

## Effect of Nanoclay and Microwave Thermal Treatment on Mechanical Properties of MDF Dust-PP Nanocomposite

Arash Chavooshi<sup>1</sup>, Mehrab Madhoushi<sup>1</sup>, Amir Mootab Saei<sup>2</sup>, Alireza Shakeri<sup>3\*</sup>

1. Department of Wood Engineering and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, P.O. Box: 49138-15739, Gorgan, Iran
2. Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University (TMU), P.O. Box: 46414-356, Tehran, Iran
3. Department of Chemistry, Faculty of Sciences, Golestan University, P.O. Box: 49138-15759, Gorgan, Iran

Received 12 April 2012, accepted 19 September 2012

### ABSTRACT

The effect of microwave thermal treatment on mechanical properties of composites made from MDF dust-polypropylene was investigated. In this regard, nanoclay (Cloisite 15A) was added in three different (2, 4 and 6 %wt) levels into the composites. Furthermore, polypropylene (PP) was used as a matrix material and maleic anhydride-grafted polypropylene (MAPP) was used as coupling agent at 4%wt. The medium density fibreboard (MDF) dust was used as lignocellulosic material in the present study. Test samples were made, using extrusion process (twin screw), as granules. Then, samples with dimensions 30×20×1 cm were prepared with 1 g/cm<sup>3</sup> nominal density for the polymer composites using hot pressing method. The bending strength and impact strength were measured according to the technical specifications CEN/TS15534:2007 and D-4495 regulation of ASTM standard, respectively. Field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) and X-ray diffraction (XRD) techniques were employed to evaluate the extent of intercalation and exfoliation of silicate layers in the nanocomposites. Finally, the mechanical tests of flexural strength, flexural modulus and impact strength were performed on the samples. The results showed that the highest flexural strength, flexural modulus and impact strength were obtained at level 2 wt% nanoclay particles. The mechanical strength of the samples that were treated by microwave radiation was the highest. Also, X-ray diffraction studies showed increases in the interlayer spacing of silicate layers and intercalation of polymer chains between the clay layers. Scanning electron microscopy results showed that in the nanocomposites treated by microwave radiation, MDF dust was desirably compounded with thermoplastic materials.

#### Keywords:

microwave radiation,  
nanoclay,  
MDF dust,  
composite,  
mechanical test

(\*)To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: a.shakeri@gu.ac.ir

# بررسی اثر ذرات نانو خاک رس 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 چوب شناسی 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 شکل شناسی نانوکامپوزیت های گرد تخته فیبر با چگالی متوسط (MDF) - پلی پروپیلن بررسی شده است. بدین منظور، نانوخاک رس 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 جفت کننده استفاده شد. همچنین، ماده لیگنوسلولوزی استفاده شده در این پژوهش گرد حاصل از سمباده زنی سطح تخته های MDF (سطح ۵۰٪ وزنی) بود. نمونه های 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 شکل شناسی و فاصله لایه های سیلیکات ( $d_{001}$ ) در کامپوزیت های تهیه شده، از آزمون های پراش پرتو X (XRD) و میکروسکوپ الکترونی پویشی (FE-SEM) استفاده شد. نتایج نشان داد، بیشترین استحکام خمشی، مدول خمشی و استحکام ضربه ای در سطح ۲ درصد وزنی ذرات نانوخاک رس به دست می آید. خواص مکانیکی نمونه های عمل آوری شده با تابش ریزموج نیز نسبت به سایر نمونه های آزمون (عمل آوری نشده با تابش ریزموج) بهتر بود. همچنین، مطالعات پراش پرتو X نشان داد که افزایش فاصله بین صفحات خاک رس در نمونه های کامپوزیت با ساختار بین لایه ای است. نتایج FE-SEM نشان داد، در نانوکامپوزیت های عمل آوری شده، ذرات گرد MDF به طور بهینه تر با فاز زمینه پلیمری ترکیب شده و عمل دربرگرفتن ذرات به وسیله پلیمر بهتر انجام شده است.

## واژه های کلیدی

تابش ریزموج،  
نانوخاک رس،  
گرد MDF،  
کامپوزیت،  
آزمون مکانیکی

\* مسئول مکاتبات، پیام نگار:  
[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 فرآورده‌های کامپوزیتی چوبی، امکان استفاده از چوب‌های با کیفیت کم و تولید دیواره‌های با کیفیت خوب، باعث گسترش صنایع فرآورده‌های 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 عمل آوری گرمایی با تابش ریزموج بر خواص مکانیکی کامپوزیت مدنظر بررسی شده است. عمل آوری 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 فرآوری شوند [۴].

فرآوری 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 فرآوری 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.

## تجربی

### مواد

ماده لیگنوسلولوزی استفاده شده در این پژوهش، گرد حاصل از سمباده زنی سطح تخته های MDF بود که از کارخانه آراین سینا واقع در شهرک صنعتی ساری تهیه شد. پلی پروپیلن (PP) نوع V30S صنایع پتروشیمی اراک به عنوان ماده زمینه گرمانرم با شاخص جریان مذاب  $18 \text{ g}/10 \text{ min}$  استفاده شد. نانوذرات خاکرس کلوزیت 15A (Cloisite®15A) محصول شرکت Southern Clay آمریکاست که در سه سطح وزنی ۲، ۴ و ۶٪ به عنوان ماده تقویت کننده (با ابعاد  $90 \times 1 \times 2$  میکرون، ۵۰ درصد کمتر از  $6 \times 6$  میکرون و ۱۰ درصد کمتر از  $2 \times 2$  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 پلی پروپیلن (MAPP) به مقدار ۴٪ وزنی به عنوان عامل جفت کننده با نام تجاری PP-G ۱۰۱ ساخت شرکت کیمیا جاوید سپاهان (اصفهان) استفاده شد.

### دستگاهها و روشها

#### آماده سازی مواد

پس از تهیه گردهای MDF، برای رساندن مقدار رطوبت آنها به نزدیک صفر درصد، این گرد به مدت  $24 \text{ h}$  داخل خشک کن با دمای  $20 \pm 100^\circ \text{C}$  قرار داده شدند. سپس، گرد خشک شده در کیسه های پلاستیکی بسته بندی شد. نانوذرات خاکرس نیز پیش از استفاده برای تولید کامپوزیت مدنظر به منظور کاهش رطوبت و همچنین جلوگیری از جذب رطوبت به مدت  $24 \text{ h}$  داخل خشک کن با دمای  $20 \pm 100^\circ \text{C}$  قرار گرفتند.

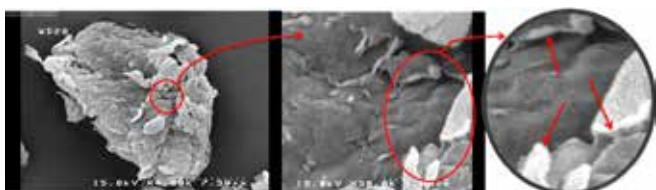
#### اختلاط مواد اولیه و ساخت نمونه ها

چگالی اسمی نمونه ها  $1 \text{ g}/\text{cm}^3$  در نظر گرفته شد و مواد آماده شده برای هر نمونه با استفاده از ترازوی آزمایشگاهی توزین شدند. برای ساخت نمونه ها، مواد توزین شده پیش از فرایند ساخت، به مدت  $10 \text{ min}$

جدول ۱- خواص نانوذرات خاکرس اصلاح شده.

نام تجاری	اصلاح کننده آلی	مقدار CEC (meq/100g)	نتایج پراش پرتو X $d_{001}(\text{Å})$
Cloisite® 15A	*2M2HT	۱۲۵	۳۱/۵

\* 2M2HT: دی متیل، تالوی دی هیدروژن دار شده، آمونیم چهار تایی.



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

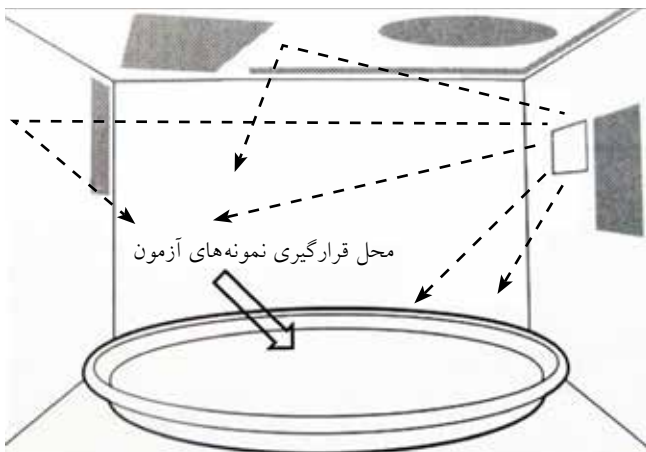
مخلوط شدند تا فاز زمینه و فاز پرکننده به طور بهینه با یکدیگر آمیخته شوند. سپس، مواد با استفاده از اکسترودر دوپیچی مدل WPC-4815 ساخت شرکت برنا پارس مهر به شکل گرانول تهیه و با استفاده از آسیاب چکشی آزمایشگاهی، گرانولها به پودر تبدیل شدند. در ادامه نمونه های آزمون با استفاده از پرس گرم تهیه شدند.

#### عمل آوری گرمایی به وسیله تابش ریزموج

برای تعیین زمان مناسب پرتو دهی، نمونه ها در سه زمان ۵، ۷ و  $10 \text{ min}$  با توان  $1000 \text{ W}$  در معرض تابش با دستگاه ریزموج Panasonic مدل NN-CD997S قرار گرفتند. در ادامه پس از بررسی شکل ظاهری نمونه ها (تغییر شکل و رنگ)، زمان  $7 \text{ min}$  به عنوان زمان بهینه انتخاب شد (شکل ۲).

#### اندازه گیری خواص مکانیکی

خواص خمشی و استحکام ضربه ای نمونه های عمل آوری شده با پرتو و نمونه های عمل آوری نشده بررسی شدند. آزمون خمش طبق استاندارد CEN/TS 15534-1 انجام شد [۱۲]. آزمون روی نمونه ها به ابعاد  $17 \times 2 \times 1 \text{ cm}$  بر اساس خمش سه نقطه ای با سرعت  $5 \text{ cm}/\text{min}$  انجام شد. نتایج میانگین ۶ آزمون گزارش شده است. برای انجام آزمون ضربه مطابق با استاندارد ASTM D4495، مستطیلی با ابعاد اسمی  $8 \times 1/5 \times 1 \text{ cm}$  استفاده شد [۱۳].

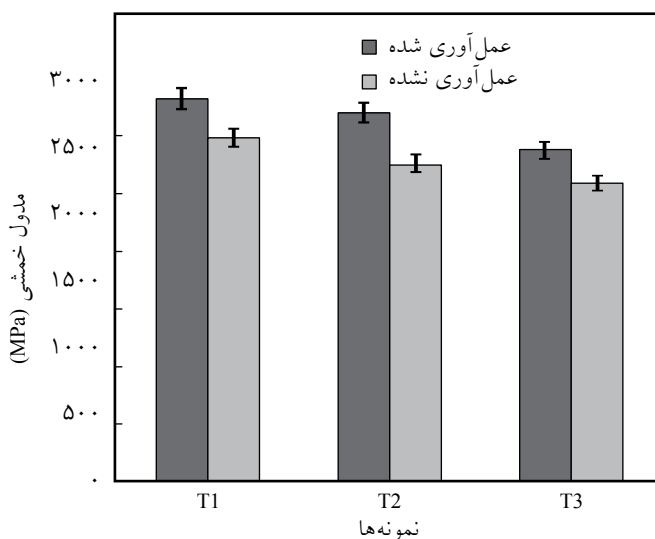


شکل ۲- تصویر کلی از تابش ریزموج بر نمونه های کامپوزیت.

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.

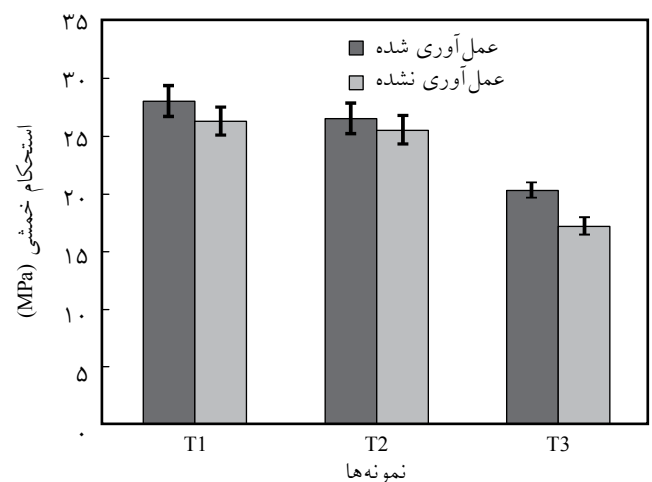
برای بررسی خواص مکانیکی (خمشی) از دستگاه INSTRON-4486 ساخت کشور انگلستان استفاده شد. همچنین برای انجام آزمون استحکام ضربه‌ای بدون شکاف، ماشین ضربه پاندولی ساخت شرکت SANTAM به کار گرفته شد.

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



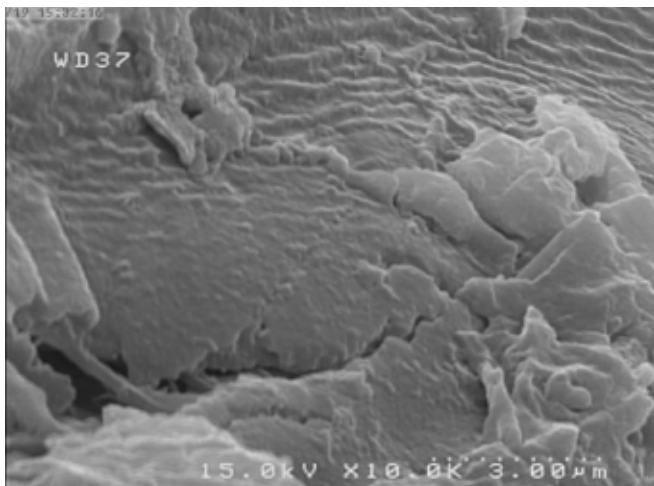
شکل ۳- تغییرات استحکام خمشی در نمونه‌های نانوکامپوزیت گرد MDF - پلی‌پروپیلن.

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

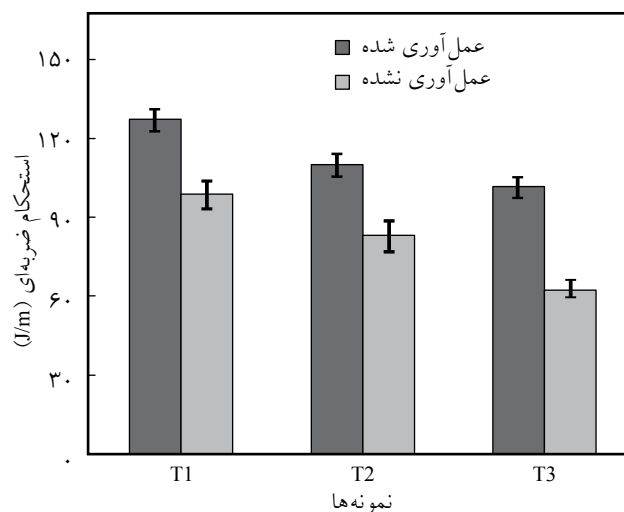


شکل ۶- تصویر FE-SEM نانوکامپوزیت گرد MDF- پلی پروپیلن عمل‌آوری نشده (سطح ۲ درصد نانوخاک‌کرس).

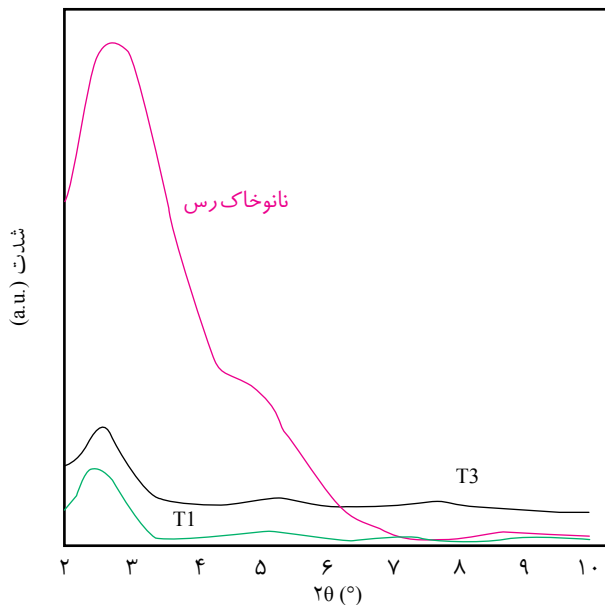
طول به قطر زیاد فصل مشترک بزرگی با فاز پیوسته پلیمری دارند که افزایش استحکام نانوکامپوزیت حاصل را توجیه می‌کند. اما، با افزایش درصد وزنی نانوخاک‌کرس از ۲ به ۶ درصد خواص مدول خمشی کاهش یافت. خواص مدول خمشی نه تنها بستگی به خواص اجزای تشکیل دهنده دارد، بلکه متأثر از پراکنش نانوخاک‌کرس و چسبندگی بین سطحی 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.



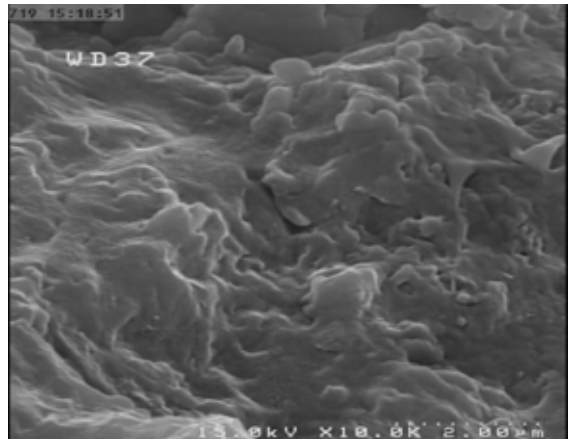
شکل ۹- الگوی پراش پرتو X خاک رس و نانوکامپوزیت گرد MDF - پلی پروپیلن. به وسیله ماده زمینه کاهش یابد.

### 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  $d_{001} = 31.41 \text{ nm}$  و  $2\theta = 2.49^\circ$  و  $d_{001} = 35.44 \text{ nm}$  و  $2\theta = 2.49^\circ$  برای نانوذرات خاک رس و نمونه های آزمون T1 و T3 است (شکل ۹).

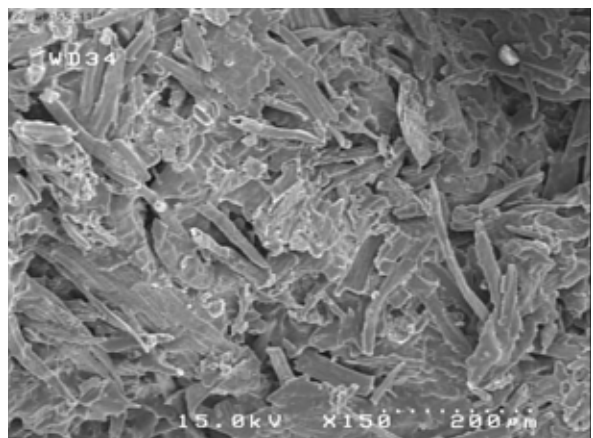
### نتیجه گیری

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 زیرتر 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.