

# بررسی اثر ذرات نانوخاکرس و عمل آوری گرمایی با ریزموج بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت گرد MDF- پلی پروپیلن

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،  
سال بیست و پنجم، شماره ۴،  
صفحه ۳۳۱-۳۲۳، ۱۳۹۱  
ISSN: 1016-3255  
Online ISSN: 2008-0883

آرش چاوشی<sup>۱</sup>، محراب مدهوشی<sup>۱</sup>، امیر موتاب ساعی<sup>۲</sup>، علی رضا شاکری<sup>۳\*</sup>

۱- گرگان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گروه تکنولوژی و مهندسی چوب،

صندوق پستی ۱۵۷۳۹-۴۹۱۳۸

۲- تهران، دانشگاه تربیت مدرس، گروه چوب‌شناسی و صنایع چوب، صندوق پستی ۳۵۶-۴۶۴۱۴

۳- گرگان، دانشگاه گلستان، دانشکده شیمی، گروه شیمی، صندوق پستی ۱۵۷۵۹-۴۹۱۳۸

دریافت: ۹۱/۱/۲۴، پذیرش: ۹۱/۶/۲۹

## چکیده

در این پژوهش، اثر عمل آوری گرمایی تابش ریزموج بر خواص مکانیکی و شکل‌شناسی نانوکامپوزیت‌های گرد تخته فیبر با چگالی متوسط (MDF)- پلی پروپیلن بررسی شده است. بدین منظور، نانوخاکرس کلویزیت 15A (Cloisite 15A) در سه سطح وزنی ۲، ۴ و ۶٪ به کار گرفته شد. از پلی پروپیلن (PP) به عنوان ماده زمینه و مالئیک انیدرید پیوند یافته با پلی پروپیلن (MAPP) نیز به مقدار ۴٪ وزنی به عنوان عامل جفت‌کننده استفاده شد. همچنین، ماده لیگنوسولولوژی استفاده شده در این پژوهش گرد حاصل از سمباده‌زنی سطح تخته‌های MDF (سطح ۵۰٪ وزنی) بود. نمونه‌های آزمون با استفاده از اکسترودر دوپیچی به شکل گرانول تهیه شدند. سپس، با چگالی اسمی  $1 \text{ g/cm}^3$  در ابعاد  $1 \times 2 \times 3 \text{ cm}$  با استفاده از روش پرس گرم تهیه شدند. آزمون خمش طبق استاندارد CEN/TS 15534-1 و آزمون ضربه مطابق با استاندارد ASTM D4495 انجام شد. برای بررسی شکل‌شناسی و فاصله لایه‌های سیلیکات ( $d_{001}$ ) در کامپوزیت‌های تهیه شده، از آزمون‌های پراش پرتو X (XRD) و میکروسکوپ الکترونی پویشی (FE-SEM) استفاده شد. نتایج نشان داد، بیشترین استحکام خمشی، مدول خمشی و استحکام ضربه‌ای در سطح ۲ درصد وزنی ذرات نانوخاکرس به دست می‌آید. خواص مکانیکی نمونه‌های عمل آوری شده با تابش ریزموج نیز نسبت به سایر نمونه‌های آزمون (عمل آوری نشده با تابش ریزموج) بهتر بود. همچنین، مطالعات پراش پرتو X نشان داد که افزایش فاصله بین صفحات خاکرس در نمونه‌های کامپوزیت با ساختار بین‌لایه‌ای است. نتایج FE-SEM نشان داد، در نانوکامپوزیت‌های عمل آوری شده، ذرات گرد MDF به طور بهینه‌تر با فاز زمینه پلیمری ترکیب شده و عمل دربرگرفتن ذرات به وسیله پلیمر بهتر انجام شده است.

## واژه‌های کلیدی

تابش ریزموج،  
نانوخاکرس،  
گرد MDF،  
کامپوزیت،  
آزمون مکانیکی

\* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:  
[a.shakeri@gu.ac.ir](mailto:a.shakeri@gu.ac.ir)

## مقدمه

کامپوزیت‌های چوب - پلاستیک (WPCs) مواد کامپوزیتی ساخته شده از الیاف (آرد) چوب و پلاستیک‌ها هستند. WPCها زیرمجموعه دسته بزرگ‌تری از مواد به نام کامپوزیت‌های پلاستیکی با الیاف طبیعی (natural fiber plastic composites, NFPCs) هستند که ممکن است در آنها از سایر پرکننده‌های سلولوزی لیفی مانند الیاف خمیر کاغذ، پسماندهای کشاورزی، بامبو، ضایعات و گردهای صنایع چوبی استفاده شود. کامپوزیت‌های گرمانرم نقش مهمی در زندگی دارند و در مواردی چون وسایل آشپزخانه تا اجزای شاتل‌های فضایی استفاده می‌شوند [۱].

افزایش جهانی تقاضا برای تولید فراورده‌های کامپوزیتی چوبی، امکان استفاده از چوب‌های با کیفیت کم و تولید دیواره‌های با کیفیت خوب، باعث گسترش صنایع فراورده‌های کامپوزیت چوبی شده است. از راه‌های جلوگیری از تخریب جنگل‌ها و رفع کمبود محصولات لیگنوسلولوزی، استفاده گسترده از منابع سلولوزی جایگزین است.

استفاده از ضایعات کارخانه‌های صنایع چوبی یکی از این منابع سلولوزی جایگزین است. این حجم گسترده ضایعات علاوه بر هدر دادن منابع چوبی، در کارخانه‌ها و کارگاه‌های صنایع چوب نیز به عنوان معضلی در آمده است که تنها راه خلاصی از آن در بیشتر موارد سوزاندن آنهاست [۲]. از این رو در ساخت این نوع کامپوزیت‌ها، استفاده از ماده لیگنوسلولوزی ارزان قیمت می‌تواند راه کاری در تولید مقرون به صرفه این محصول باشد. بنابراین، برای تبدیل منابع لیگنوسلولوزی کم‌ارزش به محصولات با ارزش زیاد، استفاده از گردهای سمباده‌زنی MDF می‌تواند راه کار مناسبی برای صنایع چوب - پلاستیک باشد. برای بهینه‌سازی عملکرد کامپوزیت‌ها، استفاده از تقویت‌کننده‌ها و نیز بهبود فرایند تولید و تقویت کامپوزیت‌های جدید به واسطه عمل‌آوری‌هایی برای تقویت اتصالات فازهای مختلف کامپوزیت‌ها اهمیت ویژه‌ای می‌یابند. بنابراین، در پژوهش حاضر سطوح مختلف ذرات نانوخاک رس در کامپوزیت گرد MDF - پلی پروپیلن و همچنین اثر عمل‌آوری گرمایی با تابش ریزموج بر خواص مکانیکی کامپوزیت مدنظر بررسی شده است. عمل‌آوری با تابش ریزموج پتانسیل زیادی برای بهبود روش‌های کنونی تولید کامپوزیت دارد. همچنین، گرمادهی با تابش ریزموج به شکل همرفتی انرژی الکترومغناطیسی نسبت به انرژی گرمایی با انتقال گرما، مناسب‌تر است [۳].

گرمادهی با ریزموج به شکل حجمی است و به سطح محدود نمی‌شود. در نتیجه، مواد پلیمری گرمانرم می‌توانند در قالب ریزموج سریع‌تر فراوری شوند [۴].

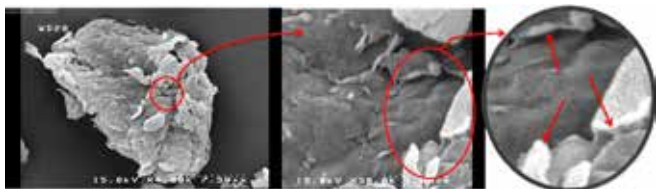
فراوری با ریزموج، به روش انتقال گرمایی همرفتی دارای چند امتیاز است. این مزایا شامل گرمادهی سریع، افزایش چسبندگی الیاف - ماده زمینه و کنترل‌پذیری زیاد است. گرمادهی با ریزموج به شدت به مقدار خواص دی‌الکتریک پلیمر بستگی دارد. بنابراین، انرژی امواج ریزموج به‌طور مستقیم به داخل لایه مرزی مواد زمینه‌ای بسیار نازک منتقل می‌شود [۵].

پژوهش‌های انجام شده در ارتباط با اثر ذرات نانوخاک رس بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها نشان داد، افزودن نانوخاک رس به کامپوزیت چوب - پلاستیک موجب افزایش مدول یانگ از ۲/۳ GPa به ۳/۸ GPa [۶]، افزایش استحکام کششی کامپوزیت آرد باگاس - پلی پروپیلن تا ۳٪ وزنی از نانوخاک رس [۷] و افزایش استحکام‌های خمشی و کششی کامپوزیت آرد چوب کاج و پلی اتیلن سنگین (HDPE) تا ۲٪ وزنی می‌شود [۸]. همچنین نتایج نشان داده است، با افزایش درصد وزنی ذرات نانوخاک رس در نمونه‌های چوب - پلاستیک، استحکام ضربه‌ای کاهش یافته و در سطح ۵ درصد، کمترین مقدار استحکام حاصل می‌شود [۹].

در پژوهشی Feyz و همکاران [۱۰] نشان داده‌اند، در نانوکامپوزیت آمیزه‌های PC/ABS بیشترین استحکام کششی و استحکام ضربه‌ای در استفاده ۲٪ ذرات نانوخاک رس حاصل می‌شود و در نمونه‌های حاوی نانوخاک رس با افزایش مقدار نانوذرات، استحکام کششی و استحکام ضربه‌ای افت کرده و مدول یانگ آمیزه افزایش می‌یابد. پژوهشگران روش امواج ریزموج را به عنوان منبع انرژی جایگزین برای فراوری پلیمرها و کامپوزیت‌ها بررسی کرده‌اند [۵].

Chaowasakoo و Sombatsompop [۱۱]، روش‌های پخت گرمایی متداول و پخت ریزموج را برای پخت کامپوزیت‌های اپوکسی استفاده کرده و خواص مکانیکی و شکل‌شناسی کامپوزیت‌ها را ارزیابی کرده‌اند. پخت با گرمادهی به شکل متداول، در ۷۰°C و به مدت ۸۰ min انجام شد، درحالی‌که پخت به روش ریزموج در توان ۲۴۰ W به مدت ۱۸ min به منظور دست‌یابی به پخت بهینه کامپوزیت‌ها انجام شد. نتایج مقایسه‌ای نشان داد، در پخت با استفاده از امواج ریزموج، زمان پخت کوتاه‌تر و استحکام نهایی بیشتری حاصل می‌شود. به‌ویژه استحکام ضربه‌ای و ازیاد طول تا پارگی در نمونه‌هایی بیشتر است که با پخت گرمایی متداول ساخته شده‌اند.

با توجه به اهمیت موضوع در این پژوهش برای ساخت کامپوزیت از گرد MDF - پلی پروپیلن با افزودن سه سطح نانوذرات استفاده شد. سپس، نمونه‌ها پیش از آزمون برای برهم‌کنش بهتر ماده زمینه پلیمری با گرد MDF در معرض امواج ریزموج قرار گرفتند، در نهایت خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها بررسی شد.



شکل ۱- تصویر FE-SEM از نانوذرات خاکرس اصلاح شده.

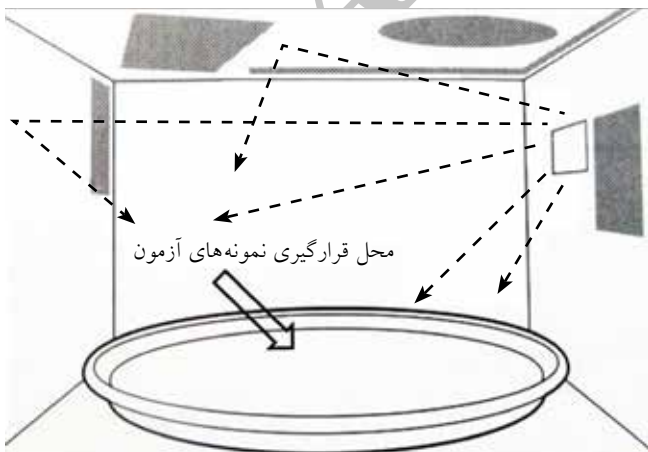
مخلوط شدند تا فاز زمینه و فاز پرکننده به طور بهینه با یکدیگر آمیخته شوند. سپس، مواد با استفاده از اکسترودر دوپیچی مدل WPC-4815 ساخت شرکت برنا پارس مهر به شکل گرانول تهیه و با استفاده از آسیاب چکشی آزمایشگاهی، گرانول‌ها به پودر تبدیل شدند. در ادامه نمونه‌های آزمون با استفاده از پرس گرم تهیه شدند.

#### عمل آوری گرمایی به وسیله تابش ریزموج

برای تعیین زمان مناسب پرتو دهی، نمونه‌ها در سه زمان ۵، ۷ و ۱۰ min با توان ۱۰۰۰ W در معرض تابش با دستگاه ریزموج Panasonic مدل NN-CD997S قرار گرفتند. در ادامه پس از بررسی شکل ظاهری نمونه‌ها (تغییر شکل و رنگ)، زمان ۷ min به عنوان زمان بهینه انتخاب شد (شکل ۲).

#### اندازه‌گیری خواص مکانیکی

خواص خمشی و استحکام ضربه‌ای نمونه‌های عمل‌آوری شده با پرتو و نمونه‌های عمل‌آوری نشده بررسی شدند. آزمون خمش طبق استاندارد CEN/TS 15534-1 انجام شد [۱۲]. آزمون روی نمونه‌ها به ابعاد ۱۷×۲×۱ cm و بر اساس خمش سه نقطه‌ای با سرعت ۵ cm/min انجام شد. نتایج میانگین ۶ آزمون گزارش شده است. برای انجام آزمون ضربه مطابق با استاندارد ASTM D4495، مستطیلی با ابعاد اسمی ۸×۱/۵×۱ cm استفاده شد [۱۳].



شکل ۲- تصویر کلی از تابش ریزموج بر نمونه‌های کامپوزیت.

## تجربی

### مواد

ماده لیگنوسلولوزی استفاده شده در این پژوهش، گرد حاصل از سمباده‌زنی سطح تخته‌های MDF بود که از کارخانه آراین سینا واقع در شهرک صنعتی ساری تهیه شد. پلی‌پروپیلن (PP) نوع V30S صنایع پتروشیمی اراک به عنوان ماده زمینه گرمانرم با شاخص جریان مذاب ۱۸ g/۱۰min استفاده شد. نانوذرات خاکرس کلوزیت 15A (Cloisite®15A) محصول شرکت Southern Clay آمریکا است که در سه سطح وزنی ۲، ۴ و ۶٪ به عنوان ماده تقویت‌کننده (با ابعاد ۹۰ درصد کمتر از ۱۳ میکرون، ۵۰ درصد کمتر از ۶ میکرون و ۱۰ درصد کمتر از ۲ میکرون) استفاده شد. مشخصات نانوخاکرس اصلاح شده در جدول ۱ و تصویر میکروسکوپی الکترونی پویشی آن در شکل ۱ آورده شده است. همچنین، از مالئیک انیدرید پیوند داده شده با پلی‌پروپیلن (MAPP) به مقدار ۴٪ وزنی به عنوان عامل جفت‌کننده با نام تجاری PP-G ۱۰۱ ساخت شرکت کیمیا جاوید سپاهان (اصفهان) استفاده شد.

### دستگاه‌ها و روش‌ها

#### آماده‌سازی مواد

پس از تهیه گردهای MDF، برای رساندن مقدار رطوبت آنها به نزدیک صفر درصد، این گرد به مدت ۲۴ h داخل خشک‌کن با دمای ۲۰±۱۰۰ °C قرار داده شدند. سپس، گرد خشک شده در کیسه‌های پلاستیکی بسته‌بندی شد. نانوذرات خاکرس نیز پیش از استفاده برای تولید کامپوزیت مدنظر به منظور کاهش رطوبت و همچنین جلوگیری از جذب رطوبت به مدت ۲۴ h داخل خشک‌کن با دمای ۲۰±۱۰۰ °C قرار گرفتند.

#### اختلاط مواد اولیه و ساخت نمونه‌ها

چگالی اسمی نمونه‌ها ۱ g/cm<sup>3</sup> در نظر گرفته شد و مواد آماده شده برای هر نمونه با استفاده از ترازوی آزمایشگاهی توزین شدند. برای ساخت نمونه‌ها، مواد توزین شده پیش از فرایند ساخت، به مدت ۱۰ min

جدول ۱- خواص نانوذرات خاکرس اصلاح شده.

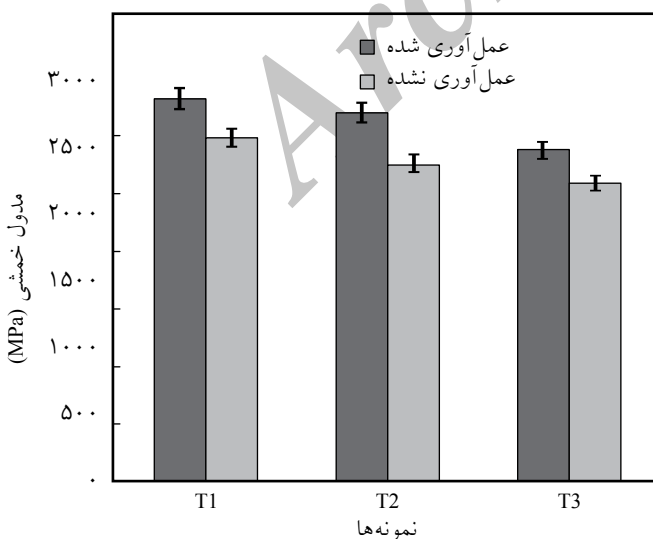
نام تجاری	اصلاح‌کننده آلی	مقدار CEC (meq/۱۰۰g)	نتایج پراش پرتو X d <sub>001</sub> (Å)
Cloisite® 15A	*2M2HT	۱۲۵	۳۱/۵

\* 2M2HT: دی‌متیل، تالوی‌دی‌هیدروژن‌دار شده، آمونیم چهارتایی.

اصلاح شده به علت تشکیل اتصال با ماده زمینه پلیمر موجب افزایش استحکام خمشی کامپوزیت می‌شوند. البته پس از حد مشخصی روند افزایشی خواص با افزایش درصد خاک‌رس کند و حتی گاهی معکوس می‌شود. به همین دلیل، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد نانوذرات خاک‌رس، استحکام خمشی کاهش می‌یابد [۱۵]. در واقع به نظر می‌رسد در مقادیر بیشتر، نانوذرات خاک‌رس کلوخه شده باعث تمرکز تنش می‌شوند و استحکام خمشی را نسبت به نمونه‌های دارای ۲٪ نانوذرات خاک‌رس کاهش می‌دهند. کاهش استحکام خمشی در درصد‌های بیشتر نانوذرات خاک‌رس می‌تواند در اثر افزایش درهم‌گیری بین قطعات مولکولی و جلوگیری از تسهیم متعادل تنش و جلوگیری از آزادی لازم زنجیرها شود که موجب کاهش استحکام در مقادیر زیاد نانوذرات شده است [۱۶]. همچنین، استفاده از عمل‌آوری گرمایی با تابش ریزموج اثر مثبتی بر مقدار استحکام خمشی نمونه‌های آزمون دارد و استحکام خمشی افزایش یافته است. محدوده تغییرات استحکام خمشی از ۲۰/۲۸۸ MPa تا ۲۸/۰۲۷ MPa است (شکل ۳).

### مدول خمشی

مدول خمشی نشان‌دهنده نیروی لازم برای خم کردن نمونه است. بنابراین، اجسام دارای سفتی بیشتر مدول خمشی زیاده‌تری دارند [۱۷]. افزایش خاک‌رس در کامپوزیت باعث بهبود مدول خمشی آن می‌شود. مطابق شکل ۴، یک اثر تقویت‌کنندگی در ۲ درصد وزنی نانوکاکرس (نمونه T1) در خواص مدول خمشی کامپوزیت گرد MDF - پلی‌پروپیلن مشاهده می‌شود. در واقع، نانوذرات با نسبت



شکل ۴- تغییرات مدول خمشی در نمونه‌های نانوکامپوزیت گرد MDF - پلی‌پروپیلن.

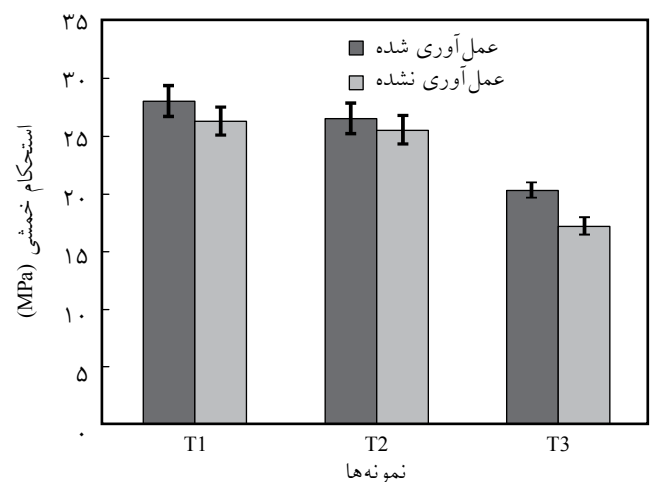
برای بررسی خواص مکانیکی (خمش) از دستگاه INSTRON-4486 ساخت کشور انگلستان استفاده شد. همچنین برای انجام آزمون استحکام ضربه‌ای بدون شکاف، ماشین ضربه پاندولی ساخت شرکت SANTAM به کار گرفته شد.

تصاویر میکروسکوپی الکترونی پویشی به کمک میکروسکوپ FE-SEM مدل S-4160 ساخت شرکت Hitachi ژاپن از سطح شکست نمونه‌ها تهیه شد. همچنین، ساختار نانوکاکرس لایه‌ای و شکل‌شناسی نانوکامپوزیت‌های تولیدی با آزمون XRD، به کمک پراش سنج مدل D8 Advance ساخت شرکت Bruker آلمان با تابش پرتو با طول موج  $1.54 \text{ \AA}$ ، ولتاژ شتاب‌دهنده  $40 \text{ kV}$  و جریان  $30 \text{ mA}$  بررسی شده است. الگوی پراش در  $2\theta$  بین  $10^\circ$  -  $20^\circ$  به دست آمد و فاصله بین لایه‌ها ( $d_{001}$ ) به کمک قانون براگ محاسبه شد.

## نتایج و بحث

### استحکام خمشی

در شکل ۳، اثر مقدار خاک‌رس اصلاح شده بر مقدار استحکام خمشی نمونه‌های کامپوزیت نشان داده شده است. مطابق این شکل، بیشترین مقدار استحکام خمشی در نمونه T1 حاوی ۲ درصد وزنی خاک‌رس به دست آمد، نتایج مشابهی نیز توسط سایر پژوهشگران در این سطح افزایش نانوذرات خاک‌رس گزارش شده است [۸،۹،۱۴]. به نظر می‌رسد، مقدار استحکام خمشی تابعی از مقدار خاک‌رس در کامپوزیت باشد که با افزایش آن به ۴ و ۶ درصد وزنی (نمونه‌های T2 و T3) استحکام خمشی کامپوزیت کاهش یافت. زیرا، نانوذرات خاک‌رس



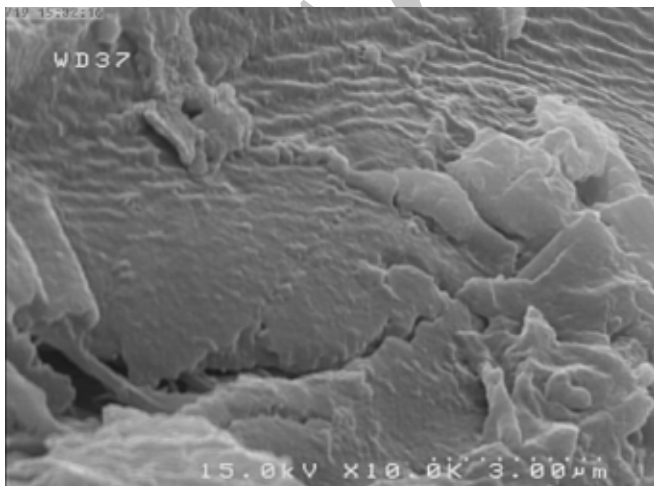
شکل ۳- تغییرات استحکام خمشی در نمونه‌های نانوکامپوزیت گرد MDF - پلی‌پروپیلن.

امکان اتلاف انرژی آنها، استحکام ضربه‌ای برای هر سه نمونه حاوی نانوخاک‌کرس کاهش یافته است [۱۶]. همچنین، افزایش مقدار نانوخاک‌کرس مناطقی را در ماده زمینه پلیمری به وجود می‌آورد که موجب تمرکز تنش می‌شود و رشد ترک را از آن ناحیه آغاز می‌کند [۹]. از طرفی، محدودیت حرکت زنجیرهای پلیمری در مجاورت چنین ذراتی که دارای نسبت منظر زیاد هستند، در مقایسه با ذرات کروی متداول، مقاومت ماده را در برابر رشد ترک بهبود می‌بخشد [۲۰].

استفاده از تابش ریزموج سبب بهبود استحکام ضربه‌ای نمونه‌های آزمون شد. مطابق شکل ۵، پرواضح است که بین نمونه‌های عمل‌آوری نشده و عمل‌آوری شده به لحاظ مقدار استحکام ضربه‌ای تفاوت وجود دارد و مقدار آن در نمونه‌های عمل‌آوری شده با تابش ریزموج، بیشتر است. این موضوع می‌تواند ناشی از نرم شدن پلیمر و در برگرفتن بیشتر ذرات با ماده زمینه پلیمری و کاهش فضاهای خالی بین ذرات و ماده زمینه پلیمری و همچنین از بین رفتن ترک‌های ریز تشکیل شده حین فرایند ساخت کامپوزیت باشد. محدوده تغییرات استحکام ضربه‌ای بدون شکاف از  $62/5 \text{ J/m}$  تا  $127/3 \text{ J/m}$  است.

#### شکل شناسی

تصاویر میکروسکوپ الکترونی پویشی از سطح مقطع شکست نمونه‌های شاهد و نمونه‌های عمل‌آوری شده با استفاده از تابش ریزموج به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ و نیز نحوه اختلاط گردهای MDF در ماده زمینه در شکل ۸ نشان داده شده است. شکل ۸، نحوه پراکنش ذرات چوب را در ماده زمینه نشان می‌دهد، با توجه به شکل در بعضی از بخش‌های نمونه‌های آزمون، فضاهای خالی و به جامانده از خروج گردهای MDF مشاهده می‌شود که بیانگر اتصالات ضعیف

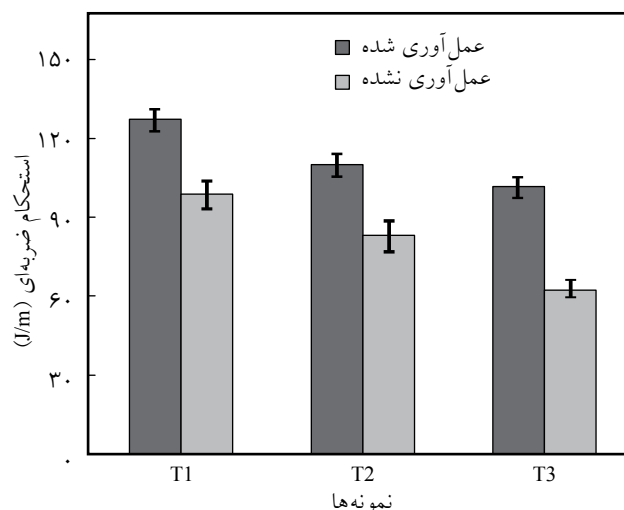


شکل ۶- تصویر FE-SEM نانوکامپوزیت گرد MDF- پلی پروپیلن عمل‌آوری نشده (سطح ۲ درصد نانوخاک‌کرس).

طول به قطر زیاد فصل مشترک بزرگی با فاز پیوسته پلیمری دارند که افزایش استحکام نانوکامپوزیت حاصل را توجیه می‌کند. اما، با افزایش درصد وزنی نانوخاک‌کرس از ۲ به ۶ درصد خواص مدول خمشی کاهش یافت. خواص مدول خمشی نه تنها بستگی به خواص اجزای تشکیل دهنده دارد، بلکه متأثر از پراکنش نانوخاک‌کرس و چسبندگی بین سطحی بین نانوخاک‌کرس و پلیمر نیز است. نتایج گزارش منتشر شده نیز این یافته‌ها را تأیید می‌کند [۹، ۱۸، ۱۹]. همچنین در شکل ۴ ملاحظه می‌شود، استفاده از تابش ریزموج باعث افزایش مقدار مدول در تمام نمونه‌های آزمون شده است. به نظر می‌رسد، تابش‌دهی نمونه‌های کامپوزیتی سبب نرم‌شدگی ماده زمینه گرم‌نرم می‌شود، زنجیرهای پلیمری حرکت کرده و سبب دربرگرفتن (encompass) ذرات پرکننده نرمه گرد MDF و نانوذرات خاک‌کرس می‌شوند، بنابراین سطح تماس بین ذرات پرکننده و تقویت‌کننده با ماده زمینه بیشتر می‌شود.

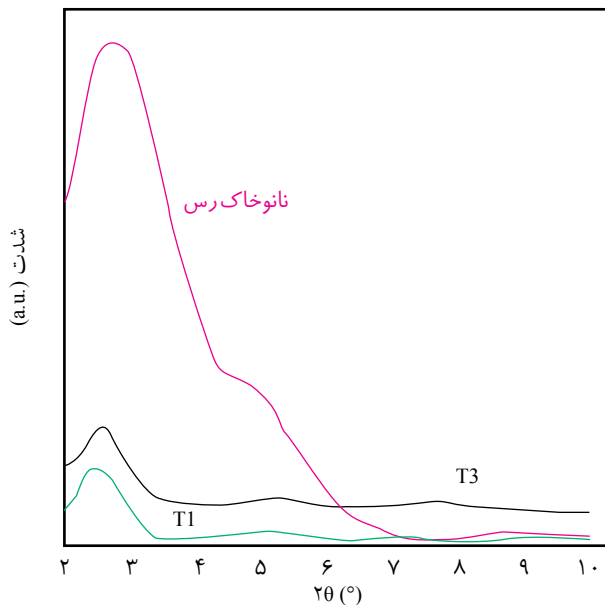
#### استحکام ضربه‌ای

آزمون استحکام ضربه‌ای روی نمونه‌های کامپوزیتی با مقادیر مختلف نانوخاک‌کرس نشان داد، استحکام ضربه‌ای نمونه‌های کامپوزیتی کاهش می‌یابد (شکل ۵) که با نتایج به دست آمده پژوهش‌های پیشین مطابقت دارد [۹، ۱۹]. به نظر می‌رسد، نانوذرات خاک‌کرس در سطوح وزنی زیاد تمایل به کلوخه شدن دارند و این کلوخه‌ها به راحتی می‌توانند منجر به ایجاد شکاف اطراف خود شده و نقطه تمرکز تنش را ایجاد کنند، در نهایت شکست و افت خواص ضربه را موجب شوند [۱۰]. در واقع با افزایش درصد نانوخاک‌کرس به دلیل کاهش تحرک پذیری زنجیرها و



شکل ۵- نمودار تغییرات استحکام ضربه‌ای در نانوکامپوزیت‌های گرد MDF- پلی پروپیلن.





شکل ۹- الگوی پراش پرتو X خاک رس و نانوکامپوزیت گرد MDF - پلی پروپیلن.

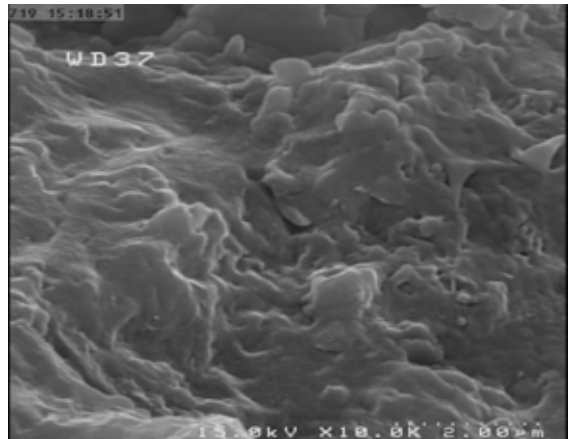
به وسیله ماده زمینه کاهش یابد.

#### پراش پرتو X (XRD)

مطالعات پراش پرتو X نشان دهنده افزایش فاصله بین صفحات خاک رس در نمونه های کامپوزیت با ساختار بین لایه ای است. زیرا قله مربوط به ناحیه بلوری نانوخاک رس از بین نرفته و فقط به سمت  $2\theta$  های کمتر کاهش یافته است. به عبارت دیگر، فاصله بین لایه های سیلیکاتی نانوخاک رس به دلیل نفوذ زنجیرهای پلیمری افزایش یافته، ولی از هم گسیختگی کامل لایه های خاک رس رخ نداده است. همان طور که مشاهده می شود، زاویه پراش پرتو X و فاصله بین صفحات پودر نانوخاک رس به ترتیب از  $2\theta = 2/81^\circ$  و  $d_{001} = 31/41 \text{ nm}$  برای  $2\theta = 2/49^\circ$  و  $d_{001} = 35/44 \text{ nm}$  و  $2\theta = 2/45^\circ$  و  $d_{001} = 37/02 \text{ nm}$  برای نانوذرات خاک رس و نمونه های آزمون T1 و T3 است (شکل ۹).

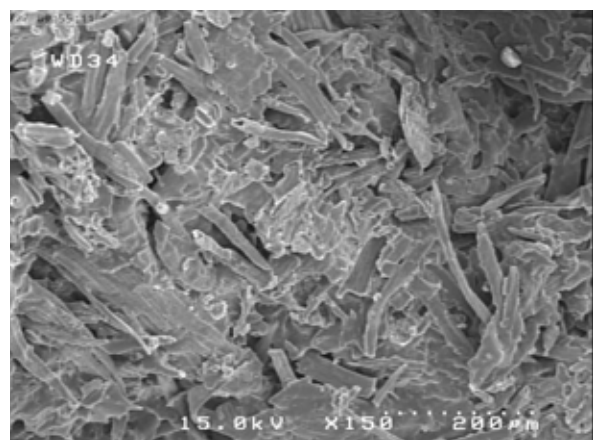
#### نتیجه گیری

در این پژوهش، اثر عمل آوری گرمایی تابش ریزموج بر خواص مکانیکی و شکل شناسی نانوکامپوزیت های گرد MDF - پلی پروپیلن بررسی شده است. مقایسه خواص مکانیکی نمونه های عمل آوری شده به وسیله تابش ریزموج و نمونه های عمل آوری نشده، حاکی از آن است که نمونه های عمل آوری شده نسبت به نمونه های عمل آوری



شکل ۷- تصویر FE-SEM نانوکامپوزیت گرد MDF - پلی پروپیلن عمل آوری شده با استفاده از تابش ریزموج (سطح ۲ درصد نانوخاک رس).

بین این گرد و پلیمر در ناحیه بین سطحی آنهاست. در حالی که در نمونه های عمل آوری شده با پرتو، یکنواختی و انسجام بیشتری مشاهده می شود که نشان دهنده پراکنش بهتر گرد MDF درون ماده زمینه و اتصالات قوی بین پلیمر و پرکننده است (شکل ۷). از سوی دیگر، تفاوت قابل توجهی بین سطح مقطع شکست نانوکامپوزیت عمل آوری شده و عمل آوری نشده وجود دارد. بدین ترتیب، سطح نمونه های عمل آوری شده با تابش زبرتر به نظر می رسد که نشان دهنده رفتار شکست شکننده است. در حالی که نمونه های عمل آوری نشده سطح شکست صاف دارند که حاکی از انرژی چسبندگی کم برای شکست است. در واقع استفاده از این نوع عمل آوری گرمایی سبب می شود، پلیمر ذوب شود و مذاب پلیمر عمل دربرگیری ذره های گرد MDF را بهتر انجام دهد. زیرا، در نمونه های عمل آوری نشده ممکن است، بخش هایی از زنجیر پلیمر ذوب نشود و عمل دربرگیری ذرات



شکل ۸- تصویر FE-SEM نمونه های آزمون و نحوه اختلاط الیاف گرد MDF در ماده زمینه.

استحکام ضربه‌ای در نمونه‌های حاوی ۲ درصد وزنی نانوذرات خاک‌کرس حاصل شدند که این رفتار در نتیجه پراکنش بهتر لایه‌های سیلیکاتی نانوخاک‌کرس در فاز پلیمری است.

### قدردانی

از ستاد ویژه توسعه فناوری نانو به دلیل حمایت‌های مالی از این پژوهش قدردانی می‌شود.

### مراجع

- Hetzer M. and De Kee D., Wood/Polymer/Nanoclay Composites, Environmentally Friendly Sustainable Technology: A Review, *Chem. Eng. Res. Design*, **86**, 1083-1093, 2008.
- Winandy J.E., Stark N.M., and Clemons C.M., Considerations in Recycling of Wood-plastic Composites, *5th Global Wood and Natural Fiber Composites Symposium*, Germany, 27-28, April 2004.
- Papargyris D.A., Day R.J., Nesbitt A., and Bakavos D., Comparison of the Mechanical and Physical Properties of a Carbon Fibre Epoxy Composite Manufactured by Resin Transfer Moulding Using Conventional and Microwave Heating, *Compos. Sci. Technol.*, **68**, 1854-1861, 2008.
- Sgriccia N. and Hawley M.C., Thermal, Morphological, and Electrical Characterization of Microwave Processed Natural Fiber Composites, *Compos. Sci. Technol.*, **67**, 1986-1991, 2007.
- Zhou Sh. and Hawley M.C., A Study of Microwave Reaction Rate Enhancement Effect in Adhesive Bonding of Polymers and Composites, *Compos. Struct.*, **61**, 303-309, 2003.
- Yeh S., Ortiz D., Al-Mulla A., and Gupta R., Mechanical and Thermal Properties of Wood/Layered Silicate/Plastic Composites, *Proceedings of the 8th International Conference on Wood fiber-Plastic Composites*, Society of Plastic Engineers, Wisconsin, MI, 2005.
- Nourbakhsh A. and Ashori A., Influence of Nanoclay and Coupling Agent on the Physical and Mechanical Properties of Polypropylene/Bagasse Nanocomposite, *Appl. Polym. Sci.*, **112**, 1386-1390, 2009.
- Wu Q., Lei Y., Clemons C.M., Yao F., Xu Y., and Lian K., Properties of HDPE/Clay/Wood Nanocomposites, *J. Plast. Technol.*, **2**, 108-115, 2007.
- Kord B., Investigation on the Effects of Nanoclay Particles on Mechanical Properties of Wood Polymer Composite Made of High Density Polyethylene-wood Flour, *Iran. J. Wood Paper Sci. Res.*, **1**, 91-101, 2010.
- Feyz E., Jahani Y., Esfandeh M., and Jafari S.H., Flame Retardant Hybrid System of Triphenyl Phosphate/Nanoclay in Evaluation of Flammability and Mechanical Properties of PC/ABS Compound, *Iran. J. Polym. Sci. Technol.* (In Persian), **6**, 475-485, 2011.
- Chaowasakoo T. and Sombatsompop N., Mechanical and Morphological Properties of Fly Ash/Epoxy Composites Using Conventional Thermal and Microwave Curing Methods, *Compos. Sci. Technol.*, **67**, 2282-2291, 2007.
- British Standard, Wood-plastics Composites (WPC)-Part 1: Test Methods for Characterization of WPC Materials and Products, 2007.
- Ramtin A.A., Karimi A.N., and Tajvidi M., Study on Mechanical Properties of Composite Made from Sander Dust of Particle-board-Polypropylene, *Iran. J. Wood Paper Sci. Res.*, **1**, 58-68, 2009.
- Chowdhury F.H., Hosur M.V., and Jeelani S., Studies on the Flexural and Thermomechanical Properties of Woven Carbon/Nanoclay-epoxy Laminateds, *Mater. Sci. Eng. A*, **421**, 298-306, 2006.
- Samal S.K., Nayak S., and Mohanty S., Polypropylene Nanocomposites: Effect of Organo-Modified Layered Silicates on Mechanical, Thermal and Morphological Performance, *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, **2**, 243-263, 2008.
- Jowdar E., Beheshty M.H., and Atai M., Nanoclay Effect on Morphology, Mechanical Properties and Water Absorption of Vi-

- nyl Ester- Based Nanocomposites, *Iran. J. Wood Paper Sci. Res.*, **2**, 83-92, 2011.
17. Mehrabzadeh M. and Kamal M.R., Effects of Different Types of Clays and Maleic Anhydride Modified Polystyrene on Polystyrene/Clay Nanocomposites, *Iran. J. Wood Paper Sci. Res.*, **2**, 151-157, 2009.
18. Wan L., Wang K., Chen L., Zhang Y., and He C., Preparation, Morphology and Thermal/Mechanical Properties of Epoxy/Nanoclay Composite, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manufact.*, **11**, 1890-1896. 2005.
19. Han G., Lei Y., Wu Q., Kojima Y., and Suzuki S., Bamboo-fiber Filled High Density Polyethylene Composites; Effect of Coupling Treatment and Nanoclay, *J. Polym. Env.*, **21**, 1567-1582, 2008.
20. Basiri L., Bakhshandeh G.R., Naderi Gh., and Shokoohi Sh., Elastomer Nanocomposites based on Organoclay/IIR/EPDM: Microstructure and Mechanical Properties, *Iran. J. Wood Paper Sci. Res.*, **5**, 343-353, 2011.

Archive of SID