تحقیقات بتن
سال شانزدهم، شمارهٔ دوم
تابستان ۱۴۰۲
ص ۷۰ – ۵۷
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۸

بررسی مقاومت فشاری و خمشی بتن‌های پلیمری حاوی الیاف پلی وینیل الکل و پلی پروپیلن بر پایه‌ی رزین اپوکسی

سید رضا موسوی *
دانشجوی دکتری عمران گرایش سازه ، مرکز تحقیقات سازه و زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی تفت، ایران.
محمدرضا جواهری
استادیار، مرکز تحقیقات سازه و زلزله، دانشگاه آزاد اسلامی تفت، ایران.

چکیده
در این پژوهش به بررسی تأثیر الیاف پلی پروپیلن و پلی وینیل الکل به‌صورت مجزا در ساختار بتن پلیمری پرداخته شده و میزان مقاومت فشاری، خمشی و تنش و کرنش متحمل شده مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین نمونه‌های ساخته شده توسط دستگاه عکس‌برداری الکترونی(SEM)، مورد ارزیابی و مطالعه واقع شدند. مطالعه حاضر، بر روی چهار گروه بتن پلیمری حاوی رزین اپوکسی ۱۲ درصد، با افزودن الیاف با درصدهای ۰/۵ ، ۱ ، ۲ و ۲/۵ نسبت به وزن رزین برای هر دو نوع الیاف پلی پروپیلن و پلی‌وینیل‌الکل به طول ۱۲ میلیمتر، انجام گرفت. نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش شامل نمونه‌ی مکعبی ۵۰×۵۰×۵۰ میلیمتر مربوط به آزمایش مقاومت فشاری و آزمایش تنش -کرنش در بازه‌های ۱، ۷ و ۲۸ روزه و نمونه منشوری ۵۰×۵۰×۳۰۰ میلیمتر مربوط به آزمایش مقاومت خمشی در سنین ۷ و ۲۸ روز می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل شده، هر چه میزان درصد الیاف پلی‌پروپیلن (PP) در بتن‌های پلیمری حاوی رزین اپوکسی افزایش یابد، میزان مقاومت فشاری و خمشی نیز به مراتب افزایش پیدا می‌کند و همچنین روند صعودی و رو به رشدی را در مقایسه با بتن شاهد پلیمری از خود نشان می‌دهد. اما در مقابل هر چه میزان درصد الیاف پلی‌وینیل‌الکل(PVA) در بتن‌های پلیمری افزایش یابد، مقاومت با روندی نزولی همراه می‌شود. بنابراین از این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که درصد بهینه برای الیاف پلی‌وینیل‌الکل در بتن‌های پلیمری، ۰/۵ درصد وزنی رزین اپوکسی و برای الیاف پلی‌پروپیلن ۲/۵ درصد می‌باشد. همچنین از نتایج عکس برداری الکترونی نیز این‌گونه برداشت شد که به طور کلی هر دو الیاف مورد استفاده پس از تحمل سیکل بارگذاری کششی از ماتریس پلیمری جدا نشده و پیوندی قوی و مناسب با فاز پلیمری برقرار کرده است اما به دلیل پراکندگی مناسب الیاف پلی پروپیلن در بتن پلیمری و بالطبع ایجاد پیوند مطلوب با رزین اپوکسی، خصوصیات مکانیکی بتن به طور چشمگیری بهبود می‌یابد. میزان مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های پلیمری الیاف پلی‌پروپیلن با درصدهای ۰/۵ ، ۱، ۲ و ۲/۵ به ترتیب افزایش ۵/۵٪ ، ۹/۴٪ ، ۳۰/۵٪ ، ۳۸/۴٪ را نسبت به بتن شاهد پلیمری به ثبت رسانیده است.

واژه‌های کلیدی: بتن پلیمری، الیاف پلی وینیل الکل، الیاف پلی پروپیلن، رزین اپوکسی.

* نویسنده مسئول: moosavi9966@yahoo.com

۱- مقدمه

قابل توجه است که در بسیاری از فعالیت‌های ساختمانی، بتن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و اصلی‌ترین مصالح در صنعت ساختمانی به شمار می‌رود. سیمان به عنوان جزء اصلی و مهم ترکیب بتن شناخته شده که وظیفه‌ی چسبندگی مصالح را بر عهده داشته است. اما نکته‌ی قابل توجه این است که در طول فرآیند تولید سیمان مقدار قابل توجه‌ای از گاز کربن دی اکسید، که این مقدار برابر با ۷ درصد از میزان گازهای گلخانه‌ای موجود در کل دنیا می‌باشد، در اتمسفر آزاد می‌شود[۱]. به همین منظور در سال ۱۹۹۷ تحقیقات وسیع و جدی‌تری در زمینه‌ی بتن‌های پلیمری و خصوصیات مرتبط، با تشکیل کمیته‌ی ACI 548 آغاز شد[۲].

بتن پلیمری با استفاده از پلیمرهایی مانند رزین اپوکسی[۱]، پلی استر[۲] یا وینیل استر[۳] به منظور پوشش، مکمل یا جایگزینی سیمان اطلاق شده که خواص مکانیکی و دوام بتن را در مقایسه با بتن سیمانی بهبود می‌بخشد. این سه نوع رزین از نوع رزین‌های معمولی بوده که بسته به نحوه استفاده، می‌تواند به صورت بتن آغشته به پلیمر، بتن پوششی با پلیمر و بتن پلیمری معمولی تولید شود. به طور کلی، بتن پلیمری نسبت به بتن معمولی دارای سرعت سخت شوندگی بسیار بالاتری است و برای شرایط خاص اعم از قرارگیری در معرض مواد شیمیایی و اسیدی استفاده می‌شود[۳]. مکانیسم بتن پلیمری شامل استفاده از یکی از انواع رزین با یک ماده فعال کننده برای شروع فرآیند عمل آوری و تشکیل یک شبکه اتصال پایدار با مصالح سنگی است. بتن پلیمری به دلیل نفوذ ناپذیری و سایر پتانسیل‌های موجود، می‌تواند جایگزین اصلی برای بتن سیمانی باشد، یا به‌عنوان مکمل در سازه‌های پیش ساخته و بحث تعمیرات مورد استفاده قرار گیرد. بر اساس محتوای بررسی شده، افزودن رزین‌ها می‌تواند خواص فیزیکی، مکانیکی و دوام سازه‌های بتنی را افزایش دهد، به ویژه اگر در ترکیب با سایر پرکننده ها و مواد سیمانی استفاده شود[۳].

بنابراین محققان به بررسی خواص مکانیکی بتن پلیمری، ساخته شده از رزین‌های پلی استر غیر اشباع (پلی اتیلن ترفتالات)[۴] پرداختند. مقاومت بتن پلیمری ساخته شده با رزین پلی استر در مقایسه با بتن شاهد سیمانی بسیار بالاتر بوده و همچنین با افزایش مقدار رزین در این بتن‌ها، مقاومت افزایش یافته است. لازم به ذکر است که با افزایش رزین از یک مقدار خاص، صرفاً هزینه‌های ناشی از ساخت بتن افزایش یافته و تأثیر قابل توجهی بر مقاومت نداشته است[۴]. در مطالعه‌ای دیگر بتن‌های پلیمری در مخلوط‌هایی با پنج نسبت رزین (۱۵٪، ۱۸٪، ۲۱٪، ۲۴٪ و ۲۷٪) همراه با دو نوع سنگ‌دانه، سنگ‌دانه رسی منبسط شده سبک (LECA) و ماسه رودخانه طبیعی ساخته شدند. نمونه‌ها تحت آزمون‌های مقاومت فشاری، خمشی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که افزایش نسبت پلیمر منجر به افزایش میزان مقاومت فشاری و خمشی شده که به پوشش تمام سنگ‌دانه‌ها و پر کردن منافذ نسبت داده می‌شود. علیرغم افزایش در محتوای پلیمر، نسبت رزین اضافی (۲۷٪)، تأثیر قابل توجهی بر خواص بتن پلیمری نداشته است[۵]. همچنین تأثیر عوامل تخریبی بر روی مقاومت خمشی و فشاری بتن‌های پلیمری اپوکسی انجام گرفت. بدین منظور، نمونه‌ها در معرض هشت عامل مختلف تخریبی قرار گرفت و نتایج نشان داد که نمونه‌های پلیمری با وجود کاهش مقاومت خمشی و فشاری، همچنان مقاومت بالاتری نسبت به بتن‌های تهیه شده از سیمان پرتلند داشتند[۶].

در سالیان متمادی مطالعات در زمینه‌های مختلفی برای بررسی ریزساختارها، افزودنی‌ها و خواص حرارتی و مکانیکی کامپوزیت‌های ساخته شده با رزین و پرکننده ها برای رفع نواقص پلیمر انجام شده است. در این خصوص در پژوهشی گزارش شده است که افزودن سرباره به بتن پلیمری به عنوان افزودنی، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داده، در حالی‌که نسبت جذب آب به طور معنا داری کاهش پیدا کرده است [۷].

همچنین ورما[۵] و همکاران در مطالعه‌ای بر روی بتن پلیمری، برای ساخت و شناسایی کامپوزیت های رزین اپوکسی اصلاح شده با مواد پرکننده کربنی با سه درصد محتوایی (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی) تحقیقاتی را انجام دادند. آن‌ها دریافتند که رزین اپوکسی حاوی پرکننده کربن نسبت به اپوکسی فاقد افزودنی، خواص مکانیکی، مقاومت کششی مطلوب‌تر و سختی بالایی دارد. علاوه

[۱] Epoxy
[۲] Polyester
[۳] Vinyl ester
[۴] Polyethylene Terephthalate
[۵] Verma, A. and et al.

بر این، بتن پلیمری حاوی ۵ درصد وزنی کربن در مخلوط رزین اپوکسی بهترین نتیجه را در خصوص سختی، چگالی و مقاومت کششی در مقایسه با بتن پلیمری فاقد افزودنی، از خود نشان داده است. با آنالیز ریزساختاری (میکروسکوپ الکترونی روبشی و پراش اشعه ایکس) نتایج بدست آمده از آزمایشات، صحت سنجی و تکمیل شد. تجزیه و تحلیل مورفولوژیکی (آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی) نشان داد که مواد پرکننده کربنی در ابعاد و مقیاس نانو بوده و به طور یکنواخت در ماتریس اپوکسی پراکنده شده است[۸ و۹].

در مطالعه‌ای دیگر محققان، اثر افزودنی‌های ضایعاتی را بر مقاومت فشاری، شکل پذیری و میزان تنش-کرنش متحمل شده بتن‌های پلیمری مبتنی بر پلی استر بررسی کردند. در مخلوط‌های بتن پلیمری، نسبت رزین پلی استر به مواد پرکننده ۸۵٪ به ۱۵٪، ۸۰٪ به ۲۰٪ و ۷۵٪ به ۲۵٪ انتخاب شد. در نتیجه، با افزایش نسبت افزودنی‌های ضایعاتی در بتن‌های پلیمری مبتنی بر رزین پلی استر، مقاومت فشاری با کاهش رو به رو شد اما با این حال، میزان شکل‌پذیری و کرنش در تنش ماکزیمم در نسبت پایین رزین افزایش یافت[۱۰].

محققان رفتار مکانیکی بتن پلیمری با رزین پلی استر حاوی چوب پنبه را نیز مورد بررسی قرار دادند که در هر سری از نمونه‌ها، چوب پنبه محتوای صفر الی ۴۵٪ از حجم کل سنگ‌دانه‌ها را به خود اختصاص داده بود. نتایج حاکی از آن بود که کاهش حجم رزین و مقاومت کم چوب پنبه عامل اصلی ضعف خواص مکانیکی بوده، اما نسبت مقاومت خمشی به فشاری در مقایسه با مواد سیمان معمولی نسبتاً بالا بوده است[۱۱]. در مطالعه‌ای خرده و تراشه لاستیک به عنوان جایگزین سنگ‌دانه در بتن پلیمری استفاده گردید. کارایی بتن حاوی لاستیک نسبت به بتن پلیمری فاقد افزودنی، کاهش یافته و همچنین تخلخل و محتوای هوا در مخلوط، با افزایش روبه‌رو شده است. با این حال هزینه‌ی ساخت نمونه‌ها کاهش یافته و تراکم و میزان جذب انرژی بهبود یافته است[۱۲].

همانطور که مشخص است، در تولید بتن پلیمری رزین‌های پلیمری به عنوان جزء اصلی در نظر گرفته شده، که به عنوان مثال می‌توان به رزین‌های پلی استر یا اپوکسی اشاره کرد. با این حال، اضافه‌کردن الیاف پلیمری و غیرپلیمری می‌تواند گاهی اوقات خواص مکانیکی را بهبود بخشد. بنابراین، با افزودن آنها به ترکیب پلیمری به عنوان یک ماده تقویت کننده، می‌توان برخی اصلاحات فیزیکی یا شیمیایی را بر روی پلیمر انجام داد. به همین دلیل، در اولین مرحله آزمایشی، ۳۰ درصد وزنی رزین پلی استر و ۷۰ درصد وزنی سنگ دانه، در جهت ساخت بتن شاهد ترکیب شد. سپس، بتن پلیمری با همان غلظت رزین، اما با افزودن ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد وزنی الیاف پلی استر ساخته شد. سپس، بتن‌های پلیمری دارای الیاف و همچنین بتن‌های فاقد الیاف تحت آزمایشات مکانیکی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزودن ۰/۵ درصد وزنی الیاف به مخلوط، میزان شکل پذیری با افزایش و مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته با اندکی کاهش رو به رو شده است، اما در مقایسه با بتن پلیمری فاقد الیاف، مقاومت و مدول الاستیسیته افزایش داشته است. در حالی که، برای بتن پلیمری با ۰/۱ درصد وزنی الیاف، مقاومت فشاری تا ۸/۲٪ افزایش یافت و مدول الاستیسیته نیز روند افزایشی داشته است [۱۳].

در پژوهشی دیگر بررسی اثر افزودن الیاف پلیمری بر مقاومت کششی و شکل پذیری بتن پلیمری (PC) و بتن پلیمری تقویت‌شده با الیاف (FRPC) مورد مطالعه قرار گرفت. محدوده استفاده شده برای رزین مصرفی (در واحد وزن) بین ۱۵ تا ۲۵ درصد، برای الیاف پلیمری ۰ تا ۲ درصد ، ۴۵ تا ۵۵ درصد برای سنگ‌دانه‌های ریز و ۲۵ تا ۳۵ درصد برای سنگ‌دانه‌های درشت انتخاب شد. با استفاده از طراحی نرم‌افزاری و آزمایشی، ۱۹۸ نمونه از ۶۶ طرح مخلوط مختلف، طراحی، تهیه و آزمایش شد. نتایج حاکی از آن بود که افزایش محتوای الیاف و رزین باعث افزایش مقاومت کششی و میزان شکل پذیری وجذب انرژی شده است. همچنین اثر تقویت‌کننده الیاف در مخلوط‌هایی با درصد رزین بالاتر و محتوای سنگ‌دانه‌ها با ابعاد کوچک‌تر بسیار امیدوارکننده بوده است. علاوه بر این، نتایج نشان داد که درصد بهینه الیاف پلیمری مصرفی به درصد رزین مورد استفاده بستگی دارد. در مخلوطی با رزین ۱۵ درصد، مقدار بهینه الیاف برابر با ۰/۵ درصد و در مخلوط با ۲۵ درصد، میزان بهینه الیاف برابر با ۲ درصد بوده است[۱۴].

در مطالعه دیگر، از رزین اپوکسی برای تولید بتن پلیمری تقویت شده با الیاف فولادی، کربن، شیشه و پلی وینیل الکل (PVA) استفاده شد. همچنین میزان محتوای رزین در این پژوهش به ترتیب ۱۵ و۱۸ درصد انتخاب گشت. در این پژوهش میزان مقاومت

فشاری، تخلخل و رفتار تنش-کرنش تک محوری مورد مطالعه قرار گرفت. مقاومت فشاری بتن پلیمریربا غلظت ۱۵٪ و ۱۸٪ به ترتیب بین رنج ۵۰-۶۰ مگاپاسکال و ۶۵-۷۵ مگاپاسکال بوده و همچنین میزان تخلخل برای هر دو نوع بتن پلیمری کمتر از ۱٪ بوده است. نمونه‌های بتن پلیمری تقویت شده با الیاف کربن و شیشه تحت بارگذاری کششی تک محوری، دچار یک شکست شکننده ناگهانی شده که این پدیده ناشی از گسیختگی کامل الیاف در بتن بوده است، در حالی که بتن پلیمری تقویت‌شده با الیاف فولادی و PVA یک شکست انعطاف پذیر را همراه با کرنش انعطاف‌پذیراز خود نشان داده است. همچنین هنگامی که میزان رزین به خصوص برای بتن پلیمری تقویت شده با الیاف کربن و شیشه از ۱۵٪ به ۱۸٪ افزایش یافت، میزان مقاومت کششی به طور قابل توجهی با افزایش رو به رو شد، در حالی که برای بتن پلیمری تقویت شده با الیاف فولادی و PVA میزان این افزایش اندک بوده است[۱۵].

در مطالعه‌ی مقایسه‌ای دیگری، در بتن پلیمری حاوی رزین اپوکسی، تقویت پلیمر بوسیله الیاف شیشه و کربن انجام گرفت. در این تحقیق الیاف‌ها به صورت کاملاً تصادفی و با درصدهای ۱ و ۲ نسبت به وزن رزین به ترکیب اضافه شد. نتایج حاکی از آن بود که افزودن الیاف شیشه به بتن پلیمری تا ۴۵ درصد و الیاف کربن تا ۵۵ درصد روند مقاوتی را افزایش می‌دهد. همچنین مقاوت فشاری بتن پلیمری با الیاف مذکور در مقایسه با بتن سیمانی الیافی در حدود ۸۵ درصد بهبود یافته است[۱۶]. تحقیقی با هدف بررسی خصوصیات مکانیکی بتن پلیمری حاوی اپوکسی پس از قرارگیری در معرض افزایش دما تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. در این مطالعه چهار درصد متفاوت برای رزین اپوکسی در بازه ۶ تا ۱۶ درصد در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که مقدار پلیمر ۱۳٪، میزان بهینه رزین برای بتن پلیمری بوده و همچنین بتن اپوکسی پلیمری در مواجهه با دمای کمتر از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد کارایی و خواص مکانیکی به مراتب بهتری نسبت به بتن سیمانی داشته است[۱۷]. بررسی تأثیر افزودن دو نوع تقویت کننده پلیمری متشکل از ترکیبات آمونیوم پلی‌فسفات[۱] و ترکیبات آلومینیوم هیدروکسید[۲] به بتن پلیمری با رزین اپوکسی، موضوع دیگری بود، که به آن پرداخته شد. نتایج نشان داد با افزودن آمونیوم‌پلی فسفات به ترکیب بتن پلیمری، خواص مکانیکی آن در مقابل افزایش دما به طور قابل توجهی بهبود یافته، اما افزودن آلومینیوم هیدروکسید تأثیر معکوس بر خواص مکانیکی در اثر افزایش دما را داشته است، که منجر به ضعف در این مورد شده است[۱۸].

با توجه به اهمیت بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی بتن‌های پلیمری، هدف از انجام این پژوهش در گام نخست، بهبود مشخصات مکانیکی از جمله جلوگیری از شکست ترد و شکننده بتن‌های پلیمری بر پایه رزین اپوکسی به کمک الیاف‌های پلیمری، در اثر افزودن دو نوع الیاف متفاوت پلی وینیل الکل و پلی پروپیلن می‌باشد. همچنین در گام بعدی هدف، تعیین میزان درصد بهینه الیاف پلیمری استفاده شده در این پژوهش با توجه به شرایط آزمایشگاهی، برای بتن پلیمری می‌باشد.

۲- مصالح مصرفی

در تولید بتن‌های پلیمری، پیش‌ماده پلیمری به‌عنوان ماده‌ی پایه اصلی به همراه یک فعال کننده و یک کاتالیزور، با پرکننده‌های معدنی مخلوط می‌شوند، که زمان گیرش و میزان مقاومت در این نوع از بتن‌ها به میزان رزین مصرفی، نوع کاتالیزور و فعال کننده بستگی دارد. مقدار پیش ماده پلیمری استفاده شده به طور معمول برحسب مقدار پرکننده‌ها تعیین می‌گردد، که این مقدار بین ۱۰ الی ۳۰ درصد وزن کل مخلوط می‌باشد. جهت حصول کارایی کامل محصولات بتن پلیمری، الیاف تقویتی مختلفی نیز به ترکیب پلیمری افزوده می‌شود که در این پژوهش الیاف‌های پلی‌پروپیلن و پلی‌وینیل‌الکل به منظور بهبود خواص مکانیکی و مقاومتی اضافه شده است. با توجه به مطالب ذکر شده، ترکیبات بتن پلیمری مورد استفاده در این پژوهش شامل بخش‌های ذیل می‌باشد.

۲-۱- رزین مصرفی

با توجه به تولید رزین اپوکسی در داخل کشور و استفاده از سوابق و نتایج تحقیقات انجام شده روی بتن پلیمری، رزین اپوکسی تولید شده توسط شرکت پلیمر ایران واقع در شهرستان اصفهان انتخاب گردید، که مشخصات فنی و مشخصات پس از پخت حامل پلیمری

[۱] Ammonium Polyphosphate

[۲] Aluminum hydroxide

مصرفی به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ذکر شده است.

جدول۱- مشخصات فنی رزین اپوکسی [۱۹]

مشخصه	مقدار
حالت ظاهری	مایع ویسکوز
رنگ ظاهری	مات بی رنگ
درصد جامد (٪)	۶۳±۲
ویسکوزیته (S)	۲۰-۲۵
دانسیته (g/cm^3)	۱/۱۳ ± ۰/۵ ٪
ژل تایم (min)	۱۴-۱۸
زمان پیک (min)	۲۵-۳۵
دمای پیک (°c)	۱۷۰-۱۹۰

جدول۲- خصوصیات رزین پخت شده [۱۹]

مشخصه فیزیکی	مقدار
مقاومت کششی ۷ روزه (MPa)	۱۵-۲۵
مقاومت فشاری ۷ روزه (MPa)	۱۰۴-۱۱۵
مقاومت خمشی ۷ روزه (MPa)	۲۷/۵-۳۵
مدول کششی (GPa)	۴-۷
افزایش طول در نقطه شکست (%)	۲-۵
دمای تغییر شکل (°c)	۸۵±۲
سختی در دمای ۲۵ درجه (Day)	۷

۲-۲- الیاف مصرفی

الیاف مورد استفاده در این پژوهش به دو دسته مجزای پلی پروپیلن و پلی وینیل الکل تقسیم می‌شود. این مواد به صورت تک رشته‌ای و در دو اندازه ۱۲ میلیمتری برای بتن و نوع ۶ میلیتری برای پلاستر و یا ملات ساختمانی به کار می‌رود. مشخصات فنی هر یک از این الیاف‌ها در جدول شماره ۳ آورده شده است. هچنین شکل۱، الیاف‌های مورد استفاده در این پژوهش را به تصویر کشیده است

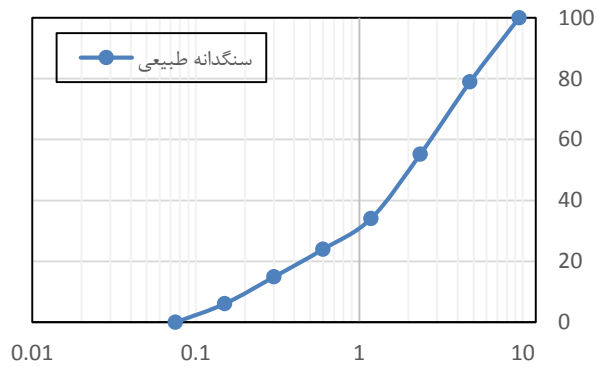
۲-۳- سنگ‌دانه مصرفی

سنگ‌دانه‌ی مصرفی با هدف ایجاد پیوستگی بین اجزای دیگر بتن به دو بخش درشت‌دانه و ریزدانه تقسیم می‌شود. ذرات ریزدانه مصالح، بر اساس طبقه‌بندی ASTM C136 به سنگ‌دانه‌های ریزتر از ۴/۷۵ میلیمتر و درشت‌تر از ۰/۰۷۵ میلیمتر (۷۵ میکرون) گفته می‌شود. همچنین مصالح درشت‌دانه نیز بر اساس طبقه‌بندی یاد شده، به سنگ‌دانه‌های کوچکتر از ۷۵ میلیمتر و درشت‌تر از ۴/۷۵ میلیمتر گفته می‌شود. جهت افزایش کارایی و با توجه به انتخاب قالب‌های مورد نظر، میزان ۶۰ درصد از کل سنگ دانه ریزدانه و ۴۰ درصد را درشت‌دانه به خود اختصاص داده است[۲۲]. بر همین اساس برای رسیدن به یک مخلوط متراکم با کارایی حداکثری، منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه مصرفی و درصد تجمعی باقیمانده بر روی هر میزان الک مطابق شکل ۲، ارائه شده است. همچنین جدول شماره ۴ نیز مشخصات ذاتی مصالح مصرفی اعم از ریز دانه و درشت دانه را به تفکیک نمایش می‌دهد.

جدول۳- مشخصات فنی الیاف پلی وینیل الکل و پلی پروپیلن [۲۰, ۲۱]

نوع الیاف	پلی وینیل الکل	پلی پروپیلن
رنگ	کرم	سفید
طول (mm)	۱۲	۱۲
قطر (mm)	۰/۰۱۶	۰/۰۱
مدول (GPa)	۳۸	۷۰
وزن مخصوص (g/cm^3)	۱/۳	۰/۹۱

شکل۱- الیاف مصرفی الف) پلی وینیل الکل ب) پلی پروپیلن



شکل ۲- منحنی دانه بندی سنگ‌دانه مصرفی

۳-کار آزمایشگاهی

هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر افزودن دو نوع الیاف

متفاوت پلی وینیل الکل و پلی پروپیلن به صورت مجزا بر خصوصیات مکانیکی و مقاومتی بتن‌های پلیمری برپایه‌ی رزین اپوکسی و تعیین حداکثر درصد الیاف قابل استفاده با توجه به شرایط آزمایشگاهی موجود می‌باشد. به همین منظور برای ساخت نمونه‌های پلیمری حاوی الیاف، ابتدا ریز دانه و درشت دانه با توجه به درصدهای ارائه شده در طرح اختلاط، بطور دقیق توزین شده و در مخلوط کن بصورت خشک با هم مخلوط می‌گردند. سپس رزین به منظور انحلال و فعال‌سازی، با ۱ درصد وزنی محلول کبالت و ۱ درصد وزنی محلول متیل اتیل کتون پراکسید ترکیب شده و به خوبی همزده می‌شود، تا یک ماده همگن بدست آید.

جدول۴- مشخصات سنگ دانه مصرفی

مشخصه	اندازه دانه (mm)	رطوبت اولیه (٪)	جذب آب (٪)	وزن مخصوص (kg/m^3)
ماسه	۰ -۴/۷۵	۰/۳۶	۱/۱	۲/۵۷
شن	۴/۷۵ -۱۰	۰/۴۴	۱/۸	۲/۵۴

لازم به ذکر است که برای اختلاط رزین، ابتدا شتاب دهنده (کبالت) و رزین را مخلوط کرده و سپس کاتالیست (پراکسید) به آن اضافه می‌شود. ذکر این نکته الزامی است که هرگز نباید شتاب دهنده و کاتالیست با یکدیگر تماس داشته باشند زیرا باعث واکنش شدید بین آن‌ها و حتی در حجم بالا منجر به انفجار می‌شود. در ادامه مخلوط رزین به سنگ‌دانه ها اضافه شده و خمیر حاصله به مدت ۳ دقیقه باهم ترکیب می‌گردد. سپس الیاف مورد نظر به منظور ایجاد پراکندگی مناسب و یکسان در مخلوط، طی سه مرحله به خمیر اضافه شده و همزمان عملیات اختلاط صورت می‌گیرد. پس از این که مخلوط به مدت ۳ دقیقه با سرعت متوسط ۱۲۰ دور بر دقیقه به صورت کامل مخلوط گشت، مواد حاصل طی سه مرحله داخل قالب‌های مکعبی و منشوری ریخته شده و متراکم می‌گردد. سپس نمونه‌های ساخته شده، در دما و شرایط محیط آزمایشگاهی قرار گرفته و پس از حدود یک ساعت کاملاً سخت شده و از قالب خارج می‌شود. پس از باز کردن قالب، نمونه‌ها تا سن مورد نظر جهت آزمایش در شرایط محیطی با دمای ۱±۲۲ درجه‌ی سانتی‌گراد نگهداری می‌شود. در ضمن تمامی مصالح مصرفی به مدت ۲۴ ساعت درون آون خشک شده تا رطوبت آن‌ها کاهش یابد و اطمینان جهت اتصال مناسب بین مصالح و رزین مصرفی حاصل شود. نکته‌ی بسیار مهم و حائز اهمیت در بتن‌های پلیمری بحث انتخاب درصد مناسب و بهینه رزین برای ترکیب می‌باشد. درصد انتخابی در این پژوهش بنا به مطالعات صورت گرفته ۱۲٪ وزن مصالح در نظر گرفته شده است[۲۳].

نمونه‌های مکعبی ۵۰ میلیمتر به منظور انجام تست مقاومت فشاری و تنش-کرنش مطابق با استانداردهای ASTM C579 و ASTM C469 و نمونه‌های منشوری ۵۰×۵۰×۳۰۰ میلی‌متر برای تست مقاومت خمشی مطابق با استاندارد ASTM C580، ساخته شد[۲۴-۲۶]. بدین صورت که نمونه‌ها پس از رسیدن به سن مورد نظر با اندازه‌گیری دقیق ابعاد و وزن آن‌ها در دستگاه مقاومت فشاری و خمشی قرار گرفته و تحت نیروی پیوسته مطابق استاندارد مربوطه، حداکثر نیروی وارده تا زمان شکست برداشت می‌شود. به ترتیب مقدار مقاومت فشاری f_s و مقاومت خمشی f_f محاسباتی از رابطه‌ی ۱ و ۲ محاسبه می‌گردد.

$$F = \frac{P}{A} \quad (۱)$$

$$Ff = \frac{3PL}{2B^3} \quad (۲)$$

در روابط فوق، P حداکثر نیروی وارده، A سطح مقطع نمونه تحت بارگذاری، L فاصله تکیه‌گاه‌ها و B عمق و عرض نمونه منشوری است.

شکل ۳- نمونه‌های فشاری بتن‌های پلیمری حاوی رزین اپوکسی

٤- نسبت مخلوط بتن

با توجه به اهداف ارائه شده، نسبت مخلوط بتن انتخابی در این پژوهش برای درصدهای ۰/۵ ، ۱ ، ۲ و ۲/۵ درصد الیاف و بتن شاهد پلیمری برای یک متر مکعب در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵- نسبت مخلوط انتخابی

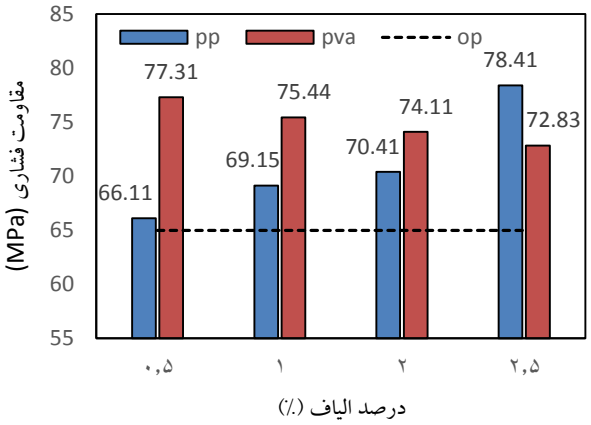
طرح اختلاط	شن (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	رزین (kg/m^3)	الیاف پلی پروپیلن (kg/m^3)	الیاف پلی وینیل الکل (kg/m^3)
OP	۷۵۷	۱۱۳۵	۲۲۷/۰۴	–	–
PVA-0.5	۷۵۷	۱۱۳۵	۲۲۷/۰۴	–	۱/۱۳
PVA-1	۷۵۷	۱۱۳۵	۲۲۷/۰۴	–	۲/۲۷
PVA-2	۷۵۷	۱۱۳۵	۲۲۷/۰۴	–	۴/۵۴
PVA-2.5	۷۵۷	۱۱۳۵	۲۲۷/۰۴	–	۵/۶۷۶
PP-0.5	۷۵۷	۱۱۳۵	۲۲۷/۰۴	۱/۱۳	–
PP-1	۷۵۷	۱۱۳۵	۲۲۷/۰۴	۲/۲۷	–
PP-2	۷۵۷	۱۱۳۵	۲۲۷/۰۴	۴/۵۴	–
PP-2.5	۷۵۷	۱۱۳۵	۲۲۷/۰۴	۵/۶۷۶	–

همانطور از جدول ۵ مشخص است، OP بیانگر طرح مخلوط بتن شاهد و PVA و PP به ترتیب بیانگر نسبت طرح مخلوط مربوط به بتن‌های پلیمری حاوی الیاف پلی‌وینیل الکل و پلی‌پروپیلن می‌باشد. لازم به ذکر است اعدادی که به عنوان پسوند پس از حروف PVA و PP قرار دارند نشان دهنده درصد الیاف مورد استفاده در بتن می‌باشد.

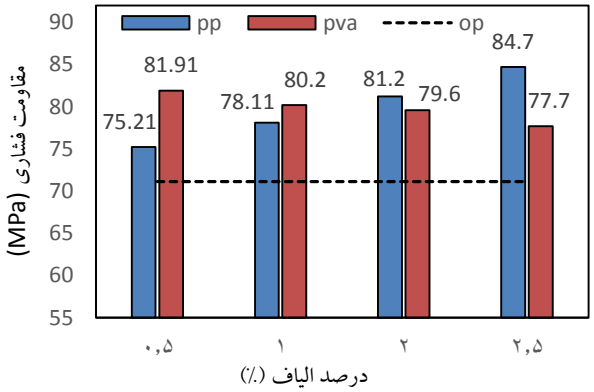
۵-بحث و نتیجه‌گیری

۵-۱- مقاومت فشاری

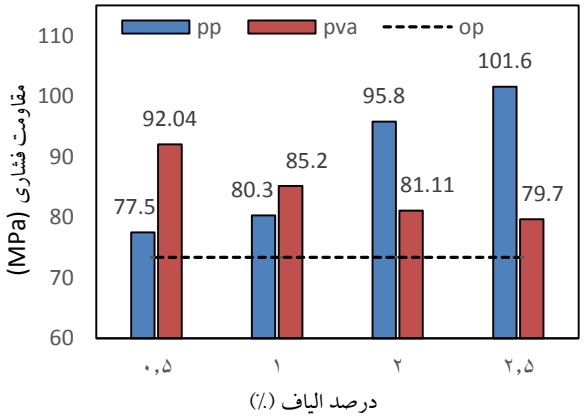
نتایج حاصل از تست مقاومت فشاری برای سنین ۱، ۷ و ۲۸ روزه برای بتن‌های پلیمری حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و الیاف پلی‌وینیل‌الکل در شکل‌های ۴ الی ۶ ذکر شده است.



شکل ۴- مقایسه نتایج مقاومت فشاری ۱ روزه‌ی بتن پلیمری حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و پلی وینیل الکل



شکل ۵- مقایسه نتایج مقاومت فشاری ۷ روزه‌ی بتن پلیمری حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و پلی وینیل الکل



شکل ۶- مقایسه نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی بتن پلیمری حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و پلی وینیل الکل

از مقایسه‌ی نتایج ارائه شده، می‌توان اینگونه برداشت کرد که مقاومت فشاری بتن مسلح شده به الیاف پلی پروپیلن به دلیل

ماهیت جاذب و دو قطبی بودن آن، مانع از جدا شدن و فروپاشی بتن از هم، تحت اثر نیروی فشاری می‌شود. بنابراین چسبندگی ایجاد شده بین الیاف و بتن باعث جلوگیری از ایجاد لغزش بین الیاف و بتن شده، و الیاف مورد نظر اجازه‌ی ترک خوردگی و باز شدن ترک‌های ریز در بتن را نمی‌دهد، تا لحظه‌ای که خود الیاف به مرزگسیختگی برسد، در نتیجه میزان تنش برای ایجاد اولین ترک در بتن افزایش می‌یابد. همچنین از طرف دیگر هر چه میزان درصد این الیاف در بتن‌های پلیمری افزایش یابد، میزان مقاومت فشاری نیز به مراتب افزایش پیدا می‌کند. همچنین مقاومت بتن پلیمری حاوی الیاف پلی‌پروپیلن روند صعودی و رو به رشد مطلوبی را در مقایسه با مقدار مقاومت بتن شاهد پلیمری از خود نشان می‌دهد. مقدار مقاومت بتن‌های پلیمری حاوی الیاف پلی‌پروپیلن در سنین ۱، ۷ و ۲۸ روز برای درصد الیاف ۰/۵، به ترتیب برابر ۶۶/۱۱، ۷۵/۲۱، ۷۷/۵ مگاپاسکال، برای درصد الیاف ۱، به ترتیب برابر ۶۹/۱۵ ، ۷۸/۱۱ ۸۰/۳ مگاپاسکال، برای الیاف ۲ درصد ، ۷۰/۴۱، ۸۱/۲ ، ۹۵/۸ مگاپاسکال و همچنین برای درصد الیاف ۲/۵ نیز به ترتیب ۷۸/۴۱، ۸۴/۷ و ۱۰۱/۶ مگاپاسکال می‌باشد. اما در مقابل هر چه میزان درصد الیاف پلی‌وینیل‌الکل در بتن‌های پلیمری افزایش یابد، کارایی و روانی بتن به طور محسوسی با کاهش روبه رو شده که همین امر باعث پدیدار شدن تخلخل در بتن گردیده و به دنبال آن میزان مقاومت فشاری با روندی نزولی همراه می‌شود. به طور کلی الیاف پلی وینیل الکل دارای خاصیت آبدوستی می‌باشد و تمایل دارد که آب اختلاط را به خود جذب کند. از طرفی دیگر به‌دلیل آن که در بتن‌های پلیمری از آب استفاده نمی‌شود، افت کارایی و روانی بتن دو چندان شده و نقطه ضعف ویژه‌ای را ایجاد می‌کند. اگرچه در اثر گذر زمان و سن بتن در هر درصد الیاف به صورت مجزا روند صعودی مقاومت محسوس می‌باشد، اما در مقایسه‌ی درصدهای متفاوت الیاف پلی‌وینیل‌الکل در بتن پلیمری، شاهد روند نزولی و کاهش مقاومت بتن خواهیم بود. نکته قابل توجه در ترکیب الیاف پلی وینیل الکل و پلیمر این است که درصد ۰/۵ الیاف به‌دلیل حجم کم آن تخلخلی در بتن ایجاد نکرده و چسبندگی به مراتب مطلوبی را با بتن برقرار می‌کند. همین امر باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در پایین ترین درصد موجود در این پژوهش می‌شود.

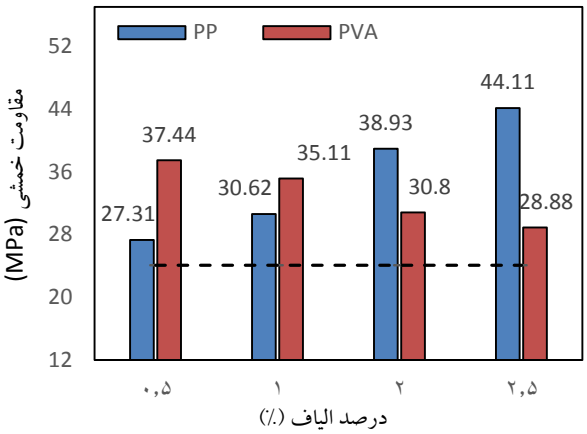
لازم به ذکر است افزودن الیاف پلی‌وینیل‌الکل به بتن پلیمری به‌صورت کلی، نسبت به بتن شاهد پلیمری باعث افزایش مقاومت شده اما با افزایش درصد الیاف در بتن، شاهد کاهش مقاومت نسبت به درصدهای پایین‌تر الیاف خواهیم بود. مقدار مقاومت بتن‌های پلیمری حاوی پلی‌وینیل‌الکل در سنین ۱، ۷ و ۲۸ روز برای درصد الیاف ۰/۵، به ترتیب برابر ۷۷/۳۱، ۸۱/۹۱ و ۹۲/۰۴ مگاپاسکال، برای درصد الیاف ۱، به ترتیب برابر۷۵/۴۴ ، ۸۰/۲ و ۸۵/۲ مگاپاسکال، برای درصد الیاف ۲ درصد ، ۷۴/۱۱، ۷۹/۶، ۸۱/۱۱ مگاپاسکال و همچنین برای درصد الیاف ۲/۵ نیز به ترتیب ۷۲/۸۳، ۷۷/۷ و ۷۹/۷ مگاپاسکال می‌باشد. شکل ۷ نحوه شکست نمونه‌های پلیمری اپوکسی شاهد و پلیمری اپوکسی حاوی الیاف را به تصویر کشیده است.

شکل ۷- نحوه شکست بتن پلیمری تحت آزمایش مقاومت فشاری الف) بتن پلیمری بدون الیاف ب) بتن حاوی الیاف

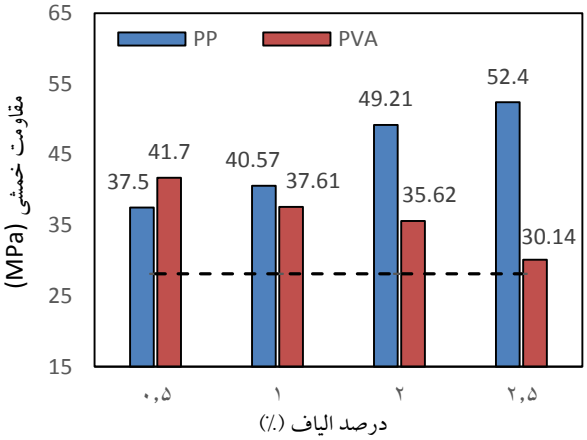
۵-۲- مقاومت خمشی

نتایج حاصل از تست مقاومت خمشی بر روی نمونه‌های منشوری ۵۰×۵۰×۳۰۰ میلیمتر برای سنین ۷ و ۲۸ روزه بتن‌های پلیمری حاوی الیاف پلی پروپیلن و الیاف پلی وینیل الکل در اشکال ۸ و ۹ آورده شده است.

مطابق نتایج به‌دست آمده بتن‌های پلیمری حاوی الیاف پلی‌پروپیلن به طور کلی در تمامی درصدهای مورد استفاده، نسبت به بتن شاهد پلیمری برتری کاملاً محسوسی را تجربه کرده است. هر چه میزان درصد الیاف پلی‌پروپیلن در بتن‌های پلیمری افزایش یافته، میزان استحکام خمشی نیز به مراتب روند صعودی را در پیش گرفته است. به صورت کلی فلسفه‌ی این که مقدار مقاومت خمشی در این نوع از بتن‌ها افزایش یافته را می‌توان به مقاومت خمشی الیاف پلی‌پروپیلن ارتباط داد. بدین صورت که با ایجاد یک پیوستگی در بتن‌های پلیمری مانع فروپاشی و از هم گسیختگی در بتن شده است.



شکل ۸- مقایسه نتایج مقاومت خمشی ۷ روزه‌ی بتن پلیمری حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و پلی وینیل الکل



شکل ۹- مقایسه نتایج مقاومت خمشی ۲۸ روزه‌ی بتن پلیمری حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و پلی وینیل الکل

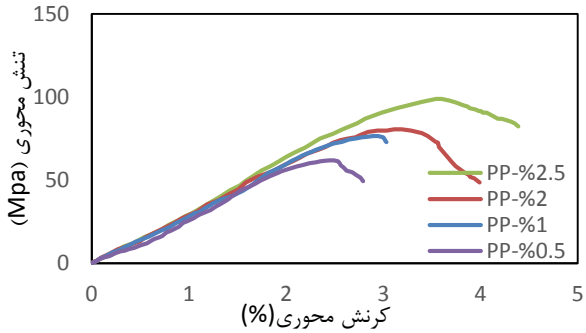
در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که حتی پس از تحمل بار مورد نظر خمشی نیز، الیاف اجازه‌ی فرو پاشی صد درصدی را به بتن نداده است. از طرفی دیگر نکته‌ی قابل توجه و حائز اهمیت، روند کاهشی و نزولی مقاومت خمشی به مانند مقاومت فشاری، در اثر افزایش درصد الیاف پلی‌وینیل‌الکل در بتن‌های پلیمری بوده که تحت هیچ شرایطی افت مقاومت قابل قبول نمی‌باشند. نتایج حاکی از آن است که هر چه میزان درصد الیاف پلی‌وینیل‌الکل بالاتر رفته، مقاومت خمشی کاهش و افت محسوس‌تری را تجربه کرده است. اگر بخواهیم عملکرد خمشی بتن‌های پلیمری حاوی الیاف پلی‌وینیل‌الکل را با بتن‌های پلیمری حاوی الیاف پلی پروپیلن مقایسه کنیم، باید در ابتدا به این نکته توجه کرد که عملکرد خمشی بتن پلیمری پلی‌وینیل‌الکل در نسبت ۰/۵ درصد ، نسبت به بتن پلیمری پلی‌پروپیلن در همین درصد یاد شده، مطلوب‌تر بوده است، اما به محض افزایش درصد الیاف در هر دو بتن، مقاومت خمشی بتن‌های پلیمری حاوی الیاف پلی‌وینیل‌الکل روند نزولی را تجربه کرده و برخلاف آن بتن‌های پلیمری حاوی الیاف پلی‌پروپیلن روند صعودی قابل قبولی را در پیش می‌گیرد. بنابراین می‌توان این گونه نتیجه گرفت که در بتن‌های پلیمری حاوی الیاف پلی‌پروپیلن با درصد ۲/۵ وزنی نسبت به رزین اپوکسی مطلوب‌ترین نتیجه را در برداشته و در مورد بتن‌های پلیمری که به آنها الیاف پلی‌وینیل‌الکل افزوده شده، درصد ۰/۵ درصد وزنی رزین اپوکسی، مناسب‌ترین نتیجه را در بردارد.

شکل ۱۰-نمونه‌های شکسته شده تحت نیروی خمشی بتن پلیمری الف) بتن پلیمری حاوی الیاف ۰/۵ درصد پلی‌پروپیلن ب) بتن پلیمری حاوی الیاف ۲/۵ درصد پلی‌پروپیلن

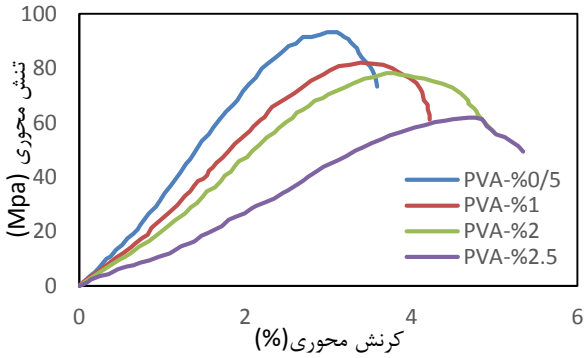
همچنین مقدار مقاومت خمشی، بتن‌های پلیمری حاوی الیاف پلی‌پروپیلن در سنین ۷ و ۲۸ روز برای درصد الیاف ۰/۵، به ترتیب برابر ۲۷/۳۱ و ۳۷/۵ مگاپاسکال، برای درصد الیاف ۱، به ترتیب برابر ۳۰/۶۲ و ۴۰/۵۷ مگاپاسکال، برای الیاف ۲ درصد ۳۸/۹۳ و ۴۹/۲۱ مگاپاسکال و همچنین برای درصد الیاف ۲/۵ نیز به ترتیب ۴۴/۱۱ و ۵۲/۴ مگاپاسکال می‌باشند.

۵-۳- منحنی تنش -کرنش

نتایج مربوط به منحنی تنش - کرنش محوری برای مخلوط‌های بتن پلیمری در درصدهای مختلف الیاف پلی پروپیلن و پلی وینیل الکل به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که در شکل‌ها مشاهده می شود، عملکرد مقاومتی بتن پلیمری حاوی الیاف پلی پروپیلن PP و بتن پلیمری حاوی الیاف پلی وینیل الکل PVA با افزودن مقادیر حجمی مختلف الیاف به ترکیب، به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. با توجه به نتایج بدست آمده از عملکرد تنش-کرنش در شکل ۱۱، بتن پلیمری حاوی الیاف پلی پروپیلن با درصد الیاف ۲/۵٪ میزان تنش وارده بیشتری را نسبت به سایرمخلوط‌های ساخته شده تحمل می‌نماید. همچنین کرنش متناظر با تنش متحمل شده ماکزیمم در درصد الیاف ۲/۵٪ نسبت به سایر مخلوط‌های ساخته شده با این الیاف، عدد به مراتب بالاتری را از خود نشان می‌دهد، که این امر نشان از میزان شکل پذیری بیشتر می‌باشد. با این تفاسیر می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش میزان درصد الیاف پلی پروپیلن به مخلوط پلیمری میزان تنش ماکزیمم و کرنش متناظر، با افزایش همراه شده و با توجه به افزایش سطح زیر منحنی، میزان جذب انرژی نیز در این مخلوط نسبت به سایر نمونه‌های ساخته شده با الیاف پلی پروپیلن بیشتر خواهد بود. دلیل این امر ویژگی‌های ذاتی مکانیکی الیاف بوده که می‌تواند با عملکرد پل زدن در مخلوط پلیمری و ایجاد پیوند مناسب و پایدار، میزان تنش وارده، شکل پذیری و در نهایت میزان جذب انرژی را افزایش دهد و در نتیجه شکست ترد بتن پلیمری را به به یک شکست با شکل پذیری مناسب تبدیل نماید. اما در مقابل، بتن پلیمری حاوی الیاف پلی وینیل الکل، با محتوای درصد الیاف کمتر یعنی ۰/۵٪ بیشترین مقاومت را به ثبت رسانیده است و از آنجایی که افزایش میزان درصد الیاف پلی‌وینیل‌الکل در بتن‌های پلیمری کارایی بتن را به‌طور قابل توجهی با مشکل رو به رو می‌کند، میزان تخلخل در بتن افزایش یافته و به دنبال آن میزان مقاومت در برابر تنش وارده با روندی نزولی همراه می‌شود. از طرف دیگر با افزایش درصد الیاف پلی وینیل الکل در بتن اگرچه میزان تنش ماکزیمم با کاهش رو به رو خواهد شد اما به دلیل افزایش میزان شکل پذیری، میزان کرنش متحمل شده متناظر با تنش نسبت به مخلوط با درصد پایین تر الیاف (۰/۵٪)، افزایش یافته است.



شکل ۱۱- مقایسه نتایج منحنی تنش - کرنش ۲۸ روزه‌ی بتن پلیمری حاوی الیاف پلی پروپیلن

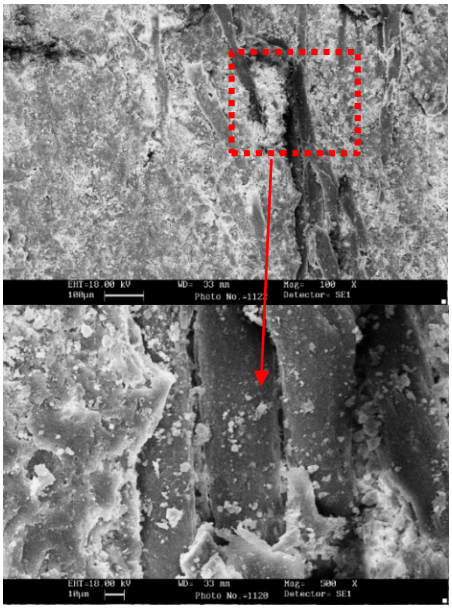


شکل ۱۲- مقایسه نتایج منحنی تنش - کرنش ۲۸ روزه‌ی بتن پلیمری حاوی الیاف پلی وینیل الکل

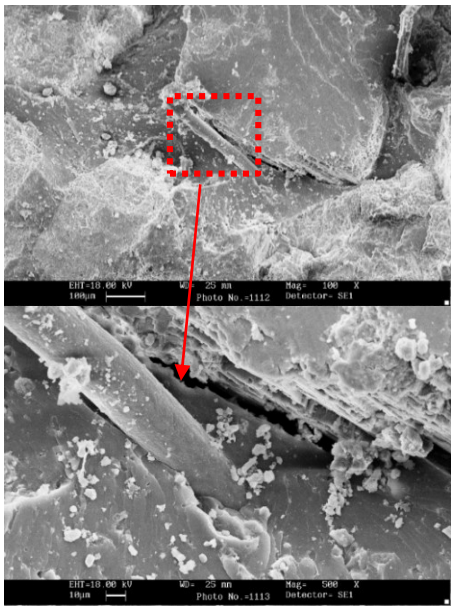
۵-٤- عکس برداری الکترونی (SEM)

شکل ۱۳ و ۱۴ به ترتیب بتن‌های پلیمری حاوی الیاف پلی‌وینیل‌الکل و پلی‌پروپیلن را در بالاترین درصد، یعنی ۲/۵ ٪ را نشان می‌دهد، که در آن الیاف تحت چرخه بارگذاری خمشی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در شکل ۱۳ و۱۴ اتصال الیاف مورد نظر در بتن پلیمری توسط کادر قرمز رنگ نشان داده شده است. نکته قابل توجه آن است که الیاف پس از تحمل سیکل بارگذاری کششی از ماتریس پلیمری جدا نشده و پیوندی قوی و مناسب با فاز پلیمری برقرار کرده است. این موضوع می‌تواند دلیل اصلی افزایش خواص مکانیکی بتن پلیمری مسلح شده با الیاف پلیمری باشد. همچنین دلیل قرارگرفتن عکس‌های الکترونی نمونه‌های پلیمری با درصدهای بالا در این پژوهش، بررسی عملکرد دو الیاف در بالاترین درصد در فاز پلیمری می‌باشد. همانطور که از شکل ۱۴ مشخص است استفاده از الیاف پلی وینیل الکل در بتن پلیمری در حجم و درصدهای بالا منجر به رخداد پدیده گلوله‌ای شدن در بتن شده که این امر میزان تخلخل در بتن

را افزایش می‌دهد. اما برخلاف آن الیاف پلی پروپیلن حتی در درصد بالا(۲/۵٪) نیز به دلیل خاصیت جاذب و دو قطبی بودن از تجمع الیاف در یک نقطه جلوگیری شده و به صورت یکنواخت در فاز پلیمر پخش شده است.

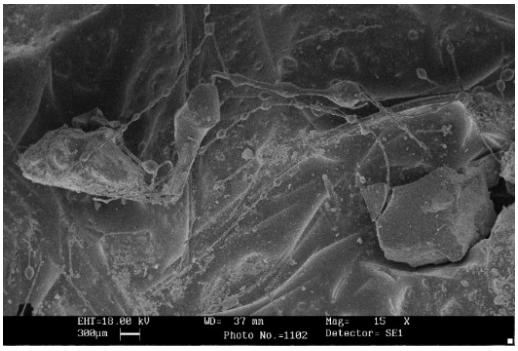


شکل ۱۳ – عکس‌برداری الکترونی نمونه پلیمری حاوی الیاف ۲/۵ درصد پلی وینیل الکل



شکل ۱۴ – عکس برداری الکترونی نمونه پلیمری حاوی الیاف ۲/۵ درصد پلی پروپیلن

همچنین در شکل ۱۵ تغییر شکل الیاف نیز پس از چرخه بارگذاری به وضوح مشاهده می‌شود. همانطور که در شکل۱۵ مشخص است، الیاف پلی‌پروپیلن در هم تنیده شده، تا یک کامپوزیت همگن با پلیمر ایجاد کند و سطح ناهموار آنها منجر به اصطکاک و پیوند بیشتر با ماتریس پلیمری شود. وجود الیاف پلی‌پروپیلن استحکام بتن را به طور چشمگیری بهبود بخشیده که دلیل این امر پراکندگی مناسب در بتن پلیمری و ایجاد پیوند مطلوب با رزین اپوکسی بوده است. همچنین مشاهده می‌شود که رشته‌های الیاف با پلیمر تولید یک کامپوزیت فشرده و قوی‌تری را می‌کند که منجر به افزایش پیوند بین اجزای بتن‌های پلیمری می‌شود. علاوه بر این، اگرچه نمونه پس از تحمل بارگذاری دچار شکست و ترک خوردگی شده، اما الیاف همچنان در بتن کار می کند.



شکل ۱۵ – تغییر شکل الیاف نیز پس از چرخه بارگذاری نمونه پلیمری حاوی الیاف پلی پروپیلن

٦- نتیجه‌گیری

– به طور کلی استفاده از الیاف پلی‌وینیل‌الکل و پلی‌پروپیلن خواص مکانیکی و مقاومتی بتن پلیمری را بهبود میبخشد. به طوری که استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن در بتن پلیمری حاوی رزین اپوکسی، مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه با درصدهای ۰/۵، ۱، ۲ و ۲/۵ را به ترتیب ۵/۵٪ ، ۹/۴٪ ، ۳۰/۵٪ ، ۳۸/۴٪ درصد افزایش می‌دهد. همچنین افزودن الیاف پلی‌وینیل‌الکل نیز برای درصدهای ۰/۵، ۱، ۲ و ۲/۵ به ترتیب افزایش ۲۵/۳٪ ، ۱۵/۸٪ ، ۱۰/۵٪ و ۸/۵٪ درصدی را برای مقاومت فشاری نسبت به بتن شاهد پلیمری به همراه داشته است.

– استفاده از الیاف پلی وینیل الکل در حجم و درصدهای بالا منجر به رخداد پدیده گلوله‌ای شدن در پلیمر شده که این امر میزان تخلخل در بتن پلیمری را افزایش می‌دهد. همین امر سبب کاهش ۲۰٪ مقاومت فشاری و خمشی در سن ۲۸ روز برای بتن پلیمری می‌شود. اما در مقابل با توجه به نتایج به‌دست آمده از این پژوهش، الیاف پلی‌پروپیلن به‌دلیل ماهیت جاذب و دو قطبی بودن مانع

فروپاشی بتن از هم تحت اثر بار وارده شده و اجازه‌ی ترک خوردگی و باز شدن ترک‌های ریز در بتن را نمی‌دهد.

- میزان درصد بهینه برای افزودن الیاف پلی‌وینیل‌الکل به بتن‌های پلیمری، ۰/۵ درصد وزنی رزین اپوکسی می‌باشد و از این درصد به بعد شاهد کاهش مقاومت به دلیل افزایش میزان تخلخل در بتن در اثر رخداد پدیده گلوله ای شدن الیاف خواهیم بود. همچنین درصد بهینه برای الیاف پلی پروپیلن در بتن‌های پلیمری درصد وزنی ۲/۵ بوده مطلوب‌ترین نتیجه را در برداشته است.

- بتن‌های پلیمری حاوی الیاف پلی‌پروپیلن پس از انجام بارگذاری بر روی آن‌ها به دلیل مقاومت بالای الیاف و ماهیت آن که مانع از فروپاشی کامل بتن شده، قابل بارگذاری مجدد بالافاصله پس از بارگذاری اولیه می‌باشد. در صورتی که بتن‌های پلیمری فاقد الیاف پس از بارگذاری اولیه به دلیل ماهیت ترد و شکننده‌ی پلیمر، منهدم خواهد شد.

- مطابق نتایج بدست آمده از عکسبرداری الکترونی(SEM)، به طور کلی وجود الیاف در بتن پس از تحمل سیکل بارگذاری کششی منجر به جلوگیری از گسسته شدن اجزای بتن شده و پیوندی قوی و مناسبی با فاز پلیمری برقرار کرده است. این موضوع می‌تواند دلیل اصلی افزایش خواص مکانیکی بتن پلیمری مسلح شده با الیاف پلیمری باشد. همچنین وجود الیاف پلی پروپیلن استحکام بتن را به طور چشمگیری بهبود بخشیده که به دلیل پراکندگی مناسب در بتن پلیمری باعث ایجاد پیوند مطلوب با رزین اپوکسی شده است. برخلاف آن الیاف پلی وینیل الکل در بتن پلیمری در حجم و درصدهای بالا منجر به رخداد پدیده گلوله‌ای شدن در بتن شده که این امر میزان تخلخل در بتن را افزایش می‌دهد.

۷- مراجع

[1] K. P. Mehta, "Reducing the environmental impact of concrete," *Concrete international,* vol. 23, pp. 61-66, 2001.

[2] D. W. F. Milton Anderson, "ACI 548 Polymer-Modified Concrete," *ACI Committee 548,* p. 48, 1997.

[3] M. Nodehi. "Epoxy, polyester and vinyl ester based polymer concrete: a review". *Innov. Infrastruct. Solut.* **7**, 64, 2022.

[4] Bedi, R., Chandra, R., & Singh, S. P. "Mechanical properties of polymer concrete". *Journal of Composites*, 1-12 ,2013.

[5] Ataabadi, H. S., Zare, A., Rahmani, H., Sedaghatdoost, A., & Mirzaei, E. "Lightweight dense polymer concrete exposed to chemical condition and various temperatures: An experimental investigation". *Journal of Building Engineering*, *34*, 101878, 2021.

[6] J. Reis, "Mechanical characterization of polymer mortars exposed to degradation solutions," *Construction and Building Materials,* vol. 23, pp. 3328-3331, 2009.

[7] V. Toufigh, M. Hosseinali, and S. M. Shirkhorshidi, "Experimental study and constitutive modeling of polymer concrete's behavior in compression," *Construction and Building Materials,* vol. 112, pp. 183-190, 2016.

[8] Verma, A., Baurai, K., Sanjay, M. R., & Siengchin, S. "Mechanical, microstructural, and thermal characterization insights of pyrolyzed carbon black from waste tires reinforced epoxy nanocomposites for coating application". *Polymer Composites*, *41*(1), 338-349, 2020.

[9] Verma, Akarsh, and V. K. Singh. "Mechanical, microstructural and thermal characterization of epoxy-based human hair–reinforced composites." *Journal of Testing and Evaluation* 47.2 ,1193-1215, 2018.

[10] Akın, M. H., & Polat, R. "The effect of vehicle waste tires on the mechanical, hardness and stress–strain properties of polyester-based polymer concretes". *Construction and Building Materials*, *325*, 126741, 2022.

[11] P. Nóvoa, M. Ribeiro, A. Ferreira, and A. Marques, "Mechanical characterization of lightweight polymer mortar modified with cork granulates," *Composites science and technology,* vol. 64, pp. 2197-2205, 2004.

[12] K. Jafari and V. Toufigh, "Experimental and analytical evaluation of rubberized polymer concrete," *Construction and Building Materials,* vol. 155, pp. 495-510, 2017.

[13] Martínez-Barrera, Gonzalo, Osman Gencel, and Miguel Martínez-López. "Performance improvement of polymer concrete produced with unsaturated resin, by a post-cure process, polyester fibers and gamma radiation." *Journal of Building Engineering* 59: 105117, 2022.

[14] Karamzadeh, Nima Shahni, M. R. M. Aliha, and Hamid Reza Karimi. "Investigation of the effect of components on tensile strength and mode-I fracture toughness of polymer concrete." *Arabian Journal of Geosciences* 15.13: 1213, 2022.

[15] Farooq, Mohammed, and Nemkumar Banthia. "Strain-hardening fiber reinforced polymer concrete with a low carbon footprint." *Construction and*

Building Materials 314: 125705, 2022.
[16] J. M. L. d. Reis, "Mechanical characterization of fiber reinforced polymer concrete," *Materials Research,* vol. 8, pp. 357-360, 2005.
[17] O. Elalaoui, E. Ghorbel, V. Mignot, and M. B. Ouezdou, "Mechanical and physical properties of epoxy polymer concrete after exposure to temperatures up to 250 C," *Construction and Building Materials,* vol. 27, pp. 415-424, 2012.
[18] O. Elalaoui, E. Ghorbel, and M. B. Ouezdou, "Influence of flame retardant addition on the durability of epoxy based polymer concrete after exposition to elevated temperature," *Construction and Building Materials,* vol. 192, pp. 233-239, 2018.
[۱۹] آنالیز رزین پلی استر، کارخانه پلیمر ایران، اصفهان, ۱۳۹۸.
[۲۰] آنالیز الیاف پلی پروپیلن، شرکت کلینیک بتن ایران، تهران, ۱۳۹۸.
[۲۱] آنالیز الیاف پلی وینیل الکل، شرکت بازرگانی مستوفیان، تهران, ۱۳۹۸.
[22] A. C136, "Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates," *ASTM International,* 2014.
[23] K. Jafari, M. Tabatabaeian, A. Joshaghani, and T. Ozbakkaloglu, "Optimizing the mixture design of polymer concrete: An experimental investigation," *Construction and Building Materials,* vol. 167, pp. 185, 2018.
[24] ASTM C579, "Test Methods for Compressive Strength of Chemical-Resistant Mortars, Grouts, Monolithic Surfacings, and Polymer Concretes," *Annual book of ASTM standards. Pennsylvania,* 2010.
[25] ASTM, C469/C469M-14: Standard test method for static Q10 modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression in Annual Book of ASTM Standards 2014.
[26] ASTM C580, "Test Method for Flexural Strength and Modulus of Elasticity of Chemical-Resistant Mortars, Grouts, Monolithic Surfacings, andPolymer Concretes," *Annual book of ASTM standards. Pennsylvania,* 2010.

Investigation of Compressive and Flexural Strength of Polymer Concretes Based on Epoxy Resin Containing Polyvinyl alcohol and Polypropylene Fibers

Seyed Reza mousavi*
Dr, Taft University, Yazd.
Mohammad reza Javaheri
Professor Assistant, Taft University, Yazd.

Abstract

In this study, effect of poly vinyl alcohol (PVA) and poly propylene (PP) fiber on epoxy resin-based concrete in terms of compressive, flexural, tensile strength and deformation has been investigated. In addition, scanning electron microscope (SEM) analyses were conducted on samples. Four groups of polymer concrete with 12% epoxy resin and fiber dosage of 0.5, 1, 2 and 2,5 % were prepared for both PVA and PP fiber. The fiber length was 12 mm. Cube and prism samples with 50 mm and 50x50x300 mm dimensions were prepared and tested for compressive strength and tensile strength/ deformation at 1, 7 and 28 days. Results showed that by increase of PP dosage, compressive and tensile strength increased noticeably compared to the control sample. However, for samples containing PVA, opposite trend has been observed. Therefore, the optimum dosage of PP and PVA fiber in fiber reinforced epoxy resin-based concrete is 2.5 and 0.5% respectively. The increase in compressive and flexural strength for 0.5, 1, 2 and 2.5% PP fiber was 4.38%, 5.3%, 4.9% and 5.5% compared to the control sample, respectively. The SEM analysis showed good bonding of both PP and PVA fiber to the polymer matrix. The PP fiber had better dispersion which could be the primary factor for better physical performance.

Keywords: Polymer concrete, polyvinyl alcohol, polypropylene, Epoxy resin.

* Corresponding Author: moosavi9966@yahoo.com