

بررسی تأثیر الیاف فورتا و پلی پروپیلین بر مقاومت فشاری، شکل پذیری و جذب انرژی نمونه‌های استوانه‌ای بتنی

میلاد آرام پرتان

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه، گروه عمران، دانشگاه حکیم سبزواری.

حمید اسکندری نداف

دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه حکیم سبزواری.

مجتبی لزگی نظرگاه*

دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه حکیم سبزواری.

مرتضی فارونی نیک

استادیار دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران.

چکیده

در این مطالعه آثار ناشی از افزودن الیاف فورتا و پلی پروپیلین بر رفتار نمونه‌های استوانه‌ای بتنی بررسی شده است. در این راستا به پارامترهایی مانند مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، الگوی رشد ترک‌ها و انرژی جذب شده پرداخته شده است. برای ساخت نمونه‌ها از الیاف فورتا با نسبت‌های حجمی ۰/۱ و ۰/۱۵ و الیاف پلی پروپیلین با نسبت‌های ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۳۵ استفاده شده است. نمونه‌ها به صورت استوانه‌هایی با ابعاد ۱۰۰ × ۱۵۰ میلی‌متر با دستگاه سروو کنترل تحت آزمایش فشاری قرار گرفته و نتایج به صورت نمودارهای تنش- کرنش ارائه شده است. همچنین برای بررسی دقیق‌تر جابجایی و تغییر شکل نمونه‌ها، روش همبستگی تصاویر دیجیتال به کار گرفته شده و برای صحت سنجی این نتایج از نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از الیاف پلیمری با درصد‌های حجمی پایین باعث افزایش شکل پذیری نمونه اما کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌گردد. همچنین عمق و طول ترک‌ها در نمونه‌های الیافی کاهش پیدا کرده و میزان جذب انرژی افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: مدول الاستیسیته، شکل پذیری، انرژی جذب شده، الیاف پلیمری فورتا و پلی پروپیلین، همبستگی تصاویر دیجیتال.

* نویسنده مسئول: m.lezgy@hsu.ac.ir

۱- مقدمه

مقاومت ضربه‌ای و مقاومت در برابر خستگی و همچنین کاهش ترک‌های ثانویه یا حرارتی می‌شوند [۸، ۹]. دشتی و نعمت زاده [۱۰] اثرات افزودن الیاف فورتا-فرو و سیمان کلسیم آلومینات را بر مقاومت کششی و فشاری نمونه‌های بتنی واقع در محیط اسیدی بررسی نمودند. نتایج آزمایشات این محققین نشان داد که افزودن الیاف فورتا-فرو و سیمان کلسیم آلومینات به ترتیب مقاومت فشاری و کششی بتن در محیط اسیدی را ۸ و ۱۱ درصد افزایش می‌دهند. برای بتن واقع در محیط غیراسیدی، افزایش در مقاومت فشاری و کششی بتن به ترتیب برابر ۳۸ و ۲۲ درصد می‌باشد. بهوگن و سابرامانیام [۱۱] اثر افزودن الیاف فولادی و پروپیلن بر مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن در سنین اولیه را بررسی نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که الیاف پروپیلن مقاومت کششی و الیاف فولادی مدول الاستیسیته بتن در سنین اولیه را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. ژو و همکاران [۱۲] تأثیر اضافه نمودن همزمان الیاف فولادی و پروپیلن بر چقرمگی، مقاومت کششی و مقاومت خمشی بتن را بررسی نمودند. این محققین درصد ترکیب بهینه الیاف فولاد و پروپیلن برای افزایش حداکثری ویژگی‌های مکانیکی فوق‌الذکر را تعیین نمودند.

در میان تحقیقات انجام شده در رابطه با تأثیر الیاف بر خواص بتن، می‌توان مدول الاستیسیته و انرژی جذب شده بتن را به‌عنوان یکی از کم‌رنگ‌ترین موضوعات مورد توجه دانست. مدول الاستیسیته برابر است با نسبت تنش به میزان کرنش آن. این مدول یکی از تأثیرگذارترین خواص بتن است که اهمیت بسزایی برای مهندسان، طراحان و محققین به‌خصوص در مسائل مربوط به کرنش‌ها دارد. این ویژگی به طور معمول با آزمون‌های استاندارد شده و برای نمونه‌های کوچک تحت بارگذاری فشاری یکنواخت به دست می‌آید [۱۳، ۱۴]. ظرفیت جذب انرژی نیز به‌عنوان یک فاکتور ایمنی مخصوصاً برای مواد و مصالح به‌حساب می‌آید و دارای درجه اهمیت بالایی برای سازه‌های نظامی و هسته‌ای می‌باشد [۱۵، ۱۶]. میزان جذب انرژی معادل سطح زیر منحنی تنش-کرنش می‌باشد [۱۷]. در این پژوهش همچنین سعی شده است میزان جابجایی‌ها، کرنش‌ها و اندازه‌گیری ترک‌ها با استفاده از روش دقیق تری به نام همبستگی تصویر دیجیتال (DIC)^۱ اندازه‌گیری

بتن به‌عنوان یکی از متداول‌ترین مصالح ساختمانی شناخته می‌شود که دارای مزایایی همچون مقاومت فشاری بالا، ساخت آسان، هزینه پایین و نقاط ضعفی از قبیل شکنندگی، مقاومت کششی و ظرفیت کرنشی پایین می‌باشد [۱-۳]. در سال‌های اخیر استفاده از بتن‌های الیافی در مهندسی عمران و به‌ویژه سازه‌های جدید رواج گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. بتن‌های الیافی در مقایسه با بتن‌های معمولی دارای مزایایی همچون بهبود شکل‌پذیری، کاهش طول ترک، ظرفیت خستگی بالا، چقرمگی و افزایش پایایی می‌باشند. در بتن‌های با مقاومت بالا، کاهش تردشکنی نمونه‌ی بتنی یکی از مهم‌ترین پارامترهای طراحی در نظر گرفته می‌شود زیرا که ظهور میکروترک‌ها تأثیر به‌سزایی بر مقاومت مواد دارند که می‌توان استفاده از الیاف را به‌منظور افزایش شکل‌پذیری راه‌حل مناسبی برای این مهم در نظر گرفت [۴]. الیاف می‌تواند از مواد طبیعی مانند آزبست، سیزال و سلولز یا یک محصول تولیدی مانند شیشه، فولاد، کربن و پلیمر ساخته شود. دو نوع متداول از الیاف را می‌توان الیاف فولادی و الیاف پلیمری در سایزهای میکروسنتتیک (پلی پروپیلن) و ماکروسنتتیک (فورتا) برشمرد. زیمیل و همکارانش [۵] به این نتیجه رسیدند که استفاده از الیاف پلی پروپیلن می‌تواند رفتار خردشدگی و از هم پاشیدن بتن را بهبود ببخشد. این رفتار تا حد زیادی وابسته به ترک‌های ظاهر شده در ساعات اولیه بتن‌ریزی و تنش‌های کششی ایجاد شده ناشی از آن می‌باشد که تا زمان رسیدن بتن به مقاومت اولیه خود ادامه می‌یابد. چنین ترک‌هایی بستر مناسبی برای ورود عوامل خارجی را به درون بتن فراهم می‌سازند که می‌تواند منجر به خوردگی شود. پژوهش‌های انجام شده در این زمینه نشان داده است که استفاده کمتر از ۰/۵٪ حجمی الیاف پلی پروپیلن بهترین نتایج را برای جلوگیری از ایجاد ترک‌ها در بر داشته است [۶]. از سوی دیگر استفاده از درصد‌های بالاتر الیاف بهترین نتایج را برای مقاومت‌های کششی و فشاری نشان داده‌اند در صورتی که باعث کاهش کارایی نیز شده‌اند [۷]. نوع دیگری از الیاف پلیمری در مقیاس ماکرو، الیاف فورتا است که از پیچ دادن تک الیاف‌ها به‌منظور ساخت شبکه‌ای از الیاف به دست می‌آیند. این الیاف باعث کاهش انقباض بتن تازه و سخت شده، بهبود

¹ Digital image correlation

سهولت قابل دستیابی نمی‌باشد، از روش DIC استفاده شده است. علاوه بر این، نتایج روش DIC با نتایج بدست آمده از تحلیل اجزا محدود نیز مقایسه شده‌اند. این مقایسه امکان ارزیابی دقت روش DIC در برآورد کرنش‌های سطحی و تغییر شکل‌ها نمونه‌های بتن الیافی که مستقیماً از طریق نتایج تست‌های آزمایشگاهی امکان‌پذیر نمی‌باشد را فراهم می‌آورد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

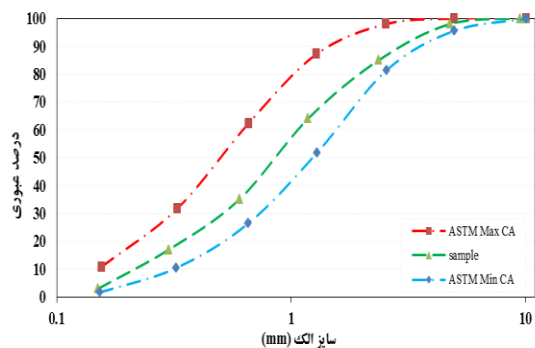
۲-۱- مصالح

در این برنامه آزمایشگاهی از دو نوع سیمان پرتلند تیپ ۲ و ۵ محصول کارخانه سیمان بجنورد در رده مقاومتی ۵۲۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع استفاده شده است. مشخصات شیمیایی و کانی‌شناسی سیمان‌های استفاده‌شده در جدول شماره ۱ و مشخصات فیزیکی آن‌ها در جدول شماره ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات مکانیکی سیمان

مقاومت فشاری ۲۸ روزه (Kg/cm ²)	انقباض طولی (%)	زمان گیرش		سطح مخصوص (cm ² /gr)	وزن مخصوص (ton/m ³)
		اولیه	نهایی		
۵۲۰	۰/۰۲	۳:۰۰	۱۵۰	۳۵۵۰	۳/۱۸۵
۵۱۵	۰/۰۳	۲:۵۵	۱۵۰	۳۶۵۰	۳/۱۸۶

در تمامی طرح اختلاط‌ها از شن و ماسه‌ی شکسته‌ی منطبق بر آیین‌نامه‌ی ASTM استفاده شده است که نمودار دانه‌بندی آن در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در بتن

الیاف ماکروسینتتیک استفاده شده از نوع فورتا (شکل ۲-الف) و ساخت کشور آمریکا می‌باشد. این نوع الیاف متشکل از مواد ترکیبی

شود. DIC یک روش نوری غیرمخرب برای اندازه‌گیری است که تغییرات وابسته به زمان را در نمونه مورد بررسی در حالت‌های دو و سه‌بعدی از طریق تکنیک‌های تطبیق الگو و تصویر اندازه‌گیری می‌کند [۱۸]. روش DIC برای اندازه‌گیری تغییر شکل و کرنش‌های مواد تحت شرایط مختلف بارگذاری از سال‌های ۱۹۸۰ مورد استفاده قرار گرفته است [۱۹، ۲۰].

این روش می‌تواند برای اندازه‌گیری ابعاد، تغییر شکل، جابجایی و فشار استفاده شود. تکنیک DIC توجه گسترده‌ای در روش‌های مهندسی برای اندازه‌گیری تغییرات تنش و جابجایی، تحلیل مواد و ساختار، صحت سنجی، تجزیه و تحلیل اجزاء محدود و کنترل کیفیت ارائه کرده است [۲۱، ۲۲]. این ترکیب با موفقیت برای تعیین گونه‌ها در نمونه‌های چوب جامد، الیاف چوبی [۲۳، ۲۴] و همچنین فیلم‌های رزین [۲۵]، کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده [۲۶، ۲۷] و بتن [۲۸] مورد استفاده قرار گرفته است.

در این مطالعه به بررسی اثر الیاف فورتا و پلی‌پروپیلین بر رفتار فشاری بتن که نشانگر رابطه‌ی تنش-کرنش می‌باشد پرداخته شده است. در همین راستا مدول الاستیسیته، تغییر شکل‌ها، الگوی رشد ترک‌ها و انرژی جذب‌شده‌ی بتن تحت آزمایش فشاری نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در این مسیر به‌منظور بررسی دقیق‌تر و اهمیت رفتار کرنشی بتن بر روی مدول الاستیسیته و شکل‌پذیری بتن از روش همبستگی تصاویر دیجیتال استفاده شده است.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان

ترکیب شیمیایی (%)						
SO ₃	K ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
۲/۱۶	۰/۶۵	۱/۹۳	۶۴/۱۴	۳/۸	۴/۶۲	۲۱/۵
۲/۰۴	۰/۶۴	۱/۹۴	۶۴/۱۹	۳/۹۱	۴/۴۵	۲۲/۰۳

با وجود دقت بالای DIC به‌عنوان یک روش غیرتماسی و غیرمخرب در برآورد تنش و کرنش در قطعات تحت آزمایش حین بارگذاری، گزارش‌های علمی محدودی در زمینه استفاده از این روش در حوزه مطالعات تجربی بتن‌های الیافی گزارش شده است. در این تحقیق برای به دست آوردن کرنش‌های سطحی و تغییر شکل‌ها در جهت‌های مختلف نمونه‌های بتنی حاوی الیاف که اندازه‌گیری آن‌ها با روش‌های سنتی (حس گرهای الکتریکی) به

۲-۲- طرح اختلاط و نحوه آزمایش نمونه‌ها

در این پژوهش نمونه‌های آزمایشگاهی به صورت نمونه‌های استوانه‌ای به ارتفاع ۱۵۰ و قطر ۱۰۰ میلی‌متر در ۲ گروه ساخته شده‌اند. گروه الف شامل ۲ طرح اختلاط با مقادیر متفاوت الیاف ماکروسنتتیک (فورتا) و با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و نمونه‌های گروه ب در شامل ۳ طرح اختلاط با مقادیر متفاوتی از الیاف میکروسنتتیک (پلی‌پروپیلن) و با نسبت آب به سیمان ۰/۵ می‌باشند. جهت بررسی بهتر برای هر گروه نمونه شاهد نیز ساخته شده است. اطلاعات مربوط به طرح اختلاط‌ها در جدول ۵ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است به منظور اینکه نتایج این تحقیق به یک تیپ خاص از سیمان و یک رده‌ی مقاومتی خاص محدود نباشند، دو تیپ متفاوت سیمان و دو رده‌ی مقاومتی مختلف برای نمونه‌های تست شده در نظر گرفته شده‌اند. در واقع جهت دستیابی به مقاومت‌های فشاری متفاوت، دو نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۵ برای طرح اختلاط در نظر گرفته شده است. نمونه‌های ساخته شده به مدت ۲۸ روز در حوضچه آب شرب به نحوی عمل‌آوری شدند که تمام سطح بتن در طول این مدت در تماس با آب بود. پس از آن، نمونه‌ها در شرایط و دمای عادی آزمایشگاه تا زمان آزمایش نگهداری شدند. کلیه نمونه‌های ساخته شده توسط دستگاه سروو کنترل با ظرفیت ۲۰۰ تن، طبق استاندارد ASTM C469 / C469M با سرعت بارگذاری ۱ mm/min مورد آزمایش قرار گرفتند.

جدول ۵- طرح اختلاط

گروه	نام طرح	نوع سیمان	w/c	الیاف پلی‌پروپیلن %	الیاف فورتا %
الف	NF	بجنورد تیپ ۲	۰/۴	۰	۰
	F1	بجنورد تیپ ۲	۰/۴	۰	۰/۱
	F2	بجنورد تیپ ۲	۰/۴	۰	۰/۱۵
ب	NPP	بجنورد تیپ ۵	۰/۵	۰	۰
	PP1	بجنورد تیپ ۵	۰/۵	۰/۲	۰
	PP2	بجنورد تیپ ۵	۰/۵	۰/۳	۰
	PP3	بجنورد تیپ ۵	۰/۵	۰/۳۵	۰

۲-۳- نتایج آزمایش

۲-۳-۱ بررسی رفتار فشاری

آزمایش فشاری جهت مشخص شدن مقاومت نمونه‌های ساخته شده انجام شده است. نمودار تنش- کرنش نمونه‌های تقویت شده با

مختلف، ساخته شده از پلی‌پروپیلن ۱۰۰٪ خالص، متشکل از یک شبکه الیاف رشته‌ای شامل رشته‌های بسیار نازک پیچ‌خورده در هم و به صورت گره درآمده می‌باشند. الیاف پلی‌پروپیلن نوع دیگری از الیاف‌های پلیمری (شکل ۲-ب) و در مقیاس میکرو است. الیاف استفاده شده محصول کارخانه وند شیمی و با نام تجاری vand fiber P. P می‌باشد. مشخصات فیزیکی این الیاف طبق شرکت سازنده در جدول شماره ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- مشخصات مکانیکی الیاف

مواد اولیه	وزن مخصوص (Kg/m ³)	طول (m)	قطر (m)	مقاومت کششی (MPa)
فورتا	۹۱۰	۵۴		۵۷۰-۶۶۰
پلی‌پروپیلن	۹۰۰	۱۸	۲۰	۳۵۰



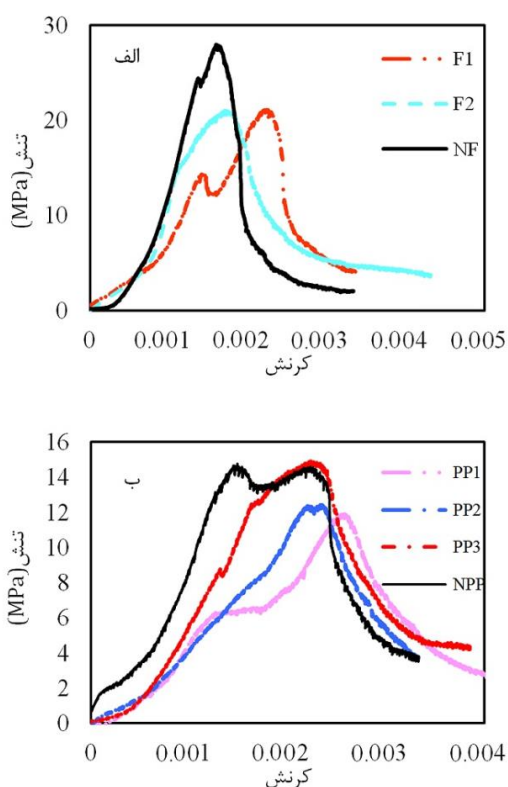
شکل ۲- الیاف مورد استفاده: (الف) فورتا، (ب) پلی‌پروپیلن

با توجه به استفاده از الیاف در ساخت نمونه، به جهت تنظیم اسلامپ از فوق روان کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلیت استفاده شد. در واقع از آنجاکه افزودن الیاف باعث کاهش کارایی می‌شود، از فوق روان کننده استفاده شده است. مشخصات فنی فوق روان کننده مورد استفاده در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴- مشخصات فنی فوق روان کننده

پایه شیمیایی	وزن مخصوص (Kg/Liter)	PH
دیسپرسیون پلیمری کربوکسیلیت	۱/۰۳	حدود ۷

مقاومت در برابر ضربه را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. در نمودار تنش- کرنش نمونه‌های بتنی بدون الیاف، بویژه در نمونه فاقد الیاف پروپیلین، سخت شوندگی مجدد مشاهده می‌گردد. ناصاف نبودن سطح نمونه‌های استوانه‌ای تست شده و نیز خطا در اندازه‌گیری مقدار دقیق و لحظه‌ای تنش و کرنش می‌تواند از جمله سایر عوامل ایجاد کننده سخت شوندگی مجدد در نمودار تنش- کرنش نمونه‌های بتنی بدون الیاف باشند. توجه به این نکته نیز ضروریست که نمونه‌های بتنی فاقد الیاف پروپیلین تست شده در این تحقیق، از لحاظ رده‌ی مقاومتی جز بتن‌های کم مقاومت محسوب می‌گردند. در مقایسه با بتن‌های پر مقاومت، بتن‌های کم مقاومت تغییر شکل‌های بزرگتری از خود نشان می‌دهند و مقاومت فشاری حداکثر آن‌ها در محدوده‌ی بزرگتری از کرنش (در اینجا بازه‌ی حدود ۰/۰۰۱۵ تا ۰/۰۰۲۵) رخ می‌دهد.



شکل ۳- نمودار تنش- کرنش نمونه‌های فشاری تقویت شده با: (الف) الیاف فورتا، (ب) الیاف پلی پروپیلین

۲-۳-۲ بررسی مدول الاستیسیته

شکل ۴ تأثیر استفاده از الیاف فورتا و پلی پروپیلین را بر تنش و کرنش ماکزیمم و مدول الاستیسیته کلیه نمونه‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه F1 (حاوی کمترین درصد

الیاف فورتا در شکل ۵-الف نمایش داده شده است. نمونه کنترل بیشترین مقاومت و نمونه F2 (حاوی کمترین الیاف) کمترین مقاومت فشاری را نمایش می‌دهند. این روند در خصوص کرنش کاملاً متفاوت می‌باشد به گونه‌ای که نمونه F1 توانسته است کرنش بیشتری در ماکزیمم بار، نسبت به نمونه کنترل ایجاد کند و در مقابل، نمونه F2 دچار کاهش کرنش شده است.

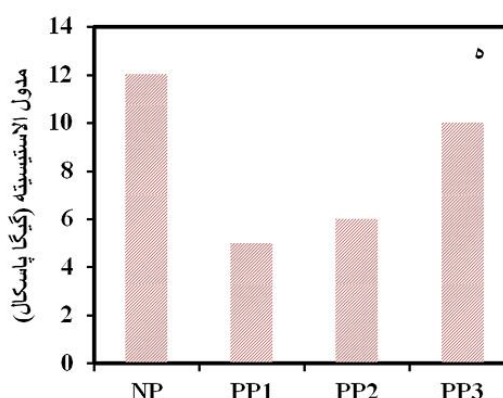
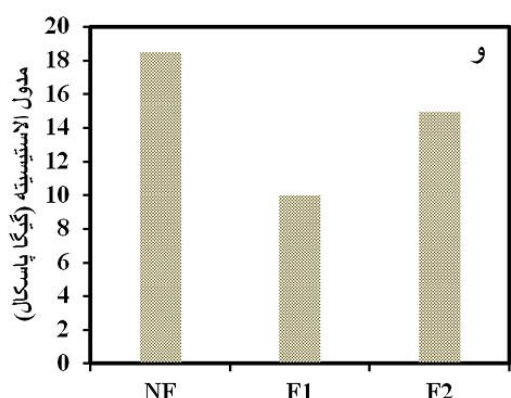
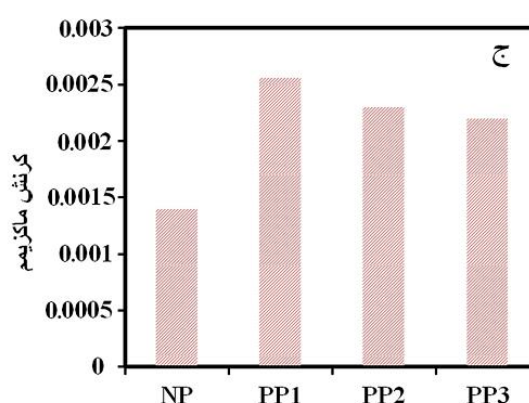
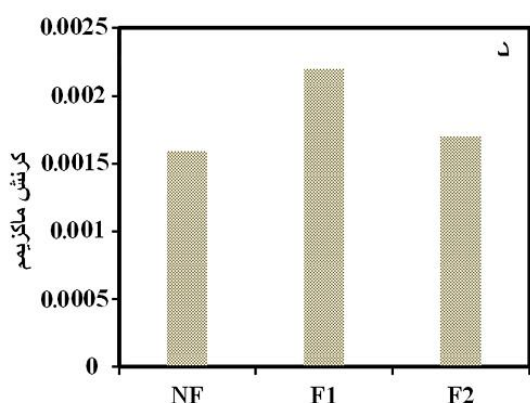
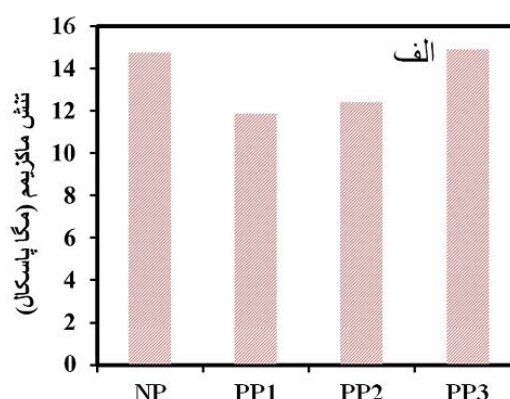
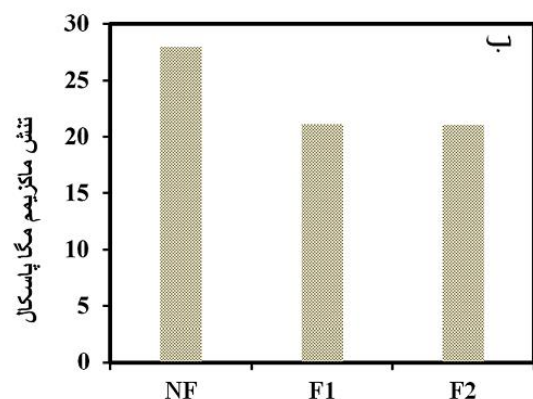
بدین ترتیب نتیجه می‌شود که افزودن الیاف تا ۰/۰۱٪ باعث افزایش قابل توجه شکل‌پذیری می‌شود. همان‌طور که از شکل ۳-الف مشخص می‌باشد میزان کاهش مقاومت به مقدار ۲۰٪ می‌رسد که می‌توان گفت همچنان دارای مقاومت قابل قبولی می‌باشد.

نتایج حاصل از نمونه‌های استوانه‌ای تقویت شده با الیاف پروپیلین در شکل ۳-ب نمایش داده شده است. در نمونه PP1 شاهد کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه کنترل می‌باشیم. افزایش شکل‌پذیری پس از وقوع اولین ترک (تنش ۵/۷۷) قابل توجه می‌باشد. در واقع نمونه دچار ترک شده است و با صرف نیروی کمی، جابجایی زیادی را تجربه می‌کند که در ادامه الیاف استفاده شده باعث توقف ترک خوردگی و شروع دوباره مقاومت تا ۱۱/۸ مگاپاسکال می‌شود. این روند برای هر سه نمونه الیافی تحت آزمایش اتفاق می‌افتد با این تفاوت که با افزایش مقدار الیاف، شروع مقاومت دوباره تسریع می‌شود. به عنوان مثال، در نمونه PP3 پس از وقوع اولین ترک (تنش ۷/۹۷) شاهد مقاومت مجدد نمونه می‌باشیم. صاف نبودن سطح بارگذاری در نمونه کنترل باعث اعمال فشار به لبه نمونه شده و پس از وقوع ترک، نیروی وارده به تمامی سطح منتقل می‌شود که باعث شروع مقاومت مجدد نمونه می‌شود. با توجه به نتایج حاصل، استفاده از الیاف پلی پروپیلین باعث کاهش مقاومت فشاری و افزایش شکل‌پذیری نسبت به نمونه کنترل می‌شود. در مقایسه‌ی نمونه‌های تقویت شده با الیاف پلی پروپیلین با یکدیگر، مشاهده می‌شود که افزایش مقدار الیاف مقاومت فشاری را افزایش و شکل‌پذیری را کاهش داده است.

قابل ذکر است که نتایج به دست آمده در این بخش، همسو با تحقیقات سایر محققین نیز می‌باشد. به عنوان نمونه، الحزیمی و همکاران [29] اثر افزودن الیاف مختلف بر ویژگی‌های مکانیکی بتن حاوی خاکستر بادی را بررسی نمودند. تحقیقات این محققین نیز نشان می‌دهد افزودن الیاف پروپیلین منجر به افزایش نه چندان محسوس مقاومت فشاری و خمشی بتن شده، ولی چقرمگی و

می باشد. افزایش مقدار الیاف باعث کمتر شدن اثر کاهنده بر روی مقاومت فشاری می شود به گونه ای که در نمونه PP3 با ۰/۳۵ الیاف، شاهد افزایش نسبی مقاومت و مدول الاستیسیته می باشیم. همچنین افزایش الیاف پلی پروپیلن باعث کاهش شکل پذیری در نمونه ها شده است. با مقایسه جامع نمونه های الیافی که تحت آزمایش فشاری قرار گرفته اند، نمونه PP1 بیشترین شکل پذیری و کمترین مقاومت فشاری را دارد.

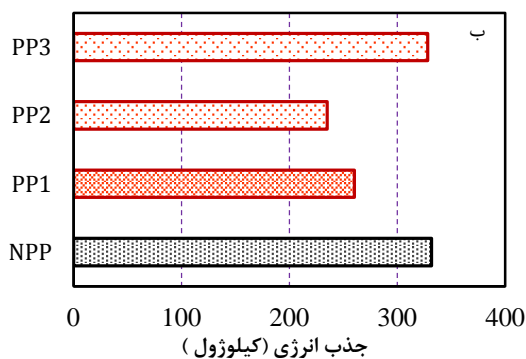
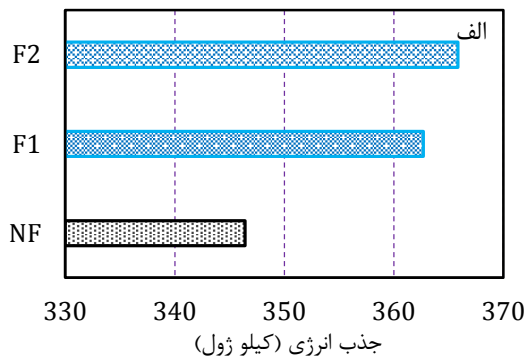
الیاف فورتا) بیشترین شکل پذیری را در گروه خود دارد. از طرفی استفاده از این درصد الیاف فورتا باعث کاهش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته نیز شده است. با افزایش مقدار الیاف فورتا به ۰/۱۵ درصد، شاهد کاهش مقادیر تنش، کرنش و افزایش مدول الاستیسیته می باشیم. در شکل های ۴-الف تا ۴-ه تأثیر استفاده از الیاف پلی پروپیلن بر نمونه های فشاری نشان داده شده است. بیشترین شکل پذیری مربوط به نمونه PP1 با ۰/۲ درصد الیاف



شکل ۴- نمودار مقایسه رفتار فشاری نمونه ها در نقطه ی تنش ماکزیمم: (الف) ماکزیمم تنش فشاری در نمونه های حاوی الیاف فورتا (ب) ماکزیمم تنش فشاری در نمونه های حاوی الیاف پلی پروپیلن (ج) کرنش طولی در ماکزیمم تنش فشاری نمونه های حاوی الیاف فورتا (د) کرنش طولی در ماکزیمم تنش فشاری نمونه های حاوی الیاف پروپیلن (ه) مدول الاستیسیته در نمونه های حاوی الیاف فورتا (و) مدول الاستیسیته در نمونه های حاوی الیاف پلی پروپیلن

۳-۳-۲ میزان جذب انرژی

پیدا کرده است همچنین فاصله ترک‌ها از یکدیگر کاهش یافته است. ترک‌ها تا ناحیه میانی ادامه پیدا کرده‌اند.



شکل ۵- مقایسه‌ی جذب انرژی در نمونه‌های استوانه‌ای تقویت شده با الیاف: (الف) فورتا، (ب) پلی پروپیلین

تأثیر الیاف فورتا بر جذب انرژی نمونه‌های استوانه‌ای تحت فشار در شکل ۵ نمایش داده شده است. نمونه‌ی کنترل علی‌رغم تحمل بیشترین نیرو، کمترین جذب انرژی و نمونه F2 بیشترین جذب انرژی را به خود اختصاص داده‌اند. استفاده از الیاف فورتا در ساخت نمونه‌ها منجر به افزایش شکل‌پذیری و کاهش نیروی قابل تحمل می‌شود که نشان‌دهنده تأثیر بیشتر شکل‌پذیری نسبت به مقاومت فشاری بر میزان جذب انرژی نمونه‌های تحت فشار می‌باشد. نتایج حاصل از بررسی میزان جذب انرژی نمونه‌های استوانه‌ای تقویت شده با الیاف پروپیلین تحت فشار در شکل ۵-ب نمایش داده شده است. با توجه به صاف نبودن سطح نمونه کنترل در هنگام بارگذاری که منجر به افزایش کاذب سطح زیر نمودار شده است، بیشترین انرژی جذب شده مربوط به نمونه PP3 می‌باشد. جذب انرژی روند متفاوتی را نسبت به افزایش الیاف طی می‌کند به گونه‌ای که نمونه PP2 علی‌رغم دارا بودن الیاف بیشتر نسبت به نمونه PP1، جذب انرژی کمتری را نشان می‌دهد. عوامل دخیل در شرایط بارگذاری تأثیر بسزایی در نتایج مرتبط با جذب انرژی دارد.

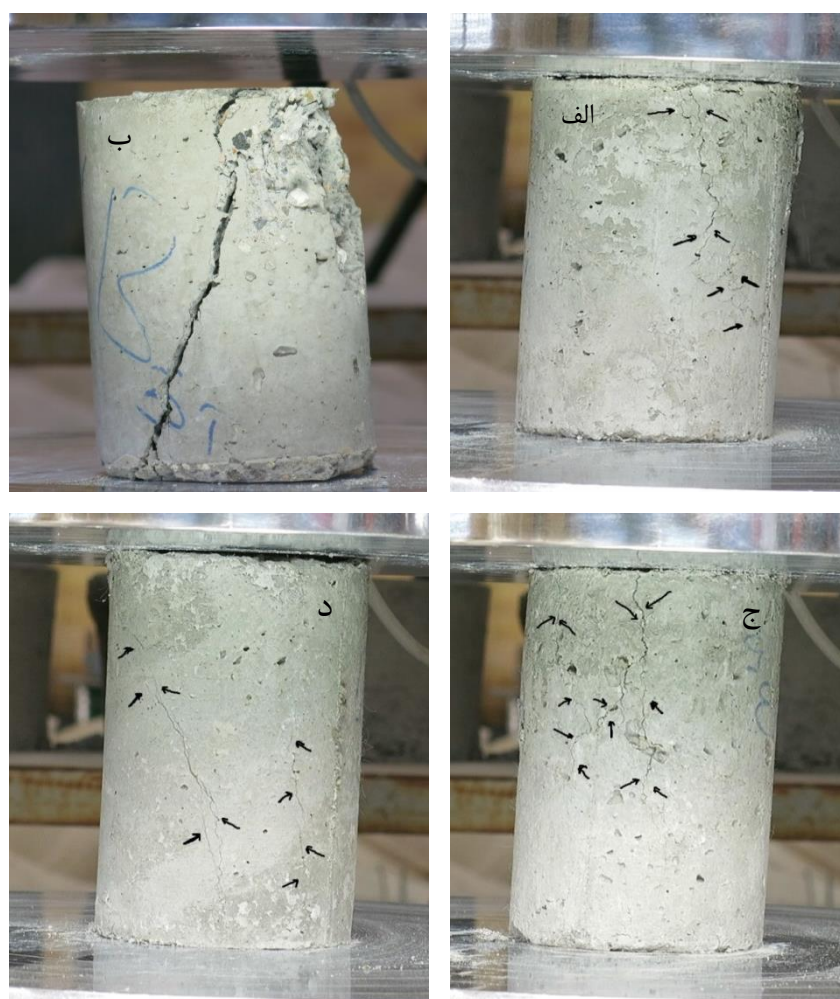
۴-۳-۲ الگوی ترک خوردگی

تأثیر الیاف پروپیلین بر الگوی رشد ترک نمونه‌های استوانه‌ای تحت فشار در شکل ۷ نمایش داده شده است. در نمونه‌ی کنترل، وقوع ترک به صورت ناگهانی و رشد آن قابل پیش‌بینی می‌باشد. این ترک دارای عمق و بازشدگی زیادی بوده و به صورت مستقیم در کل طول نمونه ادامه دارد. شروع ترک در نمونه PP1 (شکل ۷-الف) روند متفاوتی را نشان می‌دهد. قسمت میانی ناحیه فوقانی در دو قسمت بسیار نزدیک دچار ترک خوردگی شده است. افزایش بار باعث گسترش ترک‌ها و پیوستن آن‌ها به یکدیگر شده است به طوری که این ترک تا ناحیه میانی ادامه پیدا می‌کند. در شکل ۷-ب (PP2)، تعداد ترک‌ها به دو عدد افزایش پیدا کرده است. شروع ترک‌های این نمونه در ناحیه تحتانی بوده و عمق ترک‌ها کمتر شده است. شروع ترک در نمونه PP3 (شکل ۷-ج) در ناحیه فوقانی اتفاق افتاده است. تعداد ترک‌ها نسبت به نمونه‌های دیگر افزایش و فاصله آن‌ها از یکدیگر کاهش پیدا کرده است. گسترش ترک باعث به وجود آمدن ریز ترک‌هایی در اطراف ترک‌های اصلی شده است.

تأثیر الیاف فورتا بر الگوی ترک خوردگی در نمونه‌های استوانه‌ای تقویت شده تحت فشار در شکل ۶ نمایش داده شده است. نمونه شاهد تحت فشار دچار ترک خوردگی از ناحیه میانی و گسترش آن به سمت لبه‌ها می‌باشد. این گسترش ترک کاملاً مستقیم و قابل پیش‌بینی می‌باشد. همچنین در سمت چپ نمونه شاهد پوسته شدن بخشی از رویه نمونه می‌باشیم که در ادامه بارگذاری به طور کامل از نمونه جدا می‌شود. ترک در کل طول نمونه ادامه پیدا کرده است. در نمونه الف (F1)، شروع ترک‌ها از ناحیه تحتانی و در طرفین اتفاق افتاده است. گسترش این ترک‌ها همراه با ایجاد ترک‌های کوچکی در اطراف ترک اصلی با عمق بسیار کمتر می‌باشد. همچنین شاهد پوسته شدن جزئی می‌باشیم که به دلیل استفاده از الیاف در ادامه بارگذاری این قسمت دچار جداشدگی نمی‌شود. ترک تا قسمت میانی ادامه پیدا کرده است. در نمونه ب (F2)، شروع ترک‌ها در ناحیه فوقانی و سمت چپ نمونه اتفاق افتاده است. عمق ترک نسبت به نمونه شاهد کمتر و تعداد آن افزایش



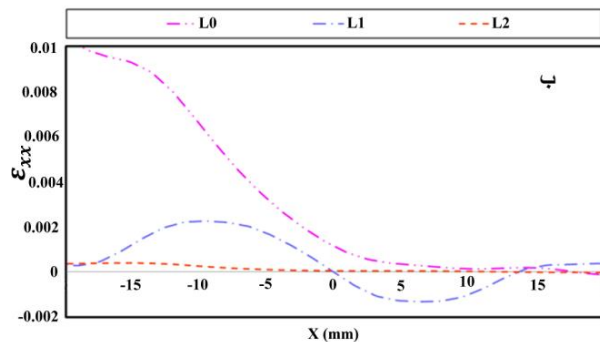
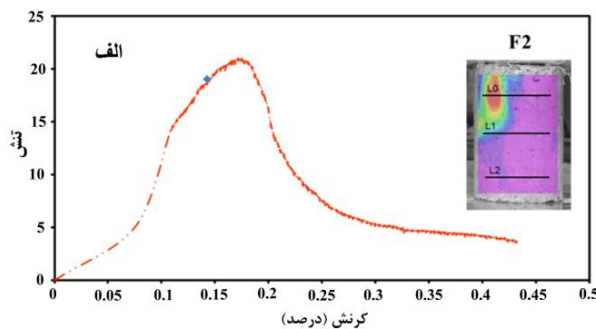
شکل ۶- مقایسه الگوی ترک خوردگی در نمونه‌های استوانه‌ای فشاری تقویت شده با الیاف فورتا: (الف) نمونه F2، (ب) نمونه F1، (ج) نمونه NF



شکل ۷- مقایسه الگوی ترک خوردگی در نمونه‌های استوانه‌ای فشاری تقویت شده با الیاف پلی پروپیلن: (الف) نمونه PP1 (ب) نمونه NPP (ج) نمونه PP3 (د) نمونه PP2

الیاف فورتا تأثیر کنترل کننده‌ای بر روی ترک‌های نمونه‌های تحت فشار دارند به گونه‌ای که باعث کاهش عمق و بازشدگی دهانه ترک و طول ترک در این نمونه‌ها شده است. استفاده از الیاف پروپیلن نیز باعث کاهش تردشکنی بتن شده‌اند به گونه‌ای که فاصله و بازشدگی دهانه ترک کاهش پیدا می‌کند. همچنین این الیاف تأثیر مثبتی بر رفتار پسا ترک نمونه‌های تقویت شده در مقایسه با نمونه‌های فاقد الیاف داشته‌اند.

و مقادیر مثبت نشان دهنده کشش می‌باشند. با توجه به وقوع ترک در نمونه، ناحیه فوقانی (محل وقوع ترک) در کشش قرار گرفته است. شکل سینوسی نمودار کرنش افقی در ناحیه میانی، اثر هم‌زمان و برابر فشار و کشش را بر این منطقه نشان می‌دهد. ناصاف بودن سطح بارگذاری شده امکان بروز خطا را افزایش می‌دهد به گونه‌ای که منجر به ایجاد فشار و کشش کاذب در نمونه می‌شود. قابل ذکر است که در صورت استفاده از کپینگ یا کلاهیگ گذاری نمونه‌های استوانه‌ای در حین آزمایش می‌توان از ایجاد تمرکز تنش در نمونه ممانعت و متعاقباً میزان چینی خطایی در اندازه‌گیری را به میزان قابل توجهی کاهش داد. در نتایج حاصل از DIC مشاهده می‌شود نیمه چپ نمونه تحت کشش و نیمه راست تحت فشار قرار دارد که می‌تواند متأثر از شرایط بارگذاری باشد.



شکل ۸- بررسی کرنش افقی با استفاده از DIC در نمونه استوانه‌ای F2: (الف) نمودار تنش-کرنش، (ب) کرنش افقی متناظر با سه خط L0، L1 و L2

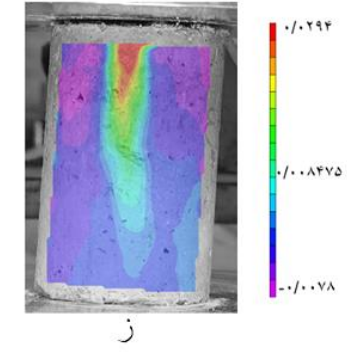
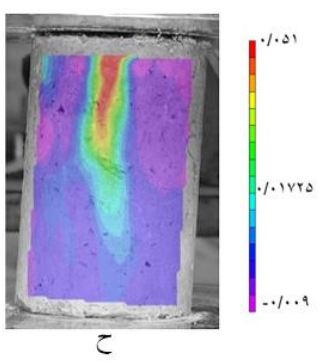
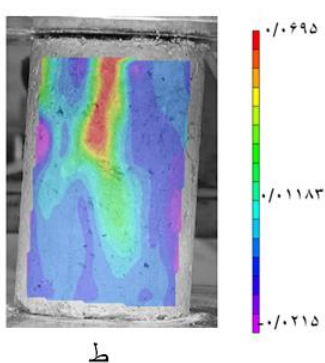
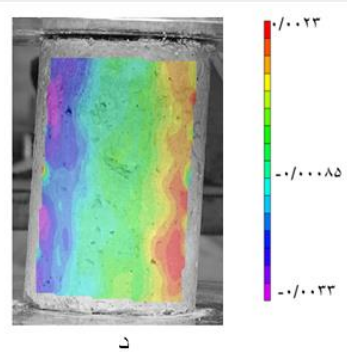
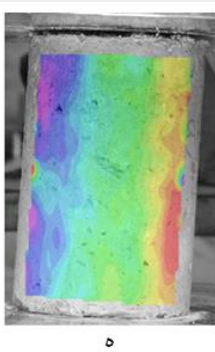
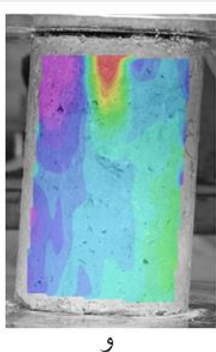
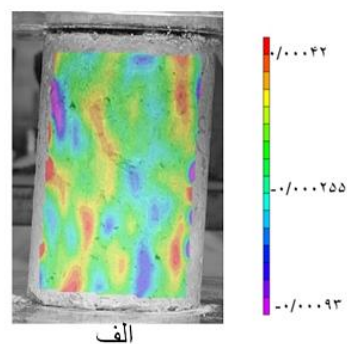
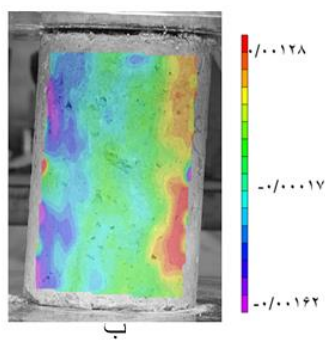
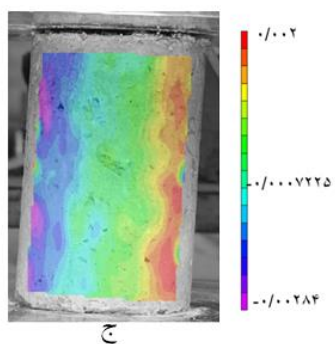
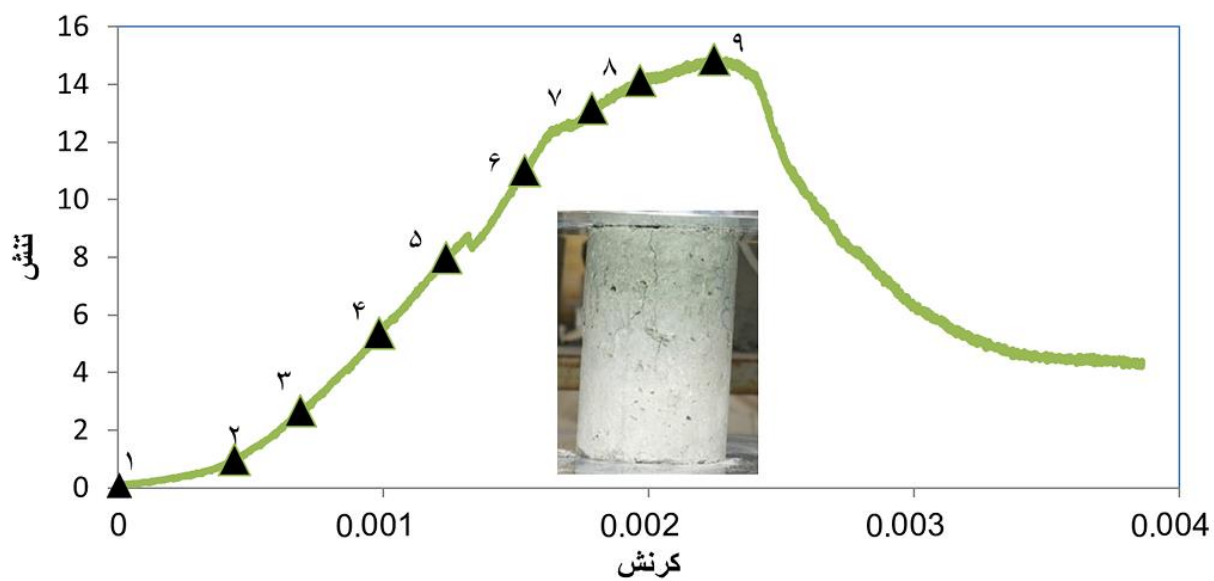
جهت بررسی و امکان مقایسه بهتر نمونه‌های استوانه‌ای تقویت شده با الیاف پلی پروپیلین، کرنش افقی بر روی نمونه PP3 به روش همبستگی تصاویر دیجیتال انجام و نتایج حاصل در شکل ۹ نمایش داده شده است. تصاویر انتخاب شده جهت تحلیل DIC، بر روی نمودار تنش و کرنش مشخص شده‌اند.

۳- روش همبستگی تصاویر دیجیتال (DIC)

اندازه‌گیری تغییر شکل سطح مواد و سازه‌هایی که در معرض بارهای گوناگون مکانیکی و حرارتی قرار گرفته‌اند، یک فرآیند مهم در مکانیک مشاهده‌ای می‌باشد. گذشته از استفاده وسیع از تکنیک کرنش سنج، روش‌های عمومی غیرتماسی تمام میدانی مختلفی تاکنون برای این هدف به کار رفته و توسعه یافته‌اند. تکنیک‌های غیرتماسی مزیت ویژه‌ای دارند و آن اینکه گستره وسیعی از اندازه نانو تا ماکرو را شامل می‌شوند و در زمینه‌های مکانیک، علم مواد و حتی علوم پزشکی کاربرد یافته‌اند. این روش‌ها تفاوت‌های اساسی نیز با یکدیگر دارند. روش همبستگی تصاویر دیجیتال یا DIC به‌عنوان یک تکنیک عمومی غیر تداخل سنجی به‌صورت گسترده پذیرفته شده و به‌عنوان یک ابزار قوی و انعطاف‌پذیر برای اندازه‌گیری تغییر شکل سطحی در مکانیک جامدات کاربرد دارد. این روش می‌تواند تغییر شکل‌ها و کرنش‌های تمام میدانی را با مقایسه‌ی شدت نور پیکسل‌های تصاویر قبل و بعد از تغییر شکل فراهم کند. این تکنیک در دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی به پیشرفت‌هایی دست یافته است. این تصاویر به‌وسیله جستجوی یک نقطه انطباقی از یک تصویر بر دیگری جهت یافتن جابجایی‌ها و حتی کرنش و یا به دست آوردن خواص مکانیکی مواد مقایسه می‌شوند. در این پژوهش از نرم‌افزار VIC-2D تولید شرکت Correlated Solutions بهره گرفته شده است. خروجی نرم‌افزار به دو صورت تصاویر و داده، قابل ذخیره می‌باشد. همچنین نرم‌افزار قابلیت رسم نمودار در هر نقطه از تصاویر ورودی را دارا می‌باشد.

۳-۱- بررسی کرنش افقی با استفاده از DIC

کرنش افقی نمونه استوانه‌ای تقویت شده با الیاف فورتا برای نمونه F2 با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل در شکل ۸ نمایش داده شده است. در شکل ۸-الف، مختصات لحظه‌ی بارگذاری و عکس‌برداری از نمونه مشخص شده است. همچنین جهت بررسی بهتر سه خط L0، L1 و L2 به طول ۴۰ میلی‌متر در بازه (۲۰، -۲۰) در سه ناحیه فوقانی، میانی و تحتانی به‌صورت فرضی بر روی نمونه در نظر گرفته شده است و کرنش افقی متناظر با هر خط در قالب نمودار در شکل ۸-ب رسم شده است. مقادیر منفی ϵ_{xx} نشان‌دهنده فشار

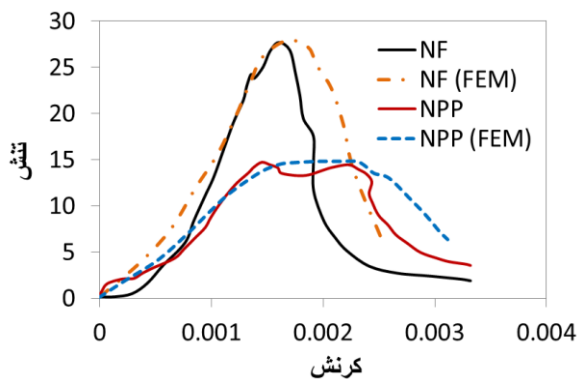


شکل ۹- بررسی کرنش افقی در نمونه‌های استوانه‌ای PP3 با استفاده از DIC

در شروع بارگذاری (شکل ۹-الف)، توزیع طیف‌ها نشان دهنده در کشش و فشار بودن کل سطح نمونه می‌باشد. با افزایش بار، این توزیع شکل پایدارتری پیدا می‌کند. با توجه به شکل‌های ۹-ب الی ۹-ه، سمت راست نمونه تحت کشش و سمت راست نمونه تحت فشار قرار گرفته است. افزایش کرنش طولی در هر دو سمت نمونه قابل مشاهده می‌باشد. در کشش و فشار بودن طرفین نمونه منجر به ایجاد ترک در قسمت میانی می‌شود. محدوده شروع ترک در شکل ۹-و قابل مشاهده می‌باشد. ادامه بارگذاری باعث گسترش ترک می‌گردد که این روند در شکل‌های ۹-ز الی ۹-ط نمایش داده شده است.

۴- مدل سازی با استفاده از روش اجزاء محدود (FEM)

در این پژوهش از نرم‌افزار Abaqus جهت بررسی رفتار فشاری نمونه‌های استوانه‌ای به روش اجزاء محدود استفاده شد. جهت مدل‌سازی اجزاء محدود، از المان C3D8R که المانی مناسب برای مش‌بندی بتن می‌باشد، استفاده شده است. برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی بتن در کشش و فشار، از مدل بتن آسیب دیده‌ی پلاستیک استفاده شده است. مقادیر مدول الاستیسیته بین ۴ تا ۱۲ گیگا پاسکال و همچنین میزان چگالی برابر ۲۱۷۰ - ۲۳۲۰ Kg/m^3 در نظر گرفته شده است. ضریب پواسون، زاویه اتساع و ویسکوزیته به ترتیب برابر ۰/۱۸، ۳۰/۵ و ۰/۰۰۰۱ در نظر گرفته شد. قسمت تحتانی مدل با شرایط مرزی encaster محدود و جابجایی یکنواختی متناسب با نتایج آزمایشگاهی بر قسمت فوقانی اعمال شده است. تمامی مدل‌ها با استفاده از روش استاتیکی غیرخطی مبتنی بر حل گر نیوتن مورد بررسی قرار گرفتند. به منظور صحت-سنجی مدل FEM، مطابق شکل ۱۰ نمودار تنش-کرنش بدست آمده از نرم‌افزار با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌گردد که انطباق خوبی میان نتایج تجربی و FEM وجود دارد.



شکل ۱۰- مقایسه نمودار تنش-کرنش بدست آمده از مدل اجزاء محدود با نتایج آزمایشگاهی

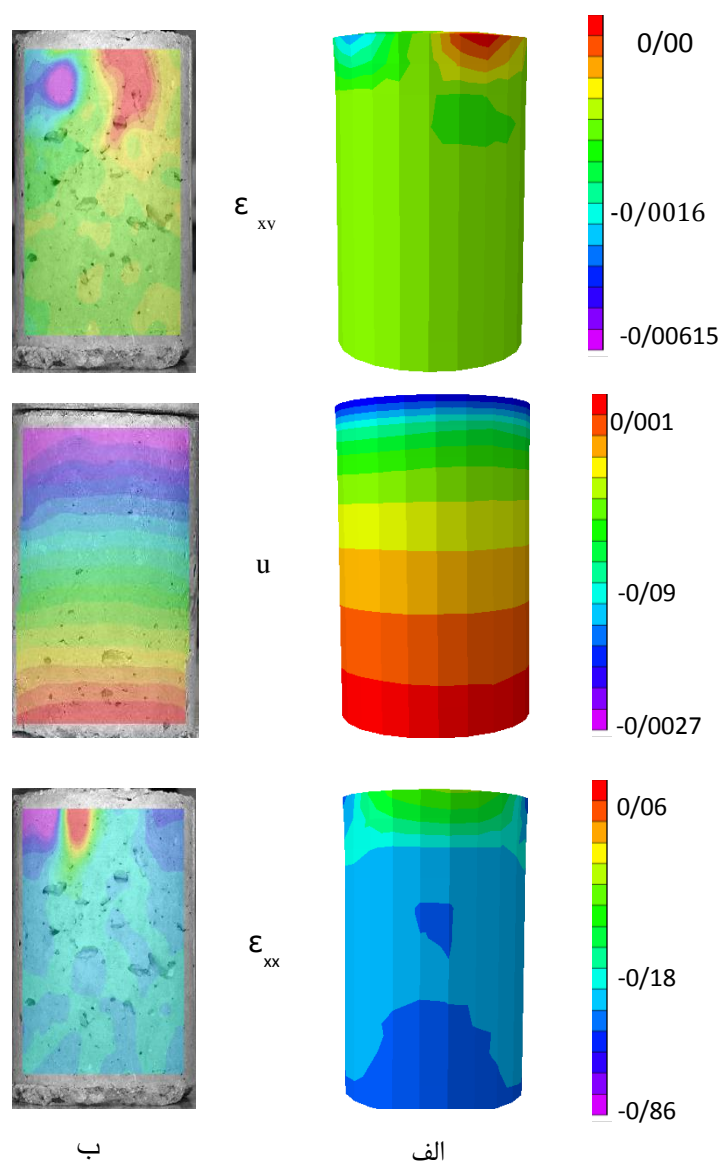
با وجود مطابقت‌های موجود، اختلاف‌هایی در کانتورهای ترسیمی مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از شرایط بارگذاری، تغییر نور و ایجاد سایه‌ها بر روی شکل باشد. همچنین امکان بروز خطا در روش FEM به دلیل عدم امکان شبیه‌سازی کامل شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری قابل توجه می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق نمونه‌های تقویت شده با الیاف پلی پروپیلین و فورتا مورد بررسی قرار گرفتند. تست‌های فشاری بر روی ۷ طرح اختلاط شامل نمونه‌های استوانه‌ای توسط دستگاه سروو کنترل تحت بارگذاری قرار گرفتند. نتایج حاصل در قالب نمودار تنش-کرنش مورد بررسی قرار گرفت. همچنین با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال، نمودار تغییرات کرنش در تمامی سطح نمونه رسم گردید. نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشد:

۴-۱ مقایسه نتایج FEM و DIC

کانتورهای خروجی مرتبط با پارامترهای کرنش افقی (ϵ_{xx})، کرنش مورب (ϵ_{xy}) و جابجایی افقی (u) با استفاده از دو روش FEM و DIC در شکل ۱۱ مورد بررسی قرار گرفته است. جهت مقایسه بهتر، کانتورها در مقادیر بار نهایی ترسیم شده‌اند. تأثیرپذیری مستقیم روش DIC از شکل نمونه، باعث بروز خطاهایی پس از تخریب سطح می‌شود. این خطاها در پارامترهای



شکل ۱۱- مقایسه‌ی نتایج: (الف) اجزاء محدود، (ب) همبستگی تصاویر دیجیتال

- مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی الیاف فورتا، رابطه عکس با میزان الیاف مورد استفاده دارد. نمونه دارای کمترین مقدار الیاف فورتا، بیشترین مقاومت فشاری در بین نمونه‌های الیافی را دارد.
- الیاف تأثیر کنترل‌کننده‌ای بر روی ترک‌های نمونه‌های تحت فشار دارد به گونه‌ای که باعث کاهش عمق و طول ترک دهانه ترک در این نمونه‌ها شده است. ولی لازم به ذکر است که تعداد ترک‌ها افزایش یافته است.
- نمونه دارای بیشترین الیاف پلیمری، مقاومت فشاری بالاتری نسبت به دیگر نمونه‌های الیافی گروه خود دارد.
- استفاده از الیاف پلی پروپیلن جهت مسلح نمودن بتن باعث کاهش مقاومت فشاری و افزایش کرنش نسبت به نمونه کنترل می‌شود.
- استفاده از الیاف پلی پروپیلن باعث کاهش تردشکنی بتن می‌شود به گونه‌ای که تعداد ترک‌ها افزایش و فاصله و بازشدگی دهانه کاهش پیدا می‌کند.
- با افزایش الیاف فورتا مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته به شدت کاهش می‌یابد.
- میزان جذب انرژی با مقدار الیاف استفاده شده در آزمایش رابطه مستقیم دارد.
- تطبیق نتایج حاصل از روش همبستگی تصاویر دیجیتال با تست فشار، نشان دهنده‌ی قابلیت مفید این روش در بررسی مقادیر جابجایی و کرنش‌ها دارد تا آنجا که با استفاده از DIC، پیش‌بینی‌های خوبی در رابطه با محل وقوع ترک و نحوه گسترش آن به دست آمده است.

properties of concrete. *Materials Journal*, 1992. 88(6): p. 630-643.

[14] Mesbah, H.A., Lachemi, M., and Aitcin, P.-C., Determination of elastic properties of high-performance concrete at early ages. *Materials Journal*, 2002. 99(1): p. 37-41.

[15] Yu, R., Spiesz, P., and Brouwers, H., Energy absorption capacity of a sustainable Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) in quasi-static mode and under high velocity projectile impact. *Cement and Concrete Composites*, 2016. 68: p. 109-122.

[16] Booker, P.M., et al., Investigation on the response of segmented concrete targets to projectile impacts. *International Journal of Impact Engineering*, 2009. 36(7): p. 926-939.

[17] Mehta, P.K., *Concrete. Structure, properties and materials*. 1986.

[18] Bruck, P., Esselman, T., and Fallin, M., Digital image correlation for nuclear. *Nuclear Engineering International*, 2012. 57(693): p. 28-31.

[19] Bruck, H., et al., Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction. *Experimental mechanics*, 1989. 29(3): p. 261-267.

[20] Vendroux, G., and Knauss, W., Submicron deformation field measurements: Part 2. Improved digital image correlation. *Experimental Mechanics*, 1998. 38(2): p. 86-92.

[21] Schmidt, T., Tyson, J., and Galanulis, K., Full-field dynamic displacement and strain measurement using advanced 3d image correlation photogrammetry: part 1. *Experimental Techniques*, 2003. 27(3): p. 47-50.

[22] Schmidt, T., Tyson, J., and Galanulis, K., Full-field dynamic displacement and strain measurement-specific examples using advanced 3D image correlation. *Experimental Techniques*, 2003. 27(4): p. 22-26.

[23] Mott, L., Shaler, S.M., and Groom, L.H., A technique to measure strain distributions in single wood pulp fibers. *Wood and Fiber Science*, 2007. 28(4): p. 429-437.

[24] Muszyński, L., Lagana, R., and Shaler, S., Optical measurements of wood deformations in changing climate. in *Actes du SEM IX International Congress on Experimental Mechanics, tenu à Milwaukee, USA, du. 2002*.

[25] Muszyński, L., Wang, F., and Shaler, S.M., Short-term creep tests on phenol-resorcinol-formaldehyde (PRF) resin undergoing moisture content changes. *Wood and Fiber Science*, 2007. 34(4): p. 612-624.

[26] Muszynski, L., Lopez-Anido, R., and Shaler, S.M., Image correlation analysis applied to

[1] Foti, D., Innovative techniques for concrete reinforcement with polymers. *Construction and Building Materials*, 2016. 112: p. 202-209.

[2] Kosmatka, S.H., W.C. Panarese, and B. Kerkhoff, *Design and control of concrete mixtures*. 2002.

[3] Mehta, P.K., and P.J., Monteiro, *Concrete: microstructure, properties, and materials*. Vol. 3. 2006: McGraw-Hill New York.

[4] Edgington, J., Hannant, D., and Williams, R., *Steel fiber reinforced concrete. Fiber reinforced materials*, The Construction Press, Lancaster, England, 1978: p. 112-128.

[5] Zeiml, M., et al., How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete? *Cement and concrete research*, 2006. 36(5): p. 929-942.

[6] Banthia, N., and Gupta, R., Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. *Cement and concrete Research*, 2006. 36(7): p. 1263-1267.

[7] Zhang, P., and Li, Q.-f., Experiment and study on tensile strength of polypropylene fiber reinforced cement stabilized macadam. *Highway*, 2008. 4: p. 175-179.

[8] Arafa, M., Alqedra, M., and Almassri, H., Effect of Forta-Ferro Fibers on Fresh and Mechanical Properties of Ultra High Performance Self Compacting Concrete. *International Journal of Engineering and Technology Research*, 2013. 1(7): p. 43-47.

[9] Hasan-Nattaj, F., and Nematzadeh, M., The effect of forta-ferro and steel fibers on mechanical properties of high-strength concrete with and without silica fume and nano-silica. *Construction and Building Materials*, 2017. 137: p. 557-572.

[10] Dashti, J., and Nematzadeh, M., Compressive and direct tensile behavior of concrete containing Forta-Ferro fiber and calcium aluminate cement subjected to sulfuric acid attack with optimized design, *Construction and Building Materials*, 2020, 253, 118999

[11] Bhogonea, M.V., and Subramaniam K.V.L., Early-age tensile constitutive relationships for steel and polypropylene fiber reinforced concrete, *Engineering Fracture Mechanics*, 244, 2021, 107556

[12] Guo, H., Jiang, L., Tao, J., Chen, Y., Zheng, Z., Jia, B., Influence of a hybrid combination of steel and polypropylene fibers on concrete toughness, *Construction and Building Materials*, 275, 2021, 122132

[13] Wood, S.L., Evaluation of the long-term

measurement of shear strains in laminated composites. in SEM IX International Congress on Experimental Mechanics. 2000.

[27] Melrose, P.T., Lopez-Anido, R., and Muszynski, L., Elastic properties of sandwich composite panels using 3-D digital image correlation with the hydromat test system. 2004, University of Maine.

[28] Choi, S., and Shah, S., Measurement of deformations on concrete subjected to compression using image correlation. *Experimental Mechanics*, 1997. 37(3): p. 307-313.

[30] Alhozaimy, A.M., Soroushian, P., Mirza, F., Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete and the effects of pozzolanic materials, *Cement and Concrete Composites*, 1996. 18(2): p. 85-92.

Evaluating the effect of Forta and Polypropylene fibers on compressive strength, ductility and energy absorption of cylindrical concrete specimens

Milad Aram Partan

Faculty of Civil Engineering, Hakim Sabzevari University.

Hamid Eskandari

Faculty of Civil Engineering, Hakim Sabzevari University.

Mojtaba Lezgy-Nazargah *

Faculty of civil engineering, Hakim Sabzevari University.

Morteza Gharouni Nik

Faculty of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology.

Abstract

This study is aimed to examine the effect of Forta and polypropylene fibers on compressive behavior, modulus of elasticity, deformation, crack growth pattern, and absorbing energy of concrete materials. The laboratory specimens were made as cylindrical samples of 150 mm height and 100 mm diameter in two groups and 7 mix designs. Group A consists of two mix designs with 0.1 and 0.15 percentages of macrostetic fibers (Forta) with a water to cement ratio of 0.4. Group B specimens include three mixing designs with 0.2, 0.3 and 0.35 percentages of microsatellite fibers (Polypropylene) and with a water to cement ratio of 0.5. Digital Images Correlation (DIC) method has been used for measurement of displacements and strains in concrete specimens while finite element analysis (Abaqus software) has been used for the validation. The obtained results show that the absorbing energy is directly related to the amount of fiber used in the test. The fibers have a controlling effect on the cracks of the specimens so that they reduce the depth and the length of cracks. However, it should be noted that the number of cracks increased. The use of polypropylene fibers as reinforcing material reduced the compressive strength of the concrete specimens while it increased the ductility of specimens.

Keywords: Modulus of elasticity, Ductility, Absorbed Energy, FORTA and Polypropylene Polymer Fibers, Correlation of Digital Images.

* Corresponding Author: m.lezgy@hsu.ac.ir

