طاقت خمشی افزایش می یابد.

1 Flexural toughness

عکس میکروسکوپی نوک الیاف نشان داد که الیاف در هنگام شکست نمونه دچار کشیدگی و پارگی شده و بیرون کشیدگی الیاف رخ نداده است که نشان از عملکرد مطلوب الیاف دارد. نمونه‌ای از سطح مقطع شکست و نوک الیاف نمونه‌های بتن الیافی در شکل ۷ نشان داده شده است.



ب- عکس میکروسکوپی نوک الیاف



الف - سطح مقطع شکست

شکل ۷. نمونه‌ای از سطح مقطع شکست و نوک الیاف نمونه‌های بتن الیافی

- به طور کلی، با افزایش مقدار مصرف الیاف، طاقت خمشی افزایش می‌یابد. همچنین، با توجه به نتایج حاصله، بتن‌های حاوی الیاف نوع ۲ بیشترین طاقت خمشی و نمونه‌های حاوی الیاف ۴ کمترین نتایج را نتیجه دادند.

- با توجه به نتایج حاصله، الیاف با شکل درهم‌تنیده، علی‌رغم جنس متفاوت (نایلون و پلی‌پروپیلن) تأثیر بیشتری بر عملکرد خمشی بتن الیافی دارند و نمونه‌های حاوی الیاف شبکه‌ای نتایج ضعیف‌تر از بتن‌های حاوی ترکیباتی از الیاف ماکروسینتتیک نتیجه دادند.

- با توجه به نتایج به‌دست آمده، استفاده از الیاف برای سازه‌هایی که خمش و کشش در آنها از اهمیت بالایی برخوردار است، مانند روسازی بتنی، که معیار طراحی آن مقاومت خمشی است، بسیار کاربردی بوده و لحاظ نمودن تأثیر الیاف در طراحی سازه‌های بتنی موجب افزایش دوام، ظرفیت باربری و طول عمر سازه و دستیابی به یک طراحی با هزینه فایده زیاد خواهد گردید.

۴. بررسی سطح مقطع شکست و الیاف

پس از شکست نمونه‌ها، سطح مقطع شکست و نوک الیاف مورد بررسی قرار گرفت. بررسی سطح مقطع شکست نشان داد که شکست از ناحیه سنگدانه‌ها اتفاق افتاده که بیانگر عملکرد مطلوب ملات می‌باشد. همچنین، بررسی

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مقاومت خمشی، مقاومت پس از ترک خوردگی بتن الیافی، طاقت خمشی برای نمونه‌های بتن الیافی با طرح اختلاط یکسان و چهار ترکیب مختلف الیاف اندازه‌گیری و تأثیر الیاف بر عملکرد خمشی بتن آنها بررسی شد. نتایج اصلی پژوهش حاضر به شرح زیر است:

- طبق نتایج به‌دست آمده، اضافه نمودن الیاف به میزان یک کیلوگرم بر متر مکعب، مقاومت خمشی را برای نمونه‌های حاوی الیاف نوع ۱ به میزان ۱۴/۶۴ درصد، نوع ۲ به میزان ۱۰/۸۴ درصد، نوع ۳ به میزان ۳/۳۱ درصد و نوع ۴ به میزان ۱۶/۹۶ درصد افزایش می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، الیاف نوع ۴ که ترکیبی از الیاف درهم‌تنیده و شبکه‌ای است بیشترین مقاومت خمشی را به‌دست آورد.

- بررسی نتایج آزمایش میانگین مقاومت باقیمانده نشان می‌دهد که اضافه نمودن الیاف به میزان یک کیلوگرم بر متر مکعب به بتن برای نمونه‌های حاوی الیاف نوع ۳ (الیاف درهم‌تنیده از جنس نایلون) بیشترین و نوع ۴ کمترین میانگین مقاومت باقیمانده را نتیجه می‌دهد.

۵. مراجع

- Alberti, M., Enfedaque, A. and Gálvez, J. 2017. "Fibre reinforced concrete with a combination of polyolefin and steel-hooked fibres". *Composite Struct.*, 171: 317-325.
- ACI 360R-10. 2010. "Guide to design of slabs-on-ground. ACI Committee 360.
- ACI 211.1-91. 2009. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. ACI Committee 211.
- Afroughsabet, V. and Ozbakkaloglu, T. 2015. "Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers". *Constr. Build. Mater.*, 94: 73-82.
- ASTM, C. 2002. "Test method for obtaining average residual-strength of fiber-reinforced concrete". *Annual Book of ASTM Standards*, 4, pp. 1-5.
- ASTM C78-09. 2009. "Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading). ASTM International.
- ASTM C1609. 2011. "Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading). *Book of ASTM Standards*.
- Bordelon, A. and Roesler, J. R. 2009. "Fiber-reinforced concrete pavement design and material requirements". 8th International Conference (BCR2A'09), Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields.
- Daneshfar, M., Hassani, A., Aliha, M. R. M. and Berto, F. 2017. "Evaluating mechanical properties of macro-synthetic fiber-reinforced concrete with various types and contents". *Strength of Mater.*, 49: 618-626.
- Eswari, S. 2015. "Experimental investigation on flexural performance of hybrid fibre reinforced concrete". *Int. Res. J. Eng. Technol.*, 2(3): 1772-1776.
- Fallah, S. and M. Nematzadeh. 2017. "Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume". *Constr. Build. Mater.*, 132: 170-187.
- Hesami, S., Ahmadi, S. and Nematzadeh, M. 2014. "Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement". *Constr. Build. Mater.* 53: 680-691.
- Hesami, S., Hikouei, I. S. and Emadi, S. A. A. 2016. "Mechanical behavior of self-compacting concrete pavements incorporating recycled tire rubber crumb and reinforced with polypropylene fiber". *J. Clean. Prod.*, 133: 228-234.
- Jadhav, H. and Koli, M. 2013. "Flexural behavior of hybrid fiber reinforced concrete beams". *Int. J. Struct. Civ. Eng. Res.*, 2: 211-218.
- Jiabiao, J., Loh, S. and Gasho, T. 2004. "Synthetic structure fibers for toughness and crack control of concrete". 29th Conference on Our World in Concrete and Structures, 25-26 Aug., Singapore.
- Karadelis, J. N. and Lin, Y. 2015. "Flexural strengths and fibre efficiency of steel-fibre-reinforced, roller-compacted, polymer modified concrete". *Constr. Build. Mater.*, 93: 498-505.
- Kumar, R., Goel, P. and Mathur, R. 2013. "Suitability of concrete reinforced with synthetic fiber for the construction of pavements". *Proc. of the 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*.
- Lee, J. H., Cho, B. and Choi, E. 2017. "Flexural capacity of fiber reinforced concrete with a consideration of concrete strength and fiber content". *Constr. Build. Mater.*, 138: 222-231.
- Li, Z. 2011. "Advanced concrete technology". John Wiley and Sons, N. Y.
- Pajak, M. and Ponikiewski, T. 2013. "Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers". *Constr. Build. Mater.*, 47: 397-408.
- Pakravn, H., Latifi, M. and Jamshidi, M. 2017. "Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review". *Constr. Build. Mater.*, 142: 280-294.
- Ramujee, K. 2013. "Strength properties of polypropylene fiber reinforced concrete". *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.*, 2: 3409-3413.
- Rao, G. A. and Rao, A. 2010. "Toughness indices of fiber reinforced concrete subjected to mode II loading. *Proc. of FraMCoS-7*, pp. 112-117.
- Rooholamini, H., Hassani, A. and Aliha, M. 2018. "Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology". *Constr. Build. Mater.*, 159: 517-529.
- Saidani, M., Saraireh, D. and Gerges, M. 2016. "Behaviour of different types of fibre reinforced concrete without admixture". *Eng. Struct.* 113: 328-334.
- Singh, S., Singh, A. and Bajaj, V. 2010. "Strength and flexural toughness of concrete reinforced with steel-polypropylene hybrid fibres". *Asian J. Civ. Eng. (Build. Hous.)*, 11(4): 495-507.

- Silva, F. and Thaumaturgo, C. 2003. "Fibre reinforcement and fracture response in geopolymeric mortars". *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 26(2): 167-172.
- Toledo Filho, R. D. and Sanjuan, M. A. 1999. "Effect of low modulus sisal and polypropylene fibre on the free and restrained shrinkage of mortars at early age". *Cement Concrete Res.*, 29: 1597-1604.
- Vairagade, V., Kene, K. and Deshpande, N. 2012. "Investigation of compressive and tensile behavior of fibrillated polypropylene fibers reinforced concrete. *Int. J. Eng. Res. Appl.*, 2: 1111-1115.
- Vibhuti, R. B. and Radhakrishna, A. N. 2013. "Mechanical properties of hybrid fiber reinforced concrete for pavements". *Int. J. Res. Eng. Technol.*
- Yew, M. K., Mahmud, H. B., Ang, B. C. and Yew, M. C. 2015. "Influence of different types of polypropylene fibre on the mechanical properties of high-strength oil palm shell lightweight concrete. *Constr. Build. Mater.*, 90: 36-43.
- Yoo, D. Y., Kim, S. W. and Park, J. J. 2017. "Comparative flexural behavior of ultra-high-performance concrete reinforced with hybrid straight steel fibers. *Constr. Build. Mater.*, 132: 219-229.

