

"مقاله علمی-پژوهشی"

بررسی تأثیر الیاف پلیمری نوع KWB و KB ساخت شرکت نانونخ سیرجان بر خواص مکانیکی بتن ریزدانه

محمد رضا علی اکبرزاده^۱، سعید کریمی نسب^{۲*}، حسین جلالی فر^۳، مجتبی بهالدینی^۴

۱- کارشناس ارشد مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، mohammadrezaaliakbarzadeh@gmail.com

۲- دانشیار بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، kariminasab@uk.ac.ir

۳- استاد بخش مهندسی نفت و گاز، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، Jalalifar@uk.ac.ir

۴- دانشیار بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان، m_bahaaddini@uk.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۰۲ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۵)

چکیده

بتن، یکی از پرکاربردترین مصالح در صنعت مهندسی عمران است. سازه‌های بتنی، برخلاف مقاومت فشاری بالا، در مقابل کشش و یا خمش عملکرد ضعیفی دارند. از این رو برای تقویت بتن می‌توان از انواع مسلح آن، مانند بتن فیبری استفاده کرد. در این تحقیق اثر نسبت حجمی مختلف از دو گونه الیاف پلیمری ساخت شرکت نانونخ سیرجان، بر پارامترهای مکانیکی بتن ریز دانه، به صورت آماری بررسی شد. الیاف به کار برده شده در این پژوهش از انواع KWB (Kortta Wave Blend) و KB (Kortta Blend) می‌باشند. علاوه بر طرح اختلاط بدون الیاف، برای هر کدام از الیاف طرح‌های اختلاطی با نسبت‌های حجمی ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد تهیه شد. آزمون‌های فشاری تک‌محوره، کششی غیرمستقیم (برزیلی) و مقاومت فشاری سه‌محوره، روی نمونه‌های تهیه شده از هر طرح انجام شد. پارامترهای مکانیکی مانند مقاومت فشاری تک‌محوره، مدول الاستیسیته، مقاومت کششی غیرمستقیم محاسبه و مقایسه شدند. همچنین با استفاده از نتایج آزمون فشاری سه‌محوره، تأثیر الیاف پلیمری روی زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی نیز بررسی شد. نتایج آزمون‌ها نشان داد که الیاف KWB نسبت به الیاف KB تأثیر کمتری بر افزایش مقاومت تک‌محوره داشته و همچنین میزان افزایش مدول الاستیسیته با افزایش درصد الیاف KWB از نظر آماری معنی‌دار نیست. اما افزایش درصد الیاف KB تا یک درصد حجمی می‌تواند مدول الاستیسیته را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد. همچنین نتایج آزمون‌های کششی غیرمستقیم نشان داد که وجود الیاف KB تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت کششی خواهد داشت. با توجه به نتایج آزمون‌ها و تحلیل‌های آماری انجام شده توسط آنالیز واریانس، مقادیر ۲ درصد حجمی برای الیاف KWB، و مقادیر ۱/۵ درصد برای الیاف KB به‌عنوان نسبت حجمی بهینه تشخیص داده شد.

کلمات کلیدی

بتن، بتن فیبری مسلح شده، مقاومت کششی، الیاف پلی پروپیلن، نسبت حجمی بهینه الیاف

* نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

بدست آورده که دلیل آن را می‌توان به حساسیت کمتر در برابر خوردگی و سایش کمتر تجهیزات دانست [۳].

امروزه یکی از پرکاربردترین انواع الیاف، انواع مصنوعی هستند که می‌توان به الیاف پلی‌پروپیلن، پلی‌استر، نایلونی، پلی‌اکریلونیتریل و پلی‌ولفین به صورت‌های تکررشته‌ای و یا گره خورده را نام برد که در این بین الیاف مصنوعی نوع پلی‌پروپیلن عمدتاً به صورت چند رشته‌ای تولید می‌شوند [۷]. سانگ^۵ و همکاران در سال ۲۰۰۵ به بررسی تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن و نایلونی بر روی خواص مقاومتی بتن پرداختند. بررسی‌های این محققین نشان داد که هر دو نوع الیاف، منجر به افزایش مقاومت‌های فشاری، خمشی و کششی بتن می‌شوند. همچنین نتایج بررسی این محققین نشان داد که الیاف نایلونی تأثیر بهتری بر مقاومت بتن دارد [۸]. محمد در سال ۲۰۰۶ مطالعاتی بر روی تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر مقاومت فشاری، خمشی و کشش غیرمستقیم بتن انجام داد. در این تحقیق الیاف به طول ۱۵ میلی‌متر با نسبت‌های حجمی ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد بکار برده شد و نتایج با نمونه بدون الیاف مقایسه شد. نتایج این مطالعه، نسبت حجمی ۰/۵ درصد را به‌عنوان مقدار بهینه الیاف گزارش کرد [۹]. کاکویی^۶ و همکاران و همچنین راموجی^۷ در تحقیقاتی جداگانه، از الیاف پلی‌پروپیلن با طول‌های مختلف و با نسبت‌های حجمی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد استفاده کردند. نتایج تحقیق این محققین نشان داد که مقدار ۱/۵ درصد نسبت حجمی بهینه برای مقاومت فشاری تک-محوره و مقاومت کششی غیرمستقیم است [۱۰ و ۱۱]. موهاده^۸ در سال ۲۰۱۵ از الیاف پلی‌پروپیلن به طول ۶/۲ میلی‌متر در نسبت‌های حجمی ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد در بتن استفاده نمود و مقادیر ۰/۵ درصد را به‌عنوان مقاومت بهینه تعیین کرد [۱۲]. دیهاران^۹ و لال^{۱۰} در سال ۲۰۱۶ تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن به صورت ترکیبی از الیاف با طول‌های مختلف ۲۴، ۴۰ و ۵۰ میلی‌متر بر مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت خمشی و مقاومت کششی غیرمستقیم را بررسی کردند و نسبت حجمی ۱/۵ درصد را به‌عنوان مقادیر بهینه انتخاب نمودند [۱۳]. یانگ^{۱۱} و همکاران در سال ۲۰۱۷ با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی و درجا، به مقایسه تأثیر فبرهای فلزی آمورف^{۱۲} و فبرهای فولادی رایج پرداختند. نتایج تحقیق این محققین نشان داد که فبرهای فولادی دارای مقاومت خمشی کمتری بوده، اما دارای مقاومت فشاری، مقاومت باقیمانده و چقرمگی بالاتری می‌باشند [۱]. لیو و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی تأثیر طول فبرهای پروپیلن بر روی رفتار مکانیکی شاتکریت پرداختند و نتایج مطالعات آنها نشان داد که افزایش طول الیاف

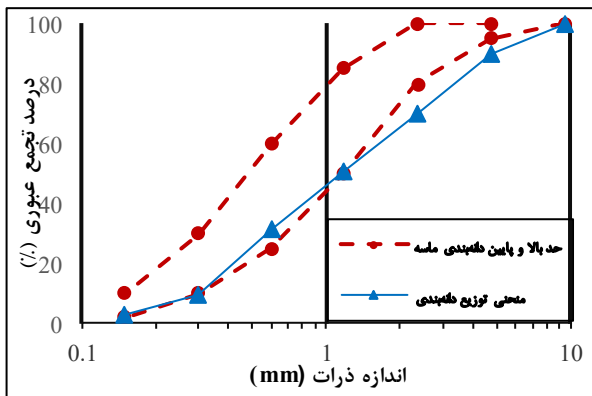
بتن به‌عنوان ترکیبی از سیمان، ماسه، آب و سایر مواد افزودنی، امروزه یکی از پرکاربردترین مواد در اکثر پروژه‌های ساخت و تولید می‌باشد که بدلیل هزینه کم تولید و خواص مکانیکی مناسب آن، دارای مقبولیت قابل ملاحظه‌ای می‌باشد. اما به دلیل ساختار غیرهموزن و شکنندگی^۱ آن، دارای مقاومت کششی پایینی در مقایسه با مقاومت فشاری آن است. برای جبران این نقیصه بتن، از مواد تقویت‌کننده مختلفی همچون آرماتورهای فولادی در سازه‌های مهندسی بهره گرفته می‌شود.

یکی از کاربردهای بتن در پروژه‌های عمرانی و معدنی، شاتکریت است. در اوایل به‌کارگیری تکنولوژی شاتکریت، از تور سیمی قبل از پاشش شاتکریت استفاده می‌شد تا مانع از ایجاد ترک در لایه‌های شاتکریت شود. نصب تور سیمی همراه با مشکلات اجرایی خاصی بوده و همچنین باعث ایجاد فضایی در پشت شبکه مشبک و در نقاطی که شاتکریت به سختی امکان نفوذ دارد، می‌شد [۱]. پیشرفت‌های اخیر در صنایع ساخت و ساز همراه با بهبود مشخصه‌های فیزیکی - مکانیکی بتن و سایر محصولات بتنی بوده است. تحقیقات قبلی حاکی از کم بودن مقاومت کششی و خمشی بتن در مقابل مقاومت فشاری آن است. تقویت و تسلیح بتن برای حل این مشکل به کار گرفته شده است، که نه تنها باعث بهبود خواص فیزیکی و مقاومتی بتن شده، بلکه می‌تواند باعث بهبود خواص تغییر شکل‌پذیری، مقاومت در برابر ایجاد ترک و همچنین مشخصه دوام آن می‌شود [۲].

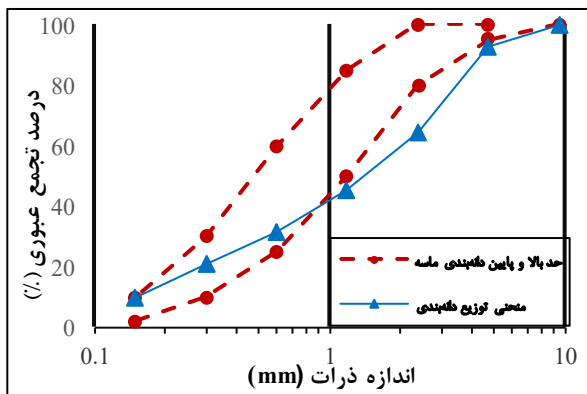
استفاده از شاتکریت و بتن تقویت شده که تحت عنوان بتن فیبری مسلح شده (FRC^۲) شناخته می‌شود، باعث بهبود مشخصه‌های ساختاری و غیرساختاری بتن می‌شود. از نظر ساختاری می‌توان به شکل‌پذیری^۳ بیشتر، کنترل ترک داری بهتر، مقاومت خمشی و مقاومت کششی باقیمانده^۴ بالاتر اشاره نمود. در مورد مشخصه‌های غیر ساختاری نیز می‌توان به عملکرد بهتر در سیکل انجماد - ذوب، رفتار بهتر در برابر ضربه و سایش و دوام بهتر را بیان کرد. علاوه بر موارد ذکر شده، در مقایسه با به‌کارگیری بتن و سیستم‌های رایج تقویت بتن، باعث صرفه جویی قابل ملاحظه‌ای در زمان نیز می‌شود [۳].

اکثر تحقیقات قبلی در مورد به‌کارگیری FRC در لاینینگ تونل‌ها، بر روی استفاده از فبرهای فولادی، نحوه ساخت و شکل این الیاف بوده است [۴-۶]. اما در سال‌های اخیر، استفاده از الیاف پلیمری در صنایع معدنی محبوبیت بیشتری

می شوند و یا توسط فرایند انفجار تولید می شوند. سنگدانه‌ها با آب و سیمان مخلوط شده و ملات بتن را می سازند و با قفل شدگی که بین دانه ها ایجاد می شود، مقاومت بتن را در برابر تنش های وارده تامین می کنند [۱۷، ۱۸]. در این تحقیق از دو نوع مصالح سنگی ماسه شسته و ماسه شکسته، برای تهیه مخلوط بتن استفاده شده است. در طرح اختلاط بتن پروژه تونل انتقال آب کرمان، مقادیر ۹۲۲ کیلوگرم ماسه شسته، ۹۴۸ کیلوگرم ماسه شکسته و ۴۲۰ کیلوگرم سیمان در هر متر مکعب بتن به کار می رود [۱۹]. با انجام آزمایش توزیع دانه بندی، منحنی توزیع دانه بندی برای هر دو نوع ماسه شسته و ماسه شکسته تعیین شد که نتایج آن به ترتیب در اشکال ۱ و ۲ نشان داده شده است. همچنین محدوده استاندارد توزیع دانه بندی ASTM [۲۰] نیز در این اشکال مشخص شده است که نمودار توزیع نتایج دانه بندی ماسه شسته کمی خارج محدوده بوده و خصوصیات فیزیکی آن قابل قبول است. اما محدوده بیشتری از منحنی ماسه شکسته خارج از محدوده استاندارد می باشد.



شکل ۱- منحنی دانه بندی ماسه شسته



شکل ۲- منحنی دانه بندی ماسه شکسته

از ۳ تا ۲۱ میلیمتر باعث بهبود مکانیزم شکست برشی و کششی نمونه‌ها می شود. اما در طول های بیشتر افت مقاومت مشاهده شد [۱۴]. خوشه چیان و تن زاده (۲۰۱۸) به بررسی تأثیر استفاده از نانوذرات اکسید آلومینیوم، سیلیس و همچنین فیبرهای شیشه‌ای پرداختند و به ترتیب مقدار ۱٪، ۱/۵٪ و ۰/۷٪ را به عنوان مقادیر بهینه این مواد در بتن تشخیص دادند که در نتیجه آن مقاومت فشاری و خمشی بتن به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت [۱۵]. کین^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی استفاده از فیبرهای مواد باطله پروپیلن که در صنعت البسه مورد استفاده قرار می گیرند، پرداختند و تحقیق آنها نشان داد که استفاده از این مواد علاوه بر بهبود خواص مقاومتی، باعث بهبود میزان جذب انرژی و همچنین خواص تخریبی بتن می شود [۱۶].

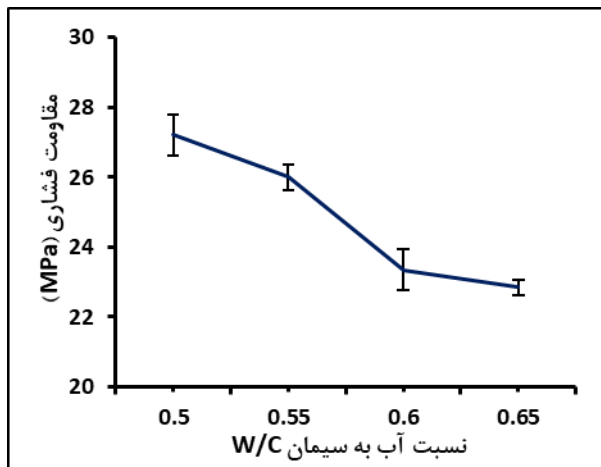
تونل دسترسی انتقال آب کرمان در ارتفاعات جنوب بهرامجرد واقع شده است که محدوده‌ای از رابر تا گلزار را شامل می شود. حفاری این تونل بصورت سنتی چالزنی و آتشیاری و نگهداری آن شامل سیستم‌های پیچ سنگ دوغابی و شاتکریت می باشد. در مسیر تونل دسترسی، ناپیوستگی‌هایی شامل سطوح لایه بندی، درزه‌ها، زون‌های شکسته در توده سنگ، گسل‌ها و مناطق تماس بین دو نوع سنگ مختلف وجود دارد. برای تقویت بتن در برابر خمش و کشش ناشی از جابجایی ناپیوستگی‌های یاد شده و یا حرکت گوه‌های تشکیل شده احتمالی، از شبکه تور سیمی استفاده شده است. در این تحقیق سعی بر آن است که با مسلح کردن بتن با الیاف پلیمری، مقاومت آن را در برابر کشش و خمش را بالا برده تا بتوان به نحوی مشکلات مربوط به نصب و اجرای سیستم تور سیمی که در بالا به آن اشاره شد، را حذف نمود. برای این منظور، از دو نوع الیاف پلیمری شرکت نانونخ سیرجان به نام‌های تجاری KWB^{۱۴} و KB^{۱۵} استفاده شده است. در این مقاله، ابتدا به تشریح مصالح به کار برده شده، پرداخته و مشخصات فیزیکی آن‌ها بررسی می شوند. در ادامه، طرح اختلاط بتن مورد استفاده در این تحقیق و نیز الیاف استفاده شده در طرح‌های مختلف بررسی شده و با انجام آزمون‌های فشاری تک‌محوره، کششی غیر مستقیم (برزیلی) و فشاری سه‌محوره میزان بهینه هر دو نوع الیاف و کارایی آن‌ها مورد بررسی قرار می گیرد.

۲- تهیه مصالح برای ساخت نمونه‌ها

۲-۱- طرح اختلاط بتن

در طرح اختلاط بتن، سنگدانه‌ها مصالح سنگی دانه‌ای هستند که معمولاً یا به صورت طبیعی از مناطق آبرفتی تهیه

طرح پایه در نظر گرفته شد. بنابراین، برای هر طرح، مقدار سیمان، ماسه شسته، ماسه شکسته و آب مورد نیاز به ترتیب، ۹، ۱۹/۸، ۲۰/۴ و ۵ کیلوگرم محاسبه شد.



شکل ۳- تأثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری تک‌محوره

۲-۲- الیاف پلیمری

در این تحقیق از دو ترکیب مختلف الیاف KWB و KB ساخت شرکت نانوخ سیرجان استفاده شد. مشخصات ظاهری این دو نوع الیاف در اشکال ۴ و ۵ نشان داده شده است. الیاف به کار برده شده، از انواع پلی‌پروپیلن می‌باشند و ویژگی‌های مکانیکی این الیاف در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۴- الیاف پلی‌پروپیلن KWB تیپ ۰۳۰۷

سایر مشخصات این دو نوع ماسه، در جدول ۱ آورده شده است. میزان حداکثر خاک مجاز موجود در ماسه ۲۵٪ است (SE = ٪۷۵) و هر چه این مقدار به ۱۰۰ نزدیکتر باشد، برای ساخت بتن مناسب‌تر است. از طرف دیگر، بر اساس استاندارد ASTM، مدول نرمی (FM) برای مصالح ریز دانه بتن، بین ۲/۵ و ۳/۳ است. اما مدول نرمی هر دو نوع ماسه، مقداری بیشتر از این مقدار بوده که نشانگر وجود دانه‌های سنگی درشت‌تر می‌باشد [۲۰]. لازم به ذکر است که با توجه به استفاده از توزیع‌های دانه‌بندی و مشخصات ذکر شده برای ماسه شکسته و ماسه شسته در تونل انتقال آب کرمان، در این تحقیق سعی شده است که طرح اختلاطی مشابه با شرایط واقعی پروژه و با همان مشخصات تهیه شود.

آب استفاده شده در تهیه بتن باید عاری از هرگونه ناخالصی و یا آلودگی باشد. آبی که حاوی اندکی خاصیت اسیدی باشد، می‌تواند اثرات خوردگی بر بتن داشته باشد. همچنین وجود روغن در آب، علاوه بر کند کردن زمان گیرش، مقاومت را نیز کاهش می‌دهد [۱۷].

جدول ۱- مشخصات فیزیکی مصالح سنگی

وزن مخصوص (kg/m ³)	جذب آب (%)	SE* (%)	FM* (%)
۲۱۲۸	۲/۲۵	۷۹	۳/۴۵
۲۶۶۰	۱/۴۲	۶۹	۳/۵۹

SE*: ارزش ماسه‌ای FM*: مدول نرمی

در این تحقیق از آب شهری آشامیدنی در تمامی طرح‌های اختلاط استفاده شده است. همچنین از سیمان تیپ دو پرتلند برای تهیه بتن مورد نیاز، استفاده شده است. به منظور تعیین نسبت آب به سیمان و جلوگیری از خارج شدن مقاومت بتن از محدوده مورد نظر، چهار طرح با نسبت آب به سیمان مختلف تهیه شد. سه نمونه مکعبی به ابعاد ۱۵ سانتی‌متر، مطابق با استاندارد BS^{۱۶} از هر طرح تهیه شده و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است [۲۱]. با افزایش نسبت آب به سیمان، مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش می‌یابد. از طرفی نسبت آب به سیمان بالا، منجر به روانی بیشتر مخلوط بتن می‌شود. روانی بالا برای بتن پاششی مناسب نبوده و منجر به ریزش بتن از روی دیواره می‌شود. با کاهش نسبت آب به سیمان روانی بتن نیز کاهش پیدا می‌کند. بررسی‌های انجام شده نشان داد که طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ مقاومت مشخصه مورد نظر را دارد و به‌عنوان

ذکر شده برای طرح بدون الیاف در نظر گرفته شدند. برای هر یک از الیاف، چهار طرح اختلاط با نسبت‌های حجمی الیاف ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد تهیه شد.

برای انجام آزمایش فشاری تک‌محوره، هر طرح اختلاط، چهار نمونه مکعبی به ابعاد ۱۵ سانتی‌متر مطابق با استاندارد BS تهیه شد [۲۱]. برای انجام آزمایش برزیلی شش نمونه استوانه‌ای به قطر ۷/۵ سانتی‌متر و نسبت ارتفاع به قطر ۰/۵ طبق استاندارد ASTM تهیه شد [۲۲]. برای انجام آزمایش فشاری سه‌محوره، شش مغزه استوانه‌ای به قطر ۵۴ میلی‌متر و نسبت ارتفاع به قطر ۲، طبق استاندارد ASTM تهیه شد [۲۳]. نمونه‌ها به مدت ۴۸ روز داخل آب گذاشته شدند و به منظور به‌دست آوردن چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برای هر طرح، مغزه‌های تهیه شده طبق استاندارد ASTM تحت آزمون سه‌محوره قرار گرفتند [۲۳]. برای این منظور از شش مغزه تهیه شده برای هر طرح، روی سه مغزه آزمون مقاومت فشاری تک‌محوره انجام گرفت و سه مغزه دیگر تحت تنش‌های جانبی ۲، ۴ و ۶ مگاپاسکال قرار گرفتند. نتایج بدست آمده، وارد نرم‌افزار RocData شده و مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی با استفاده از معیار موهر- کولمب استخراج و مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفتند.

۴- ارائه و تحلیل نتایج

۴-۱- نتایج آزمون مقاومت فشاری تک‌محوره

منحنی‌های تنش - کرنش تمامی نمونه‌های حاوی الیاف KWB و KB به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ آورده شده است. با بررسی نمودار تنش - کرنش مربوط به الیاف KWB تأثیر چشم‌گیری در پیک منحنی تنش - کرنش و شیب منحنی‌ها ملاحظه نمی‌شود. اما در منحنی‌های تنش - کرنش مربوط به نمونه‌های حاوی الیاف KB اختلاف در پیک منحنی و شیب منحنی واضح تر بوده، بگونه‌ای که با افزودن الیاف شیب منحنی که معرف مدول الاستیسیته می‌باشد، به میزان محسوسی افزایش یافته است و این افزایش در نسبت‌های حجمی یک درصد و بالاتر، چشم‌گیرتر می‌باشد. به منظور بررسی دقیق‌تر نتایج و همچنین تحلیل آماری آن‌ها، پیک منحنی که معرف مقاومت فشاری تک‌محوره بوده و همچنین شیب قسمت خطی منحنی تنش - کرنش که معرف مدول الاستیسیته متوسط می‌باشد، برای هر دو دسته آزمایش‌های الیاف پلیمری KWB و KB تعیین شد. روند تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های بتنی برای الیاف KWB و KB در نسبت‌های حجمی مختلف در شکل ۸ آورده شده است.



شکل ۵- الیاف پلی‌پروپیلن KB تپ ۰۱۰۷

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف مورد استفاده

نوع الیاف	KB	KWB
وزن مخصوص	۰/۹۴	۰/۹۱
حداکثر مقاومت کششی (MPa)	۸۰۰	۵۰۰
مدول الاستیسیته (GPa)	۷/۰	۵/۵
طول الیاف (mm)	۳۰-۴۰	۴۰-۴۲

۳- نحوه انجام آزمایش‌ها

برای بررسی تأثیر الیاف ذکر شده روی خواص مکانیکی بتن، آزمون‌های فشاری تک‌محوره، کششی غیرمستقیم (برزیلی) و آزمون فشاری سه‌محوره انجام شد. برای انجام آزمایش فشاری تک‌محوره، از دستگاه تک‌محوری خودتنظیم با ظرفیت ۲۰۰ تن و قابلیت کنترل تنش، استفاده شد. برای انجام آزمایش، نرخ بارگذاری برابر ۰/۱ مگاپاسکال بر ثانیه انتخاب شد. با استفاده از LVDT با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر، جابجایی‌های عمودی ثبت شده و منحنی‌های تنش و کرنش رسم گردید. برای انجام آزمایش کششی غیرمستقیم، از دستگاه بارگذاری تمام اتوماتیک با ظرفیت پنج تن، با اتصال صفحات تخت، استفاده شد و نرخ بارگذاری ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد. برای انجام آزمایش فشاری سه‌محوره، از دستگاه تمام اتوماتیک با ظرفیت بار قائم ۱۲۰ تن استفاده شد و برای اعمال فشار جانبی، از سلول هوک با قطر داخلی ۵۴ میلی‌متر استفاده شد و فشار جانبی از طریق جک مجزا، اعمال شد.

در تمامی طرح‌های اختلاط حاوی الیاف مقادیر مصالح سیمان، ماسه شسته، ماسه شکسته و آب ثابت و برابر با مقادیر

بررسی تأثیر الیاف KWB بر روی مقاومت فشاری تک‌محوره، حاکی از افزایش جزئی مقاومت با افزایش درصد حجمی الیاف می‌باشد، اما با توجه به پراکندگی و انحراف نتایج، جهت بررسی دقیق‌تر نتایج از آنالیز واریانس^{۱۷} برای بررسی معنی‌دار بودن تأثیر درصد حجمی مختلف الیاف بر مقاومت فشاری تک‌محوره نمونه‌ها بهره گرفته شد. نتایج این بررسی در جدول ۳ آورده شده است. در آنالیز اولیه نتایج درصد حجمی‌های مختلف به گروه‌های جداگانه تقسیم‌بندی شد و میزان معنی‌داری با مقایسه آماره F با مقدار بحرانی آن نشان داد که با احتمال ۹۹٪ میزان مقاومت در گروه‌های مختلف معنی‌دار است و می‌توان گفت حداقل دو طرح اختلاط حاوی الیاف KWB تغییر قابل توجهی در مقاومت فشاری تک‌محوره ایجاد کرده‌اند. در ادامه با توجه به فرضیات ابتدایی حاصل از آنالیز واریانس دو به دو، بین طرح‌های بدون الیاف و طرح‌های دارای نسبت حجمی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد از الیاف KWB، آنالیز واریانس انجام گرفت که نتایج آن در جدول ۴ آمده است. با توجه به نتایج آنالیز واریانس انجام شده می‌توان گفت، الیاف KWB تا نسبت حجمی ۱/۵ درصد، هیچ تأثیر چشمگیری در افزایش مقاومت فشاری تک‌محوره بتن نداشته‌اند. از طرفی بررسی طرح اختلاط حاوی ۱/۵ درصد حجمی با طرح اختلاط حاوی ۲ درصد حجمی از الیاف KWB که نتایج آن در جدول ۵ آمده است، نشان می‌دهد بین این دو طرح تفاوت معنی‌داری وجود ندارد. بنابراین بر اساس آنالیزهای واریانس انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت نسبت‌های حجمی ۲ درصد و ۱/۵ درصد از الیاف KWB به ترتیب بیشترین تأثیر را در بالا بردن مقاومت فشاری تک‌محوره بتن داشته‌اند و نسبت حجمی ۲ درصد مقادیر بهینه برای این نوع الیاف بر روی مقاومت فشاری تک‌محوره می‌باشد.

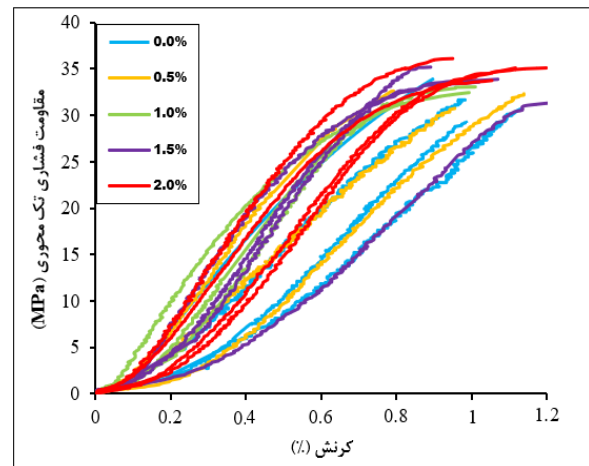
جدول ۳- آنالیز واریانس بین نتایج مقاومت فشاری تک‌محوره

بدست آمده از نمونه‌های حاوی الیاف KWB

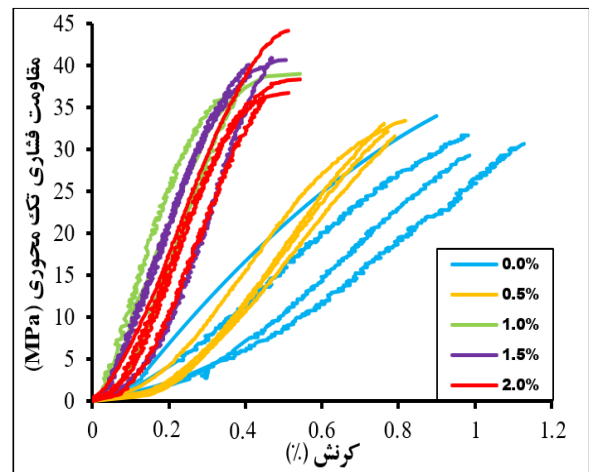
SUMMARY				
Groups	Count	Sum	Average	Variance
KWB-0%	4.00	125.50	31.38	3.94
KWB-0.5%	3.00	95.64	31.88	1.02
KWB-1%	3.00	95.64	31.88	1.02
KWB-1.5%	4.00	134.90	33.72	1.44
KWB-2%	4.00	140.04	35.01	0.93

ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	36.08	4.00	9.02	5.10	0.01	3.18
Within Groups	23.00	13.00	1.77			
Total	59.08	17.00				

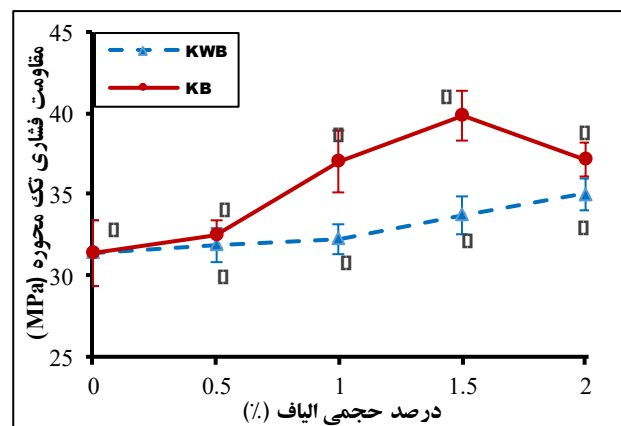
نوشته شده کنار هر نقطه انحراف معیار مقادیر بدست آمده را نشان می‌دهد.



شکل ۶- منحنی تنش-کرنش نمونه‌های حاوی الیاف KWB.



شکل ۷- منحنی تنش-کرنش نمونه‌های حاوی الیاف KB.



شکل ۸- تأثیر نسبت حجمی الیاف بر مقاومت فشاری تک‌محوره.

جدول ۷- آنالیز واریانس بین مقاومت فشاری تک محوری طرح های اختلاط حاوی ۱، ۱/۵ و ۲ درصد الیاف KB

SUMMARY				
Groups	Count	Sum	Average	Variance
KB-1%	4.00	148.11	37.03	3.53
KB-1.5%	4.00	159.32	39.83	2.18
KB-2%	4.00	155.56	38.89	12.88

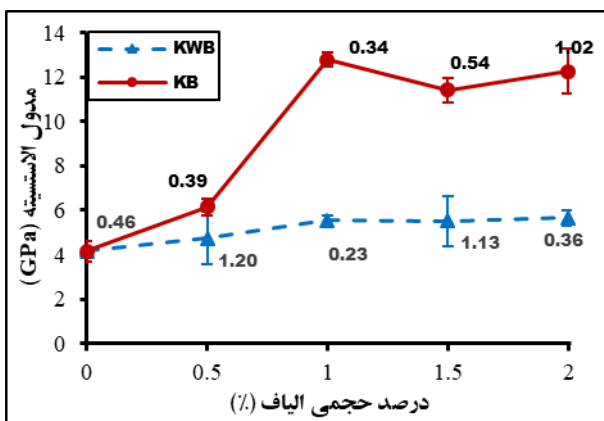
ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	16.28	2.00	8.14	1.31	0.32	4.26
Within Groups	55.76	9.00	6.20			
Total	72.04	11.00				

جدول ۸- آنالیز واریانس مقاومت فشاری تک محوره طرح بدون الیاف و طرح حاوی ۰/۵ درصد حجمی الیاف KB

SUMMARY				
Groups	Count	Sum	Average	Variance
KB-0%	4.00	125.50	31.38	3.94
KB-0.5%	4.00	130.12	32.53	0.70

ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	2.67	1.00	2.67	1.15	0.32	5.99
Within Groups	13.91	6.00	2.32			
Total	16.58	7.00				

میزان تأثیر الیاف KB و KWB در نسبت های حجمی مختلف بر روی مدول الاستیسیته متوسط نمونه های بتنی در شکل ۹ آورده شده است.



شکل ۹- تأثیر نسبت حجمی الیاف بر مدول الاستیسیته متوسط.

با توجه به پراکندگی نتایج، تغییر بارزی در مدول الاستیسیته الیاف KWB مشاهده نمی شود. برای روشن تر شدن این موضوع، آنالیز واریانس دو به دو بر روی درصدهای مختلف این الیاف انجام گرفت که نتایج آن در جدول ۹ آمده است. با توجه به این آنالیز واریانس، نمونه های حاوی الیاف

جدول ۴- آنالیز واریانس بین مقاومت فشاری تک محوری نمونه های حاوی نسبت های حجمی ۰/۵، ۱، ۱/۵ درصد از الیاف KWB و طرح بدون الیاف

SUMMARY				
Groups	Count	Sum	Average	Variance
KWB-0%	4.00	125.50	31.38	3.94
KWB-0.5%	3.00	95.64	31.88	1.02
KWB-1%	3.00	95.64	31.88	1.02
KWB-1.5%	4.00	134.90	33.72	1.44

ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	12.58	3.00	4.19	2.08	0.17	3.71
Within Groups	20.20	10.00	2.02			
Total	32.78	13.00				

جدول ۵- آنالیز واریانس، بین مقاومت فشاری تک محوری طرح های حاوی ۲ و ۱/۵ درصد حجمی از الیاف KWB

SUMMARY				
Groups	Count	Sum	Average	Variance
KWB-2%	4.00	140.04	35.01	0.93
KWB-1.5%	4.00	134.90	33.72	1.44

ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	3.31	1.00	3.31	2.79	0.15	5.99
Within Groups	7.13	6.00	1.19			
Total	10.44	7.00				

همچنین مشابه تحلیل انجام شده برای الیاف KWB، آنالیز واریانس بر روی درصدهای مختلف الیاف KB نیز صورت گرفت که این آنالیز (جدول ۶) نشان داد که با احتمال بالای ۰.۹۹، حداقل دو جامعه آماری متفاوت وجود دارد. سپس آنالیز دقیق تر برای گروه های مختلف نشان داد، نسبت حجمی ۱، ۱/۵ و ۲ درصد به یک جامعه تعلق داشته (جدول ۷) و نسبت حجمی ۰/۵ درصد و طرح بدون الیاف (جدول ۸) در یک جامعه آماری مجزا قرار می گیرند. بنابراین طبق این تحلیل آماری، الیاف KB در درصد های حجمی بیشتر از ۱ درصد تأثیر گذار واقع شده اند.

جدول ۶- آنالیز واریانس انجام شده بین مقاومت فشاری تک محوری نمونه های فاقد الیاف و نمونه های حاوی الیاف KB

SUMMARY				
Groups	Count	Sum	Average	Variance
KB-0%	4.00	125.50	31.38	3.94
KB-0.5%	4.00	130.12	32.53	0.70
KB-1%	4.00	148.11	37.03	3.53
KB-1.5%	4.00	159.32	39.83	2.18
KB-2%	4.00	155.56	38.89	12.88

ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	229.92	4.00	57.48	12.37	0.00	3.06
Within Groups	69.68	15.00	4.65			
Total	299.60	19.00				

جدول ۱۰- آنالیز واریانس بین مدول الاستیسیته متوسط طرح اختلاط بدون الیاف و طرح‌های اختلاط حاوی الیاف KB

SUMMARY					
Groups	Count	Sum	Average	Variance	
KB-0%	4.00	16.62	4.15	0.22	
KB-0.5%	4.00	24.56	6.14	0.15	
KB-1%	4.00	51.12	12.78	0.12	
KB-1.5%	4.00	45.63	11.41	0.29	
KB-2%	4.00	48.97	12.24	1.03	

ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	Fcrit
Between Groups	246.61	4.00	61.65	169.88	0.00	3.06
Within Groups	5.44	15.00	0.36			
Total	252.06	19.00				

جدول ۱۱- آنالیز واریانس بین مدول الاستیسیته متوسط طرح اختلاط بدون الیاف و طرح حاوی ۰/۵ درصد الیاف KB

SUMMARY					
Groups	Count	Sum	Average	Variance	
KB-0%	4.00	16.62	4.15	0.22	
KB-0.5%	4.00	24.56	6.14	0.15	

ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	Fcrit
Between Groups	7.89	1.00	7.89	42.72	0.00	5.99
Within Groups	1.11	6.00	0.18			
Total	9.00	7.00				

آنالیز واریانس بین نسبت‌های حجمی ۱، ۱/۵ و ۲ درصد نیز انجام گرفت (جدول ۱۲) و نتایج این بررسی نشان داد که در این مقادیر از الیاف KB، تفاوت بارزی با یکدیگر ایجاد نمی‌کنند. بنابراین به طور کلی در خصوص الیاف KB نتیجه می‌توان گرفت که افزودن آن تا ۱ درصد حجمی موجب افزایش مدول الاستیسیته متوسط شده، اما در نسبت‌های حجمی بیشتر از ۱ درصد، این تفاوت بارز نمی‌باشد.

جدول ۱۲- آنالیز واریانس بین مدول الاستیسیته متوسط نمونه‌های حاوی نسبت‌های حجمی ۱، ۱/۵ و ۲ درصد از الیاف KB

SUMMARY					
Groups	Count	Sum	Average	Variance	
KB-1%	4.00	51.12	12.78	0.12	
KB-1.5%	4.00	45.63	11.41	0.29	
KB-2%	4.00	48.97	12.24	1.03	

ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	Fcrit
Between Groups	3.83	2.00	1.92	3.98	0.06	4.26
Within Groups	4.33	9.00	0.48			
Total	8.17	11.00				

بنابراین بر اساس نتایج آزمون‌های فشاری تک‌محوره می‌توان نتیجه‌گیری کرد که برای الیاف KWB، در نسبت‌های حجمی کمتر از ۱/۵ درصد، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش مقاومت فشاری تک‌محوره نداشته است. افزایش مدول الاستیسیته متوسط نیز برای نمونه‌های حاوی الیاف KWB، در

KWB دو به دو در یک جامعه قرار گرفتند و این بدان معنا است که افزایش درصد حجمی الیاف KWB بر مدول الاستیسیته از نظر آماری معنی‌دار نمی‌باشد. نتایج این بررسی نشان می‌دهد تأثیر وجود الیاف تنها در طرح‌های بیش از ۱ درصد، توانسته‌اند مقدار متوسط مدول الاستیسیته را نسبت به طرح بدون الیاف را افزایش دهد. اما با توجه به انحراف معیار نتایج به طور کلی می‌توان گفت، الیاف KWB تنها توانسته‌اند افزایش جزئی در مدول الاستیسیته بتن در مقادیر بیش از ۱ درصد حجمی ایجاد کنند.

جدول ۹- آنالیز واریانس بین مدول الاستیسیته متوسط نمونه‌های حاوی الیاف KWB و طرح اختلاط بدون الیاف

SUMMARY					
Groups	Count	Sum	Average	Variance	
KWB-0%	4.00	16.62	4.15	0.22	
KWB-0.5%	3.00	14.23	4.74	1.43	
KWB-1%	3.00	16.62	5.54	0.05	
KWB-1.5%	4.00	22.04	5.51	1.27	
KWB-2%	4.00	22.63	5.66	0.13	

ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	Fcrit
Between Groups	6.45	4.00	1.61	2.68	0.08	3.18
Within Groups	7.81	13.00	0.60			
Total	14.26	17.00				

بررسی اولیه انجام شده بر روی تأثیر افزودن الیاف KB نشان داد که با افزودن ۰/۵ درصد حجمی از الیاف، مدول الاستیسیته نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف، حدود ۴۸ درصد افزایش یافته است. این در حالی است که در نسبت‌های حجمی بیشتر از یک درصد از الیاف KB، مدول الاستیسیته تقریباً به دو برابر افزایش یافته است. برای تحلیل بهتر مدول الاستیسیته نمونه‌های حاوی الیاف KB، تحلیل واریانس بصورت دو به دو بر روی درصدهای مختلف انجام گرفت. جدول (۱۰) آنالیز واریانس بین طرح اختلاط بدون الیاف و طرح‌های اختلاط حاوی نسبت حجمی ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد از الیاف KB را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این آنالیز واریانس حاکی از وجود حداقل دو جامعه مجزا از هم با احتمال بیش از ۹۹٪ می‌باشد. با توجه به نمودارهای تنش-کرنش طرح بدون الیاف و طرح حاوی ۰/۵ درصد، آنالیز واریانس برای بررسی معنی‌داری تأثیر ۰/۵ درصد الیاف روی مدول الاستیسیته متوسط انجام گرفت (جدول ۱۱)). نتایج این آنالیز نشان داد که افزایش ۰/۵ درصد حجمی الیاف KB تأثیر افزایشی معنی‌داری با احتمال بیش از ۹۹٪ بر مدول الاستیسیته وجود دارد.

شکست به طور کامل از هم جدا نشدند و تنها یک ترک از میانه نمونه ایجاد و شروع به گسترش کرده است.

با توجه به نمودارهای به دست آمده می توان نتیجه گرفت افزایش الیاف منجر به افزایش مقاومت کششی نمونه های بتنی شده است. در الیاف KWB با افزایش درصد حجمی از ۰ به ۰/۵ درصد، مقداری افزایش در مقاومت کششی دیده می شود، اما به دلیل انحراف معیار نتایج تا حدود ۱/۵ درصد این افزایش مقاومت قابل ملاحظه نمی باشد. اما در درصد حجمی ۲ درصد، افزایش در مقاومت کششی بتن دیده می شود. در مورد الیاف KB، با افزایش درصد حجمی از ۰ تا ۱ درصد افزایش قابل ملاحظه ای در مقاومت کششی دیده می شود. اما از ۱ تا ۲ درصد تغییر قابل ملاحظه ای در مقاومت دیده نمی شود و کاهش جزئی مقاومت در ۲ درصد را می توان با توجه به انحراف آن بدلیل خطای آزمایش مربوط دانست.

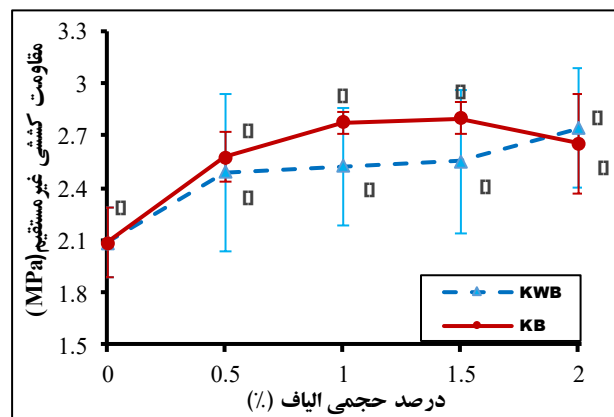
در مقایسه الیاف KWB با الیاف KB مشاهده می شود، الیاف KB تأثیر بیشتری در بالا بردن مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه های بتنی داشته اند. این تفاوت در میزان افزایش مقاومت کششی می تواند ناشی از مقاومت کششی بالای الیاف KB در مقایسه با الیاف KWB باشد. طبق نتایج بدست آمده در نمونه های حاوی الیاف KWB بیشترین میزان مقاومت کششی در نسبت حجمی ۲ درصد بدست آمده است، در حالی که درصد حجمی بهینه در آزمون کشش غیر مستقیم برای نمونه های حاوی الیاف KB، ۱/۵ درصد می باشد.

برای بررسی دقیق تر نحوه تأثیر الیاف در درصد حجمی های مختلف از آنالیز واریانس بهره گرفته شد. نتایج آزمون ها در درصدهای حجمی مختلف به پنج گروه مختلف تقسیم شد. نتایج آنالیز واریانس انجام گرفته روی نمونه های حاوی الیاف KWB در جدول ۱۳ آورده شده است. با در نظر گرفتن احتمال ۹۵٪، مشخص شد که مقدار آماره F از میزان بحرانی کمتر است و این بدان معناست که تأثیر الیاف KWB با در نظر گرفتن احتمال ۹۵٪ معنی دار نمی باشند، به نحوی که هیچ گروه متمایزی از نظر مقاومتی وجود ندارد. اما میانگین مقاومت کششی غیر مستقیم، با توجه به افزایش نسبت حجمی الیاف، روند افزایشی از خود نشان می دهند.

نسبت حجمی بیش از ۱ درصد بصورت ناچیزی محسوس می باشد. اما در خصوص نمونه های حاوی الیاف KB، مقاومت فشاری تک محوره و مدول الاستیسیته متوسط در نسبت های حجمی بیشتر از یک درصد، افزایش چشمگیری داشته اند. تأثیر الیاف KB در افزایش مقاومت فشاری تک محوره و بخصوص مدول الاستیسیته متوسط، به مراتب در مقایسه با الیاف KWB بیشتر بوده است که این امر می تواند ناشی از مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بالای الیاف KB، در مقایسه با الیاف KWB باشد.

۴-۲- نتایج آزمون کششی غیر مستقیم (برزیلی)

پس از انجام آزمون برزیلی بر اساس استاندارد ASTM با درصد حجمی الیاف مختلف، سطح نمونه ها پس از شکست مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به ابعاد کوچک نمونه ها در مقایسه با ابعاد استاندارد بتن، توزیع الیاف در بعضی نمونه ها به خوبی انجام نگرفته بود. به همین دلیل سطح شکست برخی نمونه ها در مقایسه با نمونه های دیگر مربوط به یک طرح اختلاط، گاهی دارای الیاف بیشتر و گاهی کمتر از حد معمول می باشند. در مواردی نیز الیاف در راستای بارگذاری قرار گرفته بود. بنابراین نمونه ها پس از شکست از هم جدا شده و تراکم الیاف در سطح شکست آن ها با یکدیگر به صورت چشمی مقایسه گردید و در صورت داشتن مشکلات ذکر شده، نتایج آن ها از آنالیز حذف شدند. پس از تصحیح موارد یاد شده، تأثیر نسبت حجمی الیاف بر روی مقاومت کششی غیر مستقیم تعیین گردید و نتایج آن در شکل (۱۰) آورده شده است.



شکل ۱۰- تأثیر نسبت حجمی الیاف بر مقاومت کششی غیر مستقیم

لازم به ذکر است مقاومت های ثبت شده تماماً مقاومت نمونه های بتنی در لحظه شکست و ایجاد ترک می باشند. این در حالی است که هیچ کدام از نمونه های حاوی الیاف پس از

SUMMARY

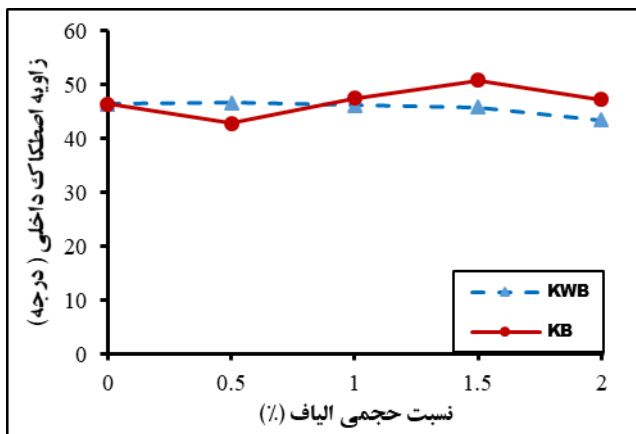
Groups	Count	Sum	Average	Variance
KB- 0.5%	6	17.16	2.86	0.23
KB- 1%	6	14.08	2.35	0.25
KB- 1.5%	6	15.84	2.64	0.07
KB- 2%	6	14.55	2.43	0.17

ANOVA

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.96	3.00	0.32	1.78	0.18	3.10
Within Groups	3.59	20.00	0.18			
Total	4.55	23.00				

۳-۴- نتایج آزمون‌های فشاری سه‌محوره

نتایج بررسی نسبت حجمی الیاف بر روی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توسط نرم افزار RocData انجام شد و نتایج آن در اشکال ۱۱ و ۱۲ آورده شده است. همان‌طور که از این اشکال مشخص است، وجود الیاف تأثیر بسیار کمی در زاویه اصطکاک و چسبندگی نمونه‌های بتنی داشته است. طبق این نمودارها، مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک چندان تغییر نیافته‌اند. به طوری که بیشترین اختلاف چسبندگی بتن الیافی در مقایسه با بتن بدون الیاف، برای هر دو نوع الیاف حدوداً یک مگاپاسکال و تغییرات زاویه اصطکاک در حدود سه درجه می‌باشد. لازم به ذکر است که با توجه به محدودیت قطر سلول هوک موجود برای انجام آزمایش سه‌محوره و نیاز به مغزه‌گیری مجدد از بلوک‌های بتونی، این تغییرات نامحسوس می‌تواند به خاطر توزیع غیر یکنواخت الیاف در نمونه‌ها باشد.



شکل ۱۱- بررسی تأثیر نسبت حجمی الیاف بر زاویه اصطکاک داخلی

جدول ۱۳- آنالیز واریانس بین مقاومت کششی نمونه‌های حاوی الیاف KWB و نمونه‌های فاقد الیاف

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average	Variance
KWB- 0%	6	12.51	2.08	0.04
KWB- 0.5%	6	14.91	2.49	0.20
KWB- 1%	6	15.12	2.52	0.11
KWB- 1.5%	6	15.29	2.55	0.17
KWB- 2%	6	16.43	2.74	0.12

ANOVA

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	1.37	4.00	0.34	2.72	0.05	2.76
Within Groups	3.16	25.00	0.13			
Total	4.53	29.00				

آنالیز واریانس روی نتایج نمونه‌های حاوی الیاف KB نیز انجام گرفت که نتایج آن در جدول ۱۴ نشان داده شده است. با مقایسه مقدار آماره F با میزان F بحرانی، مشخص شد که به احتمال ۹۸٪، حداقل دو طرح وجود دارد که مقاومت کششی غیر مستقیم آن‌ها با یکدیگر تمایز است.

جدول ۱۴- آنالیز واریانس بین مقاومت کششی نمونه‌های حاوی الیاف KB و نمونه‌های فاقد الیاف

SUMMARY

Groups	Count	Sum	Average	Variance
KB- 0%	6	12.51	2.08	0.04
KB- 0.5%	6	17.16	2.86	0.23
KB- 1%	6	14.08	2.35	0.25
KB- 1.5%	6	15.84	2.64	0.07
KB- 2%	6	14.55	2.43	0.17

ANOVA

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	2.08	4.00	0.52	3.44	0.02	2.76
Within Groups	3.79	25.00	0.15			
Total	5.87	29.00				

بنابراین آنالیز واریانس بصورت دو به دو بین نتایج طرح‌های حاوی الیاف KB انجام شد که نتایج بررسی آن همان‌طور که در جدول ۱۵ آورده شده است، نشان می‌دهد نتایج آزمون‌ها در نسبت‌های حجمی بیشتر از ۰/۵ درصد قابل توجه و در عین حال به یک گروه تعلق دارند. بنابراین این نتایج به وضوح نشان می‌دهد که با افزایش ۰/۵ درصد حجمی الیاف KB، مقاومت کششی افزایش می‌یابد.

جدول ۱۵- آنالیز واریانس بین مقاومت کششی نمونه‌های حاوی الیاف KB

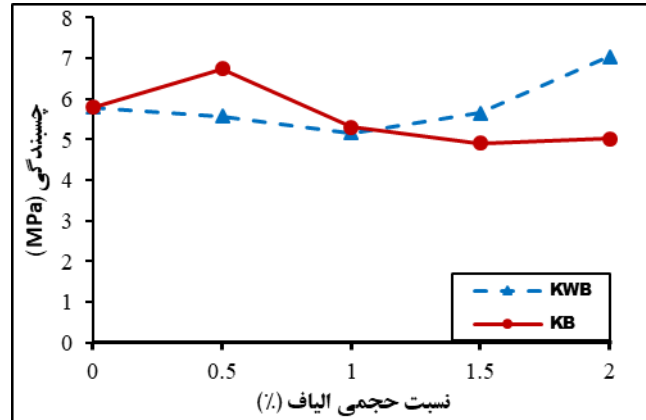
می شود که در تحقیقات آتی نحوه تأثیر الیاف بر رفتار پس از شکست بررسی شود.

پی نوشت

- ¹ Brittleness
- ² Fiber Reinforced Concrete
- ³ Ductility
- ⁴ Residual Tensile Strength
- ⁵ Song
- ⁶ Kakooei
- ⁷ Ramujee
- ⁸ Mohod
- ⁹ Dharan
- ¹⁰ Lal
- ¹¹ Yang
- ¹² Amorphous
- ¹³ Qin
- ¹⁴ Kortta Wave Blend
- ¹⁵ Kortta Blend
- ¹⁶ British Standards
- ¹⁷ Analysis of Variance (ANOVA)

منابع

- [1] Yang, J.M., Kim, J.K., Yoo, D.Y.; 2017; "Performance of shotcrete containing amorphous fibers for tunnel applications", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 64, pp. 85-94.
- [2] Pukharenko, Y.; 2017; "Restoration and construction: the potential of fiber reinforced materials and products", *Modern problems of science and education*, 4, pp. 1-7.
- [3] Massone, L.M., Nazar, F.; 2018; "Analytical and experimental evaluation of the use of fibers as partial reinforcement in shotcrete for tunnels in Chile", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 77, pp. 13-25.
- [4] Kang, T.H.K., Kim, W., Massone, L.M., Galleguillos, T.A.; 2012; "Shear-flexure coupling behavior of steel fiber-reinforced concrete beams", *ACI Structural Journal*, 109(4), pp. 435-444.
- [5] Chiaia, B., Fantilli, A.P., Vallini, P.; 2009; "Combining fiber-reinforced concrete with traditional reinforcement in tunnel linings", *Engineering Structures*, 31(7), pp. 1600-1606.



شکل ۱۲- بررسی تأثیر نسبت حجمی الیاف بر چسبندگی

۵- نتیجه گیری

این مقاله به بررسی اثر نسبت حجمی مختلف از دو گونه الیاف پلیمری ساخت شرکت نانونخ سیرجان بر پارامترهای مکانیکی بتن پرداخته شد. الیاف بکار برده شده در این پژوهش از انواع KWB و KB بودند. علاوه بر طرح اختلاط بدون الیاف، برای هر کدام از الیاف طرح های اختلاطی با نسبت های حجمی ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد تهیه شد. برای هر دو نوع الیاف، آزمون های فشاری تک محوره، کششی غیر مستقیم (برزیلی) و فشاری سه محوره تحت فشارهای جانبی ۲، ۴ و ۶ مگاپاسکال به منظور محاسبه زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی انجام شد. نتایج این آزمون های کششی غیرمستقیم نشان داد که افزایش در نسبت حجمی الیاف در آزمون مقاومت کششی غیر مستقیم، برای هر دو نوع الیاف منجر به افزایش مقاومت کششی می شود. بنابراین طبق نتایج آزمون برزیلی، نسبت حجمی بهینه در الیاف KWB و KB به ترتیب ۲ و ۱/۵ درصد تشخیص داده شد. بر اساس آزمون فشاری تک محوره مشخص شد، استفاده از الیاف پلیمری KWB تأثیر کمی بر مقاومت فشاری تک محوری نسبت به الیاف KB داشته و مقادیر بهینه برای الیاف KWB، ۲ درصد و برای الیاف KB، ۱/۵ درصد بدست آمد. افزایش مدول الاستیسیته در الیاف KWB چندان محسوس نبود، اما الیاف KB در نسبت حجمی بیش از ۱ درصد، مدول الاستیسیته را تا دو برابر نمونه بدون الیاف افزایش دادند. همچنین نتایج آزمایش فشاری سه محوره نشان داد افزایش مقادیر الیاف تأثیر بارزی بر میزان چسبندگی و زاویه اصطکاک نمونه ها ندارند، این موضوع بایستی با استفاده از آزمون سه محوره در سلول های هوک با قطر بزرگتر مورد بررسی بیشتر قرار گیرد. همچنین با توجه به تأثیر الیاف بر رفتار پس از پیک مقاومت بتن، توصیه

- [16] Qin, Y., Zhang, X., Chai, J., Xu, Z., Li, S.; 2019; “*Experimental study of compressive behavior of polypropylene-fiber-reinforced and polypropylene-fiber-fabric-reinforced concrete*”, Construction and Building Materials, 194, pp. 216-225.
- [17] Kett, I.; 2009; “*Engineered Concrete: Mix Design and Test Methods*”, Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis.
- [18] Mehta, P.K., Monteiro, P.; 1986; “*Concrete-structure, material, and properties*”, Prantice Hall Inc.
- [۱۹] موسسه مهندسی مشاور ساحل، ۱۳۹۶، گزارش کنترل کیفی و مهندسی کارگاهی تونل دسترسی تونل انتقال آب کرمان.
- [20] ASTM C33-03; 2003; “*Standard Specification for Concrete Aggregates*”, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [21] Standard BS.; 1983; “*Testing Concrete-Part 116: Method for Determination of Compressive Strength of Concrete Cubes*”. BS. 1881; 116:1983.
- [22] ASTM C496 / C496M – 17, 1996, “*Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*”; Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02. ASTM, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- 3967; 2008; “*Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens*”; ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [23] ASTM D. 2664-95a.; 1995; “*Standard Test Method for Triaxial compressive strength of Undrained Rock Core specimens without Pore Pressure Measurements*”, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [6] De la Fuente, A., Pujadas, P., Blanco, A., Aguado, A.; 2012; “*Experiences in Barcelona with the use of fibres in segmental linings*”, Tunnel Underground Space Technol. 27(1), pp. 60-71.
- [7] Johnston C.D.; 2014; “*Fiber-reinforced cements and concretes*”, Crc Press.
- [8] Song, P.S., Hwang, S., Sheu, B.C.; 2005; “*Strength properties of nylon-and polypropylene-fiber-reinforced concretes*”, Cement and Concrete Research, 35(8):1546-50.
- [9] Mohamed RA.; 2006; “*Effect of polypropylene fibers on the mechanical properties of normal concrete*”, Journal of Engineering Sciences, 34(4), pp. 1049-59.
- [10] Kakooei, S., Akil, H.M., Jamshidi, M., Rouhi, J.; 2012; “*The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures*”, Construction and Building Materials, 27(1), pp. 73-7.
- [11] Ramujee, K.; 2013; “*Strength properties of polypropylene fiber reinforced concrete*”, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 2(8), pp. 3409-13.
- [12] Mohod, M.V.; 2015; “*Performance of polypropylene fiber reinforced concrete*”, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 12(1), pp. 28-36.
- [13] Dharan, D.S., Lal, A.; 2016; “*Study the effect of polypropylene fiber in concrete*”, International Research Journal of Engineering and Technology, 3(6), pp. 616-619.
- [14] Liu, G., Cheng, W., Chen, L.; 2017; “*Investigating and optimizing the mix proportion of pumping wet-mix shotcrete with polypropylene fiber*”. Construction and Building Materials, 150, pp. 14-23.
- [15] Khooshechin, M., Tanzadeh, J., 2018; “*Experimental and mechanical performance of shotcrete made with nanomaterials and fiber reinforcement*”, Construction and Building Materials, 165, pp. 199-205.