

خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن-الیاف طبیعی سبک‌شده با عامل فوم‌زا و تقویت‌شده با نانوذرات کربن کروی برای استفاده در صنعت خودرو

محراب مدهوشی^{۱*}، امین ملکانی^۲، قنبر ابراهیمی^۳، علیمراد رشیدی^۴

۱. دانشیار گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۲. دکتری فرآورده‌های چندسازه چوب، گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۳. استاد گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۴. استاد مرکز تحقیقات نانوتکنولوژی، پژوهشگاه صنعت نفت ایران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۰

چکیده

تحقیق حاضر با هدف بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن-الیاف طبیعی سبک‌شده با عامل فوم‌زا و تقویت‌شده با استفاده از نانوذرات کربن کروی برای استفاده در صنعت خودروسازی انجام گرفت. برای این منظور آرد باگاس در سطح ثابت ۴۰ درصد، عامل فوم‌زای آزو دی‌کربن‌آمید در سه سطح صفر، ۲ و ۴ درصد، و نانوذره کربن کروی در چهار سطح صفر، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد به‌عنوان متغیرهای مطالعه و پلی‌پروپیلن به‌عنوان ماده پلیمری زمینه و جفت‌کننده مالئیک انیدرید پلی‌پروپیلینه‌شده (به مقدار ثابت ۴ درصد) برای ترکیب‌های مختلف نانوکامپوزیت در نظر گرفته شد. اختلاط مواد و فرایند ساخت با استفاده از دستگاه مخلوط‌کن داخلی و سپس با استفاده از پرس دوجله‌ای گرم و سرد انجام گرفت و نمونه‌های آزمایشی چگالی، مقاومت به ضربه فاق‌دار، آزمون‌های خمش و کشش با استفاده از قالب‌های استاندارد ساخته شدند. همچنین ریزساختار نانوکامپوزیت با استفاده از تصاویر میکروسکوپی SEM بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش عامل فوم‌زا، چگالی فرآورده را به‌طور معنی‌داری کاهش داد، اما بر مقاومت‌های مکانیکی جز مقاومت به ضربه تأثیر منفی داشت. مقاومت به ضربه نانوکامپوزیت‌های سبک‌شده، بیشتر از نمونه شاهد برآورد شد. همچنین افزایش نانوذره کربن، کاهش مقاومت‌های دیگر را در نانوکامپوزیت‌های سبک‌شده جبران کرد و مقادیر آنها را افزایش داد. بررسی ریزساختار نمونه‌ها نیز نشان داد که در حضور نانوذره کربن، ذرات باگاس در داخل پلیمر پراکنش بهتری داشتند و اتصال مناسب‌تری بین آنها و پلیمر وجود داشت. همچنین حضور عامل فوم‌زا، سبب افزایش خلل‌و‌فرج و کاهش چگالی شد. **واژه‌های کلیدی:** باگاس، صنعت خودرو، عامل فوم‌زا، مقاومت به ضربه، نانوذره کربن کروی، نانوکامپوزیت.

مقدمه

از آنجا که کارخانه‌های خودروسازی راهبرد تولید قطعات سبک با قابلیت بازیافت خوب و زیست‌تخریب‌پذیر را در پیش‌رو دارند، استفاده از این کامپوزیت‌های سبک‌ساز توجه آنها قرار گرفته است. از دیدگاه فنی، این کامپوزیت‌ها مقاومت‌های مکانیکی و عایق بودن در مقابل صوت را بهبود می‌بخشند، وزن محصول و مصرف سوخت را کاهش

امروزه چندسازه‌های چوب-پلاستیک به‌عنوان مواد مهندسی، در صنایع مختلفی چون خودروسازی، هوافضا، ساختمان‌سازی، صنایع بسته‌بندی و ... کاربردهای وسیعی پیدا کرده‌اند [۱].

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۱۷۳۳۴۲۷۱۵۶

Email: madhoushi@gau.ac.ir

می‌دهند، هزینه تولید را کم می‌کنند، ایمنی سرنشینان را افزایش می‌دهند و تزیینات داخلی خودرو را نیز بهبود می‌بخشند [۲]، [۳]. این کامپوزیت‌ها در خودروسازی در قسمت‌های داشبورد، تزیینات داخلی اتاق خودرو، پانل درها، قفسه‌ها، آسترده‌ری کابین، بالشتک‌های صندلی و بخش‌هایی از سپر استفاده می‌شوند. بنابراین به‌طور کلی، طراحی با وزن کم و در عین حال مقاوم، بخش ضروری قوانین شرکت‌های خودروسازی برای کاهش مصرف سوخت و انتشار دی‌اکسید کربن است. در گذشته به‌منظور مقاوم‌سازی پلیمر در کامپوزیت‌ها از الیاف معدنی و شیشه به‌همراه پرکننده‌هایی مانند تالک، میکا و ... استفاده می‌شد که به‌دلیل مشکلات زیست‌محیطی و ایجاد حساسیت‌های پوستی و تنفسی، محققان به فکر استفاده از موادی جایگزین نظیر الیاف طبیعی افتادند.

انواع الیاف طبیعی از یک سو فرصت به‌کارگیری منبع عظیمی از مواد تجدیدپذیر را فراهم می‌کنند و از سوی دیگر قابلیت مناسبی برای تولید کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک دارند. از این الیاف می‌توان به‌عنوان پرکننده‌های سبک‌وزن و در عین حال مقرون‌به‌صرفه و پرتنوع استفاده کرد. درصد الیاف نیز از عوامل مهم و تأثیرگذار در چگالی چندسازه‌ها و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آنهاست [۴-۶].

به‌منظور کنترل و کاهش چگالی کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک، می‌توان از عامل فوم‌زا در ترکیب آنها استفاده کرد. این مواد با خواص گسترده‌ای همچون چگالی کم، پایداری ابعاد، مقاومت شیمیایی، قابلیت بازیافت، عایق مناسب در برابر گرما و کارایی جذب انرژی، کاربردهای زیادی یافته‌اند. در سال‌های اخیر فرایند فوم کردن چندسازه‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف طبیعی، به‌دلیل ایجاد مزایایی نظیر کاهش وزن و هزینه، کاربرد آنها را افزایش داده است. برای مثال این مواد می‌توانند چگالی چندسازه را ۳۰ درصد کاهش دهند و به حدود ۰/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب برسانند [۷]. عامل فوم‌زای شیمیایی علی‌رغم تأثیر مثبت در افزایش اندازه سلول

و کاهش چگالی محصول، سبب کاهش خواص مکانیکی چندسازه‌ها می‌شود و نوع عامل فوم‌زا نیز در این زمینه مؤثر است [۸]. در تحقیق دیگری مشخص شد که عامل فوم‌زای آزو دی‌کربن‌آمید سبب کاهش چگالی کامپوزیت الیاف طبیعی تا ۴۶ درصد و در عین حال افزایش مقاومت به ضربه کامپوزیت می‌شود [۹]. هرچند در برخی از مطالعات، عامل فوم‌زا نتوانست سبب کاهش مطلوب چگالی محصول شود [۱۰]. به‌طور کلی، سعی می‌شود برای افزایش مقاومت به ضربه پلیمرها از یک فاز الاستومری استفاده شود تا ذرات الاستومر پراکنده‌شده با جذب انرژی و جلوگیری از رشد ترک در ماتریس پلیمری سبب افزایش چقرمگی شوند [۱۱]. در عین حال، برخی از مطالعات قبلی نشان داده است که حضور عامل فوم‌زا در ترکیب کامپوزیت‌های الیاف طبیعی، ضمن افزایش چگالی سلول و کاهش اندازه آن تا حدودی تأثیر مثبت بر خواص فرآورده نهایی دارد [۱۲، ۱۳].

شایان یادآوری است این کامپوزیت‌های زیستی را می‌توان با افزودن تقویت‌کننده‌های نانوکربنی تولید کرد تا ضمن ارتقای مقاومت‌های مکانیکی و افزایش ایمنی سرنشینان، خواص آکوستیک آنها را نیز بهبود بخشند [۱۴]. گزارش شده است که استفاده از این نانوذرات، مقاومت کششی، پیچشی و مدول الاستیسیته نانوکامپوزیت را افزایش می‌دهد، اما بر مقاومت به ضربه تأثیری ندارد [۱۵]. هرچند در همین زمینه، در تحقیق دیگری تأثیر مثبت این نانوذرات بر مقاومت به ضربه تأیید شده است [۱۶]. به‌طور کلی، بررسی منابع مشخص می‌کند که با کاهش چگالی کامپوزیت‌ها توسط عامل فوم‌زا، بیشتر خواص مقاومتی آنها کاهش می‌یابد، ولی تأثیر این عامل در مقاومت به ضربه در برخی منابع متفاوت است. همچنین بیشتر تقویت‌کننده‌های افزوده‌شده به کامپوزیت‌ها همه خواص مقاومتی به‌جز مقاومت به ضربه را بهبود می‌بخشند.

با توجه به موارد یادشده، در این تحقیق امکان بهره‌گیری از باگاس (ضایعات کارخانه نیشکر) در ساخت کامپوزیت‌های

شده و در نهایت با گروه عاملی هیدروکسیل برای عملکرد هر چه بهتر عامل دار و با ابعاد ۱۵ تا ۲۵ نانومتر استفاده شدند.

ساخت نانوکامپوزیت‌ها

نانوکامپوزیت‌های چوب-پلاستیک در کارگاه پلاستیک پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران به‌وسیله مخلوط‌کن داخلی و پرس دو مرحله‌ای گرم و سرد ساخته شده و نمونه‌های نهایی با استفاده از قالب‌های فلزی مطابق با استانداردهای لازم برای آزمون‌های ضربه، کشش و خمش ساخته شدند. برای کنترل رطوبت ذرات قبل از مخلوط کردن، مواد لیگنوسولولزی و پلیمری در خشک‌کن آزمایشگاهی با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو ساعت خشک شدند. جهت مخلوط کردن مواد در دستگاه مخلوط‌کن داخلی، شرایط دمای قسمت داخلی ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت چرخش ماردون‌ها ۶۰ دور در دقیقه برای مدت زمان ۱۳ دقیقه تنظیم شدند. عامل فومزا با توجه به دمای ذوب خود به مدت سه دقیقه با مواد دیگر مخلوط شد. عمل فوم شدن در این مرحله صورت نگرفت و این مرحله تنها به منظور مخلوط‌سازی مواد اولیه برای تولید نانوکامپوزیت انجام گرفت. نانوکامپوزیت‌های تولیدشده سرد و سپس به اندازه‌های کوچک‌تر خرد شدند. در ادامه با توجه به وزن هر آزمون، مقدار ماده لازم برای آزمون‌های ضربه، کشش و خمش با توجه به ابعاد قالب آن تعیین شد. در این مرحله، با توجه به دمای ذوب و فوم شدن عامل فومزا، دمای پرس گرم حدود ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۵ دقیقه در نظر گرفته شد و نمونه‌های نانوکامپوزیت‌ها بعد از پرس دو مرحله‌ای گرم و سرد به مدت حدود ۱۰ دقیقه تولید شدند.

آزمون‌های مکانیکی

آزمون‌ها مطابق با استانداردهای ASTM برای آزمون چگالی (D-792)، مقاومت به ضربه (D-256)، آزمون خمشی (D-790) و آزمون کششی (D-638) در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران انجام گرفت.

چوب-پلاستیک سبز و سبک با استفاده از عامل فومزا و تقویت خواص آنها به‌ویژه مقاومت به ضربه با استفاده از نانوذرات کربن کروی برای استفاده در صنعت خودروسازی بررسی شد. به‌طور کلی، اهداف تحقیق در گام اول، کاهش چگالی نانوکامپوزیت و بهبود مقاومت به ضربه آن و در گام دوم بهبود دیگر خواص مقاومتی آن بود. نانوکربن کروی استفاده‌شده در این تحقیق متشکل از ذرات گرافن خردشده بود که با هزینه بسیار کم در داخل کشور و در پژوهشگاه صنعت نفت ایران تولید شده و به ثبت بین‌المللی رسیده است.

مواد و روش‌ها

مواد

این تحقیق به منظور دستیابی به شرایط بهینه تولید برای کنترل خواص محصول نهایی نانوکامپوزیت با دو عامل متغیر در نظر گرفته شد. عوامل متغیر عبارت بودند از ۱. مقدار عامل فومزای شیمیایی آزو دی‌کربن آمید در سه سطح صفر، ۲ و ۴ درصد، ۲. مقدار نانوذرة کربن در چهار سطح وزنی صفر، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد.

عوامل ثابت تحقیق نیز عبارت بودند از: ۱. مقدار باگاس با مقدار ۴۰ درصد وزنی، ۲. پلیمر پلی‌پروپیلن (PP) تهیه‌شده از شرکت صنایع پتروشیمی مارون با کد تجاری Z30S، ۳. اندازه ذرات باگاس با مش ۴۰ و رطوبت ۴ درصد تهیه‌شده از شرکت کشت و صنعت سلمان فارس، ۴. ماده جفت‌کننده مالئیک انیدرید پلی‌پروپیلینه‌شده (MAPP) به مقدار ۴ درصد وزنی پلی‌پروپیلن با کد تجاری KARABOND@P تهیه‌شده از شرکت کرانگین.

باگاس در ابتدا در چند مرحله آسیاب شده و سپس به‌وسیله الک‌های آزمایشگاهی با مش‌های ۴۰ و ۶۰ الک شد. نانوذرات کربن کروی با فرایند رسوب بخار شیمیایی از ضایعات گیاهان و میوه‌ها در پژوهشگاه صنعت نفت ایران تولید شد. در این روش، نانوذرات کروی کربنی از ذرات خردشده گرافن که کروی بودند با روش هیدروترمال سنتز

مطالعه ریزساختار نانوکامپوزیت (SEM)

بررسی ریزساختار نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی (SEM) مدل VEGA 3 ساخت شرکت Tescan و با ولتاژ ۲۰ کیلوولت، در محل آزمایشگاه پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران انجام گرفت.

تحلیل آماری

داده‌های آزمایش با استفاده از طرح فاکتوریل کامل و نرم‌افزار SPSS در سطح اطمینان ۹۵ درصد بررسی و تحلیل شده و میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون دانکن بررسی شد.

نتایج و بحث

چگالی

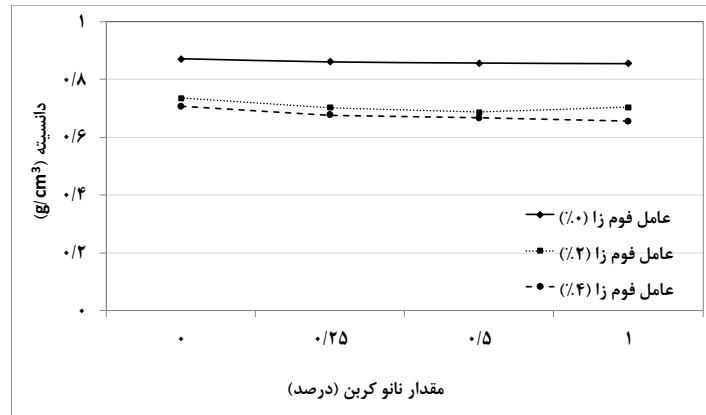
تحلیل آماری نشان داد (جدول ۱) که اثر مستقل عامل

فومزا و نانوذره بر مقدار چگالی نانوکامپوزیت با اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار است و با افزایش مقدار عامل فومزا از صفر (تیمار شاهد) تا ۴ درصد، چگالی به‌طور معنی‌دار و در حدود ۲۱/۵ درصد کاهش می‌یابد و از مقدار ۰/۸۶۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب به کمترین مقدار خود یعنی ۰/۶۷۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌رسد (شکل ۱). همچنین افزایش مقدار نانوذره کربن سبب کاهش معنی‌دار چگالی نانوکامپوزیت شد، اما با توجه به مقادیر مصرف کمتر از ۱ درصد نانوذره، تأثیر این عامل بر چگالی نانوکامپوزیت نسبت به مقدار عامل فومزا جزئی بود. در بخش تصاویر میکروسکوپ الکترونی مشخص شد که با افزایش مصرف ماده فومزا در ترکیب نانوکامپوزیت، خلل و فرج در ساختار کامپوزیت بیشتر می‌شود و به همین دلیل چگالی محصول کاهش می‌یابد.

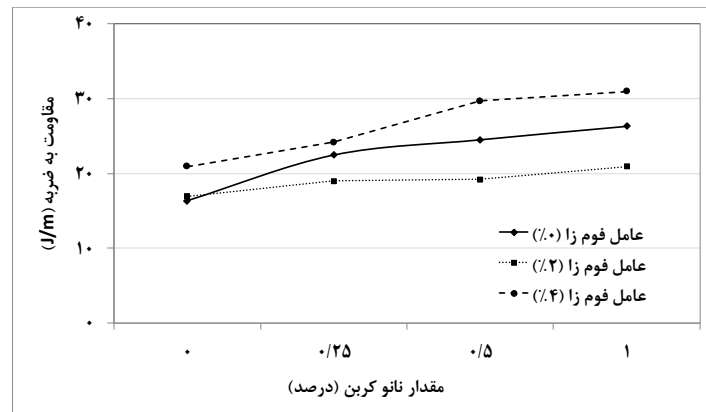
جدول ۱. تجزیه واریانس اثر مستقل و متقابل فاکتورهای متغیر بر چگالی و مقاومت‌های مکانیکی نانوکامپوزیت

منابع تغییرات	خواص	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	معنی‌داری*
نانوذره کربن	چگالی	۳	۰/۰۰۷	۰/۰۰۲	۶/۵۱۳	۰/۰۰۲
	مقاومت خمشی	۳	۱۶۴/۷۶۹	۵۴/۹۲۳	۱۰/۱۵۸	۰/۰۰۰
	مدول خمشی	۳	۲۰۲۷۲۰/۱۳۴	۶۷۵۷۳۳/۲۷۸	۵/۱۴۹	۰/۰۰۷
	مقاومت کششی	۳	۱۸/۷۵۱	۶/۲۵۰	۱/۶۳۸	۰/۲۰۷
	مدول کششی	۳	۱۹۳۹۰۳/۹۹۸	۶۴۶۳۴/۶۶۶	۰/۵۶۸	۰/۶۴۱
عامل فومزا	مقاومت به ضربه	۳	۳۲۷/۸۲۴	۱۰۹/۲۷۵	۲۱/۱۷۲	۰/۰۰۰
	چگالی	۲	۰/۲۳۵	۰/۱۱۸	۳۳۰/۵۵۳	۰/۰۰۰
	مقاومت خمشی	۲	۴۱۵/۵۰۵	۲۰۷/۷۵۳	۳۸/۴۲۲	۰/۰۰۰
	مدول خمشی	۲	۴۸۳۸۷۰۵/۲۸۳	۲۴۱۹۳۵۲/۶۴۱	۱۸/۴۳۶	۰/۰۰۰
	مقاومت کششی	۲	۱۲۲/۳۳۰	۶۱/۱۱۵	۱۶۰/۰۱۷	۰/۰۰۰
نانوذره*عامل فومزا	مدول کششی	۲	۲۴۹۷۴۱/۰۲۱	۱۳۴۸۷۰/۵۱۱	۱/۰۹۸	۰/۳۵۰
	مقاومت به ضربه	۲	۳۳۱/۰۱۳	۱۶۵/۵۰۷	۳۲/۰۶۷	۰/۰۰۰
	چگالی	۶	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰	۰/۸۵۳	۰/۵۴۳
	مقاومت خمشی	۶	۲۴/۵۶۸	۴/۰۹۵	۰/۷۵۷	۰/۶۱۰
	مدول خمشی	۶	۲۲۱۱۲۳/۷۴۴	۳۶۸۵۳/۹۵۷	۰/۲۸۱	۰/۹۴۰
خطا	مقاومت کششی	۶	۱/۱۷۰	۰/۱۹۵	۰/۰۵۱	۰/۹۹۹
	مدول کششی	۶	۲۷۶۷۷/۳۶۵	۴۶۱۲/۸۹۴	۰/۰۴۱	۱/۰۰۰
	مقاومت به ضربه	۶	۶۳/۷۷۲	۱۰/۶۲۹	۲/۰۵۹	۰/۰۹۶
	چگالی	۲۴	۰/۰۰۹	۰/۰۰۰		
	مقاومت خمشی	۲۴	۱۲۹/۷۷۱	۵/۴۰۷		
کل	مدول خمشی	۲۴	۳۱۴۹۴۸۲/۰۴۳	۱۳۱۲۲۸/۴۱۸		
	مقاومت کششی	۲۴	۹۱/۵۷۶	۳/۸۱۶		
	مدول کششی	۲۴	۲۷۹۶۸۴/۱۰۹	۱۱۳۷۳۶/۸۳۸		
	مقاومت به ضربه	۲۴	۱۲۳/۸۷۰	۵/۱۶۱		
	چگالی	۳۶	۲۰/۳۹۲			
کل	مقاومت خمشی	۳۶	۳۳۶۴۸/۴۳۵			
	مدول خمشی	۳۶	۱/۳۷۱ × ۱۰ ^۴			
	مقاومت کششی	۳۶	۹۵۳۷/۲۹۴			
	مدول کششی	۳۶	۴/۱۱۳ × ۱۰ ^۷			
مقاومت به ضربه	۳۶	۱۹۲۴۲/۸۸۰				

* (P<0.05)



شکل ۱. تغییرات چگالی نانوکامپوزیت در اثر تغییرات مقدار نانو کربن و عامل فوم‌زا



شکل ۲. تغییرات مقاومت به ضربه نانوکامپوزیت در اثر تغییرات مقدار نانو کربن و عامل فوم‌زا

مقاومت به ضربه

نتایج نشان داد (شکل ۲) که افزایش عامل فوم‌زا سبب افزایش معنی‌دار مقاومت به ضربه نانوکامپوزیت شد (جدول ۱) و در سطح ۴ درصد عامل فوم‌زا به بیشترین مقدار خود (۲۶/۴۲ ژول بر متر) رسید. افزایش مقدار نانوذره کربن در افزایش مقاومت به ضربه نیز به‌طور مستقل معنی‌دار بود.

همچنین مقایسه نمودارها مشخص می‌کند که افزایش مقدار نانوذره از صفر تا ۱ درصد در همه سطوح عامل فوم‌زا، سبب افزایش مقاومت به ضربه نانوکامپوزیت شده و بیشترین مقاومت به ضربه در سطوح ۰/۵ و ۱ درصد نانوذره مشاهده شد. نتایج این بخش مطابق با یافته‌های تحقیقات قبلی است که در آنها مقاومت به ضربه چوب-

پلاستیک به‌طور معنی‌داری با افزایش نانوذرات کربنی افزایش یافت [۹].

به‌طور کلی با توجه به جدول ۱، اثرهای مستقل همه عوامل متغیر و همچنین اثرهای متقابل آنها بر مقاومت به ضربه در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌داری بود. تغییرات میانگین‌های این مقاومت تحت تأثیر سطوح نانوذره، با استفاده از آزمون دانکن، در چهار گروه مختلف دسته‌بندی شدند و بهترین سطح برای مقدار ۱ درصد نانوذره مشخص شد. همچنین مقدار عامل فوم‌زا نیز در سه گروه مختلف تقسیم شد.

مقاومت و مدول خمشی

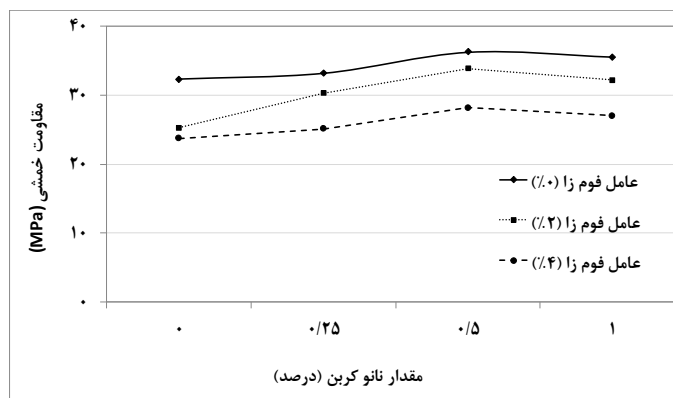
جدول آنالیز آماری داده‌ها (جدول ۱) مشخص کرد که مقدار نانوذره و مقدار عامل فوم‌زا به‌طور مستقل اثر

در تحقیقات قبلی نیز مشاهده شد که عامل فوم‌زا علی‌رغم تأثیر مثبت بر کاهش وزن کامپوزیت، سبب کاهش خواص مکانیکی آن می‌شود که ممکن است بر خواص کاربردی آن تأثیر منفی داشته باشد [۱۳]. به همین دلیل باید با افزودن نانومواد، کاهش خواص مکانیکی را جبران کرد. همان‌گونه که در تحقیقات دیگری نشان داده شد، با افزایش مصرف نانوکربن می‌توان مدول الاستیسیته خمشی و کششی محصول را افزایش داد [۱۷].

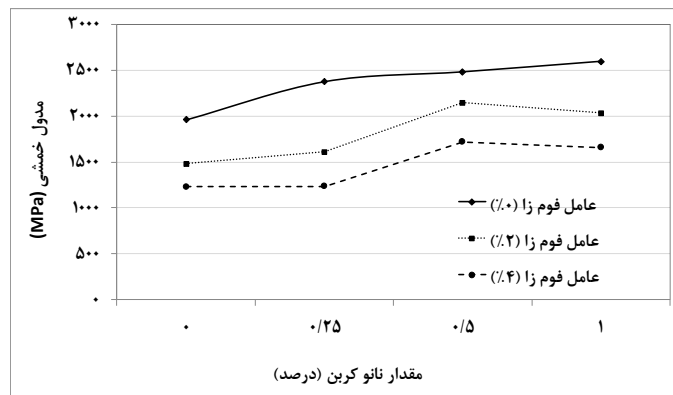
به‌طور کلی، نتایج تحقیق حاضر در تطابق با نتایج تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که با افزایش مقدار نانوذره کربن کروی در ماتریس نانوکامپوزیت، افزایش معنی‌داری در مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی مشاهده می‌شود و بیشترین مقاومت خمشی مربوط به سطح ۰/۵ درصد نانوذره کربن است.

معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد بر مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی نانوکامپوزیت داشتند (شکل ۳). می‌توان مشاهده کرد که مقدار این مقاومت از تیمار شاهد (صفر درصد) تا ۴ درصد عامل فوم‌زا در حدود ۲۴/۲ درصد کاهش داشته و بیشترین مقاومت خمشی مربوط به تیمار دارای صفر درصد عامل فوم‌زا با مقدار ۳۴/۳ مگاپاسکال است. مشابه این روند و تأثیر منفی عامل فوم‌زا بر مدول الاستیسیته نیز مشاهده شد و مقدار آن در حدود ۳۸ درصد کاهش یافت.

برخلاف تأثیر منفی عامل فوم‌زا، حضور نانوذره کروی کربن بر مقدار مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی نانوکامپوزیت تأثیر مثبتی داشت و مدول خمشی را تا حدود ۲۵/۶ درصد افزایش داد. این افزایش در همه سطوح عامل فوم‌زا مشهود بود (شکل ۴).



شکل ۳. تغییرات مقاومت خمشی نانوکامپوزیت در اثر تغییرات مقدار نانوکربن و عامل فوم‌زا



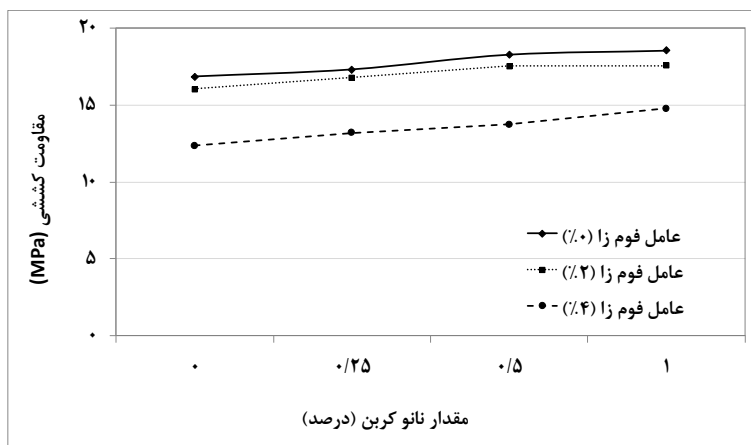
شکل ۴. تغییرات مدول خمشی نانوکامپوزیت در اثر تغییرات مقدار نانوکربن و عامل فوم‌زا

مقاومت و مدول کششی

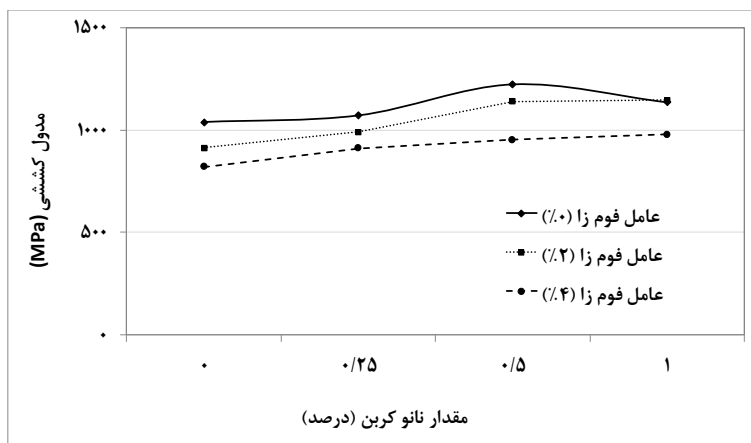
مطابق نتایج آنالیز آماری (جدول ۱) اثر مستقل مقدار نانوذره و مقدار عامل فوم‌زا بر مقاومت کششی نانوکامپوزیت در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار است. با افزایش مقدار عامل فوم‌زا، مقاومت کششی محصول به‌طور معنی‌دار و تا حدود ۲۳/۹ درصد کاهش یافت (شکل ۵) و بیشترین مقدار این مقاومت در تیمار شاهد (صفر درصد) و بدون حضور عامل فوم‌زا مشاهده شد (۱۷/۷۴ مگاپاسکال). همچنین با افزایش مقدار نانوذره کربن، مقاومت کششی نانوکامپوزیت به‌طور معنی‌دار افزایش یافت و این روند افزایشی را در همه سطوح عامل فوم‌زا می‌توان مشاهده کرد. بیشترین مقدار مقاومت

کششی برای نمونه‌های با ۱ درصد نانوذره کربن و در سطح صفر درصد عامل فوم‌زا به مقدار ۱۶/۹۶ مگاپاسکال ثبت شد.

در همین ارتباط، می‌توان مشاهده کرد (شکل ۶) که با افزایش مقدار عامل فوم‌زا، مقدار مدول الاستیسیته کششی نانوکامپوزیت‌ها کاهش یافت و کمترین مقدار برای تیمار دارای ۴ درصد عامل فوم‌زا به‌دست آمد (۱۱۶۰ مگاپاسکال). همچنین با افزایش مقدار نانوذره، مدول الاستیسیته کششی روند افزایشی اما غیرمعنی‌دار داشت. نتایج این تحقیق مشابه تحقیق قبلی است که براساس آن، مقدار عامل فوم‌زا تأثیر منفی زیادی بر مدول الاستیسیته دارد [۱۵].



شکل ۵. تغییرات مقاومت کششی نانوکامپوزیت در اثر تغییرات مقدار نانو کربن و عامل فوم‌زا



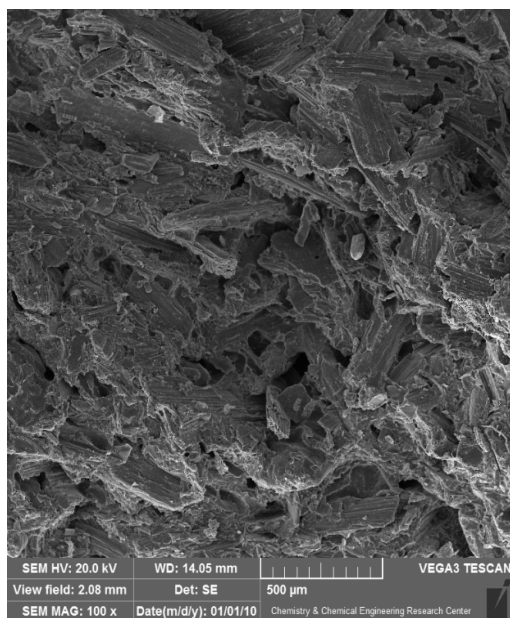
شکل ۶. تغییرات مدول کششی نانوکامپوزیت در اثر تغییرات مقدار نانو کربن و عامل فوم‌زا

که در نمونه‌ها به دلیل نبود نانوذره کربن، اتصال ضعیف بین ماده لیگنوسلولزی و پلیمر اتفاق افتاده و جدا شدن الیاف نسبتاً واضح و مشخص است. این مشکل در نمونه‌های حاوی نانوکربن (شکل ۸) تا حدی مرتفع شده و از جدا شدن الیاف تا حد زیادی کاسته شده است. همچنین با استفاده از عامل فومزا در ترکیب نانوکامپوزیت (شکل ۷ ب و شکل ۸)، خلل و فرج ایجاد شده در ساختار ماده بیشتر می‌شود و به همین دلیل چگالی محصول کاهش می‌یابد. اما به دلیل افزایش بخش آمورف ماتریس، قابلیت جذب انرژی و در نتیجه مقاومت به ضربه نمونه افزایش می‌یابد. همین موضوع ممکن است دلیلی بر افزایش تمرکز تنش در ماتریس و به تبع آن کاهش مقاومت‌های مکانیکی خمشی و کششی نمونه‌ها باشد. به طور معمول پدیده شکست در آزمون‌های خمشی و کشش در همین نقاط ضعیف اتفاق می‌افتد که در سطح شکست این نمونه‌ها مشهود است.

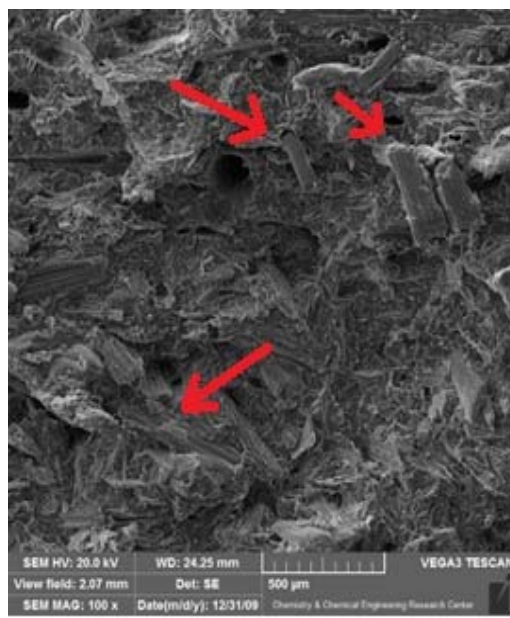
به طور کلی، با توجه به نتایج آزمون‌های مکانیکی و بررسی منابع مشخص شد که حضور همزمان عامل فومزا و نانوذره کربن تا حدودی سبب پیچیدگی تحلیل نتایج می‌شود. در یک عبارت کلی می‌توان گفت با حضور عامل فومزا در نانوکامپوزیت، درصد بلورینگی و بخش الاستیک در پلیمر کمتر می‌شود و با ایجاد فضای مناسب، سهم بخش آمورف یا ویسکوز افزایش می‌یابد و این موضوع می‌تواند دلیلی بر بهبود مقاومت به ضربه نانوکامپوزیت باشد [۱۱]. از طرف دیگر، نانوذره کربن کروی با ایجاد فضای مناسب برای هسته‌زایی، سبب افزایش تبلور در ساختار پلیمری چندسازه و افزایش مقاومت خمشی و کششی آن می‌شود و خاصیت ضربه‌پذیری را کاهش می‌دهد.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

شکل ۷ تصویر SEM از سطح شکست نمونه‌های آزمون ضربه را نشان می‌دهد و مشاهده می‌شود (شکل ۷ الف)

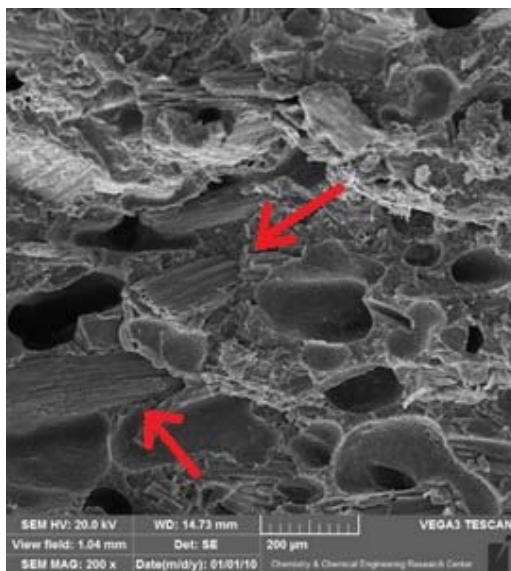


(ب)

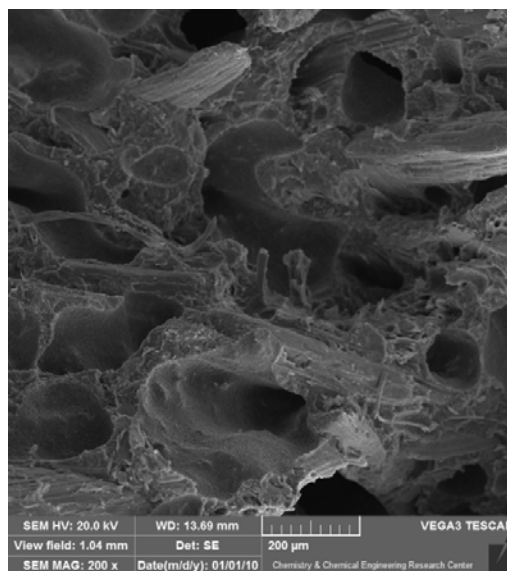


(الف)

شکل ۷. تصویر SEM سطح شکست نمونه‌های ضربه بدون نانوذره کربن در (الف) بدون و (ب) با عامل فومزا در سطح ۴ درصد (بزرگنمایی ۱۰۰ برابر)



(ب)



(الف)

شکل ۸. تصویر SEM سطح شکست نمونه‌های ضربه در حضور عامل فومزا ۴ درصد و نانوذره کربن الف) ۲۵/۰ و ب) ۱ درصد (بزرگنمایی ۲۰۰ برابر)

نتیجه‌گیری

نانوذره کربن در نانوکامپوزیت سبب افزایش تبلور در ساختار پلیمری و از طرف دیگر عامل فومزا سبب افزایش بخش آمورف و ویسکوز پلیمر می‌شود. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نیز مشخص کرد که با افزایش مقدار نانوذره کربن، مورفولوژی سلولی بهبود می‌یابد و اتصالات قوی‌تری بین ذرات باگاس و پلی‌پروپیلن ایجاد می‌شود. همچنین با افزایش مصرف عامل فومزا در ترکیب نانوکامپوزیت، خلل و فرج در ساختار ماده بیشتر می‌شود و به همین دلیل چگالی محصول کاهش می‌یابد.

سپاسگزاری

بخش‌هایی از تحقیق حاضر در قالب فرصت مطالعاتی داخل رساله دکتری با حمایت مالی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری و دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان و همکاری پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران زیر نظر دکتر اسماعیل قاسمی انجام گرفت که بدین وسیله سپاسگزاری می‌شود.

صنعت خودروسازی به‌منظور کاهش وزن نهایی خودرو، کاهش مصرف سوخت، بهبود ایمنی سرنشینان و کاهش هزینه در پی تولید قطعات سبک‌تر و مقاوم‌تر است. در نانوکامپوزیت‌های با ۴۰ درصد ذرات باگاس می‌توان با استفاده از عامل فومزا چگالی محصول را کاهش داد. با افزایش عامل فومزا، مقاومت محصول در برابر ضربه افزایش می‌یابد، اما دیگر خواص مقاومتی تضعیف می‌شود. برای رفع این مشکل، می‌توان با افزودن نانوذرات کربن کروی خواص مقاومتی نانوکامپوزیت را افزایش داد. به‌طور خلاصه می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مصرف عامل فومزا، به‌طور مطلوب چگالی محصول کاهش و مقاومت به ضربه افزایش می‌یابد، اما مقاومت خمشی، مدول خمشی و مقاومت کششی روند کاهش نشان می‌دهند. در همین زمینه، با افزایش مصرف نانوذره کربن کروی مقاومت به ضربه، مقاومت خمشی، مدول خمشی و مقاومت کششی به‌طور معنی‌دار افزایش می‌یابد. وجود

References

- [1]. Anesll, M. (2015). *Wood Composites*. Woodhead Publishing. 444 Pp.
- [2]. Ashori, A.R. (2008). Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industry. *Bioresource Technology*, 99(11): 4661-4667.
- [3]. Schwarzkopf, M.J., and Burnard, M.D. (2016). Wood-plastic composites-performance and environmental impacts. in environmental impacts of traditional and innovative forest-based bioproducts. *Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes*, 19-43.
- [4]. Ashori, A., Shahrehabak, A.B., and Madhoushi, M. (2015). Effects of nanoclay and coupling agent on fungal degradation and water absorption of sanding dust/high density polyethylene composites. *Journal of Composite Materials*, 49(9): 1107-1114.
- [5]. Ghanbari, A., Madhoushi, M., and Ashori, A. (2014). Wood plastic composite panels: Influence of the species, formulation variables and blending process on the density and withdrawal strength of fasteners. *Journal of Polymers and the Environment*, 22(2): 260-266.
- [6]. Chavooshi, A., Madhoushi, M., Navi, M., and Abareshi, M.Y. (2014). MDF dust/PP composites reinforced with nanoclay: Morphology, long-term physical properties and withdrawal strength of fasteners in dry and saturated conditions. *Construction and Building Materials*, 52: 324-330.
- [7]. Kord, B., Varshoei, A., and Chamany, V. (2011). Influence of chemical foaming agent on the physical, mechanical, and morphological properties of HDPE/wood flour/nanoclay composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30 (13): 1115-1124.
- [8]. Kord, B., and Kord, B. (2016). Influence of type and content of chemical foaming agent on the dynamic mechanical properties of high density polyethylene-flax fiber composites. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 7 (2): 179-191.
- [9]. Petchwattana, N., and Covavisaruch, S. (2010). Influences of particle sizes and contents of chemical blowing agents on foaming wood plastic composites prepared from poly(vinyl chloride) and rice hull. *Materials and Design*, 32 (5): 2844-2850.
- [10]. Tavassoli Farsheh, A., Talaeipour, M., Hemmasi, A. H., Khademieslami, H., and Ghasemi, I. (2011). Investigation on mechanical and morphological properties of foamed nanocomposites based on wood flour/PVC / multi-walled carbon nanotube. *BioResources*, 6(1): 841-852.
- [11]. Oksman Niska, K., Sain, M. (2008). *Wood-Polymer Composites*. Woodhead Publishing. 384 pp.
- [12]. Zimmermann, M., Turella, T., Santana, R., and Zattera, A. (2014). The influence of wood flour particle size and content on the rheological, physical, mechanical and morphological properties of EVA/wood cellular composites. *Materials and Design*, 57: 660-666.
- [13]. Soares, F.A., and Machtigall, S.M.B. (2013). Effect of chemical and physical foaming additives on the properties of PP/wood flour composites. *Polymer Testing*, 22 (4): 640-646.
- [14]. Bikiaris, D. (2011). Microstructure and properties of polypropylene/carbon nanotube nanocomposites. *Materials*, 3(4): 2884-2946.
- [15]. Koubaa, A., Kada, D., Migneault, S., and Tabak, G. (2016). Physical and mechanical properties of polypropylene wood carbon fiber hybrid composites. *Bioresources*, 11(1), 1393-1406.
- [16]. Yaghoobi, H., and Fereidoon, A. H. (2019). Preparation and characterization of short kenaf fiber-based biocomposites reinforced with multi-walled carbon nanotubes. *Composites: B.*, 162: 314-322.
- [17]. Prashantha, K., Soulestin, J., Lacrampe, M. F., Claes, M., Dupin, G., and Krawczak, P. (2008). Multi-walled carbon nanotube filled polypropylene nanocomposites based on masterbatch route: Improvement of dispersion and mechanical properties through PP-g-MA addition. *eXPRESS Polymer Letters*, 2(10): 735-745.

Mechanical properties of natural fiber/polypropylene, foamed and reinforced with spherical carbon nanoparticles for application in automotive industry

M. Madhoushi*; Assoc. Prof., Department of Wood Engineering and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I.R. Iran

A. Malakani; Ph.D. in Wood Composites, Department of Wood Engineering and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I.R. Iran

Gh. Ebrahimi; Prof., Department of Wood Industries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

A. Rashidi; Prof., Nanotechnology Research Center, Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, I.R. Iran

(Received: 19 January 2020, Accepted: 29 February 2020)

Abstract

The aim of this study was to investigate the mechanical properties of foamed, reinforced and light weighted natural fiber/polypropylene nanocomposites using spherical carbon nanoparticles for use in the automotive industry. For this purpose, bagasse flour at constant level of 40%, azodicarbonamide foaming agent at 0, 2 and 4% levels, spherical carbon nanoparticles at four levels, namely 0, 0.25, 0.5 and 1% were selected as study variables. Polypropylene as polymeric matrix, and polypropylated maleic anhydride coupling agent (4% constant value) were considered for different nanocomposite compositions. The mixing of materials was performed using an internal mixing machine and then by hot and cold two-step press. Test specimens for density, impact strength, flexural and tensile tests were fabricated using standard molds. The ultrastructure of the nanocomposites was also studied using SEM microscopic images. Results showed that by increasing the amount of foaming agent, the density of the product decreased significantly, but had a negative effect on mechanical strengths except impact strength. Impact strength of lightweight nanocomposites had higher values than that of control samples. It was also found that increasing the amount of carbon nanoparticles was able to compensate for the decrease in other resistances in lightweight nanocomposites and increase their quantities. Ultrastructural examination of the samples also showed that in the presence of carbon nanoparticles, bagasse particles were better dispersed inside the polymer and a better bonding between them and the polymer occurred. Also, the presence of a foaming agent increases the pores and decreases the density.

Keywords: automotive industry, bagasse, foaming agent, impact strength, nanocomposite, spherical carbon nanoparticle.

* Corresponding Author, Email: madhoushi@gau.ac.ir, Tel: +98 1732427156