

Experimental study on residual flexural strength of macrosynthetic fiber reinforced concrete

A. Doostmohamadi *

Abstract

The use of fiber concrete technology in the form of flooring with the ability to remove thermal rebar's and reduce the consumption of structural rebar's is popular in the world today, and the use of this method is expanding experimentally in our country. Due to the expansion of this issue, it is necessary to evaluate the properties of fibers that can be used in concrete as well as its mechanical properties in concrete, so that provide a fiber concrete mixture design suitable for the level of expectations from each project. The mechanical properties of fiber concrete are influenced by various parameters such as the type of fibers, the amount of fiber consumption, the dimensional characteristics of the fibers, the physical and mechanical characteristics of the fibers, as well as its geometry and appearance. The main mechanical parameter in determining the performance of fiber reinforced concrete is the ability to provide bending strength after cracking, which is generally known as the residual strength of fiber reinforced concrete in design standards and codes. The purpose of the present research is to investigate the effect of different amounts of macrosynthetic fibers on the residual strength of concrete. For this purpose, a total of eight concrete mix designs were designed using macrosynthetic fibers with amounts of 2, 4, and 6 kg per cubic meter of concrete and a control sample without fibers in two types of concrete with a compressive strength of 25 and 35 MPa. The method of performing the residual resistance test of the manufactured samples was also based on the ASTM-C1609 standard. Also, in addition to testing the residual strength of fiber reinforced concrete, the properties of fresh concrete and compressive strength testing were also performed on the samples. The results of the residual strength test show that the use of macrosynthetic fibers increases the load-carrying capacity of the bending beam samples after cracking, that the amount and load-carrying capacity after cracking is a function of the amount of fiber consumption, and with the increase of the consumption dose Residual resistance fibers increase. In the compressive strength test, the use of fibers, although it has no effect on the compressive strength value, changes the type of fracture from brittle to ductile. Regarding the fresh properties of concrete, the use of fibers reduces the slump and increases the air percentage.

Keywords: Fiber Reinforced Concrete, Macrosynthetic Fiber, Average Residual Strength

*Corresponding author E-mail: doostmohamadi92@gmail.com

بررسی آزمایشگاهی مقاومت پسماند خمشی بتن حاوی الیاف ماکروسنتتیک

علیرضا دوست محمدی^{۱*}

^۱مدیر فنی شرکت نانونخ و گرانول سیرجان

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۴، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱)

چکیده

استفاده از تکنولوژی بتن الیافی در قالب کفسازی با قابلیت حذف میگردهای حرارتی و کاهش مصرف میگردهای سازه‌ای امروزه در دنیا رواج یافته است و در کشور ما نیز بصورت تجربی استفاده از این روش در حال گسترش است. با توجه به گسترش این موضوع لازم است تا ویژگی‌های الیاف قابل استفاده در بتن و همچنین خواص عملکردی آن در بتن مورد ارزیابی قرار بگیرد و طرح مخلوط بتن الیافی مناسب با سطح انتظارات از هر پروژه ارائه شود. خواص مکانیکی بتن الیافی تحت تأثیر پارامترهای مختلفی نظیر نوع الیاف، مقدار مصرف الیاف، مشخصات ابعادی الیاف، مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف و همچنین هندسه و شکل ظاهری آن می‌باشد. اصلی‌ترین پارامتر مکانیکی در تعیین عملکرد بتن الیافی مقاومت خمشی پس از ترک خوردگی بتن الیافی است که این مشخصه مکانیکی عموماً در استانداردها و آیین‌نامه‌های طراحی به عنوان مقاومت پسماند بتن الیافی شناخته می‌شود. هدف از پژوهش انجام شده، بررسی اثر مقادیر مختلف الیاف ماکروسنتتیک بر مقاومت پسماند بتن می‌باشد. بدین منظور در مجموع هشت طرح مخلوط بتن الیافی با استفاده از الیاف ماکروسنتتیک به ترتیب با مقادیر ۲، ۴ و ۶ کیلوگرم در هر مترمکعب بتن و نمونه شاهد بدون الیاف در دو رده بتن با مقاومت فشاری ۲۵ و ۳۵ مگاپاسکال طراحی شد. روش انجام آزمون مقاومت پسماند نمونه‌های ساخته شده نیز بر اساس استاندارد ASTM-C1609 انجام شد. همچنین افزون بر آزمایش مقاومت پسماند بتن الیافی، خواص بتن تازه و آزمایش مقاومت فشاری نیز بر روی نمونه‌های ساخته شده انجام شد. نتایج آزمایش مقاومت پسماند نشان می‌دهد که استفاده از الیاف ماکروسنتتیک باعث قابلیت باربرداری نمونه‌های تیرچه خمشی پس از ترک خوردگی می‌شود که مقدار و قابلیت تحمل بار پس از ترک خوردگی تابع مقدار مصرف الیاف می‌باشد و با افزایش دوز مصرف الیاف مقاومت پسماند افزایش می‌یابد. در آزمایش مقاومت فشاری نیز استفاده از الیاف اگرچه در مقدار مقاومت فشاری تأثیر ندارد اما نوع شکست را از حالت ترد به حالت نرم تغییر می‌دهد. در خصوص خواص بتن تازه بتن نیز استفاده از الیاف باعث کاهش اسلامپ و افزایش درصد هوا می‌شود.

کلیدواژه‌ها: بتن الیافی، الیاف ماکروسنتتیک، مقاومت پسماند

۱. مقدمه

قابل توجه فنی و اقتصادی این تکنولوژی می‌باشد. استفاده از الیاف در بتن یکی از روش‌های مؤثر برای کاهش ترک خوردگی، افزایش طاق خمشی و جذب انرژی بهتر همراه با افزایش مقاومت کششی بتن می‌باشد [۹]-[۱۲]. در این نوع بتن‌ها پخش همگن رشته‌های الیاف درون مخلوط بتن آن را تبدیل به ماده‌ای شکل‌پذیر می‌کند و همچنین در کنترل و محدود کردن تعداد ترک و عرض آن‌ها بسیار تأثیرگذار می‌باشد. در واقع رفتار بتن الیافی به عنوان یک ماده مرکب تابع جنس، نوع، مشخصات مکانیکی الیاف و مقدار مصرف آن در واحد حجم بتن می‌باشد [۱۳]-[۱۵]. اولین نوع الیاف‌ها را می‌توان الیاف طبیعی دانست که از گذشته به عنوان عامل تسلیح درون کاهگل مورد استفاده بوده است. اولین نسل از الیاف‌هایی که درون بتن استفاده شد الیاف فولادی بود که استفاده از آن در کشورهای اروپایی و

امروزه استفاده از دال‌های بتنی روی زمین نظیر کفسازی، رویه‌های بتنی، روسازی باند فرودگاه و کف‌های صنعتی با استفاده از الیاف در دنیا بسیار متداول است و دهه‌های زیادی از به‌کارگیری آن‌ها در کشورهای توسعه‌یافته سپری می‌شود که در این راستا استانداردها [۱] و آیین‌نامه‌های طراحی بین‌المللی [۲]-[۸] نیز تألیف شده است. در ابتدا استفاده از الیاف طبیعی و کمی بعد استفاده از الیاف فولادی در بتن رایج شد. امروزه نسل جدید الیاف بتن با استفاده از پلیمر در فرآیند خاصی تولید می‌شود از مزایای این نوع الیاف بر نوع فولادی قیمت پایین‌تر، وزن مخصوص سبک‌تر، مقاومت در برابر زنگ‌زدگی و خوردگی و همچنین مقاومت بالا در شرایط محیطی اسیدی و قلیایی می‌باشد. [۹] افزایش طول عمر و دوام کف‌های بتنی از مزایای

[۱۹]. مشخصات مکانیکی الیاف نظیر مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و کرنش از پارامترهای تأثیرگذار در مطالعات پیشین می‌باشد. هرچه مقاومت و مدول الیاف بالاتر باشد نتایج مقاومت پس از ترک خوردگی نیز در بتن الیافی افزایش خواهد یافت. در نتیجه بتن الیافی از ظرفیت کششی و خمشی بالاتری برخوردار خواهد بود [۲۱]، [۲۲] و [۲۴]. در این خصوص استاندارد ASTM-D7508 الیاف پلیمری مورد مصرف در بتن باید حداقل دارای مقاومت ۳۴۰ مگاپاسکال باشد [۲۵].

کشور ما اخیراً در این زمینه پژوهش‌هایی به صورت موضوعی انجام گرفته است اما هیچکدام از آن‌ها به صورت جامع و با رویکرد ارائه روش طراحی بتن الیافی نمی‌باشد؛ بنابراین با توجه به وجود ظرفیت تولید داخل نیاز است تا مشخصات مکانیکی الیاف و مقدار مصرف آن در واحد حجم بتن متناسب با شرایط پروژه‌های بومی (شرایط محیطی، نوع بارگذاری و سطح استقامت بتن) بر اساس الیاف تولیدات داخلی تعیین شود.

۲. روش تحقیق

۲-۱. مصالح مصرفی

در این پروژه مصالح مصرفی به شرح ذیل است. سیمان مورد استفاده سیمان تیپ ۲ سازه و آب مورد مصرف در ساخت نمونه‌ها آب شهری تهران می‌باشد. مصالح سنگدانه از نوع شن شکسته و ماسه طبیعی از معدن شهرداری تهیه شد که دانه‌بندی آن در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین الیاف ماکروسنتتیک مورد استفاده با برند کورتا سینوسی تولید شرکت نانو نخ و گرانول سیرجان می‌باشد که تصویر و مشخصات مکانیکی آن به ترتیب در شکل (۱) و جدول (۲) آمده است.

جدول (۱). دانه‌بندی مصالح سنگی

اندازه الک (میلیمتر)	درصد تجمعی عبوری (%)
۱۰۰	۳۷/۵
۱۰۰	۲۵
۹۷/۹	۱۹
۹۰/۷	۱۲/۵
۸۱/۹	۹/۵
۶۲/۸	۴/۷۵
۴۱/۸	۲/۳۶
۲۵/۵	۱/۱۸
۱۳/۹	۰/۶
۷/۱	۰/۳
۰/۱	۰/۱۵

آمریکای شمالی از سال ۱۹۷۰ آغاز شد [۱۶]. نسل جدید الیاف بتن که از نوع پلیمری می‌باشد نیز امروزه گسترش یافته است [۱۷]. استفاده از هر یک از انواع بتن خصوصیات مکانیکی و دوامی را به بتن اضافه می‌کند [۱۸]. بر اساس مطالعات پیشین سه عامل تعیین کننده در بهبود مشخصات مکانیکی بتن نسبت طول به قطر الیاف، مقدار مصرف آن در واحد حجمی بتن می‌باشد و مشخصات مکانیکی الیاف می‌باشد [۱۹] و [۲۰].

بررسی نسبت طول به قطر الیاف در واقع معیاری از تأمین طول مهارى الیاف درون بتن می‌باشد و هرچه این نسبت بزرگتر باشد مقاومت پیوستگی بین الیاف و بتن بیشتر خواهد بود و در نتیجه ظرفیت مقطع بتن الیافی افزایش خواهد یافت [۲۱]. مطالعات پیشین نشان داده‌اند مقدار بهینه برای نسبت طول به قطر الیاف در بازه‌ای بین ۶۰ تا ۱۰۰ پیشنهاد می‌شود. هرچه مقدار این نسبت به ۱۰۰ نزدیکتر باشد توانایی الیاف در کنترل ترک و افزایش مقاومت پس از ترک خوردگی مؤثرتر خواهد بود [۴]. همچنین در این خصوص استانداردهای الیاف و آیین‌نامه‌های طراحی بتن الیافی بازه مذکور را پیشنهاد می‌دهند [۱].

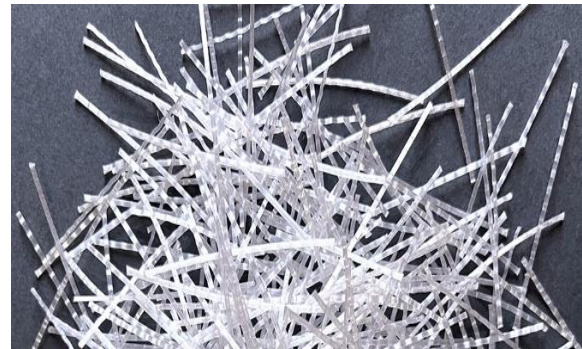
بررسی درصد حجمی الیاف درون بتن نیز یکی از پارامترهای اساسی جهت تعیین خواص مورد نظر می‌باشد بازه مورد استفاده در این تحقیقات در محدوده ۰/۱ تا ۰/۵ درصد حجمی بتن می‌باشد [۱۳]. اگرچه در تحقیقات دیگری این محدوده مصرف تا ۱٪ حجمی بتن نیز افزایش داشته است. نتایج آزمایشگاهی نشان داد با افزایش درصد حجمی مصرف الیاف منجر به افزایش مقاومت باقیمانده (کششی و خمشی) و جذب انرژی می‌شود. از طرفی دیگر افزایش مقدار الیاف باعث کاهش روانی بتن یا به عبارتی باعث افت اسلامپ می‌شود [۲۲]. خواص مکانیکی بتن الیافی بر اساس آزمایش خمش خالص در نمونه‌های تیر منشوری شکل می‌باشد [۲۳]. در این آزمایش تیرهای بتنی با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۵۵۰ میلیمتر با دهانه خالص ۴۵۰ میلیمتر تحت خمش چهار نقطه‌ای قرار می‌گیرد این آزمایش مطابق استاندارد ASTM-C1609 انجام می‌شود. مقدار پارامترهای مقاومت باقیمانده کششی و خمشی بتن الیافی پس از ترک خوردگی به عنوان پارامترهای تعیین کننده در طراحی‌های کاربردی در نظر گرفته می‌شود.

الیاف‌ها جدا از مشخصات مکانیکی و جنس آن به لحاظ ابعاد فیزیکی مطابق استاندارد ASTM-C1116 به دو دسته تقسیم می‌شوند الیاف‌هایی که قطر سطح مقطع معادل آن‌ها بیش از ۰/۳ میلیمتر باشند به عنوان الیاف ماکرو و کمتر از آن به عنوان الیاف میکرو دسته‌بندی می‌شوند. نتایج تحقیقات نشان داده است الیاف ماکرو نقش مؤثرتری در بهبود خواص مکانیکی بتن الیافی دارد

لازم به ذکر است برای انجام هر آزمایش تعداد سه نمونه ساخته شد و جمعاً در این پژوهش ۴۸ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت.

جدول (۳). جزئیات طرح مخلوط نمونه‌ها

کد نمونه	الیاف kg/m ³	$\frac{w}{c}$	سیمان kg/m ³	شن نخودی kg/m ³	شن بادامی kg/m ³	ماسه kg/m ³
C25	۰	۰/۵۱	۳۵۰	۳۶۵	۲۴۵	۱۱۳۰
C25F2	۲	۰/۵۱	۳۵۰	۳۶۵	۲۴۵	۱۱۳۰
C25F4	۴	۰/۵۱	۳۵۰	۳۶۵	۲۴۵	۱۱۳۰
C25F6	۶	۰/۵۱	۳۵۰	۳۶۵	۲۴۵	۱۱۳۰
C35	۰	۰/۴۱	۴۳۰	۳۵۰	۲۳۰	۱۱۰۰
C35F2	۲	۰/۴۱	۴۳۰	۳۵۰	۲۳۰	۱۱۰۰
C35F4	۴	۰/۴۱	۴۳۰	۳۵۰	۲۳۰	۱۱۰۰
C35F6	۶	۰/۴۱	۴۳۰	۳۵۰	۲۳۰	۱۱۰۰



شکل (۱). تصویر الیاف ماکروسنتتیک سینوسی برند کورتا

جدول (۲). مشخصات مکانیکی الیاف ماکروسنتتیک سینوسی

پارامتر	واحد	مقدار
وزن مخصوص	gr/cm ³	۰/۹۱
قطر معادل	mm	۰/۷
طول	mm	۵۰
مقاومت کششی	MPa	۴۳۰
کرنش نهایی	%	۱۰
مدول الاستیسیته	GPa	۴/۵
نوع پلیمر	-	پلی اولفین
مقاومت اسیدی و قلیایی	-	عالی
جذب آب	%	۰
دمای ذوب	C°	۱۶۰

۳-۲. ابزاربندی و انجام آزمایش

در این مقاله آزمایش‌های مربوط به خواص تازه شامل درصد هوای بتن و اسلایپ به ترتیب مطابق با استانداردهای ASTM C143 و ASTM C231 انجام شد. همچنین به منظور بررسی خواص مکانیکی بتن دو آزمایش مقاومت فشاری بتن و مقاومت پسماند به ترتیب طبق استانداردهای ASTM C39 و ASTM C1609 انجام شد. در آزمایش مقاومت پسماند نمونه‌های تیر با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۴۰۰ میلی‌متر با دهانه ۳۰۰ میلی‌متر تحت بار خمشی چهار نقطه‌ای (خمشی خالص) انجام می‌شود. پروسه آزمایش و سرعت بارگذاری در این آزمایش با افزایش خیز وسط دهانه تیر بصورت تغییر مکان کنترل و با نرخ ۰/۱۲۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. فرآیند آزمایش تیرها در این روش تا خیز $\frac{1}{150}$ دهانه که در اینجا معادل خیز ۲ میلی‌متر است انجام می‌شود و رسیدن به این خیز به منزله خاتمه آزمایش می‌باشد. همچنین در حین آزمایش نیرو و تغییر مکان قائم وسط دهانه (خیز) تا نقطه پایان آزمایش اندازه‌گیری شد. شکل (۲) پیکربندی آزمایش را نشان می‌دهد.

۲-۲. طرح مخلوط و نمونه‌ها

در این تحقیق از دو رده بتن با مقاومت فشاری ۲۵ و ۳۵ مگاپاسکال استفاده شد که جزئیات مصالح استفاده شده در جدول (۳) ارائه شده است.

همچنین بمنظور مشخص شدن عملکرد الیاف در بتن و تأثیر مقدار الیاف بر مقاومت پسماند بتن الیافی به ترتیب از سه مقدار ۲، ۴ و ۶ کیلوگرم در هر مترمکعب بتن استفاده شد؛ بنابراین جمعاً ۸ طرح مخلوط شامل دو طرح شاهد و شش طرح الیافی ساخته شد.

جزئیات هر طرح جدول (۳) ارائه شده است. از هر طرح مخلوط نمونه استوانه به ابعاد ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متر جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری و نمونه تیرچه به ابعاد ۴۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر جهت انجام آزمایش مقاومت پسماند ساخته شد.

موئد شکست بتن از حالت ترد به حالت نرم می‌شود که این مورد در شکل (۳) نشان داده شده است. ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌های الیافی بصورت بسیار محدود و کنترل شده مشاهده شدند در حالی که نمونه شاهد دچار گسیختگی کامل و ترک‌های گسترده می‌باشد.

جدول (۵). نتایج آزمون مقاومت فشاری

مقاومت فشاری (MPa)		کد نمونه
۳۲/۳	میانگین (Ave)	C25
۲/۸۵	ضریب تغییرات (CV)	
۳۲/۶	میانگین (Ave)	C25F2
۳/۶۵	ضریب تغییرات (CV)	
۳۱/۴	میانگین (Ave)	C25F4
۲/۳	ضریب تغییرات (CV)	
۳۱/۲	میانگین (Ave)	C25F6
۳/۲۷	ضریب تغییرات (CV)	
۴۰/۹	میانگین (Ave)	C35
۱/۱۳	ضریب تغییرات (CV)	
۴۱/۱	میانگین (Ave)	C35F2
۳/۱۱	ضریب تغییرات (CV)	
۴۱/۴	میانگین (Ave)	C35F4
۲/۱۳	ضریب تغییرات (CV)	
۴۱/۳	میانگین (Ave)	C35F6
۱/۴۳	ضریب تغییرات (CV)	



شکل (۳). تفاوت مود شکست بتن الیافی و بتن ساده (شاهد)



شکل (۲). پیکربندی آزمایش مقاومت پسماند بتن الیافی

۳. نتایج و بحث

۳-۱. خواص بتن تازه

خواص بتن تازه شامل آزمون اسلامپ و درصد هوا به ترتیب طبق استانداردهای انجام شد و نتایج آن در جدول (۴) ارائه شده است. طبق نتایج بدست آمده می‌توان اظهار داشت وجود الیاف در مخلوط بتن خواص تازه آن شامل اسلامپ و درصد هوا را تحت تأثیر می‌گذارد. در خصوص اسلامپ این تأثیر به‌گونه‌ای است که استفاده از الیاف در مقدار مصرف ۲ کیلوگرم در هر مترمکعب تأثیر چندانی بر کاهش اسلامپ ندارد اما در مقادیر بالاتر این کاهش محسوس است. در خصوص درصد هوا نیز نتایج نشان داد افزایش مقدار الیاف باعث افزایش درصد هوا می‌شود، در واقع وجود الیاف مانع از خروج هوا می‌شوند.

جدول (۴). نتایج خواص تازه بتن

کد نمونه	روان کننده (%)	اسلامپ (cm)	درصد هوا (%)
C25	۰/۸	۲۱	۲/۹
C25F2	۰/۸	۲۰	۲/۹
C25F4	۰/۸	۱۶/۵	۳/۷
C25F6	۰/۸	۱۴	۴/۶
C35	۰/۷	۲۰/۵	۲/۷
C35F2	۰/۷	۱۹	۳/۲
C35F4	۰/۷	۱۶	۳/۶
C35F6	۰/۷	۱۴/۵	۴/۹

۳-۲. خواص مکانیکی بتن

نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در جدول (۵) و نتایج آزمایش مقاومت پسماند در جدول (۶) ارائه شده است. نتایج آزمون مقاومت فشاری نشان داد که استفاده از الیاف تأثیر چندانی بر کاهش یا افزایش مقاومت فشاری ندارد اما باعث تغییر

حاصل همین مکانیزم می‌باشد. همچنین لازم به ذکر است تکرار آزمایش در هر نمونه طرح مخلوط سه مورد در نظر گرفته شد.

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

$$R_{e3} = \frac{150 \times T_{150}^D}{bh^2} \quad (2)$$

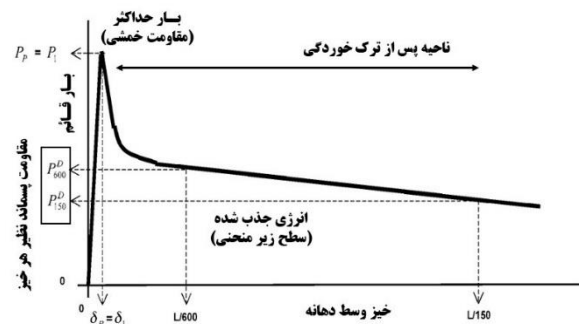
$$f_{e3} = R_{e3} \times f_p \quad (3)$$

جدول (۶). نتایج آزمون مقاومت پسماند

کد نمونه	پارامترهای آماری	f_p (MPa)	R_{e3} (%)	f_{e3} (MPa)
C25	میانگین (Ave)	۳/۹۷	۰	۰
	ضریب تغییرات (CV)	۲/۰۲	-	-
C25F2	میانگین (Ave)	۳/۹۲	۴/۸۵	۰/۷۹
	ضریب تغییرات (CV)	۱/۷۹	۲۷/۶۹	۶/۳۳
C25F4	میانگین (Ave)	۳/۸۹	۳۵/۳۷	۱/۳۱
	ضریب تغییرات (CV)	۲/۵۷	۴/۹۸	۹/۱۶
C25F6	میانگین (Ave)	۳/۹۴	۵۰/۶۱	۱/۹۵
	ضریب تغییرات (CV)	۳/۳	۳/۹۱	۵/۱۳
C35	میانگین (Ave)	۴/۷۶	۰	۰
	ضریب تغییرات (CV)	۵/۰۴	-	-
C35F2	میانگین (Ave)	۴/۵۹	۲۴/۸۵	۱/۰۹
	ضریب تغییرات (CV)	۴/۱۴	۲۷/۶۹	۰/۳
C35F4	میانگین (Ave)	۴/۵۸	۳۵/۳۷	۱/۶۳
	ضریب تغییرات (CV)	۲/۶۲	۴/۹۸	۴/۹۱
C35F6	میانگین (Ave)	۴/۵	۵۰/۶۱	۲/۱۷
	ضریب تغییرات (CV)	۴/۲۲	۳/۹۱	۴/۱۵

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به آزمون‌های انجام شده در این تحقیق نتایج زیر قابل استنباط می‌باشد:



شکل (۴). نمودار نیرو-تغییر مکان حاصل از آزمایش مقاومت پسماند بتن الیافی طبق ASTM C1609

نمودار نیرو-تغییر مکان حاصل از آزمایش نمونه‌های حاوی الیاف بصورت شماتیک در شکل (۴) نشان داده شده است.

خروجی نمودارهای حاصل شامل پارامترهای حداکثر مقاومت خمشی (f_p)، مقاومت خمشی نظیر خیز $\frac{L}{150}$ معادل خیز ۲ میلیمتر (f_D^{150})، مقاومت خمشی نظیر خیز $\frac{L}{600}$ معادل خیز ۰/۵ میلیمتر (f_D^{600})، سطح زیر نمودار به عنوان جذب انرژی تا خیز نهایی معادل خیز ۲ میلیمتر (T_D^{150})، نسبت مقاومت پسماند (R_{e3}) و مقاومت پسماند (f_{e3})، در واقع پارامتر مقاومت پسماند (R_{e3}) به عنوان جایگزین دو پارامتر (f_D^{150}) و (f_D^{600}) می‌باشد و رفتار کلی تری از عملکرد بتن الیافی ارائه می‌کند.

نتایج خروجی‌های مذکور در جدول (۶) ارائه شده است. همچنین فرمول محاسبه آن‌ها طبق استاندارد ASTM C1609 می‌باشد که در روابط (۱) تا (۳) ارائه شده است. نتایج این آزمون نشان می‌دهد وجود الیاف ماکروسنتتیک قابلیت باربری نمونه را پس از ترک خوردگی همچنان حفظ می‌کند لازم به ذکر است مشخصات مکانیکی الیاف و مقدار مصرف آن در حجم بتن روی مقاومت پسماند تأثیرگذار است و با افزایش مقدار الیاف شاهد افزایش ظرفیت باربری نمونه و در نتیجه افزایش مقاومت پسماند می‌باشد.

الیاف ماکروسنتتیک پس از رسیدن به حداکثر بار و ایجاد ترک، همچنان قابلیت تحمل دارد بنابراین در منحنی آن‌ها رفتار پس از ترک بعد از رسیده به حداکثر بار قابل مشاهده است. مکانیزم عملکرد الیاف پس از ایجاد ترک فعال می‌شود و بین دو طرف ترک ایجاد شده پل می‌زند. افزایش مقدار الیاف در حجم بتن باعث می‌شود تا تعداد رشته‌های الیاف بیشتری بین مقطع ترک خورده درگیر شوند در نتیجه این عملکرد باعث می‌شود عرض ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌های حاوی الیاف کنترل و محدود شود و ظرفیت باربری مقطع پس از ترک خوردگی نیز

- ۱- استفاده از الیاف در مقادیر کمتر از ۲ کیلوگرم در هر مترمکعب تأثیر چندانی بر خواص بتن تازه ندارد اما استفاده از مقادیر بالاتر باعث کاهش اسلامپ و افزایش درصد هوا می‌شود.
- ۲- افزایش مقدار الیاف، باعث افزایش مقاومت پسماند بتن می‌شود.
- ۳- مقادیر مقاومت پسماند برای نمونه‌های حاوی الیاف با مقادیر ۴، ۶ و ۹ کیلوگرم در هر مترمکعب برای بتن رده C25 به ترتیب برابر با ۰/۷۹، ۱/۳۱ و ۱/۹۵ مگاپاسکال و برای بتن رده C35 به ترتیب برابر با ۱/۰۹، ۱/۶۳ و ۲/۱۷ مگاپاسکال می‌باشد.
- ۴- از مقاومت خمشی ایجاد شده پس از ترک‌خوردگی بتن که با عنوان مقاومت پسماند تعریف می‌شود را می‌توان در ناحیه بتن کششی لحاظ کرد و تأثیر آن را در محاسبه ظرفیت خمشی دید.
- ۵- افزایش مقدار مصرف الیاف باعث می‌شود تا تعداد رشته‌های الیاف موجود در مقطع ترک‌خورده بیشتر باشد و در نتیجه عرض ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌های حاوی مقدار الیاف بیشتر محدودتر شده و در نتیجه ظرفیت باربری مقطع نیز افزایش می‌یابد.
- ### ۵. مراجع
- [1] H. Wu, X. Lin, and A. Zhou, "A review of mechanical properties of fibre reinforced concrete at elevated temperatures," *Cem. Concr. Res.*, vol. 135, no. April, p. 106117, 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106117.
- [12] M. Usman Rashid, "Experimental investigation on durability characteristics of steel and polypropylene fiber reinforced concrete exposed to natural weathering action," *Constr. Build. Mater.*, vol. 250, p. 118910, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118910.
- [13] A. P. Fantilli, B. Chiaia, and A. Gorino, "Fiber volume fraction and ductility index of concrete beams," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 65, pp. 139–149, 2016, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.10.019.
- [14] P. Pujadas, A. Blanco, S. Cavalaro, A. de la Fuente, and A. Aguado, "The need to consider flexural post-cracking creep behavior of macro-synthetic fiber reinforced concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 149, pp. 790–800, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.166.
- [15] F. Fotouhi, G. D. Ashkezari, and M. Razmara, "Experimental relationships between steel fiber volume fraction and mechanical properties of ultra-high performance fiber-reinforced concrete," *J. Build. Eng.*, p. 101613, 2020, doi: 10.1016/j.jobbe.2020.101613.
- [16] ASTM, "A820 Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete," no. October, pp. 1–4, 2011, doi: 10.1520/A0820.
- [17] A. Nobili, L. Lanzoni, and A. M. Tarantino, "Experimental investigation and monitoring of a polypropylene-based fiber reinforced concrete road pavement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 888–895, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.077.
- [18] Y. Chen, G. Cen, and Y. Cui, "Comparative study on the effect of synthetic fiber on the preparation and durability of airport pavement concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 184, pp. 34–44, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.223.
- [19] H. Rooholamini, A. Hassani, and M. R. M. Aliha, "Evaluating the effect of macro-synthetic fibre on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology," *Constr. Build. Mater.*, vol. 159, pp. 517–529, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.002.
- [20] D. Biddle, "Fiber Reinforced Concrete Pavements: Real Research & Real Projects," 2017.
- [21] A. Alsaif, L. Koutas, S. A. Bernal, M. Guadagnini, and K. Pilakoutas, "Mechanical performance of steel fibre reinforced rubberised concrete for flexible concrete pavements," *Constr. Build. Mater.*, vol. 172, pp. 533–543, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.010.
- [22] A. Caggiano, S. Gambarelli, E. Martinelli, N. Nisticò, and M. Pepe, "Experimental characterization of the post-cracking response in Hybrid Steel/Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 125, pp. 1035–1043, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.068.
- [23] C. C. Test, T. Drilled, C. Concrete, and S. T. Panels, "C 1609/C 1609M-05 Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading) 1," *Astm*, vol. i, no. C 1609/C 1609M-05, pp. 1–8, 2005, doi: 10.1520/C1609.
- [24] S. E. Vakili, P. Homami, and M. R. Esfahani, "Effect of fibers and hybrid fibers on the shear strength of lightweight concrete beams reinforced with GFRP bars," *Structures*, vol. 20, no. April, pp. 290–297, 2019, doi: 10.1016/j.istruc.2019.04.006.
- [25] ASTM D7508, "Standard Specification for Polyolefin Chopped Strands for Use in Concrete," 2010.
- [1] ASTM C1116, "Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete," 2010.
- [2] ACI 544.2R-17, "Report on the Measurement of Fresh State Properties and Fiber Dispersion of Fiber-Reinforced Concrete," *Am. Concr. Inst.*, pp. 1–24, 2017.
- [3] ACI 544.7R-16, Report on Design and Construction of Fiber-Reinforced Precast Concrete Tunnel Segments. 2016.
- [4] ACI 544.4R-18, Guide for Design with Fiber-Reinforced Concrete. 2018.
- [5] ACI 544.8R-18, "ACI 544.8R-16: Report on Indirect Method to Obtain Stress-Strain Response of Fiber-Reinforced Concrete (FRC)," p. 22, 2016.
- [6] ACI 544.5R-10, Report on the Physical Properties and Durability of Fiber-Reinforced Concrete. 2010.
- [7] ACI 544.6R-15, and Construction of, no. 2. 2004.
- [8] ACI 544.3R-08, "544.3R-08 Guide for Specifying, Proportioning, and Production of Fiber-Reinforced Concrete," vol. 16, pp. 0–15, 2010.
- [9] H. Bolooki Poorsaheli, A. Behravan, S. T. Tabatabaei Aghda, and A. Gholami, "A study on the durability parameters of concrete structures reinforced with synthetic fibers in high chloride concentrated shorelines," *Constr. Build. Mater.*, vol. 200, pp. 578–585, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.155.
- [10] C. Meng, W. Li, L. Cai, X. Shi, and C. Jiang, "Experimental research on durability of high-performance synthetic fibers reinforced concrete: Resistance to sulfate attack and freezing-thawing," *Constr. Build. Mater.*, vol. 262, p. 120055, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120055.