

بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های هیبریدی چوب-پلاستیک بر پایه پلی‌اتیلن/پلی‌آمید و الیاف تقویت‌کننده کربن

محمد شعا

کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک- ساخت و تولید، موسسه آموزش عالی پارسیان، قزوین، ایران،
mohammad.shoaa@gmail.com

پیمان شاهی*

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، p.shahi@uma.ac.ir

محمد رضا ابراهیمیان

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، موسسه آموزش عالی کار، قزوین، ایران، s.hedayati@modares.ac.ir

سید کاوه هدایتی

کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک- ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران،
m.ebrahimian@kar.ac.ir

چکیده

امروزه استفاده از کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک به دلیل مزایای خاص در کاربردهای مختلفی گسترش یافته‌است. با این وجود کاربرد آن‌ها در تولید قطعات ساختاری به دلیل ضعف در خواص مکانیکی آن‌ها با محدودیت روبرو است. در این پژوهش از روش تولید کامپوزیت‌های میکروفایبری جهت تقویت استفاده شد که در آن پلی‌آمید (PA) به عنوان فاز دوم، مورفولوژی میکروفایبر را در زمینه اصلی پلی‌اتیلن (PE) در شرایط فرآیندی خاص با کشش رشته خروجی از دهانه اکسترودر تشکیل می‌دهد. سپس در مرحله دوم تولید، قطعات نهایی در دمای زیر دمای ذوب فاز PA برای حفظ مورفولوژی میکروفایبر و اثر تقویت‌کننده قالب‌گیری شدند. زمینه اصلی پلی‌اتیلن (PE) بوده و پلی‌آمید (PA) به میزان ۲۰ درصد وزنی به‌عنوان فاز دوم استفاده شده‌است. نسبت کشش در سه سطح ۱:۱، ۱:۳ و ۱:۵ متغییر در نظر گرفته شد. میزان ذرات چوب و الیاف کربن نیز به ترتیب برابر با ۲۰ و ۱۰ درصد وزنی است. بدست‌آمده، با افزایش نسبت کشش، استحکام کششی تا ۲۰٪ افزایش یافته است. همچنین استحکام کششی کامپوزیت چوب - پلاستیک هیبریدی با پلی‌آمید و الیاف کربن نسبت به کامپوزیت پلی‌اتیلن-چوب افزایش ۱۴ درصدی داشته است.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت چوب پلاستیک - زمینه پلی‌اتیلن / پلی‌آمید - الیاف کربن - کامپوزیت‌های تقویت شده هیبریدی - میکروفایبر.

Experimental Investigation on Mechanical Properties of Wood Plastic Hybrid Campsites based on Polyethylene/Polyamide and Reinforced with Carbon Fibers

M. Shoa

Department of Mechanical Engineering, Parsian Higher Education Institute, Qazvin, Iran

P. Shahi

Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

M. R. Ebrahimian

Faculty of Mechanical Engineering, Kar Higher Education Institute, Qazvin, Iran

S. K. Hedayati

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract

Nowadays, using wood-plastic composites has been growing in different applications as they provide special advantages. However, their application in structural parts was hindered due to poor mechanical properties. In this study, microfibrillation method was used for reinforcement, wherein the polyamide (PA) as the second phase forms microfiber morphology in the main polyethylene (PE) matrix, under special process conditions by stretching the outlet filament from the extruder orifice. Then, in the second production step, the final parts were injection molded at the temperature below the melting temperature of the PA phase to preserve the microfiber morphology and reinforcing effect. Polyethylene (PE) was used as the main matrix and 20 wt.% of polyamide(PA) was used as the second phase. Stretching ratios were varied at three levels of 1:1, 1:3 and 1:5. Wood and carbon fibers contents were 20 wt.% and 10 wt.%, respectively. Based on the results, with increasing stretching ratio, tensile strength increases up to 20%. Also, the tensile strength of hybrid wood-plastic composite with polyamide and carbon fiber has increased by 14% compared to polyethylene-wood composite.

Keywords: Wood Plastic Composite - Polyethylene / Polyamide Matrix - Carbon Fiber - Hybrid Reinforced Composites - Micro Fibers.

گسترش سهم بازار شده است. به‌طور خاص، WPCها کامپوزیت‌هایی حاوی یک جزء چوب به شکل ذرات (ذرات چوب / آرد چوب) و یک ماتریس پلیمر هستند. موارد مصرف این کامپوزیت‌ها شامل کاربردهای ساختاری مانند پالت و غیر ساختاری، دکوراسیون در فضای باز است.

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک (WPCs) محصولی است که در طی ۴۰ سال گذشته در حال توسعه بوده و منجر به افزایش کاربردها و

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: p.shahi@uma.ac.ir

WPCها گروهی از مواد و محصولات کامپوزیتی هستند که از دو بخش اصلی و مجزا تشکیل شده‌اند. یکی از این مواد زمینه‌ای است که اجزای مختلف را در کنار هم نگه داشته و آنها را به هم متصل کرده و انتقال بار را بین آنها فراهم می‌کند. بخش اصلی دیگر جزء چوب است. اجزای چوب می‌تواند هر شکل و اندازه‌ای داشته و به عنوان پرکننده و یا تقویت‌کننده کامپوزیت عمل کند. چوب نسبت به پرکننده‌های سنتی دارای مزایایی شامل هزینه کمتر، نسبت بالاتر استحکام به وزن، چگالی کم بوده و می‌تواند مقدار پلیمر مورد استفاده را کاهش داده و به عنوان یک ماده تجدید پذیر مورد استفاده قرار گیرد [۱].

در سال‌های اخیر استفاده از کامپوزیت‌های چوب - پلاستیک در کاربردهای مختلفی رشد و گسترش داشته است. مزایای این کامپوزیت‌ها را می‌توان در عدم نفوذپذیری در برابر آب و رطوبت و حشرات، امکان استفاده از ضایعات چوب و ضایعات پلاستیک در ترکیب وزنی و تولید آنها، امکان بازیافت خود کامپوزیت‌ها، سفتی بالاتر نسبت به پلاستیک و ... دانست [۲]. با این وجود کاربرد این کامپوزیت‌ها در تولید قطعات ساختاری مانند پالت به دلیل ضعف در خواص مکانیکی این کامپوزیت‌ها با مشکل روبرو می‌باشد. تمرکز محققین این عرصه، در سال‌ها اخیر بر روی بهبود مشخصه‌های کششی، خمشی، ضربه، خستگی و خزش در دمای محیط و دماهای بالاتر با توجه به کارکرد بوده است [۳]. در این خصوص، استفاده از الیاف تقویتی طبیعی و غیرطبیعی موردعلاقه برخی محققین بوده است. از جمله می‌توان به استفاده از الیاف شیشه، الیاف کربن، الیاف سلولزی اشاره کرد که در کنار الیاف چوب در زمینه استفاده شده و به عنوان کامپوزیت‌های هیبریدی معرفی می‌شوند [۴، ۵]. روش دیگر، استفاده از زمینه پلیمری دیگری است که مشخصه‌های مکانیکی بالاتری داشته باشد. ماتریس پلیمری از طرفی با محدودیت دمای شروع تخریب الیاف چوب مواجه است؛ بنابراین استفاده از پلیمرهای با دمای فرآیند کمتر از 200°C میسر خواهد بود که می‌توان به پلی‌اتیلن (PE) و پلی‌پروپیلن (PP) اشاره کرد [۶]. پلی‌آمید ماده مهندسی با ویژگی‌های مهندسی بسیار ممتاز است که استفاده از انواع مختلف ۶ و ۶۶ متداول است. در سال‌های اخیر گریدهای این ماده تحت عناوین PA11 و PA12 با مشخصه‌های خاصی معرفی شده‌اند. دمای ذوب آن کمتر از 200°C بوده و استحکام آن بالاتر از PE می‌باشد. از محدودیت‌های این ماده می‌توان به هزینه بالای آن اشاره کرد؛ بنابراین، استفاده از آن با درصد‌های وزنی پایین‌تر در ترکیب مواد قابل بررسی است. یکی از روش‌های تقویت زمینه پلیمری، تولید کامپوزیت‌های میکروفایبری عنوان شده است. تحت شرایط فرآیندی خاص با اعمال کشش سرد یا گرم مناسب در دهانه اکسترودر، تشکیل میکرو فایبر در زمینه اصلی تشکیل می‌شود. تشکیل میکرو فایبر در صورت برهمکنش و سازگاری مناسب با فاز زمینه موجب بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت تولیدی خواهد شد. در مقایسه با تقویت‌کننده‌های متداول مانند الیاف شیشه، کربن و الیاف طبیعی، چندین مزیت برای این روش عنوان شده است. مشکلات مربوط به توزیع مناسب الیاف تقویتی در این روش وجود ندارد. علاوه بر آن، در مرحله بازیافت نیاز به جداسازی الیاف وجود نداشته و بازیافت کامپوزیت‌های میکروفایبری با سهولت بیشتری صورت می‌گیرد. همچنین در تولید این کامپوزیت‌های رشته‌ای نیاز به تجهیزات خاصی نمی‌باشد.

در تحقیقی در سال ۲۰۰۹، لیو و همکارانش به تولید و بررسی

خواص کامپوزیت‌های الیاف موز با زمینه HDPE/PA6 (80/20) در حضور سازگار کننده‌های مختلف پرداختند. در تحقیق آنها، حضور PA به عنوان میکروفایبرهای تقویتی عنوان نشده است برای درصد وزنی ۴۰ از الیاف طبیعی در ترکیب وزنی، استفاده از PA6 موجب افزایش استحکام خمشی از ۴۴MPa به ۵۱ گزارش شده است. در حالی که استحکام کششی فقط از ۳۱ MPa به ۳۳ تغییر داشته است. برای درصد وزنی الیاف چوب حدود ۵۰٪، نسبت MAPE به چوب ۷/۵ درصد، زمینه پلیمری HDPE/PA6/SEBS-g-MA (80/20/6)، استحکام خمشی نهایی ۵۲ MPa استحکام کششی ۳۴ MPa و استحکام به ضربه ۵/۶ KJ/m2 مشاهده گردید [۷].

لیو و همکاران ایشان در سال ۲۰۱۰ به بررسی تولید و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های میکروفایبری PA/PE پر شده با الیاف چوب پرداختند. نسبت وزنی اجزای زمینه پلیمری HDPE/PA/MAPE (70/30/3) بوده است. در مرحله اختلاط چوب با پلیمر، درصد وزنی چوب ۳۰ بوده و از ۱ درصد وزنی MAPE نیز استفاده شده است. در مرحله دوم اکستروژن، دمای بارل در محدوده $160 - 175^{\circ}\text{C}$ بوده است. مطابق نتایج آنها، در شرایطی که استحکام کششی و خمشی برای HDPE به ترتیب ۱۸ و ۱۹ مگاپاسکال بوده، برای کامپوزیت‌های میکروفایبری HDPE/PA به ۲۴ و ۳۱ مگاپاسکال افزایش داشته است. برای نمونه‌های دارای ۳۰ درصد وزنی چوب، استحکام کششی، خمشی و ضربه (برای نمونه شکافدار) به ترتیب ۳۰ MPa، $2/3 \text{ kJ/m}$ و ۵۰ MPa بدست آمده است. در حالی که برای کامپوزیت‌های بدون پلی‌آمید و غیر میکروفایبری، این مقادیر به ترتیب ۲۶ MPa، $8/3 \text{ kJ/m}^2$ و ۳۹ MPa بوده است. همچنین نتایج آنها بیانگر بهبود رفتار خزشی نمونه‌های میکروفایبری نسبت به HDPE خالص بوده است و با اضافه کردن چوب به ترکیب وزنی، نمونه رفتار خزشی مناسبی داشته است [۸].

در سال ۲۰۱۳ حمید و همکاران ایشان به بررسی خواص آمیخته PA6/HDPE (۳۰/۷۰) و اثر سازگار کننده MAPE پرداختند. مطابق نتایج آنها مدول و استحکام کششی و خمشی بیشینه و کمینه به ترتیب در حالت استفاده از ۲ و ۸ درصد وزنی از MAPE مشاهده گردید. در صورتی که کرنش شکست با افزایش درصد وزنی MAPE افزایش داشته و در میزان ۸ درصد وزنی بیشتر از PE و PA6 و برابر ۲۶٪ بوده است. کمینه کرنش شکست در درصد وزنی ۲ از MAPE مشاهده گردیده است. در تحقیق آنها با توجه به درصد وزنی بالاتر از PA6 و شاخص جریان مذاب پائین آن، می‌توان عنوان کرد که HDPE فاز پخش شده بوده است [۹].

در تحقیقی در سال ۲۰۱۶، کلنار و همکارانش به بررسی کامپوزیت‌های میکروفایبری HDPE/PA6 پرداختند. درصد وزنی PA در ترکیب وزنی ۲۰ بوده و برای HDPE و عامل سازگار کننده MAHPE (در صورت استفاده ۵ درصد وزنی) ۸۰ درصد وزنی بوده است. آنها برای HDPE/PA/PEGMA[در نسبت کشش ۷، استحکام 51 MPa را گزارش کردند که نسبت به HDPE خالص، ۴۶٪ افزایش داشته است. مطابق نتایج آنها عامل سازگار کننده در نسبت کشش ۱ اثر منفی بر استحکام کششی داشته است. استفاده از ۵ درصد وزنی عامل سازگار کننده در نسبت کشش ۷، موجب افزایش استحکام از ۴۵ MPa به ۵۱ MPa (۱۳ درصد) گردیده است [۱۰].

در سال ۲۰۱۸، کلنار و همکارانش به بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های میکروفایبری HDPE/PA با نسبت وزنی (۸۰/۲۰)

درصد وزنی و ترکیب الیاف مختلف خواص مکانیکی، بهبود یافته و تغییرات قابل توجهی در قطعه تولیدی ایجاد می گردد. درصد و نوع ماده سازگار کننده نیز از عوامل اثرگذار بر خواص مکانیکی نمونه های تولیدی بوده است. چهار متغیر نوع الیاف، میزان تغییر درصد های وزنی، دمای نواحی اکسترودر و دمای تزریق با توجه به پژوهش های پیشین انتخاب شده و در طول آزمایش ثابت در نظر گرفته شده است. در پژوهش های صورت گرفته اثر تقویت سازی با الیاف کربن و مقایسه آن با تقویت سازی با تکنیک میکرو فایبر مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق به بررسی جامع اثر نسبت کشش های مختلف در تشکیل میکرو فایبرها، اثر هیبریداسیون همزمان الیاف کربن و تکنیک میکرو فایبر بر کامپوزیت نهایی مورد بحث قرار گرفته است.

۱-۱- روش انجام آزمایش

۱-۲- مواد و تجهیزات

در این پژوهش از پلی اتیلن سنگین با نام تجاری PE100 ساخت پتروشیمی جم استفاده شده است. گرانول پلی آمید (PA) گرید اکستروژن ساخت شرکت اپسون ترکیه (Epson) به عنوان ماده افزودنی به زمینه HDPE استفاده شده است. مالنیک پلی اتیلن ساخت شرکت آریا پلیمر به عنوان همگن کننده ترکیب HDPE و PA در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته شده است. الیاف کربن استفاده شده از نوع الیاف خرد شده بلند با طول تقریبی ۶ میلی متر هست. الیاف چوب مصرف شده از نوع چوب راش که به وسیله الک ۶۰ میکرون، مش بندی شده است.

قبل از استفاده الیاف و پلیمرها، رطوبت گیری به مدت ۱۰ ساعت در دمای ۸۰ درجه سلسیوس در داخل خشک کن صورت گرفت. در این تحقیق برای اختلاط پلیمر و الیاف از اکسترودر دو پیچه همسو گرد برند Coperion با مشخصات فنی $L/D=40$ و $D=25\text{mm}$ $L=1000\text{mm}$ استفاده شده است.

دمای نواحی مختلف اکسترودر برای اختلاط PE و PA به ترتیب ناحیه اول ۲۰۰، ناحیه دوم ۲۲۰، ناحیه سوم ۲۵۰ و ناحیه چهارم (قالب) ۱۹۰ درجه سانتی گراد بوده است و دور اکسترودر ۴۰ rpm در نظر گرفته شد.

برای ترکیب الیاف با ماتریس پلیمری به دلیل وجود چوب و میکرو فایبرهای تشکیل شده PA، دمای نواحی مختلف اکسترودر به ترتیب ناحیه اول ۱۵۰ دوم ۱۶۰ سوم ۱۷۰ و ناحیه چهارم ۱۶۰ درجه سانتی گراد بوده است و دور اکسترودر ۴۰ rpm در نظر گرفته شد.

برای تولید نمونه ها از دستگاه تزریق پلاستیک با فشار ۱۲۰ تن، ۱۸۰ گرم ساخت شرکت پایا استفاده شده است. برای تولید نمونه های استاندارد آزمون کشش از قالب تزریق پلاستیک قطعات دمبلی مطابق استاندارد ASTM D638 با طول ۱۶۵ mm و عرض ۱۰/۵mm و ضخامت ۵/۳mm استفاده شد (جهت اطمینان از نتایج حاصل شده هر آزمایش ۵ بار تکرار شده است). دستگاه سنناتمد STM-20 جهت انجام آزمون های کشش استفاده شده است. ظرفیت نیروسنج مورد استفاده ۲۰ کیلو نیوتن بوده و نرخ کشش نمونه ها برابر با ۵ میلی متر بر دقیقه در نظر گرفته شد.

پرداختند. مطابق نتایج آنها، استحکام کششی کامپوزیت تولیدی در نسبت کشش ۷ نسبت به HDPE خالص از ۳۲MPa به ۴۵MPa افزایش داشته است. نکته جالب اینکه استحکام آمیخته در نسبت کشش ۰۱، نسبت به HDPE خالص پایین تر گزارش شده است. آنها با استفاده از مستریج PA66 با ۱٪ وزنی از نانو صفحات گرافیت در ترکیب وزنی HDPE، افزایش استحکام کششی تا ۵۷ مگاپاسکال را مشاهده کردند. استحکام PA66 استفاده شده در تحقیق آنها ۷۶MPa بوده و این اعداد استحکام در شرایطی حاصل شده است که فقط ۲۰٪ وزنی از این ماده در ترکیب وزنی HDPE استفاده شده است. تمرکز کار آنها بر روی استفاده از عامل سازگار کننده نبوده و بر خلاف نتایج برخی تحقیق ها، آنها کاهش در استحکام به ضربه برای کامپوزیت میکرو فایبری نسبت به HDPE خالص مشاهده کردند [۱۱].

در سال ۲۰۲۲، سانگ و همکارانش به بررسی میکرو فایبرهای تشکیل شده در زمینه پلیمر PMMA پرداختند. ذرات کروی پلی استایرن به پلیمر زمینه اضافه شده و با استفاده از کشش ایجاد شده در خروجی دستگاه اکستروژن میکرو فایبرهای تشکیل شده و اثر آن بر خواص مکانیکی PMMA را مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج بدست آمده میکرو فایبرهای تشکیل شده در راستای کشش رشته های خروجی تشکیل شده و استحکام کششی و کرنش شکست PMMA را به ترتیب ۲۱ و ۲۲۰ درصد افزایش داده است [۱۲].

در سال ۲۰۲۱، شی و همکارانش به بررسی تشکیل میکرو فایبر PA و PTFE در زمینه PPS پرداختند. سه ماده مورد استفاده با استفاده از مخلوط کن گرمایی مخلوط شده و با تنظیم متغیرهای دستگاه تزریق به صورت دیواره نازک تزریق شده و خواص آن مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج بدست آمده، ضریب اصطکاک نمونه تزریق شده با این روش ۲۷ درصد کمتر از ضریب اصطکاک نمونه PPS بوده است [۱۳].

در سال ۲۰۲۰، وانگ و همکارانش تشکیل میکرو فایبرهای PA6 در زمینه پلیمری PP را مورد بررسی قرار دادند. این دو ماده با استفاده از دستگاه اکستروژن دو ماردون ترکیب شده و سپس با نرخ کشش های صفر، ۰۰/۵، ۰۱/۵، ۰۲/۵ و ۰۳/۵ متر بر دقیقه میکرو فایبرهای تشکیل شده را مورد بررسی تشکیل دادند. با افزایش نرخ کشش میکرو فایبرهای تشکیل شده نازک تر شدند. حضور این میکرو فایبرها در زمینه PP موجب تغییر در درصد تبلور شده به نحوی که با افزایش میزان کشش نرخ تشکیل بلورها افزایش یافته و ماده در زمان کمتری به تبلور کامل می رسد [۱۴].

در سال ۲۰۲۱، ژیانگ و همکارانش به بررسی میکرو فایبرهای تشکیل شده PLA در اثر تبلور مجدد و کشش بلورهای تشکیل شده در آن پرداختند. در این پژوهش نمونه PLA با فرآیند پرس گرم ساخته شده و نمونه به سرعت خنک شد. در ادامه با عملیات حرارتی نمونه در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس ساختار اسفرولیت ها تشکیل شده که با اعمال فشار و نازک کردن نمونه این ساختار شکسته شده و تشکیل میکرو فایبرها را می دهند. مطابق نتایج این تحقیق، استحکام به ضربه افزایش ۷/۴ برابری داشته است. استحکام کششی و کرنش شکست نمونه تقویت شده با تشکیل میکرو فایبر به ترتیب برابر با ۱۴۸/۴ مگاپاسکال و ۱۰۷/۷ درصد بوده که در مقایسه با PLA تقویت نشده افزایش ۱۱۰ و ۱۰۴۵ درصدی را به همراه داشته است [۱۵].

نتایج به دست آمده در پژوهش های گذشته نشان داد که با تغییر در

۳- طراحی آزمایش

در این تحقیق، برای ترکیب مواد و ساخت کامپوزیت‌ها، ترکیب پلیمری زمینه (پلی‌اتیلن / پلی‌آمید / سازگار کننده) به ترتیب (۲/۲۰/۸۰) و الیاف کربن و چوب به ترتیب ۱۰ و ۲۰ در نظر گرفته شده است. جدول ۱ درصد و مقادیر مختلفی از ترکیب‌های پلی‌اتیلن، پلی‌آمید، الیاف کربن و الیاف چوب را نشان می‌دهد. برای سادگی در شناسایی ترکیب‌ها از کدهایی استفاده شده است و برای پلی‌اتیلن (PE)، پلی‌آمید (A)، الیاف کربن (C) و چوب (W) EA1 نسبت کشش ۱ به ۱، EA2 نسبت کشش ۱ به ۳ و EA3 نسبت کشش ۱ به ۵ می‌باشند.

جدول ۱- کد ترکیب کامپوزیت‌ها

کد ترکیب‌ها	درصد پلی‌آمید (wt%)	درصد وزنی الیاف چوب (wt%)	درصد وزنی الیاف کربن (wt%)
PE	۰	۰	۰
EA1	۲۰	۰	۰
EA2	۲۰	۰	۰
EA3	۲۰	۰	۰
EC	۰	۰	۱۰
EW	۰	۲۰	۰
EAW1	۲۰	۲۰	۰
EAW2	۲۰	۲۰	۰
EAW3	۲۰	۲۰	۰
EAC1	۲۰	۰	۱۰
EAC2	۲۰	۰	۱۰
EAC3	۲۰	۰	۱۰
EAWC1	۲۰	۲۰	۱۰
EAWC2	۲۰	۲۰	۱۰
EAWC3	۲۰	۲۰	۱۰

تمامی نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شده است و در جدول ۲ و جدول ۳ آورده شده‌است. شکل ۱ نمونه‌های کامپوزیتی تزریق شده را نشان می‌دهد. دمای تزریق جهت جلوگیری از ذوب مجدد PA و تخریب الیاف ایجاد شده از زمینه پایین‌تر از دمای ذوب PA انتخاب شد.

جدول ۲- پارامترهای تزریق برای تولید نمونه‌ها

پارامترها	تزریق	نگهداری	تزریق	خلاء	خنک کاری
فشار (bar)	۸۵	۹۵	۴۵	۵۰	-
زمان (t)	۳	۶	-	-	۲۰
فشار نگهداری (bar)	-	-	۱۵	-	-

جدول ۳- دما در نواحی مختلف سیلندر دستگاه تزریق

سر نازل	ناحیه اول	ناحیه دوم	ناحیه سوم
۱۷۰	۱۸۰	۱۸۵	۱۹۰

دما در نواحی مختلف ماردون (سانتی‌گراد)



شکل ۱- نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده برای انجام آزمون کشش

۲- نتایج

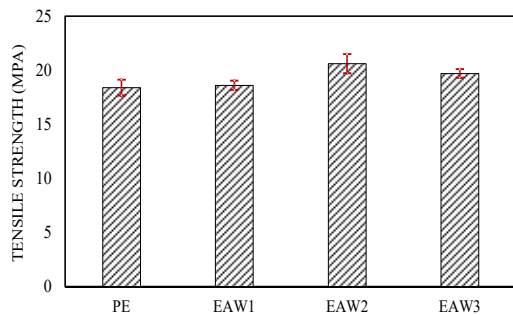
۲-۱- استحکام کششی

مطابق شکل ۲، استحکام کششی نمونه PE خالص برابر با ۱۸/۴ مگاپاسگال بوده و با افزودن ۲۰ درصد ذرات چوب استحکام تغییر قابل توجهی نداشته ولی حضور ۱۰ درصدی الیاف کربن در زمینه PE افزایش ۲۶/۶ درصدی استحکام را به همراه داشته است به گونه‌ای که استحکام کششی نمونه‌های EC و EW به ترتیب برابر با ۲۳/۳ و ۱۹/۲ مگاپاسگال می‌باشد.

در مرحله تولید نمونه‌ها با ترکیب‌های وزنی موردنظر، ابتدا گرانول پلی‌اتیلن و پلی‌آمید و عامل سازگار کننده (مالنیک پلی‌اتیلن) با درصد وزنی (۲/۲۰/۸۰) ترکیب گردید و رشته خروجی از قالب اکستروژن با نسبت‌های ۱/۱،۵/۱،۳/۱ (نسبت اندازه خروجی قالب به رشته به‌دست‌آمده) کشیده شده و سپس بلافاصله در آب، خنک گردیدند و در نهایت گرانول‌سازی برای استفاده در مرحله بعد صورت گرفت.

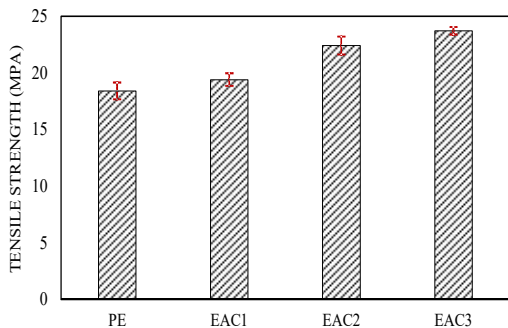
در مرحله دوم، اختلاط گرانول پلیمری تولیدشده در مرحله اول به همراه الیاف کربن و چوب با درصد وزنی مورد نظر توسط اکسترودر صورت گرفت و گرانول‌سازی صورت گرفت. در نهایت ترکیب به‌دست‌آمده برای تولید نمونه‌های استاندارد آزمون کشش توسط دستگاه قالب‌گیری تزریق پلاستیک استفاده گردید.

تمامی متغیرهای فرآیند تزریق پلاستیک شامل دما، فشار تزریق، زمان تزریق، فشار نگهداری، زمان نگهداری و بارگیری مواد در تولید



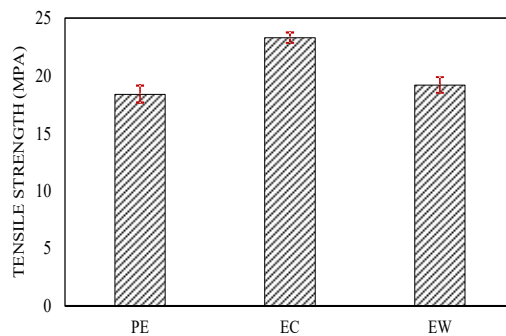
شکل ۴- استحکام کششی PE و اثر افزودن PA و ذرات چوب با نسبت کشش‌های مختلف

شکل ۵ میزان استحکام کششی نمونه‌های EAC1، EAC2 و EAC3 به ترتیب برابر با ۱۹/۴، ۲۲/۴ و ۲۳/۷ مگاپاسگال است. طبق نتایج به دست آمده افزودن الیاف کربن اثر افزایش دهنده PA در نسبت‌های کشش مختلف را افزایش داده و اثر افزایش هر دو میزان استحکام کششی این نمونه‌ها را افزایش داده است. به‌عنوان مثال برای نمونه EAC3 میزان استحکام کششی برابر با ۲۳/۷ مگاپاسگال بوده که در نمونه مشابه EA3 بدون الیاف کربن این مقدار برابر با ۲۲/۱ مگاپاسگال بوده که افزایش ۷ درصدی استحکام را به همراه داشته است؛ و برای نمونه‌های EAC1 و EAC2 این افزایش در مقایسه با نمونه‌های مشابه بدون الیاف کربن و با حضور PA به ترتیب برابر با ۵ و ۷ درصد است. بیشینه اثر افزایش PA و الیاف کربن در مقایسه با PE خالص برابر با ۲۸/۸ درصد است.

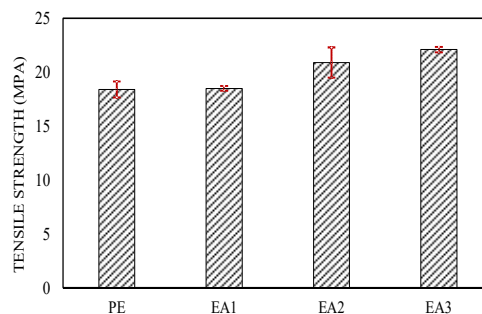


شکل ۵- استحکام کششی PE و اثر افزودن PA و الیاف کربن با نسبت کشش‌های مختلف

مطابق شکل ۶ میزان استحکام کششی نمونه‌های EAWC1، EAWC2 و EAWC3 به ترتیب برابر با ۱۹/۲، ۲۱/۳ و ۲۱/۷ مگاپاسگال است. در این نمونه‌ها PA و الیاف کربن اثر افزایشی بر استحکام کششی داشته درحالی‌که ذرات چوب اضافه شده باعث کاهش استحکام می‌شود. در نتیجه استحکام کششی این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های حاوی PA و الیاف کربن به دلیل حضور ذرات چوب کاهش پیدا کرده است. به‌عنوان مثال استحکام کششی نمونه‌های EAWC1، EAWC2 و EAWC3 در مقایسه با نمونه‌های مشابه بدون ذرات چوب به ترتیب کاهش ۱، ۴ و ۸ درصدی را داشته است. در نهایت اثر تجمعی این سه افزودنی بر



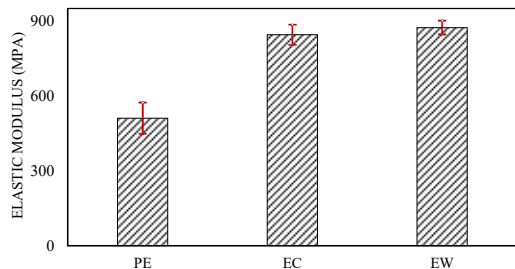
شکل ۲- استحکام کششی PE و اثر افزودن الیاف کربن و ذرات چوب



شکل ۳- استحکام کششی PE و اثر افزودن PA با نسبت کشش‌های مختلف

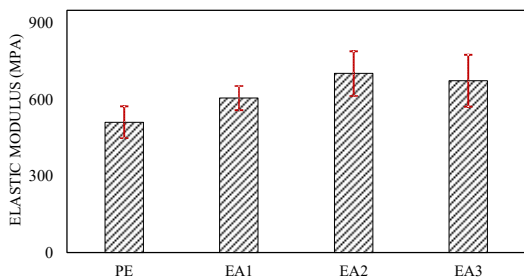
مطابق شکل ۳، با افزایش ۲۰ درصد وزنی PA به PE در نسبت کشش ۱:۱ تغییری در استحکام کششی مشاهده نشده است، ولی با افزایش نسبت کشش استحکام کششی افزایش یافته است. استحکام کششی نمونه‌های EA1، EA2 و EA3 به ترتیب برابر با ۱۸/۵، ۲۰/۹ و ۲۲/۱ مگاپاسگال است. با تغییر نسبت کشش از ۱:۱ به ۱:۳ استحکام کششی افزایش ۱۲/۹ درصدی داشته و در نسبت کشش ۱:۵ استحکام کششی نسبت به نمونه با نسبت کشش ۱:۱ افزایش ۱۹/۵ درصدی دارد. در نهایت با افزایش ۲۰ درصد وزنی PA به PE و کشش این ترکیب با نسبت ۱:۵ میزان استحکام کششی به مقدار ۲۰ درصد افزایش پیدا کرده است. افزایش استحکام کششی با افزایش نسبت کشش را می‌توان به تشکیل میکروفایب PA در زمینه PE نسبت داد [۱۵]. استحکام کششی نمونه EC نسبت به نمونه با نسبت کشش ۱:۵ اختلاف ۵ درصدی دارد.

شکل ۴، میزان استحکام کششی نمونه‌های EAW1، EAW2 و EAW3 به ترتیب برابر با ۱۸/۶، ۲۰/۶ و ۱۹/۶ مگاپاسگال است. طبق نتایج به دست آمده افزودن ذرات چوب اثر افزایش دهنده PA در نسبت‌های کشش مختلف را کاهش داده و میزان استحکام کششی این نمونه‌های کاهش پیدا کرده است. به‌عنوان مثال برای نمونه EAW3 میزان استحکام کششی برابر با ۱۹/۶ مگاپاسگال بوده که در نمونه مشابه EA3 بدون ذرات چوب این مقدار برابر با ۲۲/۱ مگاپاسگال بوده که کاهش ۱۱ درصدی استحکام را به همراه داشته است؛ اما همچنان این مقدار بالاتر از نمونه PE خالص بوده و افزایش ۶/۵ درصدی استحکام را به همراه داشته است.



شکل ۸- مدول الاستیسیته PE و اثر افزودن الیاف کربن و ذرات چوب

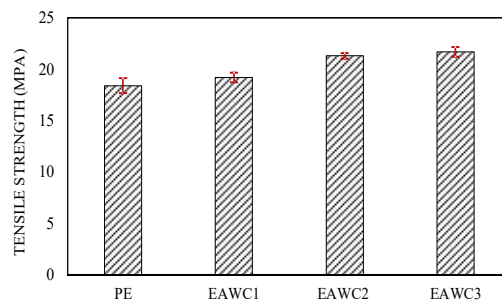
مطابق شکل ۹، با افزایش ۲۰ درصد وزنی PA به PE در نسبت کشش ۱:۱ مشابه تغییرات استحکام کششی اثری بر مدول یانگ دیده نمی‌شود و با افزایش نسبت کشش در حین فرآیند، مدول الاستیسیته افزایش یافته است. مدول الاستیسیته نمونه‌های EA1، EA2 و EA3 به ترتیب برابر با ۶۰۶، ۷۰۲ و ۶۷۴ مگاپاسگال است. با تغییر نسبت کشش از ۱:۱ به ۱:۳ مدول الاستیسیته افزایش ۱۵/۸ درصدی داشته و با تغییر این نسبت به ۱:۵ نیز مدول الاستیسیته افزایش ۱۱/۲ درصدی دارد. در نهایت با افزایش ۲۰ درصد وزنی PA به PE و کشش این ترکیب با نسبت ۱:۵ میزان مدول الاستیسیته به مقدار ۳۱/۹ درصد افزایش پیدا کرده است.



شکل ۹- مدول الاستیسیته PE و اثر افزودن پلی آمید با نسبت کشش‌های مختلف

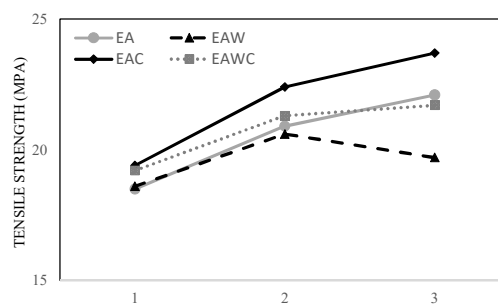
شکل ۱۰، میزان مدول الاستیسیته نمونه‌های EAW1، EAW2 و EAW3 به ترتیب برابر با ۶۱۵، ۷۱۰ و ۷۵۵ مگاپاسگال است. طبق نتایج به دست آمده افزودن ذرات چوب اثر افزایش PA در نسبت‌های کشش مختلف را افزایش داده و میزان مدول الاستیسیته این نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است. به عنوان مثال برای نمونه EAW3 میزان مدول الاستیسیته برابر با ۷۵۵ مگاپاسگال بوده که در نمونه مشابه EA3 بدون ذرات چوب این مقدار برابر با ۶۷۴ مگاپاسگال بوده که افزایش ۱۲ درصدی مدول را به همراه داشته است. این مقدار بالاتر از نمونه PE خالص بوده و افزایش ۴۷/۷ درصدی مدول را به همراه داشته است.

استحکام کششی نمونه‌های PE خالص در نسبت کشش‌های مختلف به ترتیب استحکام را به میزان ۱۵/۷، ۱۸ و ۱۸ درصد افزایش داده است.



شکل ۶- استحکام کششی PE و اثر افزودن PA، ذرات چوب و الیاف کربن با نسبت کشش‌های مختلف

شکل ۷ روند کلی تغییرات استحکام کششی نمونه‌های تزریق شده در حضور PA، ذرات چوب و الیاف کربن را با نسبت‌های کشش مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۷- روند کلی تغییرات استحکام کششی نمونه‌های تزریق شده با سه افزودنی PA، ذرات چوب و الیاف کربن را با نسبت‌های کشش مختلف

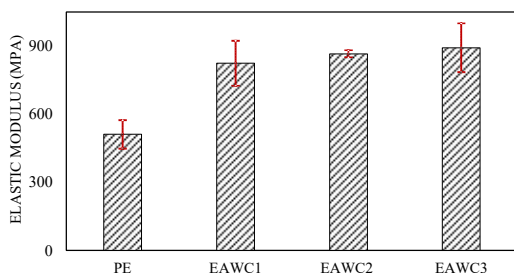
۲-۲- مدول کششی

مطابق شکل ۸ افزودن ذرات چوب و الیاف کربن مدول الاستیسیته نمونه‌های PE خالص را افزایش داده است. مدول الاستیسیته نمونه‌های PE، EC و EW به ترتیب برابر با ۵۱۱، ۸۴۵ و ۸۷۴ مگاپاسگال بوده است؛ بنابراین افزایش ۲۰ درصدی ذرات چوب، مدول الاستیسیته را به میزان ۶۵ درصد افزایش داده و الیاف کربن به مقدار ۱۰ درصد نیز مدول را ۷۱ درصد افزایش داده است.

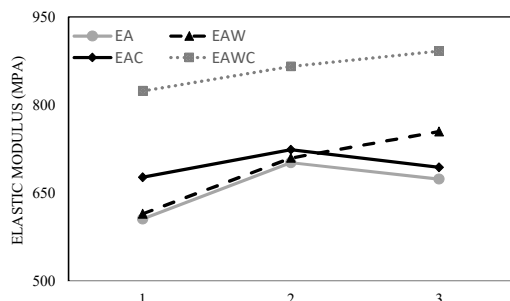
شکل ۱۳ روند کلی تغییرات مدول الاستیسیته نمونه‌های تزریق شده با سه افزودنی PA، ذرات چوب و الیاف کربن را با نسبت‌های کشش مختلف را نشان می‌دهد.

۳-۲- نمودار نیرو-جابجایی

نمودار نیرو جابجایی حاصل از آزمون کشش برای نمونه‌های مختلف کامپوزیتی در حضور PA، الیاف کربن و ذرات چوب و ترکیبی از این مواد در شکل‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ آورده شده است. مطابق شکل ۱۴ با افزودن

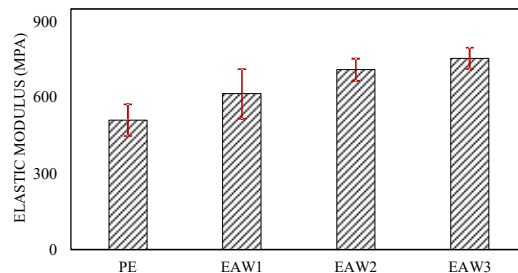


شکل ۱۴-مدول الاستیسیته PE و اثر افزودن PA، ذرات چوب و الیاف کربن با نسبت کشش‌های مختلف



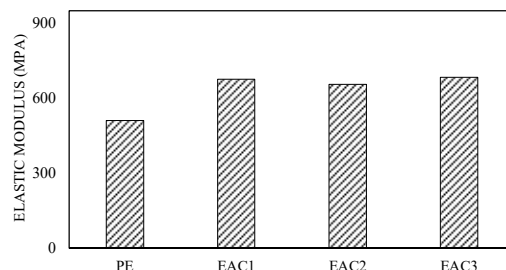
شکل ۱۳- روند کلی تغییرات استحکام کششی نمونه‌های تزریق شده با سه افزودنی PA، ذرات چوب و الیاف کربن را با نسبت‌های کشش

ذرات چوب و الیاف کربن شیب نمودار ناحیه خطی افزایش پیدا کرده و میزان استحکام نهایی تسلیم نمونه نیز افزایش پیدا کرده است. در مقابل میزان کرنش شکست نمونه‌ها با افزودن این دو کاهش پیدا کرده است. در شکل ۱۵ نیز اثر کاهش افزودن ذرات چوب بر کرنش شکست نمونه‌ها قابل مشاهده است. مطابق نتایج به دست آمده افزودن ذرات چوب کرنش شکست نمونه‌ها را کاهش داده است. در نهایت در شکل ۱۶ اثر تجمعی سه افزودنی PA، ذرات چوب و الیاف کربن در نمونه‌ها قابل مشاهده بوده و در همه‌ی نمونه‌ها کاهش میزان کرنش شکست و افزایش میزان مدول الاستیسیته نیز قابل مشاهده است.



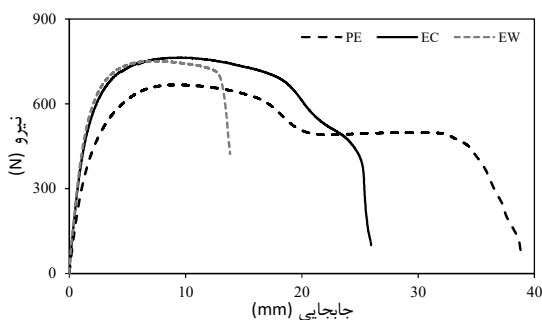
شکل ۱۰-مدول الاستیسیته PE و اثر افزودن PA و ذرات چوب با نسبت کشش‌های

شکل ۱۱ میزان مدول الاستیسیته نمونه‌های EAC1، EAC2 و EAC3 به ترتیب برابر با ۶۷۷، ۶۹۴ و ۷۲۴ مگاپاسگال است. طبق نتایج به دست آمده حضور هم‌زمان الیاف کربن و PA در نسبت‌های کشش مختلف موجب افزایش بیشتر مدول الاستیسیته نمونه‌ها شده است. به عنوان مثال برای نمونه EAC3 میزان مدول الاستیسیته برابر با ۶۹۴ مگاپاسگال بوده که در نمونه مشابه EAW3 بدون الیاف کربن این مقدار برابر با ۶۷۴ مگاپاسگال بوده که افزایش ۳ درصدی استحکام را به همراه داشته است؛ و برای نمونه‌های EAC1 و EAC2 این افزایش در مقایسه با نمونه‌های مشابه بدون الیاف کربن و با حضور PA به ترتیب برابر با ۱۱/۷ و ۳ درصد است. بیشینه اثر افزایش PA و الیاف کربن در مقایسه با PE خالص برابر با ۴۱/۶ درصد است.

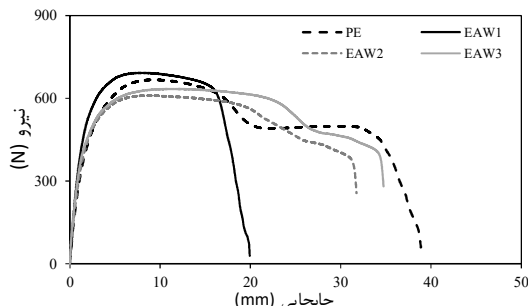


شکل ۱۱-مدول الاستیسیته PE و اثر افزودن PA و الیاف کربن با نسبت کشش‌های مختلف

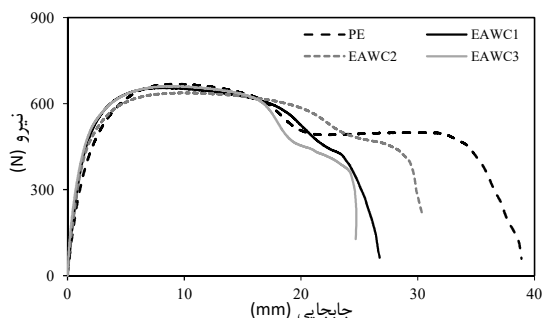
شکل ۱۲ میزان مدول الاستیسیته نمونه‌های EAWC1، EAWC2 و EAWC3 به ترتیب برابر با ۸۲۴، ۸۶۶ و ۸۹۲ مگاپاسگال است. طبق نتایج به دست آمده در این نمونه‌ها تجمیع اثرات افزایشی الیاف و پلی‌امید وجود دارد. در نتیجه مدول الاستیسیته این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های حاوی PA و الیاف کربن به دلیل حضور ذرات چوب نیز افزایش پیدا کرده است. به عنوان مثال مدول الاستیسیته نمونه‌های EAWC1، EAWC2 و EAWC3 در مقایسه با نمونه‌های مشابه همراه با PA و الیاف کربن بدون ذرات چوب به ترتیب افزایش ۲۱/۷، ۱۹/۶ و ۲۸/۵ درصدی را داشته است. در نهایت اثر تجمعی این سه افزودنی بر مدول الاستیسیته نمونه‌های PE خالص در نسبت کشش‌های مختلف به ترتیب مدول را به میزان ۶۹/۲، ۶۹/۵ و ۷۴/۵ درصد افزایش داده است.



شکل ۱۴- نمودار نیرو-جابجایی PE و اثر افزودن الیاف کربن و ذرات چوب



شکل ۱۵- نمودار نیرو-جابجایی PE و اثر افزودن PA و ذرات چوب با نسبت کشش‌های مختلف



شکل ۱۶- نمودار نیرو-جابجایی PE و اثر افزودن PA، ذرات چوب و الیاف کربن با نسبت کشش‌های مختلف

۲- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تولیدشده با زمینه پلی‌اتیلن و در حضور پلی‌آمید، ذرات چوب و الیاف کربن توسط فرآیند قالب‌گیری تزریق پلاستیک پرداخته شده است. به منظور بررسی اثر میکروفاایبرسازی پلی‌آمید در زمینه پلی‌اتیلن، تولید در مرحله اول و در فرآیند اکستروژن در سه نسبت کشش مختلف ۱ و ۳ و ۵ صورت گرفته است.

خلاصه نتایج به‌دست‌آمده به‌صورت زیر می‌باشند:

- نسبت‌های کشش مختلف میزان مدول الاستیسیته افزایش پیدا کرده است. بررسی اثر افزودن الیاف کربن و ذرات چوب بر استحکام کششی نشان داد که ذرات چوب تغییری در میزان استحکام کششی ایجاد نکرده و افزودن ۱۰ درصد الیاف کربن استحکام کششی را به مقدار ۲۶/۶ درصد افزایش داده است.
- افزودن ۲۰ درصد وزنی PA به زمینه PE در نسبت کشش ۱:۱ تغییری بر میزان استحکام کششی نداشته و با افزایش نسبت کشش در فرآیند اکستروژن استحکام کششی نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است. در نسبت کشش ۱:۵ استحکام کششی نسبت به نمونه با نسبت کشش ۱:۱ افزایش ۱۹/۵ درصدی دارد. حضور ذرات چوب اثر افزایشی PA را کاهش داده و در نسبت‌های کشش مختلف میزان استحکام کششی کاهش پیدا کرده است.
- الیاف کربن نیز استحکام کششی نمونه‌ها را افزایش داده و با ترکیب آن با ۲۰ درصد PA و مجموع اثر افزایشی هر دو در نهایت میزان استحکام کششی PE خالص را با نسبت کشش ۱:۵ از ۱۸/۴ به ۲۳/۷ مگاپاسگال افزایش داده است. در نهایت اثرات مختلف هر یک از مواد تجمیع شده و استحکام کششی نمونه EAWC3 نسبت به PE خالص افزایش ۱۸ درصدی داشته است.
- بررسی اثر افزودن الیاف کربن و ذرات چوب بر استحکام کششی نازل نشان داد که ذرات چوب و الیاف کربن هر دو میزان مدول الاستیسیته را افزایش داده است. میزان مدول الاستیسیته نمونه EW و EC به ترتیب ۶۵ و ۷۱ درصد نسبت به پلی‌اتیلن افزایش یافته است.
- در حضور ۲۰ درصد PA و تجمیع اثر افزایشی هر دو در نهایت میزان مدول الاستیسیته‌ی PE خالص با نسبت کشش ۱:۵ را از ۵۱۱ به ۶۹۴ مگاپاسگال افزایش داده است. در نهایت اثرات افزایشی هر یک از مواد با نسبت‌های کشش مختلف تجمیع شده و مدول الاستیسیته نمونه EAWC3 نسبت به PE خالص افزایش ۷۴/۵ درصدی داشته است.
- با افزودن ذرات چوب و الیاف کربن شیب نمودار ناحیه خطی افزایش پیدا کرده و میزان استحکام نهایی تسلیم نمونه نیز افزایش پیدا کرده است. در مقابل میزان کرنش شکست نمونه‌ها با افزودن این دو کاهش پیدا کرده است مطابق نتایج به‌دست‌آمده افزودن ذرات چوب کرنش شکست نمونه‌ها را کاهش داده است. در نهایت اثر تجمیعی سه افزودنی پلی‌آمید، ذرات چوب و الیاف کربن در نمونه‌ها قابل مشاهده بوده و در همه‌ی نمونه‌ها کاهش میزان کرنش شکست قابل مشاهده بوده و افزایش میزان مدول الاستیسیته نیز قابل مشاهده است.
- نتایج به‌دست‌آمده به‌صورت زیر می‌باشند:

- افزودن ۲۰ درصد وزنی PA به زمینه PE در نسبت کشش ۱:۱ مشابه نتایج استحکام کششی تغییری بر مدول الاستیسیته نداشته و با افزایش نسبت کشش در فرآیند اکستروژن مدول الاستیسیته نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است. حضور ذرات چوب اثر افزایشی PA را بهبود داده و در

- [11] Kelnar, I., et al., *Complex effect of graphite nanoplatelets on performance of HDPE/PA66 microfibrillar composites*. Composites Part B: Engineering, 2018. **144**: p. 220-228.
- [12] Song, L., et al., *Microfibrillation structure evolution and mechanical properties of MS@ PMHNTs reinforced polymethyl methacrylate composite fiber*. Composites Communications, 2022: p. 101108.
- [13] Shi, Y., et al., *In Situ Microfibrillation of Polyamide 66 and Construction of Ordered Polytetrafluoroethylene Fibers to Significantly Reduce the Friction Coefficient of Polyphenylene Sulfide*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020. **60**(1): p. 281-290.
- [14] Wang, Y., et al., *The formation of a highly oriented structure and improvement of properties in PP/PA6 polymer blends during extrusion-stretching*. Polymers, 2020. **12**(4): p. 878.
- [15] Xiang, P., et al., *Preparation of poly (lactic acid) with excellent comprehensive properties via simple deformation or microfibrillation of spherulites*. Journal of Applied Polymer Science, 2022. **139**(4): p. 51539.

جدول ۴- نتایج به دست آمده

مدول کششی (MPa)	استحکام کششی (MPa)	نمونه
۵۱۱	۱۸/۴	PE
۸۴۵	۲۲/۳	EC
۸۷۴	۱۹/۲	EW
۶۰۶	۱۸/۵	EA1
۷۰۲	۲۰/۹	EA2
۶۷۴	۲۲/۱	EA3
۶۱۵	۱۸/۶	EAW1
۷۱۰	۲۰/۶	EAW2
۷۵۵	۱۹/۶	EAW3
۶۹۴	۱۹/۴	EAC1
۶۷۷	۲۲/۴	EAC2
۷۲۴	۲۳/۷	EAC3
۸۲۴	۱۹/۲	EAW1
۸۶۶	۲۱/۳	EAW2
۸۹۲	۲۱/۷	EAW3

۴- مراجع

- [1] Sarabi, M.T., et al., *Reprocessing of extruded wood-plastic composites; mechanical properties*. Journal of Biobased Materials and Bioenergy, 2012. **6**(2): p. 221-229.
- [2] Shahi, P., et al., *Experimental investigation on reprocessing of extruded wood flour/HDPE composites*. Polymer Composites, 2012. **33**(5): p. 753-763.
- [3] TabkhPaz, M., et al., *Procedure effect on the physical and mechanical properties of the extruded wood plastic composites*. Polymer composites, 2013. **34**(8): p. 1349-1356.
- [4] Zolfaghari, A., A.H. Behraves, and A. Adli, *Continuous glass fiber reinforced wood plastic composite in extrusion process: Mechanical properties*. Materials & Design, 2013. **51**: p. 701-708.
- [5] Zolfaghari, A., et al., *Continuous glass fiber reinforced wood plastic composite in extrusion process: Feasibility and processing*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2013. **32**(1): p. 52-60.
- [6] Sarabi, M.T., et al., *Effect of polymeric matrix melt flow index in reprocessing extruded wood-plastic composites*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2014. **27**(7): p. 881-894.
- [7] Épinat, C., L. Trouillet-Fonti, and P. Sotta, *Predicting phase inversion based on the rheological behavior in Polyamide 6/Polyethylene blends*. Polymer, 2018. **137**: p. 132-144.
- [8] Liu, H., et al., *A novel wood flour-filled composite based on microfibrillar high-density polyethylene (HDPE)/Nylon-6 blends*. Bioresource Technology, 2010. **101**(9): p. 3295-3297.
- [9] Hamid, F., S. Akhbar, and K.K. Halim, *Mechanical and thermal properties of polyamide 6/HDPE-g-MAH/high density polyethylene*. Procedia Engineering, 2013. **68**: p. 418-424.
- [10] Kelnar, I., et al., *Effect of layered silicates and reactive compatibilization on structure and properties of melt-drawn HDPE/PA6 microfibrillar composites*. Polymer Bulletin, 2016. **73**(6): p. 1673-1688.