

بررسی رفتار مکانیکی بتن ساخته شده با الیاف بازیافتی پت برای کاربردهای سازه‌ای

مرتضی طوفانی

کارشناس ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد.

محمدرضا اصفهانی*

استاد دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد.

ابراهیم زمانی

استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.

چکیده

با توجه به افزایش روز افزون استفاده از بطری‌های پت، تحقیق کنونی تلاشی برای بهره‌جویی از الیاف ساخته شده از بطری‌های بازیافتی پت در صنعت بتن می‌باشد. از طرفی رفتار بتن معمولی حاوی الیاف بازیافتی هنوز به‌طور کامل مطالعه نگردیده و دستورالعمل‌های لازم منتشر نشده است. در این پژوهش اثر الیاف پلی اتیلن ترفتالات بر روی خواص مکانیکی بتن سخت شده بررسی می‌شود. به این منظور، الیاف در سه اندازه ۱، ۲ و ۳ سانتی متر و سه تراکم حجمی ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۵٪ برای این تحقیق انتخاب شدند. همه مخلوط‌ها برای مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت خمشی، دوام و ضربه مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزودن الیاف، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و جذب انرژی به ترتیب ۵ تا ۱۸ درصد، ۶ تا ۳۰ درصد و ۳۰ تا ۱۵۶ درصد افزایش می‌یابند در حالیکه مقاومت خمشی تغییر محسوسی نداشته و حتی کاهش مقاومت مشاهده می‌شود. نتایج حاکی از افزایش ۱۷ تا ۱۶۰ درصدی سختی و طاقت خمشی، در ترکیبات بتنی الیافی نسبت به بتن معمولی می‌باشد. همچنین ضربه پذیری بتن الیافی نیز نسبت به بتن شاهد ۲ تا ۷ برابر افزایش می‌یابد. با مقایسه مجموعه نتایج آزمایش‌ها، مشخص گردید که با توجه به جمع‌بندی‌ها، ترکیبات حاوی الیاف ۲ سانتیمتر با نسبت حجمی ۴۵٪ عملکرد بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارند.

واژه‌های کلیدی: بتن الیافی، الیاف بازیافتی پت، جمع‌شدگی، طاقت و مقاومت خمشی، دوام، آزمایش ضربه.

* نویسنده مسئول: esfahani@um.ac.ir

۱- مقدمه

کین بو و همکاران [۹] بتن با الیاف پت و سنگ‌دانه بازیافتی را با الیاف گونی با همین نوع سنگ‌دانه مقایسه نمودند که رفتار الیاف پت از جوانب مختلف، مشخصات مکانیکی بتن را بیشتر بهبود داد. عدنان و داوود [۱۰] رفتار تیرهای بتنی ساخته شده با الیاف پت را با درصد‌های مختلف الیاف با یکدیگر مقایسه نمودند. درصد بهینه الیاف برابر ۱/۵ درصد حجم بتن به دست آمد و بتن‌های الیافی توانستند شکل پذیری و سختی اولیه بیشتری در نمونه‌ها ایجاد کنند. هرچند منجر به مقاومت نهایی و سختی سکانت کمتری شدند.

در این پژوهش الیاف مورد نیاز، با استفاده از تسمه‌های بازیافتی پت تهیه گردید. جهت افزایش چسبندگی بتن و الیاف، با عبور دادن الیاف از بین چرخ‌دنده‌های دستگاه تغییر شکل دهنده، الیاف موج‌دار در سه طول ۱، ۲ و ۳ سانتیمتری در آزمایشگاه تهیه گردید. همچنین حجم الیاف ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۵٪ در نظر گرفته شد. در این پژوهش اثرات استفاده از الیاف بازیافتی پت بر مقاومت فشاری، مقاومت کششی، طاقت خمشی، دوام، مقاومت در برابر ضربه، و جمع‌شدگی مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت.

۲- برنامه آزمایش

۲-۱- جزئیات نمونه‌ها و نحوه انجام آزمایش

در این مطالعه، ابتدا با تحلیل نتایج دانه‌بندی، نمونه‌هایی جهت دست یافتن به طرح شاهد ساخته شد. پس از تعیین و دستیابی به طرح نهایی اختلاط، برای پیش‌بینی و بررسی عملکرد بتن مسلح شده به الیاف بازیافتی پت، الیاف در سه درصد مختلف حجمی (۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۵٪) و در سه طول متفاوت (۱، ۲ و ۳ سانتیمتر) تهیه شد. سپس نمونه‌هایی در ۱۰ ترکیب متفاوت شامل ۹ ترکیب بتن الیافی و ۱ ترکیب بتن شاهد مطابق جدول (۱) ساخته شد. نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب‌ها خارج شده و جهت عمل آوری تا سن مورد نظر آزمایش در حوض آب قرار گرفتند.

۲-۲- مشخصات مصالح به کار رفته

۲-۱-۱- سیمان

سیمان مصرفی از شرکت سیمان شرق با مشخصات استاندارد ملی ایران به شماره ۳۸۹ مطابق کامل دارد [۱۱]. مشخصات سیمان

یکی از راه‌حل‌های مناسب برای بهبود خواص بتن استفاده از مقادیر کم الیاف به منظور کنترل رشد ترک و افزایش مقاومت کششی بتن می‌باشد. کاربرد الیاف به‌طورفراگیر از اوایل سال ۱۹۶۰ در کشورهای صنعتی پیشرفته آغاز شده و در طی این ۴ دهه جنس و شکل الیاف و نحوه ساخت بتن الیافی بهبود یافته و کاربرد آن نیز فزونی یافته است. الیاف به کار رفته در بتن در جنس‌های مختلفی نظیر شیشه، فولاد، کربن، پلی پروپیلن، کولار و غیره تولید می‌شوند.

دفع زباله، چالشی بزرگ در هر کشور بوده و استفاده از مواد محصولات پلاستیکی روز به روز در حال افزایش است. متأسفانه درصد کمی از این محصولات بازیافت می‌شود و مابقی آن که سهم عمده‌ای از زباله‌های شهری را در بر می‌گیرند، دفن می‌گردند که این امر، آسیبهای زیست محیطی جبران‌ناپذیری را به دنبال داشته است. بخش عمده‌ای از زباله‌های پلاستیکی شامل بطری‌های آب معدنی، انواع نوشیدنی‌ها، تسمه بسته‌بندی از جنس پلی اتیلن ترفتالات^۱ (پت) می‌باشد. بنابراین با کاربرد الیاف پت در بتن علاوه بر حفظ محیط زیست، هزینه دفن کاهش یافته و رفتار بتن بهبود می‌یابد.

الیاف پلاستیکی نسبت به الیاف فولادی دارای مزایای متعددی شامل وزن پایین تر برای محتوای حجم برابر، هزینه‌های حمل و نقل پایین تر، مقاومت در برابر خوردگی بالاتر، سازگاری بیشتر با مواد افزودنی، هدایت حرارتی پایین تر، کارایی بالاتر و سایدگی کمتر ماشین‌آلات و تجهیزات می‌باشد [۱-۴]

نیبودی و همکاران [۵] اثر افزودن الیاف پت بدست آمده از بطری‌های آب معدنی را بر عملکرد بتن بررسی کردند. بتن در دو رده با عیار ۲۰ و ۳۰ مگاپاسکال مورد آزمایش قرار گرفت. داسیلوا و فرناندز [۶] اثر الیاف بازیافتی پت را بر رفتار خمشی ماتریس سیمانی بررسی کردند. اوچی و همکاران [۷] الیاف پت به طول ۳۰ و قطر ۰/۷ میلی‌متر را با درصد‌های حجمی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد به بتن با سه نسبت آب به سیمان متفاوت افزودند و مقاومت فشاری و خمشی آن‌ها را ارزیابی کردند. کیم و همکاران [۸] اثر افزودن الیاف PET و PP را به بتنی با طرح اختلاط ثابت و نسبت آب به سیمان ۰/۴۱ در مقاومت فشاری و خمشی با هم مقایسه نمودند. الیاف PET و الیاف PP به طول، عرض و ضخامت‌های متغیر انتخاب شدند.

^۱ Polyethylene terephthalate

مصرفی طبق گزارش ارائه شده توسط شرکت سازنده در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۱- جزئیات نمونه های ساخته شده برای هر آزمایش

آزمایش	استاندارد	ابعاد (cm)			تعداد نمونه ها	
		ارتفاع	عرض	قطر یا طول	۷ روزه	۱۴ روزه
فشاری	ISIRI 3206	۱۵	۱۵	۱۵	۳	-
کششی	ASTM C 496	-	۳۰	۱۵	-	۳
مقاومت خمشی طاق خمشی	ASTM C 78	۱۰	۱۰	۳۵	-	۳
	ASTM C 1018					
جمع شدگی	IS-1199	۷/۵	۷/۵	۲۸/۵	-	۳
ضربه	ACI 544.2R-89 ASTM D1557	-	۶/۳۵	۱۵	۳	۳
دوام	-	۱۵	۱۵	۱۵	-	۶

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان ۱-۴۲۵

مشخصات فیزیکی		مشخصات شیمیایی	
تیپ ۱-۴۲۵	استاندارد ملی	تیپ ۱-۴۲۵	استاندارد ملی
سیمان شرق	(۳۸۹)	سیمان شرق	(۳۸۹)
بلین (cm ² /gr)	۲۹۰۰	۴/۷۶ (درصد)	۶ حداکثر
گیرش اولیه	۱۵۰	۳/۴۴ (درصد)	۶ حداکثر
(دقیقه) نهایی	۲۰۰	۳۵/۶۳ (درصد)	-
مقاومت ۲روزه	۱۵۰	۲/۹۰ (درصد)	۵ حداکثر
فشاری ۷روزه	۲۹۰	۱/۹۹ (درصد)	۳ (حداکثر)
(kg/Cm ²) ۲۸روزه	۴۷۵	۴۰/۲ (درصد)	-
انبساط اتوکلاو (%)	۰/۱۲		
	۰/۸		

۲-۲-۲- سنگ دانه

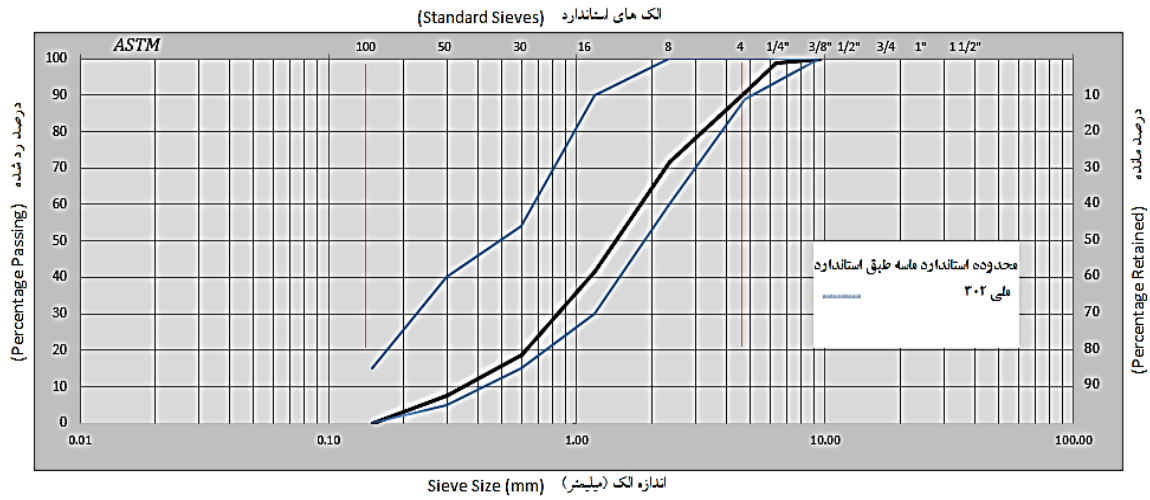
بررسی اثر طول الیاف و تعیین طول رول پت بسته بندی که از پت های باز یافتی ساخته شده است، تهیه گردید. مشخصات پت مصرف شده در جدول (۵) ارائه شده است.

نتایج آزمایش های اولیه انجام شده روی مصالح سنگی و همچنین منحنی دانه بندی و جداول هریک در ۰۰ ارائه شده است. در این پژوهش با توجه به مصالح در دسترس، حدود دانه بندی ماسه با استفاده از استاندارد ملی ۳۰۲ ایران، کنترل و تعیین گردید [۱۲]. نتایج آزمایش های انجام شده بر روی سنگ دانه های ریزدانه و درشت دانه در جدول (۳) و جدول (۴) ارائه شده است.

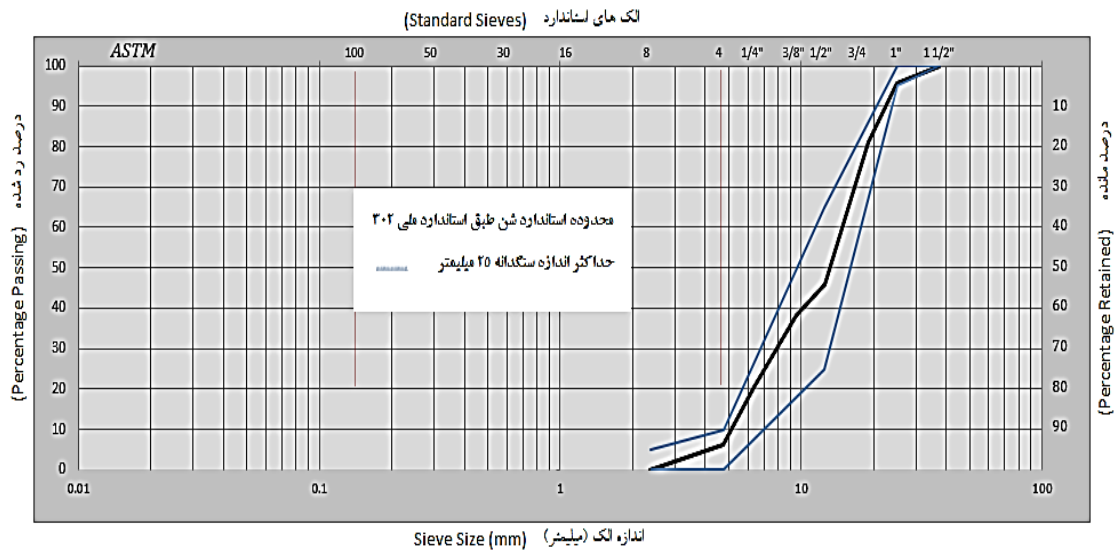
۲-۲-۳- الیاف

جهت چسبندگی و گیرداری بهتر بین الیاف و ماتریس بتن، الیاف به شکل موجدار با استفاده از دستگاه تغییر شکل دهنده مطابق ۰ بهینه الیاف، الیاف در سه طول ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلیمتر تهیه شد و در سه درصد حجمی ۰/۱۵، ۰/۳ و ۰/۴۵ درصد، مورد استفاده قرار گرفت. الیاف پت تولید شده ضخامت ۰/۸ میلیمتر، مقاومت کششی ۵۶۰۰ نیوتن و کشیدگی ۱۵٪ تا ۱۷٪ دارند.

الیاف استفاده شده در این پژوهش از تسمه تهیه گردید. به منظور



شکل ۱- منحنی دانه بندی ماسه



شکل ۲- منحنی دانه بندی درشت دانه (۶۰٪ بادامی + ۴۰٪ نخودی)

جدول ۴- نتایج آزمایش های انجام شده بر روی مصالح درشت دانه

آزمایش	۴۰ درصد بادامی + ۶۰ درصد نخودی
وزن مخصوص اشباع با سطح خشک	۲/۷
وزن واحد حجم درشت دانه خشک	۱/۷۱۴
میل خورده	
درصد جذب آب	۰/۶

جدول ۳- نتایج آزمایش های انجام شده بر روی مصالح ریزدانه

آزمایش	نتیجه
وزن واحد حجم با ویبره	۱/۷۹ t/m ³
وزن مخصوص ریزدانه اشباع با سطح ظاهری خشک	۲/۶۲ t/m ³
درصد جذب آب	٪ ۱/۲۵
ارزش ماسه (Se)	٪ ۸۴

به طور مثال ترکیب شامل الیاف ۲ سانتیمتر با درصد حجمی ۰/۳ درصد بصورت FRC 2.30 نمایش داده شده است. طرح اختلاط مطابق نشریه ض-۴۷۹ انجام گرفت [۱۳]. هدف طرح مخلوط بتنی برای ساخت اعضای سازه ای بتن مسلح با مقاومت مشخصه مکعبی

در این پژوهش، نامگذاری ترکیبات به نحوی انجام شد که به خوبی بیان کننده درصد الیاف و طول الیاف باشد. برای نمونه شاهد غیر مسلح از PC و ترکیبات شامل الیاف از FRC X.Y، که در آن X طول الیاف به سانتیمتر و Y نشانگر درصد حجمی الیاف مورد استفاده است.

در این پژوهش ارائه نشده است. اما خلاصه نتایج آزمایش‌های بر روی بتن سخت شده به شرح زیر است.

۳-۱- مقاومت فشاری

آزمایش فشاری توسط یک جک نیمه اتوماتیک با ظرفیت ۳۰۰ تن بر اساس استاندارد ۳۲۰۶ استاندارد ملی ایران انجام شد. جدول (۷) نتایج آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مختلف تهیه شده در آزمایشگاه در شرایط عمل آوری شده در آب، در سنین ۷ و ۲۸ روزه را نشان می‌دهد. این مقادیر، میانگین مقاومت فشاری سه نمونه هستند.

جدول ۷- مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین مختلف

ترکیب	مقاومت فشاری (MPa)		درصد تغییرات	
	۲۸ روزه	۷ روزه	نسبت به نمونه شاهد	۲۸ روزه
PC	۳۵/۷۹	۴۱/۹۷	-	-
FRC 1.15	۴۱/۴۸	۴۴/۵۲	+۱۶	+۶
FRC 1.30	۴۵/۳۱	۴۳/۶۴	+۱۱	+۴
FRC 1.45	۴۶/۱۹	۴۶/۹۷	+۱۸	+۱۲
FRC 2.15	۴۸/۷۴	۴۸/۶۴	+۱۸	+۱۶
FRC 2.30	۴۵/۲۱	۴۴/۰۳	+۹	+۵
FRC 2.45	۳۸/۵۴	۴۴/۹۱	-۱	+۷
FRC 3.15	۴۰/۵۰	۴۵/۸۰	+۱۴	+۹
FRC 3.30	۴۴/۵۲	۴۹/۱۳	+۱۰	+۱۷
FRC 3.45	۴۵/۳۱	۴۸/۶۴	+۱۷	+۱۶

از نتایج جدول (۷) نتیجه می‌شود که به طور کلی افزودن الیاف پت منجر به افزایش ۵ تا ۱۸ درصدی مقاومت فشاری، نسبت نمونه شاهد می‌شود. در مورد روند افزایش مقاومت، با افزایش درصد حجمی، مقدار افزایش مقاومت بیشتر می‌شود این افزایش نسبت حجمی تا ۱٪ منجر به افزایش مقاومت فشاری و بیشتر از آن سبب کاهش مقاومت فشاری می‌گردد [۹]. افزایش طول نیز منجر به بهبود و افزایش بیشتر مقاومت می‌گردد. هرچند این افزایش طول اگر با درصد ثابت حجم الیاف انجام شود تأثیر به مراتب کمتری دارد [۹].

با بررسی مراجع معتبر این نکته حائز اهمیت است همانند مقاله

۲۸ روزه ۴۰ مگاپاسکال و اسلامپ متوسط ۷۵ می‌باشد. طبق آنچه در بخش‌های قبل بیان شد، از سیمان پرتلند نوع ۱-۴۲۵ با وزن مخصوص 3 kg/m^3 استفاده شده و اطلاعات و دانه بندی سنگ‌دانه مورد استفاده طبق جدول‌های (۳) و (۴) می‌باشد. در نهایت ترکیب جدول (۶) بعنوان طرح شاهد در نظر گرفته شد.

جدول ۵- مشخصات پت مصرفی

مقدار	کمیت
RPET	نوع الیاف
۰/۸	ضخامت (mm)
۵۶۰۰	مقاومت کششی (N)
۱۵-۱۷	درصد کشیدگی (%)



شکل ۳- دستگاه تغییر شکل دهنده الیاف

جدول ۶- ترکیب مصالح طرح شاهد در یک متر مکعب بتن

سیمان (kg)	آب (kg)	درشت دانه ۴۰٪	
		ریزدانه	w/c
۳۷۵	۱۸۰	۴۴۳	۱۰۹۵
(kg)	(kg)	بادامی نخودی	(kg)
		۲۴٪	۱۶٪

۳- آزمایش‌های انجام شده و نتایج

به دلیل ازدیاد نتایج و طولانی شدن بحث، نتایج آزمایش‌های بر روی بتن تازه (اسلامپ، وزن مخصوص و درصد هوای بتن تازه)

دقیق مشخص کرد که نقاط مختلف نمونه‌ها چگونه ساختاری دارند، علت این پدیده می‌تواند ناشی از توزیع نامناسب و جهت قرار گیری الیاف در راستای شکاف باشد. همچنین اختلاط نامناسب مخلوط بتن حاوی الیاف PET می‌تواند دلیل این موضوع باشد. کاهش در مقاومت کشش مستقیم بتن با اضافه شدن الیاف PET در برخی تحقیقات پیشین نیز مشاهده شده است. از علل این امر می‌تواند بعثت عواملی همانند عدم توزیع یکنواخت، انباشتگی الیاف افزایش تخلخل، کاهش تراکم در بتن و ... گزارش شده است [۱۷، ۲۱].

۳-۳- آزمایش ضربه

این روش بر مبنای تکرار ضربات است و تعداد ضربات بیان‌کننده میزان انرژی جذب شده توسط بتن می‌باشد. بر اساس استاندارد ASTM D155 و ACI 544.2R-89 این آزمایش روش مناسبی جهت مقایسه بتن الیافی نسبت با بتن معمولی در برابر بارهای دینامیکی می‌باشد [۲۲].

نمونه دیسکی شکل به قطر ۱۵ سانتیمتر و ضخامت ۶۴ میلیمتر، طبق روش پیشنهادی استاندارد ACI-544 مورد آزمایش ضربه قرار گرفت. در این پژوهش با حفظ مقدار انرژی ضربه واحد، با استفاده از گوی ۳/۰۵ کیلویی از ارتفاع ۶۸ سانتیمتر بر نمونه‌های دیسکی شکل، ضربات متوالی وارد شد. دو مشخصه تعیین‌کننده مقاومت ضربه نمونه‌ها عبارتند از تعداد ضربات متناظر با اولین ترک قابل رویت، و تعداد ضربات لازم تا گسیختگی نهایی. یعنی زمانی که نمونه دیسک بتنی سه قسمت از چهار قسمت نگهدارنده‌های روی صفحه فلزی را لمس کند. ۰ دستگاه آزمایش ضربه را نشان می‌دهد [۲۲].



شکل ۴- دستگاه آزمایش ضربه

حاضر، تقریباً در اکثر مقالات مرتبط با بتن‌های حاوی الیاف بازیافتی PET افزایش مقاومت فشاری در درصد‌های گوناگون الیاف مشاهده شده است [۶، ۱۴-۲۰] هرچند عده محدودی، کاهش اندکی در مقاومت فشاری گزارش نموده‌اند [۱۶، ۱۷، ۱۹].

۳-۲- مقاومت شکافت کششی

بر اساس استاندارد ASTM C496-90 تست کشش غیر مستقیم برای تعیین مقاومت شکافت کششی بتن بر روی نمونه‌های استوانه‌ای قالب‌گیری شده یا مغزه‌گیری شده انجام می‌شود [۲۰]. سرعت بارگذاری بطور یکنواخت در محدوده ۶۸۹ تا ۱۳۸۰ کیلوپاسکال بر دقیقه تا هنگام گسیختگی نمونه اعمال شد. سپس بیشترین بار اعمال شده در زمان گسیختگی ثبت و مقاومت کششی دو نیم شدن نمونه با استفاده از روابط مرجع [۲۰] محاسبه گردید. نتایج آزمایش شکافت در جدول (۸) ارائه گردیده است.

جدول ۸- مقاومت شکافت کششی نمونه‌ها

مقاومت کششی	درصد تغییرات نسبت	ترکیب
(MPa)	به نمونه شاهد	
۲۸ روزه	۲۸ روزه	
۳/۲۴	-	PC
۳/۶۳	+۱۲	FRC 1.15
۳/۰۴	-۶	FRC 1.30
۳/۵۳	+۹	FRC 1.45
۳/۳۴	+۳	FRC 2.15
۳/۲۴	۰	FRC 2.30
۳/۰۴	-۶	FRC 2.45
۳/۳۴	+۳	FRC 3.15
۳/۳۴	-۳	FRC 3.30
۳/۲۴	۰	FRC 3.45

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در درصد حجمی کم الیاف (۱۵/۰ درصد حجمی) افزایش اندکی در شکافت کششی پدیدار می‌شود ولی در درصد حجمی بیشتر، تأثیر ناچیز و حتی مقداری کاهش در مقاومت شکافت کششی ایجاد می‌شود. با افزایش طول الیاف از یک به دو و سه سانتیمتر، عملکرد کششی دارای نوسان می‌باشد. با توجه به اینکه بتن ماده ناهمگن است و نمی‌توان به‌طور

نمونه‌ها در دو سن ۱۴ و ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند و مقدار می‌باشد.

انرژی جذب شده از رابطه (۱) بدست می‌آید. برای سنجش ضربه‌پذیری بتن از تنها استاندارد ارائه شده توسط

$$W = N_c \times m \times g \times h = 20.35 \times N_c \quad (1)$$

که در آن W (J) جذب انرژی، N_c تعداد پرتابه گسیختگی، m استفاده شده است. جدول (۹) نتایج این آزمایش را نشان می‌دهد.

(kg) جرم گوی، g (m/s²) گرانش زمین و h (m) ارتفاع پرتابه این مقادیر میانگین سه نمونه هستند.

جدول ۹- مقایسه عوامل مربوط به ضربه‌پذیری ۲۸ روزه نمونه‌ها

ترکیب	انرژی ضربه واحد (J)	تعداد پرتابه تا مشاهده اولین ترک (N ₁)	تعداد پرتابه تا گسیختگی کامل (N _c)	(N ₁ /N _c) (%)	انرژی تجمعی (J)	درصد تغییرات نسبت به نمونه شاهد
PC	۲۰/۳۵	۳۷	۳۹	۹۴/۹	۷۹۳	-
FRC 1.15	۲۰/۳۵	۶۸	۷۱	۹۵/۸	۱۴۴۵	+۸۲
FRC 1.30	۲۰/۳۵	۴۳	۴۶	۹۳/۵	۹۳۶	+۱۸
FRC 1.45	۲۰/۳۵	۱۳۰	۱۳۳	۹۷/۷	۲۷۰۶	+۲۴۰
FRC 2.15	۲۰/۳۵	۱۴۷	۱۵۴	۹۵/۴	۳۱۳۴	+۲۹۵
FRC 2.30	۲۰/۳۵	۱۵۰	۱۷۰	۸۸/۲	۳۴۶۰	+۳۳۶
FRC 2.45	۲۰/۳۵	۳۴۲	۳۶۱	۹۴/۷	۷۳۴۶	+۸۲۶
FRC 3.15	۲۰/۳۵	۱۴۸	۱۵۸	۹۳/۷	۳۲۱۵	+۳۰۵
FRC 3.30	۲۰/۳۵	۲۷۸	۳۰۲	۹۲	۶۱۴۵	+۶۷۵
FRC 3.45	۲۰/۳۵	۲۹۴	۳۱۷	۹۲/۷	۶۴۵۰	+۷۱۳

با توجه به جدول (۹) با افزایش الیاف، میزان مجموع انرژی جذب

شده توسط نمونه‌ها نسبت به طرح شاهد، با توجه به درصد و طول

الیاف بین ۸۰ تا ۷۰۰ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش درصد

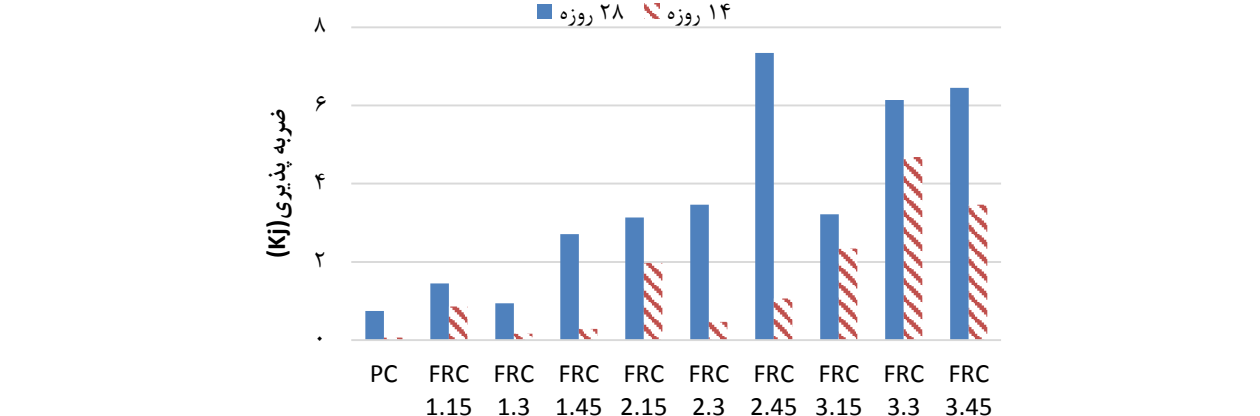
حجمی الیاف و طول الیاف، تعداد پرتابه لازم جهت گسیختگی

افزایش می‌یابد. نسبت (N₁/N_c) در هر سه طول ۱، ۲ و ۳ سانتیمتر

الیاف، در درصد حجمی ۰/۳ درصد کمینه است که بیان کننده

اختلاف بیشتر بین ترک اولیه تا ترک گسیختگی است.

همانطور که در ۰ مشاهده می‌شود با افزایش درصد و طول الیاف،



شکل ۵- نتایج ضربه‌پذیری

۳-۴- مقاومت خمشی

افزایش طول مقدار افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد کاهش می‌یابد. دلیل این روند، ناشی از توزیع بهتر و همگن بودن ترکیبات مسلح به الیاف یک سانتیمتری نسبت به ترکیبات مسلح به الیاف ۲ و ۳ سانتیمتری است.

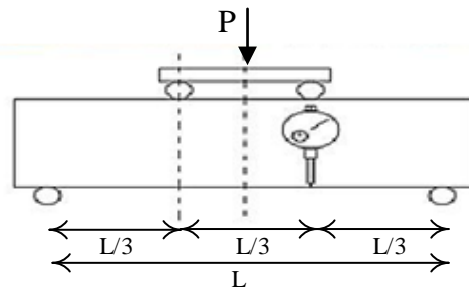
جدول ۱۰- مقایسه مقاومت خمشی نمونه‌ها

درصد تغییرات	مقاومت خمشی (MPa)	حداکثر بار (kN)	ترکیب
نسبت به نمونه شاهد			
-	۴/۳۱	۱۴/۳۸	PC
+۳۳	۵/۷۶	۱۹/۱۸	FRC 1.15
+۲۴	۵/۳۶	۱۷/۸۷	FRC 1.3
+۲۴	۵/۳۶	۱۷/۸۷	FRC 1.45
+۶	۴/۵۸	۱۵/۲۵	FRC 2.15
+۲۱	۵/۲۰	۱۷/۴۴	FRC 2.3
+۲۳	۵/۳۰	۱۷/۶۶	FRC 2.45
+۲۴	۵/۳۶	۱۷/۸۷	FRC 3.15
+۶	۴/۹۷	۱۶/۵۷	FRC 3.30
+۱۸	۵/۱۰	۱۷	FRC 3.45

نحوه بروز ترک در نمونه‌های خمشی گسیخته شده در شکل (۷) مشاهده می‌شود. در این میان، نمونه شاهد، نمونه ترکیبات حاوی الیاف ۱ سانتیمتر و درصد حجمی ۰/۱۵ درصد الیاف ۲ و ۳ سانتیمتری، به‌طور کامل گسیخته و جدا می‌شوند. در حالی که در درصد حجمی ۰/۳ و ۰/۴۵ درصد ترکیبات حاوی الیاف ۲ و ۳ سانتیمتری، پدیده پل زدگی توسط الیاف PET مشهود است و با محدود و کنترل کردن ترک‌ها، نمونه‌ها بطور کامل به تکه‌های مجزا تبدیل نمی‌شوند. بنابراین، افزایش طول و درصد الیاف سبب افزایش مقاومت خمشی و شکل پذیری نمونه‌ها می‌گردد؛ هرچند با افزایش بیش از ۱ درصدی الیاف، اندکی از افزایش مقاومت کاسته می‌شود [۱۴].

در تمامی نمونه‌ها، محل ترک در یک سوم میانی تیر و بین نقاط بارگذاری می‌باشد. مناسب‌ترین حالت عملکرد برای تیرهای الیافی، جاری شدن الیاف و بیرون کشیده شدن آن بدون وقوع گسیختگی بوده که این رفتار موجب افزایش شکل‌پذیری ناشی از تحمل تغییر شکل زیاد توسط عضو می‌گردد. همانطور که در شکل (۸) مشاهده

بر استاندارد شماره ۴۹۰ نشریات ملی ایران و ASTM C78، مقاومت خمشی بتن با انجام آزمایش چهار نقطه ای تعیین می‌گردد [۱۸]. قالب‌گیری، ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های بتن در آزمایشگاه بر طبق استاندارد شماره ۵۸۱ ایران انجام گرفت [۲۳]. مطابق ۰ نمونه‌های خمشی ۱۰*۱۰*۳۰ سانتیمتری تحت اثر بارگذاری چهار نقطه ای قرار گرفت. بر اساس استاندارد ۴۹۰ نشریات ملی ایران، چنانچه ترک در فاصله بین دو نقطه بارگذاری به‌وجود آید. مقاومت خمشی نمونه از رابطه (۲) و اگر ترک در خارج از فاصله بین دو بار باشد - مشروط بر آنکه فاصله آن تا نقطه بارگذاری از ۵ درصد طول تیر تجاوز ننماید- مقاومت خمشی نمونه از رابطه (۳) به‌دست می‌آید. در غیر از این دو صورت، آزمون باید تکرار گردد [۱۸].



شکل ۶- محل قرار گیری جابجایی سنج

$$R = \frac{PL}{bh^2} \quad (۲)$$

$$R = \frac{3Pa}{bh^2} \quad (۳)$$

که در آن R (kg/cm²) مقاومت خمشی نمونه، P (kg) حداکثر بار گسیختگی، L (cm) طول دهانه، h (cm) ارتفاع تیر و b (cm) عرض تیر می‌باشد. همچنین a (cm) فاصله بین مقطع ترک خورده با نزدیک‌ترین تکیه‌گاه بر حسب سانتی‌متر است. وزن تیر نباید در محاسبات فوق منظور گردد.

نتایج میانگین مقاومت خمشی در شرایط عمل‌آوری در آب و سن ۲۸ روزگی منطبق بر استاندارد ۴۹۰ ملی ایران و ASTM C78، در جدول (۱۰) ارائه شده است.

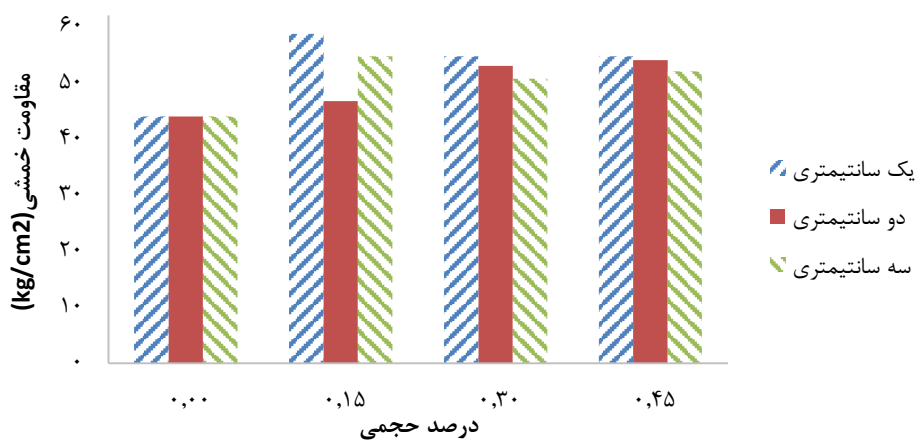
بر اساس نتایج جدول (۱۰) مشاهده می‌شود که به‌طور کلی افزودن الیاف، منجر به افزایش مقاومت خمشی به میزان ۶ تا ۳۳ درصد می‌شود. بیشترین مقدار افزایش در FRC 1.15 مشاهده شد. با

بررسی رفتار مکانیکی بتن ساخته شده با ...

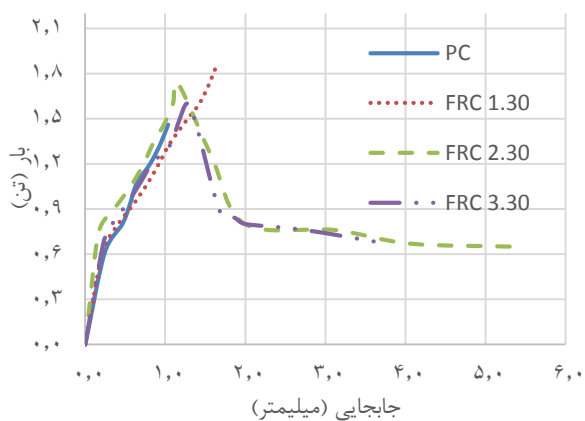
می‌شود در بین تمام ترکیبات ساخته شده، بهترین عملکرد در بار-جابجایی نشان داده شده در شکل‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱) نحوه خمش را ترکیب FRC 2.30، از خود نشان داد. در نمودارهای



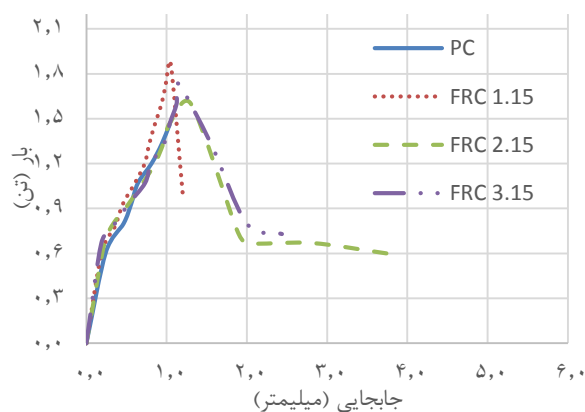
شکل ۷- نمونه های خمشی گسیخته شده



شکل ۸- مقاومت خمشی



شکل ۹- نمودار بار - جابجایی نمونه‌های خمشی در درصد حجمی ۰/۳۰ درصد



شکل ۱۰- نمودار بار - جابجایی نمونه‌های خمشی در درصد حجمی ۰/۱۵ درصد

بیشترین افزایش شکل‌پذیری در درصد حجمی ۰/۳ درصد مشاهده شد، در حالیکه بیشترین افزایش در مقاومت خمشی در درصد

میزان شکل‌پذیری و مقاومت خمشی بتن با افزودن الیاف یک سانتیمتری افزایش می‌یابد.

این خاصیت به عنوان طاقت خمشی بتن تعریف می‌شود. چنانچه الیاف طولی بیش از ۴۰ میلیمتر داشته باشند ابعاد نمونه تیرها باید (۱۵*۱۵*۵۰) سانتیمتر باشد و اگر طول الیاف کمتر از ۴۰ میلیمتر باشد ابعاد نمونه‌ها باید (۱۰*۱۰*۳۵) سانتیمتر باشد. بارگذاری در یک سوم دهانه انجام می‌گیرد و با نصب LVDT و یا اندیکاتور مکانیکی منحنی بار- تغییر شکل ترسیم می‌گردد. در این روش هنگامی که جابجایی به مقدار یک به صد و پنجاهم طول دهانه نمونه برسد سطح زیر منحنی نیرو - تغییر شکل تا سه رقم اعشار محاسبه شده و این سطح به عنوان طاقت خمشی (T_b) در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه در این پژوهش طول دهانه ۳۰ سانتیمتر است، میزان جابجایی تا ۲ میلیمتر مدنظر قرار می‌گیرد. ضریب طاقت خمشی با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود [۲۴].

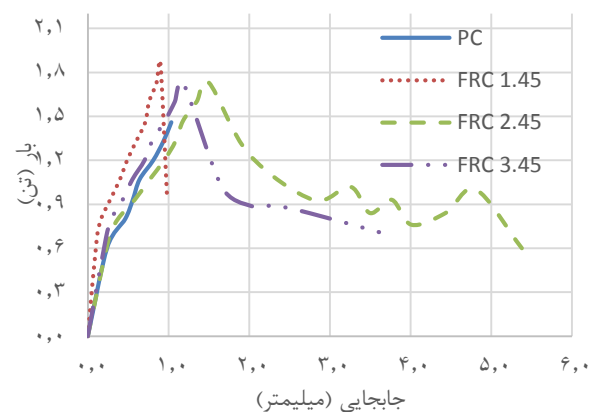
$$\sigma_b = \frac{T_b \cdot L}{\delta_{tb} \cdot b h^2} \quad (4)$$

که در آن σ_b (kg/cm²) ضریب طاقت خمشی نمونه، T_b (kg.cm) طاقت خمشی، δ_{tb} (mm) جابجایی به میزان ۲ میلیمتر، L (cm) طول دهانه، h (cm) ارتفاع تیر و b (cm) عرض تیر می‌باشد. سختی خمشی معادل شیب نمودار بار- تغییر مکان می‌باشد. در جدول (۱۱)، سختی و طاقت خمشی هر ترکیب به صورت میانگین بیان شده است.

بنا به نتایج به دست آمده از جدول (۱۱)، الگوی مشابهی برای مقادیر سختی و طاقت خمشی نمونه‌های بتن الیافی به دست آمد؛ بدان معنی که افزایش ۱۷ تا ۱۶۰ درصدی سختی و طاقت خمشی، در ترکیبات بتنی الیافی مشاهده می‌شود. در الیاف ۱ سانتیمتری، در درصد حجمی ۰/۳ درصد، بیشترین افزایش در سختی و طاقت خمشی و میزان خیز حداکثر نسبت به دو درصد حجمی دیگر مشاهده می‌شود، در حالی که در ترکیبات حاوی الیاف ۲ و ۳ سانتیمتری در درصد حجمی ۰/۴۵ درصد، بهترین عملکرد را نسبت به دو درصد دیگر مشاهده شد.

مناسب‌ترین حالت عملکرد برای تیرهای الیافی، جاری شدن الیاف و بیرون کشیده شدن آن بدون وقوع گسیختگی بوده که این رفتار موجب افزایش شکل پذیری ناشی از تحمل تغییر شکل زیاد توسط عضو می‌گردد. این رفتار در نمونه‌های FRC 2.45 مشاهده شد که در مجموع بهترین عملکرد در شکل پذیری و جذب انرژی را دارا بود.

حجمی ۰/۱۵ درصد رخ داد. در ترکیبات حاوی الیاف دو سانتیمتری، مقاومت خمشی، شکل پذیری و میزان خیز حداکثر، همگی افزایش یافتند. در این بین، درصد حجمی ۰/۳ بهترین عملکرد را دارد. انتقال نیرو پس از ترک خوردگی در هر سه درصد به خوبی مشهود می‌باشد. در ترکیبات حاوی الیاف سه سانتیمتری مشابه با الیاف ۱ و ۲ سانتیمتری افزایش مقاومت و شکل پذیری نسبت به نمونه شاهد مشاهده می‌شود. ترکیب FRC 3.15 دارای بیشترین مقاومت نسبت به درصد های حجمی بالاتر الیاف می‌باشد.



شکل ۱۱- نمودار بار - جابجایی نمونه‌های خمشی در درصد حجمی ۰/۴۵ درصد

تیر بتنی بدون الیاف و تیر حاوی الیاف ۱ سانتیمتری در ظرفیت نهایی خود دچار گسیختگی آبی گردیدند. در نمونه های با طول کوتاه الیاف به دلیل لغزش الیاف در فاصله ایجاد شده پس از ترک خوردگی یک شکست ترد مشاهده شد که در هر سه نمونه این پدیده قابل ملاحظه است.

رفتار نمونه های حاوی الیاف ۲ و ۳ سانتیمتری بسیار شکل پذیرتر و همراه با گسترش تدریجی ترک در حین تحمل نیرو بوده است. با توجه به نمودارهای ارائه شده، افزودن الیاف منجر به افزایش مقاومت خمشی، افزایش شکل پذیری، کنترل ترک و محدود کردن ترکها می‌شود. در بین ترکیبات ساخته شده، ترکیب FRC 2.45 بهترین عملکرد در کنترل ترک و افزایش شکل پذیری را دارد.

۳-۵- محاسبه ضریب طاقت مطابق JSCE-SF ژاپن

مهمترین اثر مثبتی که افزودن الیاف در بتن به وجود می‌آورد، انعطاف پذیری جسم بتن و قابلیت بیشتر در جذب انرژی می‌باشد،

جدول ۱۱- سختی و طاقت خمشی

ترکیب	طاقت خمشی (kg.cm)	سختی خمشی (kg/cm ²)	حداکثر خیز (mm)	مدت زمان آزمایش (sec)	درصد تغییرات نسبت به نمونه شاهد
PC	۸۸/۴	۱۳/۳	۱/۰۳	۴۰	-
FRC 1.15	۱۰۳/۹	۱۵/۶	۱/۳۶	۷۵	+۱۷
FRC 1.30	۱۸۱	۲۷/۱	۱/۵	۹۰	+۱۰۴
FRC 1.45	۱۱۲/۵	۱۶/۹	۱/۱۳	۹۰	+۲۷
FRC 2.15	۲۰۹	۳۱/۴	۳/۱	۶۰-۱۰۰	+۱۳۶
FRC 2.30	۲۲۸	۳۴/۲	۵/۳۵	۱۰۰-۳۰۰	+۱۵۷
FRC 2.45	۲۲۹/۹	۳۴/۵	۵/۳۸	۱۲۰-۳۶۰	+۱۵۹
FRC 3.15	۲۱۹/۷	۳۳	۳/۳۵	۸۰-۱۱۰	+۱۴۸
FRC 3.30	۲۰۴	۳۰/۶	۳/۸	۶۵-۲۱۰	+۱۳۰
FRC 3.45	۲۲۳/۶	۳۳/۵	۳/۹۴	۱۰۵-۲۸۰	+۱۵۲

۳-۶- آزمایش جمع شدگی

سانتیگراد و رطوبت نسبی ۱۷ درصد انجام گردید. فرایند گرمادهی و خنک شدن، آنقدر تکرار می شود که طول اندازه گیری شده ثابت شود. (زمانی که اختلاف بین دو عدد متوالی در دوره ۴۴ ساعته خشک شدن و بدنبال آن ۴ ساعت خنک شدن، کمتر از ۰,۰۲ میلیمتر باشد). مقدار جمع شدگی را می توان از اختلاف بین حالت خشک و اولیه که به صورت درصدی از طول اولیه می باشد، به دست آورد.

میزان جمع شدگی بنا به روش IS-1199: 1959، بر روی نمونه های ۲۸ روزه انجام و تعیین شد [۲۵]. مطابق شکل (۱۲) نمونه تیرهای مکعبی شکل به ابعاد ۷۵*۷۵*۲۸۵ میلیمتر تهیه و به مدت ۲۸ روز در آب عمل آوری گردید تا آماده انجام آزمایش جمع شدگی شوند.

با استفاده از دستگاه شکل (۱۲) میزان کرنش و تعداد سیکل انجام شده برای هر نمونه ثبت و گزارش می شود. کرنش از رابطه (۵) محاسبه می شود.

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_i}{L_i} \quad (5)$$

که در آن ε میزان کرنش طولی نمونه، L_i (mm) طول اولیه و L_f (mm) طول نهایی می باشد. میانگین نتایج در جدول (۱۲) ارائه شده است.

با توجه به نتایج حاصله، میزان جمع شدگی با افزایش درصد حجمی الیاف و افزایش طول الیاف، کمتر و کمتر می شود. به نحوی که در نمونه شاهد ۷ سیکل انجام گرفت در حالی که در FRC 3.45 تعداد سیکل مورد نیاز به ۲ سیکل کاهش یافت. این عملکرد مناسب در برابر جمع شدگی ناشی از شکل و موجودار بودن الیاف تولیدی است.



شکل ۱۲- دستگاه تعیین جمع شدگی ناشی از خشک شدن

پس از ۲۸ روز عمل آوری در دمای اتاق، طول اولیه نمونه ها ثبت و سپس وارد چرخه خشک شدن و خنک شدن گردید و میزان تغییرات طول نمونه ثبت شد. خشک شدن تحت دمای 50 ± 1 درجه

جدول ۱۲- نتایج جمع شدگی

ترکیب	طول اولیه (mm)	تغییر طول (mm)	کرنش جمع شدگی ×
PC	۲۸۷/۵	۰/۸۵	۲/۹۶
FRC 1.15	۲۸۶/۳	۰/۷۱	۲/۴۸
FRC 1.30	۲۸۶/۲	۰/۱۷	۰/۵۹
FRC 1.45	۲۸۴/۶	۰/۰۷	۰/۲۵
FRC 2.15	۲۸۷	۰/۲۵	۰/۸۷
FRC 2.30	۲۸۵/۶	۰/۱۸	۰/۶۳
FRC 2.45	۲۸۶/۲	۰/۰۵	۰/۱۷
FRC 3.15	۲۸۵/۷	۰/۰۴	۰/۱۴
FRC 3.30	۲۸۶/۲	۰/۰۳	۰/۱۱
FRC 3.45	۲۸۵/۳	۰/۰۲	۰/۰۷

متوالی در محلول (سولفات سدیم، سولفات منیزیم و یا سولفات منیزیم به همراه کلرید سدیم) قرار می‌گیرند. در واقع در این آزمایش تر و خشک شدن متوالی در محلول سولفات سدیم، به نوعی شبیه‌سازی فرایند ذوب و یخبندان می‌باشد. نحوه‌ ساز و کار آزمایش بدین صورت است که سولفات سدیم در طی سیکل‌های تر و خشک شدن به مرور در منافذ نمونه بتن نفوذ کرده و درحین خشک شدن در اُون تحت تنش ناشی از انبساط رسوبات در منافذ قرار می‌گیرد و فرایند ذوب و یخ را شبیه‌سازی می‌کند. در انتها تغییرات وزنی و مقاومت فشاری نمونه‌ها در سیکل‌های ۵ و ۱۰ گزارش می‌شود. نتایج حاصل از دوام در جدول (۱۳) ارائه شده است.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از جدول (۱۳)، روند تغییرات وزن به گونه‌ای است که در سیکل ۵ کاهش اندکی نسبت به نمونه شاهد و در سیکل ۱۰ مقداری افزایش نسبت به نمونه‌های سیکل پنجم ایجاد می‌شود. دلیل افزایش وزن در سیکل ۱۰ ناشی از نفوذ بیشتر و رسوب کردن محلول سولفات سدیم در فضاهای خالی نمونه است. در مورد تغییرات مقاومت فشاری نیز، به‌دلیل عملکرد مناسب الیاف، با وجود افزایش فشار ناشی از انبساط رسوبات سولفات سدیم، در نمونه‌های مسلح به الیاف بازیافتی پت، افزایش جزئی در مقاومت فشاری مشاهده می‌شود.

۳-۷- دوام

طبق تعریف ACI 201، دوام بتن حاوی سیمان پرتلند به توانایی آن برای مقابله با عوامل هوازدگی، تهاجم شیمیایی، سایش بتن و یا هر فرایندی که به آسیب دیدگی می‌انجامد، گفته می‌شود. [۱۵]. منظور از آزمایش دوام در این پژوهش، بررسی روند تغییرات وزنی و مقاومت فشاری نمونه‌هایی است که در معرض تر و خشک شدن

جدول ۱۳- نتایج آزمون دوام

ترکیب	نمونه شاهد		سیکل پنجم		سیکل دهم	
	وزن (kg)	مقاومت فشاری (MPa)	وزن (kg)	مقاومت فشاری (MPa)	وزن (kg)	مقاومت فشاری (MPa)
PC	۸/۲۹۳	۴۵/۸۹	۸/۲۸۳	۴۵/۵۰	۸/۲۷۹	۴۴/۱۳
FRC 1.15	۸/۴۱۰	۴۷/۰۷	۸/۳۶۵	۴۷/۷۶	۸/۳۷۰	۴۷/۵۶
FRC 1.30	۸/۱۳۷	۴۸/۱۵	۸/۱۲۶	۴۹/۵۲	۸/۱۴۰	۵۲/۲۷
FRC 1.45	۸/۳۱۴	۴۸/۶۴	۸/۲۵۱	۴۷/۰۷	۸/۲۷۹	۴۹/۴۳
FRC 2.15	۸/۳۰۳	۵۱/۰۹	۸/۲۵۱	۴۷/۰۷	۸/۲۵۰	۵۲/۳۷
FRC 2.30	۸/۱۸۵	۴۷/۷۶	۸/۱۷۸	۴۷/۴۶	۸/۱۹۰	۵۰/۱۱
FRC 2.45	۸/۱۴۷	۵۲/۲۷	۸/۱۱۲	۴۶/۶۸	۸/۱۳۰	۴۸/۲۵
FRC 3.15	۸/۲۳۸	۵۱/۳۹	۸/۲۱۶	۴۹/۳۳	۸/۲۲۵	۵۳/۴۵
FRC 3.30	۸/۳۴۳	۵۱/۱۹	۸/۳۰۱	۴۹/۴۳	۸/۳۱۷	۵۲/۷۶
FRC 3.45	۸/۱۸۹	۵۰/۲۱	۸/۱۶۴	۴۹/۷۲	۸/۱۷۸	۵۱/۲۹

۴- نتیجه گیری

شدگی ناشی از شکل و موجودار بودن الیاف تولیدی است.

- با توجه به نتایج به دست آمده، بهترین عملکرد در جذب انرژی و شکل پذیری در ترکیب حاوی ۰/۴۵٪ الیاف با طول ۲ سانتیمتر مشاهده شد.

۵- مراجع

- [1] Bencardino, F., et al., Implications of test methodology on post-cracking and fracture behaviour of steel fibre reinforced concrete. *Composites Part B: Engineering*, 2013. 46: p. 31-38.
- [2] Foti, D., Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete. *Composite Structures*, 2013. 96: p. 396-404.
- [3] Fraternali, F., et al., On the use of R-PET strips for the reinforcement of cement mortars. *Composites Part B: Engineering*, 2013. 46: p. 207-210.
- [4] Irwan, J., et al. The mechanical properties of PET fiber reinforced concrete from recycled bottle wastes. in *Advanced Materials Research*. 2013. Trans Tech Publ.
- [5] Nibudey, R., et al., Compressive strength and sorptivity properties of pet fiber reinforced concrete. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 2014. 7(4): p. 1206.
- [6] da Silva Magalhães, M. and M.S.V. Fernandes, Bending Behaviour of Recycled PET Fiber Reinforced Cement-Based Composite. *International Journal of Engineering and Technology*, 2015. 7(4): p. 282.
- [7] Ochi, T., S. Okubo, and K. Fukui, Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cement and Concrete Composites*, 2007. 29(6): p. 448-455.
- [8] Kim, S.B., et al., Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. *Cement and concrete composites*, 2010. 32(3): p. 232-240.
- [9] Bui, N.K., T. Satomi, and H. Takahashi, Recycling woven plastic sack waste and PET bottle waste as fiber in recycled aggregate concrete: An experimental study. *Waste Management*, 2018. 78: p. 79-93.
- [10] Adnan, H.M. and A.O. Dawood, Strength behavior of reinforced concrete beam using re-cycle of PET wastes as synthetic fibers. *Case Studies in Construction Materials*, 2020. 13: p. e00367.
- [11] (ISIRI), I.o.s.a.i.r.o.I., Specification for Portland cement. 1996: Tehran, Iran.
- [12] Rahimi, S., et al., Sustainable approach for recycling waste tire rubber and polyethylene

در این پژوهش تأثیر الیاف پت بر رفتار فیزیکی و مکانیکی بتن الیافی بررسی گردید. در مجموع ۱۰۱ طرح اختلاط برای بتن شاهد و بتن حاوی الیاف در سه طول ۱، ۲ و ۳ سانتیمتر و در درصد حجمی های ۰/۱۵، ۰/۳۰ و ۰/۴۵ درصد ساخته شد و در محیط آب عمل آوری گردید. جهت بررسی عملکرد بتن الیافی، آزمایش های مقاومت فشاری، شکافت کششی، ضربه پذیری، مقاومت خمشی و سختی خمشی، دوام و جمع شدگی در بتن سخت شده منطبق بر استانداردهای مربوطه انجام گرفت. جمع بندی نتایج حاصل از این پژوهش بر عملکرد بتن به صورت زیر ارائه می گردد:

- با افزایش الیاف، ضربه پذیری و میزان مجموع انرژی جذب شده توسط نمونه ها نسبت به طرح شاهد، با توجه به درصد و طول الیاف بین ۸۰ تا ۸۰۰ درصد افزایش می یابد.

- افزودن الیاف بر مقاومت شکافت کششی تأثیر نا محسوسی دارد ولی با افزایش طول و درصد الیاف میزان ثبات نمونه ها بیشتر گشته و مانع شکافته شدن نمونه ها می شود.

- افزودن الیاف پت منجر به افزایش ۵ تا ۱۸ درصدی مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد می شود، در حالیکه تأثیر نامحسوسی بر مقاومت شکافت کششی دارد. با افزایش طول الیاف، ثبات و پیوستگی بین الیاف و بتن بیشتر گردیده و مانع متلاشی شدن بتن می شود.

- افزودن الیاف منجر به افزایش مقاومت خمشی، افزایش شکل پذیری، کنترل ترک و محدود کردن ترکها می شوند.

- افزودن الیاف، منجر به افزایش مقاومت خمشی به میزان ۶ تا ۳۳ درصد و افزایش ۱۷ تا ۱۶۰ درصدی سختی و طاقت خمشی، در ترکیبات بتنی الیافی نسبت به بتن اولیه می شود. در الیاف ۱ سانتیمتری، در درصد حجمی ۰/۳ درصد بیشترین افزایش در سختی و میزان خیز حداکثر نسبت به دو درصد حجمی دیگر مشاهده می شود، در حالیکه در ترکیبات حاوی الیاف ۲ و ۳ سانتیمتری درصد حجمی ۰/۴۵ بهترین عملکرد را نسبت به دو درصد دیگر دارد. این نشان می دهد که با افزایش طول الیاف، درصد حجمی بیشتر الیاف جهت رسیدن به یک افزایش مشخص در سختی و طاقت خمشی مورد نیاز است.

- میزان جمع شدگی با افزایش درصد حجمی الیاف و افزایش طول الیاف، کمتر و کمتر می شود. این عملکرد مناسب در برابر جمع

- terephthalate (PET) to produce green concrete with resistance against sulfuric acid attack. *Journal of Cleaner Production*, 2016. 126: p. 166-177.
- [13] Center, B.a.H.R., The national method for concrete mix design. 2008: Tehran, Iran.
- [14] Borg, R.P., O. Baldacchino, and L. Ferrara, Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 2016. 108: p. 29-47.
- [15] Committee201, A., Guide for Making a Condition Survey of Concrete in Service, ACI 201.1 R. 1.7. 1997, American Concrete Institute.
- [16] de Oliveira, L.A.P. and J.P. Castro-Gomes, Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar. *Construction and Building Materials*, 2011. 25(4): p. 1712-1717.
- [17] Hasan, M., M. Afroz, and H. Mahmud, An experimental investigation on mechanical behavior of macro synthetic fiber reinforced concrete. *Int. J. Civ. Environ. Eng*, 2011. 11(3): p. 19-23.
- [18] Iran, I.o.S.a.I.R.o., Concrete- flexural strength of concrete (using simple –beam with third – point loading)-Test method. 2007: Tehran, Iran.
- [19] Marthong, C. and S. Marthong. An experimental study on the effect of PET fibers on the behavior of exterior RC beam-column connection subjected to reversed cyclic loading. in *Structures*. 2016. Elsevier.
- [20] Organization, I.N.S., Concrete Aggregates - Specifications. 2015: Tehran, Iran.
- [21] Mohammed, A.A. and A.A.F. Rahim, Experimental behavior and analysis of high strength concrete beams reinforced with PET waste fiber. *Construction and Building Materials*, 2020. 244: p. 118350.
- [22] Committee, A.C.I.-A., ACI-544.2 R-89: Measurement of properties of fiber reinforced concrete. Detroit: ACI Committee, 1989.
- [23] Organization, I.N.S., Concrete – making and curing concrete test specimens in the laboratory – code of practice. 2015: Tehran, Iran.
- [24] SF, J., Method of test for flexural strength and flexural toughness of fiber reinforced concrete. Japan Concrete Institute, 1984.
- [25] -, I., Methods of sampling and analysis of concrete. 2004, Bureau of Indian Standards New Delhi, India.

Experimental investigation of the mechanical behavior of concrete made with recycled PET fibers for structural applications

Morteza Toufani

M.sc graduatet, faculty of engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Mohammad Reza Esfahani *

Professor, faculty of engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Ebrahim Zamani

Assistant professor, faculty of civil engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

Abstract

According to increasing the use of PET products, the present study aimed to the use of PET fibers in the concrete industries. Moreover, the behavior of normal concrete contained recycled fibers is not studied and the guidelines aren't published yet. The aim of this study was to determine the effect of polyethylene terephthalate fibers on the mechanical properties of hardened concrete. Fibers were used in three volumetric percentages of 0.15%, 0.30%, and 0.45% with the lengths of 1, 2, and 3 centimeters, separately. So, 10 combinations of specimens including the control specimen and 9 combinations of PET fiber reinforced concrete were made. All mixtures were examined for compressive strength, tensile strength, flexural strength, shrinkage, durability, and impact loading. The results showed that by adding the PET fibers, the compressive strength, the bending strength, and energy absorption increase 5 to 18 percent, 6 to 30 percent, and 30 to 156 percent, respectively. However, no noticeable change was observed in tensile strength, while even a reduction in tensile strength is monitored. The impact strength of the fiber concrete was increased two to seven times in comparison with the control concrete. By comparing the experimental results it was determined that the combinations that contained 2 cm fibers with 0.45% volume had the best performance compared with the other mixtures.

Keywords: Fiber concrete, recyclable PET fiber, shrinkage, bending strength, durability, impact loading.

* Corresponding Author: esfahani@um.ac.ir

