

## بررسی اثر نانولوله کربنی عامل دار بر خواص فیزیکی و مکانیکی نانوجندسازه چوب-پلاستیک

محمد فارسی<sup>۱\*</sup>، اصغر تابعی<sup>۲</sup>، فاطمه معاشی ثانی<sup>۳</sup> و مسعود عبادی<sup>۴</sup>

\*۱- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران، پست الکترونیک: moh\_farsi@iausari.ac.ir

۲- استادیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، واحد آستارا، دانشگاه آزاد اسلامی، آستارا، ایران

۳- مربی، گروه مهندسی صنایع، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

۴- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی چوب و صنایع سلولزی، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

تاریخ دریافت: آبان ۱۴۰۰ تاریخ پذیرش: مرداد ۱۴۰۱

### چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نانوجندسازه چوب-پلاستیک حاصل از نانولوله کربنی خام و عامل دار است. بدین منظور، آرد چوب به مقدار ثابت ۵۰ درصد، نانولوله‌های کربنی خام در ۳ سطح ۰، ۱ و ۲ درصد و جفت‌کننده مالئیک در دو سطح ۰ و ۳ درصد در زمینه پلی‌اتیلن‌سنگین استفاده گردید. همچنین از نانولوله کربنی عامل دار برای تقویت کارایی نانوجندسازه در دو سطح ۱ و ۲ درصد به صورت جداگانه استفاده شد. مواد در مخلوطکن داخلی (Haake) با هم آمیخته شده و بعد نمونه‌ها توسط دستگاه پرس گرم ساخته شدند. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار نانولوله کربنی از ۰ به ۲ درصد وزنی، استحکام و مدول الاستیسته کششی نمونه‌ها به ترتیب ۵۸/۸ و ۱۲/۶ درصد افزایش و جذب آب و واکنشیدگی ضخامت به میزان ۵۴/۵ و ۱۹/۴ کاهش یافت. چندسازه‌های حاوی ۲ درصد وزنی نانولوله کربنی در مقایسه با چندسازه شاهد، مقاومت به ضربه بالاتری از خود نشان دادند. عامل جفت‌کننده مالئیک اثر مثبتی بر کارایی نانوجندسازه‌ها داشت. خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها با افزودن جفت‌کننده و نانولوله کربنی عامل دار بهبود محسوسی یافت. نتایج بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز تأیید شد.

واژه‌های کلیدی: جفت‌کننده مالئیک، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، نانولوله کربنی خام و عامل دار.

### مقدمه

چوب داشته، ولی به وسیله فرایندهای تولید آمیزه‌های پلاستیکی شکل می‌گیرد (Kim & Pal, 2010). این فراورده با همه محاسنی که دارد، دارای معایبی نیز هست که مهمترین آنها مسئله اتصال ضعیف در منطقه بین‌فازی، مقاومت به ضربه پایین، وزن زیاد و خصوصیات نامتقارن مرتبط با زمان (خزش) آن است (Eichhorn, 2001). راه‌های متفاوتی برای بهبود خواص مکانیکی آنها پیشنهاد شده است که استفاده از جفت‌کننده، اصلاح شیمیایی سطح ترکیبات لیگنوسلولزی و

بشر همواره در فکر بهبود خواص پلاستیک و فراورده‌های پلاستیکی بوده است. از این رو پلاستیک را با سایر مواد معدنی یا آلی ترکیب نموده و چندسازه‌های پلیمری را تولید کرد. یکی از انواع چندسازه‌های پلیمری، چندسازه چوب-پلاستیک (WPCs) (Wood Plastic Composites) است. این فراورده مخلوطی از ذرات چوب یا سایر مواد لیگنوسلولزی و ترکیبات پلیمری است که ظاهری شبیه به

و سیمان استفاده می‌شوند. نانولوله‌های کربنی به دو شکل نانولوله تک جداره (Single wall nanotube) و چند جداره (Multi wall nanotube) موجود هستند. نوع تک جداره آن دارای قطر حدود ۱-۳ نانومتر و نوع چند جداره آن دارای قطر بین ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر است. نانولوله‌های کربنی چند جداره از چند استوانه کربنی هم‌محور تودرتو ایجاد شده است؛ که می‌توان آن را به صورت دسته‌ای از نانولوله هم‌مرکز با قطرهای متفاوت در نظر گرفت (Popov, 2004). اثر مثبت نانولوله کربنی بر خواص فیزیکی و مکانیکی چندسازه‌های ترموپلاستیک پر شده با ترکیبات لیگنوسلولوزی در برخی از پژوهش‌ها گزارش شده است (Salehi et al., 2009; Farsheh et al., 2011; Kordkheili et al., 2013, Yaghoobi & Fereidoon, 2019; Pundhir et al., 2021) سطح نانولوله کربنی معمولاً صاف است، بنابراین همچنان مشکل چسبندگی با ماده زمینه با اضافه شدن آن به ترکیبات پلیمری وجود دارد (Salehi et al., 2009). اساساً به‌کارگیری نانولوله کربنی در پلیمرهای گرمانرم مشکلاتی مانند پیوندهای شیمیایی بیش‌ازحد و تمایل به کلوخه شدن در طی فرایند آمیزه‌سازی به همراه دارد که موجب توزیع نامناسب در چندسازه و محدود کردن کارایی نانولوله کربنی در زمینه پلیمر می‌گردد (Bag et al., 2004). پراکندگی نامناسب نانولوله کربنی بیشتر به‌عنوان یک محدودیت در فرایند تولید و به‌عنوان عامل اصلی کاهش‌دهنده خواص مکانیکی چندسازه‌ها ذکر شده است (Bai et al., 2003). تلاش‌های زیادی برای بهبود پراکنش نانولوله کربنی در پژوهش‌ها انجام شده است.

یکی از مهمترین روش‌های مورد استفاده برای حل این مشکل، استفاده از نانولوله کربنی عامل‌دار می‌باشد. عامل‌دار کردن نانولوله کربنی، تولید گروه‌های عاملی بر روی سطوح نانولوله‌ها است. این گروه‌های عاملی به کاهش نیروی جذبی دامنه بلند و اندروالسی کمک می‌کنند و باعث پراکنش همگن نمونه‌ها می‌شوند؛ بنابراین عامل‌دار کردن نانولوله کربنی واکنش‌پذیری آنها را افزایش داده و حلالیت را بهبود می‌بخشد و راهی برای اصلاحات شیمیایی بیشتر سطح نانولوله مانند جذب یون، رسوب فلز، پیوند زدن روی پلیمر و غیره است.

به‌کارگیری ترکیبات در حدود نانومتر به‌عنوان پرکننده یا تقویت‌کننده از مهمترین آنها هستند (Farsi, 2010).

امروزه با ورود فناوری نانو در عرصه علم مواد، پلیمرهای تقویت‌شده با پرکننده نانو مورد توجه جوامع علمی و صنعتی قرار گرفته است و از نظر کاربردی حوزه جدیدی در پژوهش‌ها در حد واسطه مقیاس میکرو، گشوده شده و شناخت رفتار و برهم‌کنش مواد در محدوده نانومتر (۱ تا ۱۰۰ نانومتر) در زمره اولویت‌های پژوهشی قرار گرفته است. از دیدگاه صنعتی آنچه باعث جلب توجه بسیاری از صنایع به این موضع شده، بهبود چشمگیر خواص چندسازه‌ها با اضافه شدن ترکیبات نانو است (Kordkheili et al., 2012).

نانوچندسازه‌ها طبقه جدیدی از چندسازه‌های پلیمری را تشکیل می‌دهند که در ساختار آنها ذرات با ابعاد نانومتر مورد استفاده قرار می‌گیرند که از جمله این نانو ذرات می‌توان به نانورس، نانوسیلیس، نانو روی و نانولوله‌های کربنی اشاره کرد که به علت ابعاد خاص و ضریب ظاهری بالا در مقایسه با سایر نانو مواد، در مقادیر بسیار اندک موجب بهبود خواص چندسازه‌های پلیمری می‌شوند (Bilbao-Sainza, 2011).

نانولوله‌های کربنی (CNTs) (Carbon nanotubes) از صفحات کربن به ضخامت یک اتم و به شکل استوانه‌ای توخالی ساخته شده‌اند و سخت‌ترین نوع الیاف شناخته شده می‌باشد که دارای مدول الاستیسیته حدود ۱/۴ تراپاسکال و مقاومت کششی ۱۰۰ مگاپاسکال است (Yu, 2000). برای مقایسه باید بیان کرد که فولاد با استحکام عالی دارای مدول الاستیسیته حدود ۲۰۰ گیگاپاسکال و مقاومت کششی حدود ۲ گیگاپاسکال است (Yakobson, 1996). از جمله ویژگی‌های خاص نانولوله کربنی در مقایسه با دیگر ترکیبات نانو می‌توان به سبک بودن، نسبت طول به قطر بالا (از ۱۰۰۰ به ۱ تا ۲۵۰۰۰۰۰ به ۱)، قدرت هدایت حرارتی زیاد، مدول الاستیسیته خمشی و کششی بالا، پایداری حرارتی و دارا بودن دو حالت رسانا و نارسانا (با توجه به ساختار نانولوله و قطر و اندازه آن) اشاره کرد (Salvetat et al., 1999). امروزه به دلیل این خواص کاربردی منحصر به فرد، نانولوله‌های کربنی به‌طور گسترده به‌عنوان تقویت‌کننده در صنایع پلیمر، سرامیک

مکانیکی و ریخت‌شناسی نانو چندسازه‌های حاصل بررسی شد.

### مواد و روش‌ها

#### الیاف چوب

الیاف چوب راش از چوب‌بری واقع در شمال ایران تهیه و پس از برش و عبور از الک با مش ۸۰، توسط کوره (آون) کارگاهی خشک شده و به‌عنوان پرکننده در ساخت نانوچندسازه استفاده گردید. متوسط طول الیاف مورد استفاده  $1/32 \pm 0/39$  mm و متوسط قطر آنها  $0/65 \pm 0/27$  mm می‌باشد. ترکیبات شیمیایی آرد چوب راش مصرفی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آرد راش

Table 1-Chemical composition of beech flour

نام نمونه Sample Name	سلولز (%) Cellulose (%)	همی سلولز (%) Hemicellulose (%)	لیگنین (%) Lignin (%)	مواد استخراجی (%) Extractives (%)	سایر (%) Other (%)
آرد راش Beech flour	37	25	22	3	16

#### ماده نانو

در این تحقیق از نانولوله کربنی چند جداره محصول پژوهشگاه صنعت نفت ایران (Research Institute of Petroleum Industry) (RIPI) به‌عنوان تقویت‌کننده در ساخت نانوچندسازه چوب-پلاستیک استفاده شد. طول نانولوله ۵۰۰ نانومتر و قطر داخلی و خارجی آن به ترتیب ۱۰ و ۳/۵ نانومتر بود. میزان خلوص نانولوله کربنی نیز ۹۵ درصد گزارش شده است.

#### عامل‌دار کردن نانولوله کربنی

نانولوله‌های کربنی خام (۳ گرم) در دمای  $350^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲۰ دقیقه حرارت داده شد تا کربن بی‌شکل آن حذف شود.

عامل‌دار کردن نانولوله‌های کربنی نه تنها موجب توزیع مناسب در انواع مختلف پلیمرها می‌گردد؛ بلکه موجب افزایش مقاومت در منطقه بین‌فازی میان پلیمر و نانولوله کربنی نیز خواهد شد. عامل‌دار کردن نانولوله کربنی موجب تولید گروه-های حاوی اکسیژن می‌گردد که می‌توانند با پلیمر پیوند برقرار کرده و موجب پراکنش یکنواخت‌تر نانولوله کربنی در زمینه پلیمر گردد (Ghasemi *et al.*, 2012, park & kadla, 2012, Weisenberger *et al.*, 2003).

از آنجاکه تحقیقات روی نانولوله‌های کربنی چند جداره عامل‌دار در زمینه چندسازه چوب-پلاستیک کمتر انجام شده، از این‌رو، این تحقیق با هدف بررسی تأثیر افزودن نانولوله کربنی چند جداره خام و عامل‌دار بر روی ویژگی‌های چندسازه‌های چوب-پلاستیک انجام و خصوصیات فیزیکی،

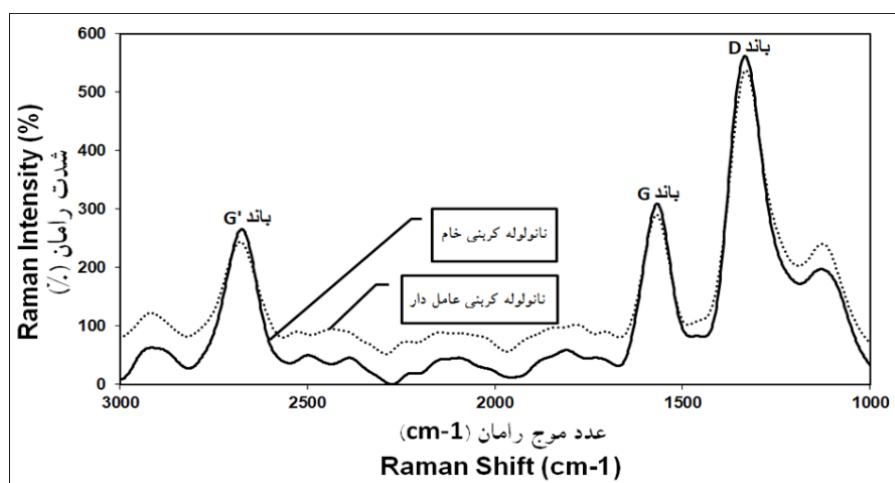
#### پلی‌اتیلن سنگین

در این پژوهش، پلی‌اتیلن سنگین (High (HDPE) (Density Polyethylene) با شاخص جریان مذاب  $g/10\text{min}$  ۲۳، دانسیته  $965 \text{ Kg/cm}^3$  و نقطه ذوب  $190^{\circ}\text{C}$  از شرکت پتروشیمی تبریز خریداری و به‌عنوان ماده زمینه انتخاب شد. جفت‌کننده

پلی‌اتیلن پیوندشده با انیدرید مالئیک (PE-g-) (Polyethylene-graft-Maleic Anhydride) (MA) با نام تجاری KJS 111 ساخت شرکت کیمیا جاوید سپاهان به‌عنوان جفت‌کننده استفاده شد. میزان مالئیک انیدرید موجود در جفت‌کننده  $0/8-1/2$  درصد و شاخص جریان مذاب آن  $g/10 \text{ min}$  ۰/۴ بوده است.

به دست آمد (Ghasemi *et al.*, 2012). طیف رامان نمونه‌های خام و عامل دار در شکل ۱ آورده شده است. طیف رامان در واقع نشان‌دهنده پیوندهای درون یک مولکول و به‌عنوان اثر انگشت منحصر به فرد هر ماده شناخته می‌شود. برجسته‌ترین ویژگی طیف رامان در نانولوله‌ها، ارتعاش شعاعی آنهاست؛ یعنی شدت‌های بالا مربوط به باند D (مناطق نامنظم)، باند G (گرافیت) و G' (طیف دوم رامان از تغییر حالت باند D) است. با عامل‌دار کردن نانولوله، شدت طیف رامان کاهش ولی منطقه تشکیل باندها دست نخورده باقی می‌ماند که نشانه اضافه شدن گروه‌های عاملی اکسیژن بر روی نانولوله است.

پس از عملیات حرارتی، نانولوله‌های کربنی تولیدی در یک فلاسک حاوی ۱۲۰ میلی‌لیتر محلول هیپوکلریت سدیم ۷۰ درصد (۳۶ میلی‌لیتر آب و ۸۶ میلی‌لیتر هیپوکلریت سدیم) پخش شدند. سپس مخلوط حاصل در یک حمام تمیزکننده فراصوت (مدل UP 400 S شرکت Hielscher آلمان) به مدت ۲۰ دقیقه تکان داده شد و برای حذف کاتالیزورهای فلزی به مدت ۳ ساعت در حمام آب گرم و در دمای  $85^{\circ}\text{C}$  حرارت داده شد. پس از خنک شدن، نانولوله‌های کربنی با آب دیونیزه تا رسیدن به PH ۷ شسته شدند. در نهایت مخلوط به وسیله یک فیلتر لیفی نایلونی ۰/۴۵ میکرومتری صاف شد و نانولوله کربنی عامل‌دار



شکل ۱- طیف رامان نانولوله کربنی چند جداره خام و عامل‌دار

Figure 1- Raman spectra of the Raw and functionalized MWCNT

گردید.

ساخت نمونه‌های آزمونی

مواد اولیه مطابق جدول ۲ به وسیله مخلوط‌کن داخلی مدل HAKKE در دمای  $180^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱۰ دقیقه و با سرعت ۶۰ rpm با هم مخلوط شدند. پس از رسیدن فرایند اختلاط به گشتاور ثابت، که نشان‌دهنده اختلاط مناسب مواد می‌باشد، فرایند اختلاط متوقف گردید. مواد مخلوط شده به وسیله آسیاب آزمایشگاهی خرد شده و در نهایت به وسیله پرس گرم در دمای  $190^{\circ}\text{C}$  و فشار ۱۰ بار در مدت ۶ دقیقه به نمونه‌های چوب-پلاستیک با ابعاد  $150 \times 150 \times 2$  mm تبدیل

اندازه‌گیری خواص مکانیکی

آزمون کشش نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D638 بوسیله دستگاه Instron مدل 1186 انجام شد. آزمون ضربه بدون فاق مطابق با آیین‌نامه D256 استاندارد ASTM و با دستگاه Zwick Impact Tester مدل 5102 انجام گردید. ابعاد نمونه ضربه  $60 \times 25 \times 2$  mm بود.

جدول ۲- ترکیب فرمول نمونه‌های مورد ارزیابی

Table 2-Composition of the formula of the evaluated samples

شماره No.	فرمول چندسازه Composite Formula	میزان پلی‌اتیلن‌سنگین (%) HDPE Content (%)	میزان آرد چوب (%) Wood Flour Content (%)	میزان نانولوله کربنی (%) CNTs Content (%)	میزان جفت‌کننده (%) Coupling Agent Content (%)
1	50HDPE/50WF/0CNT/0M	50	50	0	0
2	50HDPE/50WF/1CNT/0M	49	50	1	0
3	50HDPE/50WF/2CNT/0M	48	50	2	0
4	50HDPE/50WF/0CNT/3M	47	50	0	3
5	50HDPE/50WF/1CNT/3M	46	50	1	3
6	50HDPE/50WF/2CNT/3M	45	50	2	3
7	50HDPE/50WF/1FCNT/3M*	46	50	1*	3
8	50HDPE/50WF/2FCNT/3M*	45	50	2*	3

\*: نانولوله کربنی عامل‌دار  
Functionalized CNT\*

مقدار واكشیدگی ضخامت نیز طبق رابطه ۲ محاسبه گردید.  
(۲)

$$TS_{(t)} = \frac{T_t - T_0}{T_0} \times 100$$

$TS_{(t)}$  = واكشیدگی ضخامت در زمان غوطه‌وری  $t$ , (%)  
 $T_t$  = ضخامت نمونه‌ها در زمان غوطه‌وری  $t$ , (mm)  
 $T_0$  = ضخامت نمونه در حالت خشک (mm)

#### ریخت‌شناسی نانوجندسازها

برای بررسی ریخت‌شناسی نانوجندسازها از میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM)، KYKY مدل SBC12 استفاده شد. نمونه‌ها با نیتروژن مایع منجمد شده و بعد شکسته شدند. سطوح شکسته با لایه نازکی از طلا در دستگاه پوشاننده یونی پوشانده شد. سپس ریزنگارهای میکروسکوپ الکترونی با بهره‌گیری از ولتاژ ۲۵ کیلوولت تهیه شدند.

اندازه‌گیری جذب آب و واكشیدگی ضخامت کوتاه‌مدت جذب آب و واكشیدگی ضخامت کوتاه‌مدت نمونه‌های آزمون مطابق آیین‌نامه D7031-04 استاندارد ASTM اندازه‌گیری شد. بدین منظور، ابتدا از هر اختلاط پنج نمونه به ابعاد  $2/5 \times 2/5$  سانتی‌متر تهیه گردید و بعد این نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای  $103 \pm 2^\circ C$  در آون خشک شدند. نمونه‌های خشک شده با ترازوی دیجیتالی با دقت  $0/001$  گرم توزین و میزان ضخامت آنها نیز با ریزسنج با دقت  $0/001$  میلی‌متر اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها در آب مقطر (در دمای اتاق) غوطه‌ور شدند. وزن و ضخامت نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت غوطه‌وری دوباره اندازه‌گیری گردید. مقدار جذب آب طبق رابطه ۱ محاسبه شد.

(۱)

$$WA_{(t)} = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100$$

$WA_{(t)}$  = مقدار جذب آب در زمان غوطه‌وری  $t$ , (%)  
 $W_t$  = وزن نمونه‌ها در زمان غوطه‌وری  $t$ , (gr)  
 $W_0$  = وزن خشک نمونه‌ها قبل از غوطه‌وری (gr)

## نتایج

۳ آمده است. همچنین گروه بندی دانکن اثر نانولوله کربنی و عامل جفت کننده بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نانو چندسازه های مورد مطالعه انجام و در جدول ۴ دیده می شود. نتایج حاصل به شرح زیر است.

نتایج مربوط به جدول تجزیه واریانس اثر مستقل و متقابل مقدار نانولوله کربنی و عامل جفت کننده بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی چندسازه های چوب-پلاستیک در جدول

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر نانولوله کربنی و جفت کننده بر خصوصیات چندسازه چوب-پلاستیک

**Table 3- The results of the analysis of variance of CNT and coupling agent effect on the properties of WPCs**

منبع تغییرات Source of Variance	درجه آزادی df	F				
		مقاومت کششی Tensile Strength	مدول کششی Tensile Modulus	مقاومت به ضربه Impact Strength	جذب آب Water Absorption	واکسیدگی ضخامت Thickness Swelling
نانولوله کربنی CNT (A)	2	16.93*	0.66 <sup>ns</sup>	9.81*	5.33*	17.18*
جفت کننده Coupling Agent (B)	1	127.54*	2.24 <sup>ns</sup>	6.17*	3.12*	15.15*
A*B	2	14.88*	0.14 <sup>ns</sup>	5.42*	6.62*	10.58*

\*: معنی دار در سطح اعتماد ۹۵ درصد، ns: عدم معنی داری  
\*Significant at 95% confidence level, ns= non-significance

جدول ۴- آزمون دانکن اثر همزمان مقدار نانولوله کربنی و جفت کننده بر خصوصیات چندسازه چوب-پلاستیک

**Table 4- Duncan's test of simultaneous effect of CNT and coupling agent on the properties of WPCs**

عامل جفت کننده Coupling Agent	بدون جفت کننده Without MAPE			با جفت کننده With MAPE				
	0	1	2	0	1	2	1*	2*
نانولوله کربنی CNT								
مقاومت کششی Tensile Strength	12.42 <sup>c</sup>	16.07 <sup>c</sup>	19.72 <sup>bc</sup>	18.83 <sup>bc</sup>	22.90 <sup>b</sup>	24.81 <sup>a</sup>	24.72 <sup>a</sup>	27.89 <sup>a</sup>
مدول کششی Tensile Strength	2.7 <sup>a</sup>	2.97 <sup>a</sup>	3.05 <sup>a</sup>	3.2 <sup>a</sup>	4.04 <sup>a</sup>	4.63 <sup>a</sup>	4.86 <sup>a</sup>	5.35 <sup>a</sup>
مقاومت به ضربه Impact Strength	25.80 <sup>d</sup>	29.75 <sup>c</sup>	33.81 <sup>ab</sup>	29.48 <sup>c</sup>	32.60 <sup>b</sup>	38.46 <sup>a</sup>	34.22 <sup>ab</sup>	39.74 <sup>a</sup>
جذب آب Water Absorption	2.72 <sup>d</sup>	2.35 <sup>d</sup>	1.49 <sup>bc</sup>	2.22 <sup>d</sup>	1.75 <sup>c</sup>	1.06 <sup>a</sup>	1.32 <sup>b</sup>	1.12 <sup>a</sup>
واکسیدگی ضخامت Thickness Swelling	3.49 <sup>c</sup>	3.32 <sup>c</sup>	3.03 <sup>bc</sup>	3.11 <sup>bc</sup>	2.89 <sup>b</sup>	2.57 <sup>a</sup>	3.00 <sup>bc</sup>	2.77 <sup>b</sup>

\*: نانولوله کربنی عامل دار  
Functionalized CNT\*

## مدول الاستیسیته و مقاومت کششی

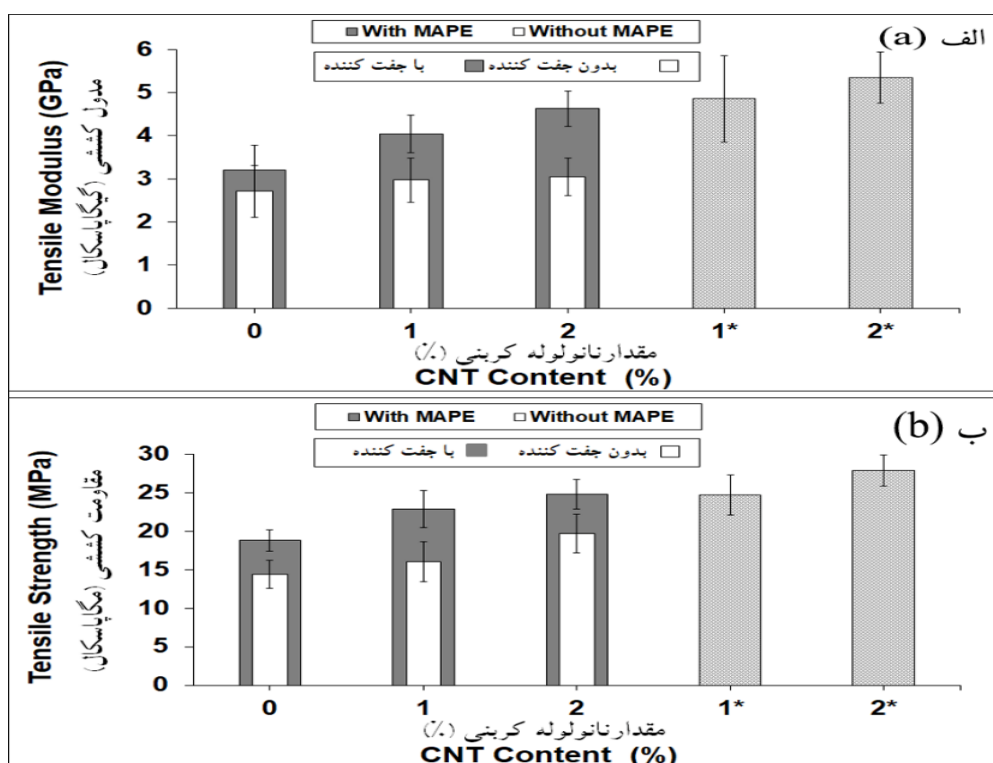
همان‌گونه که در جدول ۳ ملاحظه می‌گردد اثر مستقل و متقابل نانولوله کربنی و عامل جفت‌کننده بر خصوصیت مقاومت کششی نانو چندسازه‌های حاصل در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار و بر روی مدول کششی نانو چندسازه‌ها بی‌معنی است. متوسط مدول و مقاومت کششی چندسازه‌های چوب-پلاستیک حاوی مقادیر متفاوت نانولوله کربنی و جفت‌کننده به ترتیب در شکل ۲ (الف) و (ب) ارائه شده است. شکل ۲ (الف) نشان می‌دهد که در نمونه‌های بدون عامل جفت‌کننده، اضافه کردن نانولوله کربنی خام موجب افزایش مدول کششی چندسازه‌ها می‌گردد؛ اما این افزایش چندان محسوس نیست و از نظر آماری نیز در سطح ۹۵ درصد بی‌معنی است. به‌گونه‌ای که در شکل ۲ (الف) نشان داده شده است که بیشترین مدول کششی در بین نانو چندسازه حاوی نانولوله کربنی خام، به چندسازه بدون جفت‌کننده و حاوی ۲ درصد نانولوله کربنی خام به مقدار  $3/05 \text{ GPa}$  تعلق دارد. درحالی‌که کمترین مدول کششی به نمونه‌های بدون نانولوله کربنی خام و جفت‌کننده مالئیکی (نمونه شاهد) به میزان  $2/71 \text{ GPa}$  تعلق دارد.

همچنین با اضافه شدن ۳ درصد جفت‌کننده مالئیکی به نمونه‌های شاهد، مدول الاستیسیته از  $2/71 \text{ GPa}$  به  $3/2 \text{ GPa}$  افزایش یافت. مدول کششی نانو چندسازه‌های حاوی جفت‌کننده مالئیکی در حالت ۱ و ۲ درصد نانولوله کربنی خام، به ترتیب  $62/4$  و  $70/9$  درصد بیشتر از نمونه بدون نانولوله کربنی خام (نمونه شاهد) است. نمونه‌های ساخته‌شده از ۳ درصد جفت‌کننده مالئیکی و حاوی ۱ و ۲ درصد نانولوله کربنی خام به ترتیب دارای مدول الاستیسیته  $48/2$  و  $51/8$  درصد بیشتر از نمونه‌های بدون جفت‌کننده متناظر خود هستند. هرچند اثر نانولوله کربنی بر مدول الاستیسیته نمونه‌ها از نظر آماری در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار نیست؛ اما به‌طور کلی مدول الاستیسیته چندسازه‌های حاوی ۱ و ۲ درصد نانولوله کربنی عامل‌دار بیشتر از نمونه‌های حاوی نانولوله کربنی خام افزایش یافت. مدول کششی نیز در نمونه‌های

حاوی نانولوله کربنی عامل‌دار نسبت به نمونه‌های حاوی ۱ و ۲ درصد نانولوله کربنی خام و بدون جفت‌کننده مالئیکی، به ترتیب حدود  $63/3$  و  $75/4$  درصد افزایش یافت. البته مدول الاستیسیته کششی در نمونه‌های حاوی ۱ و ۲ درصد نانولوله کربنی عامل‌دار به ترتیب حدود  $20/1$  و  $15/6$  درصد بیشتر از نمونه‌های متناظر تیمار شده با جفت‌کننده مالئیکی است.

همچنین اثر مثبت نانولوله کربنی خام و جفت‌کننده مالئیکی بر روی مقاومت کششی در شکل ۲ (ب) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود با افزایش نانولوله کربنی خام تا سطح ۲ درصد مقاومت کششی  $58/8$  درصد افزایش می‌یابد. به‌گونه‌ای که مقاومت کششی از  $12/42 \text{ MPa}$  در نمونه‌های شاهد به  $19/72 \text{ MPa}$  در نانو چندسازه‌های حاوی ۲ درصد نانولوله کربنی خام افزایش می‌یابد. در حضور ۳ درصد جفت‌کننده مالئیکی، مقاومت کششی چندسازه‌های دارای ۱ و ۲ درصد نانولوله کربنی خام به ترتیب  $21/7$  و  $31/8$  درصد بیشتر از نمونه شاهد حاوی جفت‌کننده می‌باشد. با اضافه شدن نانولوله کربنی عامل‌دار، مقاومت کششی چندسازه‌های حاوی نانولوله کربنی عامل‌دار نسبت به چندسازه حاوی نانولوله کربنی خام متناظر خود (حاوی جفت‌کننده مالئیکی) به ترتیب  $7/9$  درصد و  $12/4$  درصد افزایش یافت. نتایج آزمون دانکن مقاومت کششی نیز نشان داد که نمونه‌های حاوی جفت‌کننده مالئیکی و ۲ درصد نانولوله کربنی خام و ۱ و ۲ درصد نانولوله کربنی عامل‌دار در گروه a قرار گرفتند. همچنین نمونه‌های بدون جفت‌کننده و حاوی ۰ و ۱ درصد نانولوله کربنی خام در گروه c قرار دارند.

به‌طور کلی نتایج آزمون کشش نشان داد که بیشترین میزان مدول الاستیسیته و مقاومت کششی به ترتیب با مقادیر  $5/35$  و  $27/89 \text{ MPa}$  در چندسازه‌های حاوی ۲ درصد نانولوله کربنی عامل‌دار و ۳ درصد جفت‌کننده مالئیکی مشاهده می‌شود؛ اما نتایج کلی مربوط به درصد افزایش مدول و مقاومت کششی حکایت از اثر مثبت بیشتر جفت‌کننده مالئیکی نسبت به اضافه شدن نانولوله کربنی عامل‌دار در زمینه پلیمری دارد.



شکل ۲- خصوصیات مکانیکی چندسازه‌های چوب-پلاستیک حاصل از نانولوله کربنی و جفت‌کننده مالئیک

Figure 2-Mechanical properties of the WPCs as a function of CNTs and MAPE

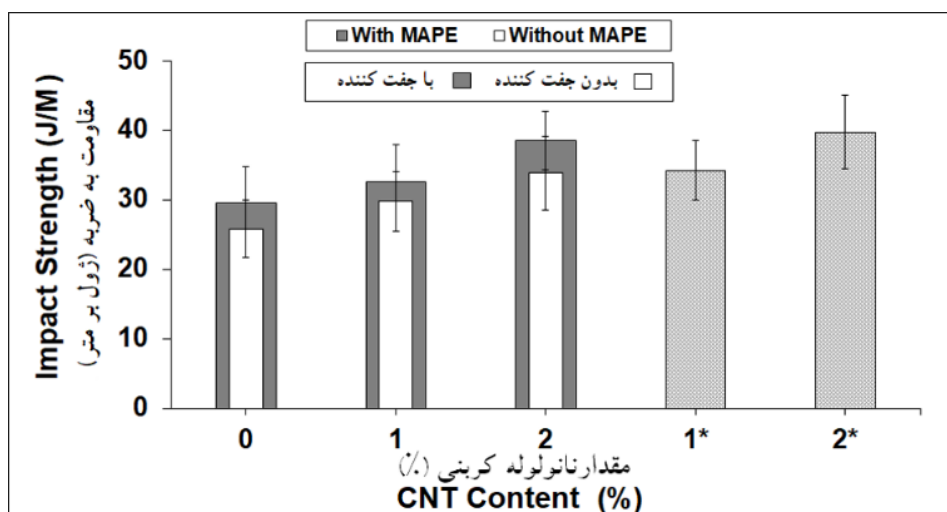
### مقاومت به ضربه

نتایج مربوط به تجزیه واریانس اثر مقدار نانولوله کربنی و عامل جفت‌کننده بر مقاومت به ضربه بدون فاق در جدول ۳ نشان می‌دهد که اثر مستقل و متقابل مقدار ذرات نانو و عامل جفت‌کننده بر مقاومت به ضربه در سطح اطمینان ۹۵ درصد دارای تفاوت معنی‌دار است. میانگین مقاومت به ضربه بدون فاق نانو چندسازه مورد مطالعه در جدول ۴ نشان داده شده است. شکل ۳ نیز حکایت از آن دارد که به‌طور کلی در نمونه‌های آزمون، چندسازه‌های دارای ۲ درصد نانولوله کربنی خام، دارای مقاومت به ضربه بیشتری در مقایسه با نمونه‌های شاهد (بدون نانولوله کربنی خام) هستند. اثر مقدار نانولوله کربنی بر مقاومت به ضربه نانو چندسازه‌های بدون جفت‌کننده مالئیک نشان داد که نمونه حاوی ۲ درصد نانولوله کربنی خام، دارای بیشترین مقاومت به ضربه به مقدار  $23/8 \text{ J/M}$  است. همچنین بدون جفت‌کننده، مقاومت به ضربه چندسازه‌های حاوی ۱ و ۲ درصد نانولوله کربنی به ترتیب

۱۵/۳ و ۳۱ درصد بیشتر از نمونه‌های شاهد می‌باشد.

در حضور جفت‌کننده مالئیک، با افزایش میزان نانولوله کربنی خام از ۱ تا ۲ درصد، میزان مقاومت به ضربه بدون فاق چندسازه‌های مورد مطالعه نیز در مقایسه با نمونه شاهد حاوی جفت‌کننده مالئیک به ترتیب ۱۰/۶ و ۳۰/۵ درصد افزایش یافت. با اضافه شدن نانولوله کربنی عامل‌دار، مقاومت به ضربه چندسازه چوب-پلاستیک افزایش بیشتری یافت. به گونه‌ای که نسبت به نمونه‌های بدون جفت‌کننده و حاوی ۱ و ۲ درصد نانولوله کربنی خام، به ترتیب ۱۵ و ۱۷/۵ درصد افزایش و نسبت به نانو چندسازه‌های متناظر حاوی ۳ درصد جفت‌کننده مالئیک به ترتیب ۴/۹ و ۳/۲ درصد افزایش نشان می‌دهد. اما از نظر گروه‌بندی دانکن نمونه‌های حاوی ۲ درصد نانولوله کربنی خام و عامل‌دار به صورت مشترک در گروه a قرار می‌گیرند. نتایج حاصل از گروه‌بندی دانکن حکایت از آن دارد که اضافه شدن نانولوله کربنی عامل‌دار در مقایسه با نمونه‌های متناظر حاوی ۳ درصد عامل جفت‌کننده، تأثیر چشمگیری بر مقاومت به ضربه ندارند.





شکل ۳- مقاومت به ضربه چندسازه‌های چوب-پلاستیک حاصل از نانولوله کربنی و جفت‌کننده مالئیک

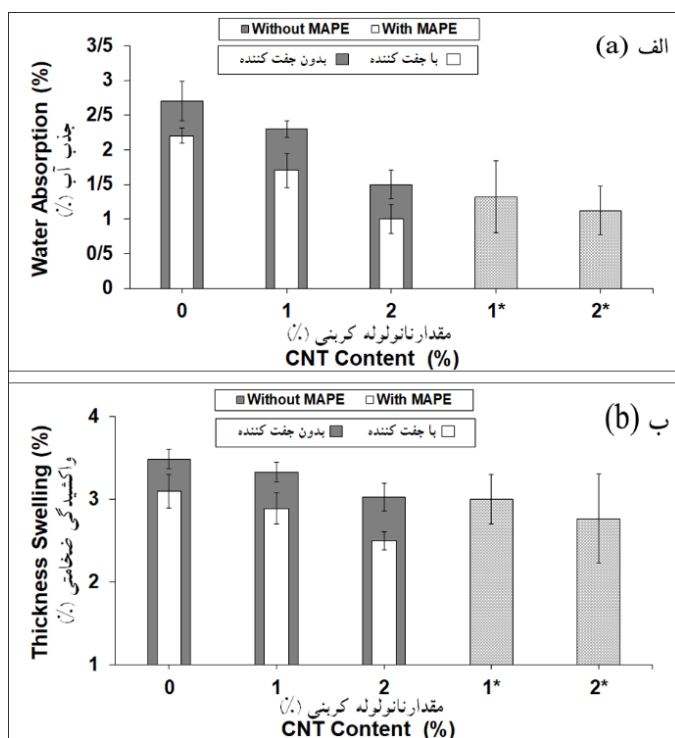
Figure 3-Impact Strength of the WPCs as a function of CNTs and MAPE

نانولوله کربنی خام، مقداری افزایش داشته است. اما نسبت به نمونه‌های حاوی نانولوله کربنی خام و جفت‌کننده مالئیک، جذب آب و واکنش‌دهی ضخامتی نمونه‌ها کاهش یافت. نتایج گروه‌بندی دانکن جذب آب چندسازه‌های چوب-پلاستیک در جدول ۴ حکایت از آن دارد که نمونه‌های حاوی ۳ درصد جفت‌کننده و ۲ درصد نانولوله کربنی خام و عامل‌دار از نظر کارایی یکسان بوده و هر دو در یک گروه (a) قرار گرفتند. همچنین نمونه‌های بدون جفت‌کننده و حاوی ۰ و ۱ درصد نانولوله کربنی خام به همراه نمونه‌های حاوی جفت‌کننده و بدون نانولوله کربنی خام با بیشترین میزان جذب آب از نظر آزمون دانکن در گروه d گروه‌بندی شدند. گروه‌بندی دانکن مربوط به واکنش‌دهی ضخامتی چندسازه‌های چوب-پلاستیک نیز نشان داد که از نظر آزمون دانکن بین نمونه‌های حاوی ۳ درصد جفت‌کننده و ۲ درصد نانولوله کربنی خام و عامل‌دار تفاوت معنی‌داری وجود ندارد و همگی در گروه a هستند. نمونه‌های بدون جفت‌کننده حاوی ۰ و ۱ درصد نانولوله کربنی خام نیز دارای بیشترین میزان واکنش‌دهی ضخامتی بوده و به صورت مشترک در گروه c قرار گرفتند.

#### جذب آب و واکنش‌دهی ضخامت

همان‌گونه که در جدول ۳ ملاحظه می‌گردد، اثر مستقل و متقابل نانولوله کربنی و عامل جفت‌کننده بر روی خصوصیت جذب آب و واکنش‌دهی ضخامت نانو چندسازه‌های حاصل در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار است. شکل‌های ۴ (الف) و (ب) میزان جذب آب و واکنش‌دهی ضخامت ۲۴ ساعته نانو چندسازه‌های الیاف چوب-پلی‌اتیلن سنگین را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، چندسازه‌های حاوی ۳ درصد جفت‌کننده مالئیک دارای میزان جذب آب و واکنش‌دهی ضخامت کمتری در مقایسه با چندسازه‌های فاقد آن هستند. همچنین نتایج نشان داد که در شرایط با و بدون جفت‌کننده مالئیک، چندسازه‌های حاوی نانولوله کربنی خام، جذب آب و واکنش‌دهی ضخامت کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد نشان دادند. با افزایش میزان نانولوله کربنی از ۱ به ۲ درصد نیز میزان جذب آب و واکنش‌دهی ضخامت نانو چندسازه مورد مطالعه به‌طور منظم کاهش یافت.

نتایج حاصل از آزمون جذب آب نشان داد که با به‌کارگیری نانولوله کربنی عامل‌دار به مقدار ۱ و ۲ درصد وزنی، میزان جذب آب و واکنش‌دهی ضخامتی نسبت به نمونه‌های متناظر حاوی ۳ درصد جفت‌کننده مالئیک و



شکل ۴- جذب آب و واکنش پذیری ضخامتی چندسازه های چوب-پلاستیک حاصل از نانولوله کربنی و جفت کننده مالئیکی  
**Figure 4-Water absorption and thickness swelling of the WPCs as a function of CNTs and MAPE**

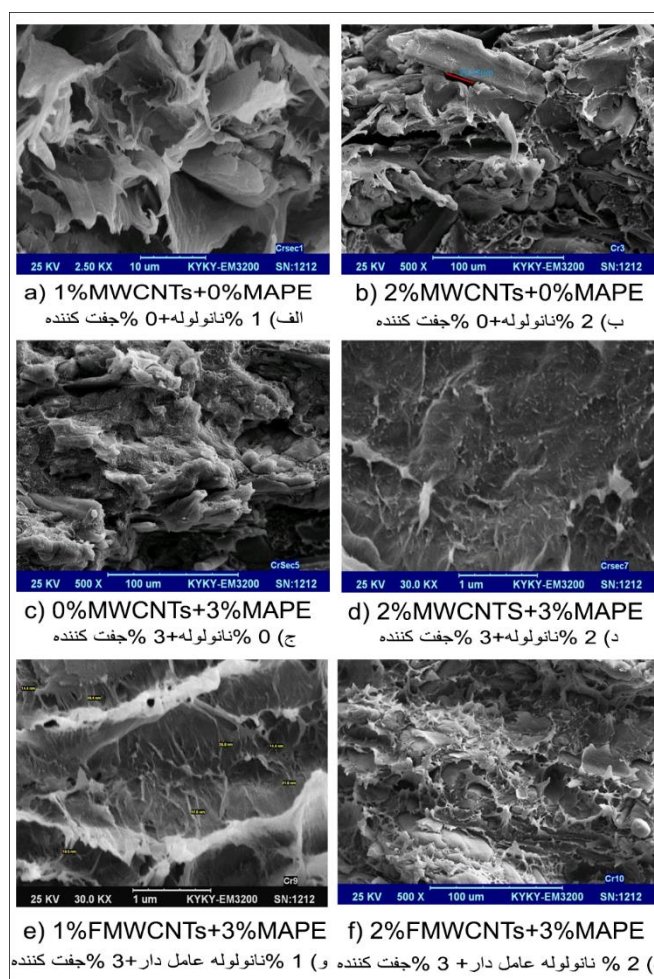
ریزننگار ۵ (ب)، چندسازه حاوی ۲ درصد نانولوله کربنی خام و بدون جفت کننده را با بزرگنمایی  $500\times$  نشان می دهد. همان گونه که در شکل نیز ملاحظه می گردد، سطح نمونه نسبت به نمونه شاهد (بدون جفت کننده مالئیکی) یکنواخت تر شده؛ اما در برخی از مناطق حفره های خالی که نشان دهنده خروج الیاف است، هنوز دیده می شود. با این حال الیاف در مناطق خارج شده سالم است اما اتصالات ضعیفی بین الیاف و ماده زمینه وجود دارد که این پدیده به صورت فاصله و شکست های ریز دیده می شود.

ریزننگار ۵ (ج)، چندسازه چوب-پلاستیک بدون نانولوله کربنی و حاوی ۳ درصد جفت کننده مالئیکی با بزرگنمایی  $500\times$  را نشان می دهد. حفره و الیاف جدا شده در ماده زمینه دیده نمی شود. ماده زمینه در آن نسبتاً پیوسته بوده و شکست و حفره های کمتری دیده می شود که نشان دهنده اتصال مناسب بین پلیمر و الیاف طبیعی در اثر حضور جفت کننده مالئیکی است. همچنین اثری از کلوخه شدن در ماده زمینه نیست.

#### خصوصیات ریخت شناسی

تصاویر میکروسکوپ الکترونی زمینه ای مؤثر برای بررسی ساختار و توجیه خصوصیات چندسازه ها است. از طریق مطالعه ریزنگارهای میکروسکوپ الکترونی، پراکنش و سازگاری بین پرکننده ها و زمینه پلیمری و به طور کلی ساختار درونی و خصوصیات منطقه بین فازی قابل بررسی است. ریزنگارهای میکروسکوپ الکترونی مربوط به سطوح شکست نمونه های کششی در شکل ۵ گزارش شده است. در مورد

چندسازه های بدون جفت کننده مالئیکی (شکل ۵ الف) با بزرگنمایی  $2500\times$ ، سوراخ و حفره های عمیق پس از بیرون کشیدن شدن الیاف از درون ماده زمینه به دلیل شکست، مشاهده می شود. وجود این حفره ها به این معنی است که پیوند سطحی بین پرکننده و زمینه پلیمری ضعیف است، بنابراین الیاف چوبی نمی تواند انتقال کارآمدی از تنش میان الیاف و زمینه پلیمری داشته باشد.



شکل ۵- ریزنگارهای میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌های شکسته شده نانو چندسازه‌های چوب-پلاستیک

Figure 5- SEM micrographs of fractured samples of wood-plastic Nanocomposites

حاوی ۱ و ۲ درصد نانولوله کربنی عامل دار و ۳ درصد جفت کننده مالئیکی هستند. همان‌گونه که در شکل ۵ (و) ملاحظه می‌گردد با اضافه شدن ۱ درصد نانولوله کربنی عامل دار، ماده زمینه در طی شکست پیوستگی خود را حفظ کرده و الیاف سر جای خود باقی مانده و از زمینه جدا نشد که نشان دهنده پراکنش مناسب نانولوله کربنی عامل دار در زمینه پلیمر و اتصال محکم‌تر در منطقه بین فازی بین نانولوله کربنی و پلیمر است. همچنین حضور عامل جفت کننده نیز با ایجاد سازگاری و اتصال قوی الیاف با ماده زمینه به بهبود مقاومت‌ها و خصوصیات مکانیکی نانوچندسازه کمک می‌کند. این موضوع با پیوستگی و اتصالات قوی‌تر در ریزنگار ۵ (ه) که حاوی ۲ درصد نانولوله کربنی عامل دار و ۳ درصد جفت کننده مالئیکی

ریزنگار ۵ (د)، اثر همزمان ذرات نانولوله کربنی خام و جفت کننده مالئیکی را نشان می‌دهد. در این شکل که با بزرگنمایی  $30000\times$  نشان داده شده است، دیده می‌شود که ماده زمینه کاملاً پیوسته بوده و هیچ‌گونه شکست و ترک در ماده زمینه دیده نمی‌شود که علت آن حضور نانولوله کربنی می‌باشد که فضای خالی ماده زمینه را می‌پوشاند. علاوه بر این، حضور عامل جفت کننده مالئیکی نیز به علت اثر فعال-کنندگی سطحی الیاف، موجب اتصال بهتر بین الیاف و پلیمر شده و مانند پلی عمل می‌کند که موجب انتقال بهتر تنش در فاصله بین دو فاز می‌گردد.

ریزنگارهای ۵ (و) و ۵ (ه) به ترتیب با بزرگنمایی  $30000\times$  و  $500\times$  مربوط به چندسازه‌های چوب-پلاستیک

می باشد به روشنی قابل ملاحظه است.

## بحث

با به کارگیری نانولوله کربنی خام از ۱ به ۲ درصد، مدول کششی نانوجندسازها افزایش یافت. یکی از مهمترین عواملی که بر مدول الاستیسیته چندسازه‌ها تأثیر دارد، اجزای تشکیل دهنده آن است. Salvetat و همکاران (۱۹۹۹) مدول الاستیسیته نانولوله کربنی را حدود ۱ تراپاسکال (TPa) گزارش کردند (Salvetat et al., 1999). بنابراین جایگزینی الیاف چوب که دارای مدول الاستیسیته حدود ۵۰۰۰ تا ۸۰۰۰ مگاپاسکال است با نانولوله کربنی خام می تواند روی مدول الاستیسیته نانوجندسازه حاصل تأثیر چشمگیری داشته باشد. از سوی دیگر، نسبت طول به قطر بالا نانولوله کربنی، با افزایش سطح ویژه فوق العاده زیاد، تأثیر بسیار مهم و چشمگیری در افزایش مدول الاستیسیته چندسازه چوب-پلاستیک دارد (Ghaseme et al., 2012, Farsi & Maashi, 2014). جفت کننده مالئیکی با کاهش انرژی سطحی الیاف چوب و نزدیک کردن انرژی سطحی آن به پلاستیک، سبب ترشوندگی بهتر آرد چوب توسط پلی اتیلن سنگین می شود که نتیجه آن افزایش چسبندگی در فاز میانی پرکننده‌ها و ماده زمینه پلیمری و همچنین افزایش روانی ماده زمینه پلیمری می باشد (Chowdhury & wolcott, 2007). با به کارگیری نانولوله کربنی عامل دار، میزان مدول کششی نمونه‌ها بیشتر افزایش یافت. این تفاوت ممکن است به پراکنش بهتر نانولوله کربنی در زمینه پلی اتیلن سنگین نسبت داده شود که از طریق عامل دار کردن نانولوله کربنی خام به دست می آید. انرژی سطحی بالا بین پلی اتیلن سنگین و نانولوله کربنی عامل دار باعث افزایش کارایی چندسازه‌ها در مقایسه با نمونه‌های حاوی نانولوله کربنی خام شد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که ساختار چندسازه‌های حاوی نانولوله کربنی عامل دار بهتر از سایر چندسازه‌ها بوده است. توسعه پیوندهای شیمیایی قوی بین الیاف و پلیمر در نانوجندسازه یک گام بسیار مهم برای افزایش خواص مکانیکی است. این نتایج حکایت از آن دارد که اضافه کردن جفت کننده می تواند در سازگاری بین عوامل

سازنده و افزایش مدول الاستیسیته چندسازه تأثیر داشته باشد. همچنین نانولوله‌های کربنی عامل دار دارای گروه‌های حاوی اکسیژن هستند که می توانند با پلیمر پیوند برقرار کرده و موجب پراکنش یکنواخت تر در زمینه پلیمر شوند و تأثیر بیشتری در انتقال بهتر تنش در منطقه بین فازی داشته باشند (Ghasemi et al., 2012, Wu et al., 2017).

با افزایش نانولوله کربنی خام از ۱ به ۲ درصد، مقاومت کششی افزایش یافت. مقاومت کششی چندسازه چوب-پلاستیک به شدت به کیفیت سطح مشترک بین دو فاز ماده مرکب بستگی دارد، زیرا انتقال تنش از فاز زمینه به فاز تقویت کننده به وسیله این ناحیه انجام می شود. اصولاً نقش فاز زمینه، نگهداری الیاف و انتقال نیرو به فاز ثانویه است و نقش فاز ثانویه تقویت فیزیکی و مکانیکی ماده زمینه می باشد، از این رو با افزایش مقدار پرکننده میزان تنش قابل تحمل چندسازه بر اثر وجود فاز تقویت کننده افزایش می یابد (Ahmadi et al., 2015). مقاومت کششی چندسازه‌ها به پیوند سایر اجزای آن نیز بستگی دارد. حضور جفت کننده مالئیکی در ترکیب چندسازه چوب-پلاستیک، سازگاری و اتصال بین مواد سلولزی قطبی و پلیمر غیرقطبی را افزایش داده و با ایجاد پیوندهای کووالانسی با گروه‌های هیدروکسیل سطوح الیاف چوب برهم کنش و چسبندگی بین ماده لیگنوسلولزی و پلیمر را افزایش داده، در نتیجه انتقال تنش از ماده زمینه به مواد سلولزی بهتر انجام می شود و مقاومت افزایش می یابد (Sanadi et al., 1996). نانولوله کربنی به تنهایی به دلیل انرژی سطحی بالا در زمینه پلیمری تمایل به کلوخه شدن دارد (Bag et al., 2004). به خوبی معلوم شده است که نانولوله کربنی عامل دار می تواند باعث پیوند نانولوله‌ها به طور مستقیم به پلیمر و کاهش کلوخه شود و این پیوندها انتقال یکنواخت تر تنش بین پلیمر و نانولوله‌های کربنی را امکان پذیر می کند (Gojny et al., 2005, Salehi et al., 2021). اثر همزمان نانولوله کربنی و جفت کننده مالئیکی حکایت از اثر موفق تر جفت کننده مالئیکی نسبت به نانولوله کربنی عامل دار دارد. پژوهش‌ها حکایت از آن است که جفت کننده می تواند موجب توزیع بهتر نانولوله کربنی در زمینه پلیمر

کاهش جذب آب و واکنشیدگی ضخامت در چندسازه خواهد شد. علاوه بر این، جفت‌کننده سبب می‌شود پوشش الیاف چوب به وسیله پلی‌اتیلن‌سنگین بهتر انجام شود و ضمن کاهش دسترس‌پذیری الیاف چوب به آب از طریق درگیر شدن با گروه‌های هیدروکسیل الیاف چوبی، از جذب آب به وسیله دیواره‌های سلولی کاسته شده که منجر به کاهش جذب آب و واکنشیدگی ضخامت چندسازه چوب-پلاستیک می‌شود (Kazemi Najafi et al., 2010). کاهش میزان جذب آب و واکنشیدگی ضخامت چندسازه چوب-پلاستیک با افزایش میزان نانولوله کربنی را می‌توان به سطح ویژه و نسبت طول به قطر (L/D) بالای ذرات مورد استفاده در این تحقیق نسبت داد که موجب می‌شود نانولوله کربنی بیشتر منافذ ریز داخل چندسازه را پر کند که منجر به کاهش میزان جذب آب و واکنشیدگی ضخامت چندسازه چوب-پلاستیک می‌گردد. این در حالی است که آب قابلیت نفوذ به ساختار نانولوله کربنی را ندارد، بنابراین متورم نمی‌شود و جایگزین کردن آن بجای ماده آلی میزان واکنشیدگی ضخامت چندسازه را نیز کاهش می‌دهد (Farsheh et al., 2011).

#### نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر میزان نانولوله کربنی (به دو صورت نانولوله کربنی خام و نانولوله کربنی عامل‌دار) و جفت‌کننده مالئیکی روی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چندسازه الیاف چوب-پلی‌اتیلن‌سنگین بررسی گردید. بر پایه نتایج به دست آمده نتیجه‌گیری‌های زیر حاصل شد.

۱- افزودن نانولوله کربنی خام تا سطح ۲ درصد موجب بهبود مدول و مقاومت کششی و جذب آب و واکنشیدگی ضخامتی نانوجندسازه شد و با اضافه شدن نانولوله کربنی عامل‌دار به چندسازه چوب-پلاستیک، مقاومت و مدول کششی چندسازه‌ها افزایش و جذب آب و واکنشیدگی ضخامتی کاهش بیشتری یافت.

۲- مقاومت به ضربه بدون فاق نانوجندسازه‌ها با افزایش نانولوله کربنی خام تا حد ۲ درصد، افزایش یافت. اما افزایش مقاومت به ضربه با اضافه شدن نانولوله کربنی عامل‌دار چندان

شده که این موضوع نیز در افزایش ویژگی‌های مکانیکی چندسازه نقش مهمی دارد (Prashantha et al., 2008).

با افزایش نانولوله کربنی خام از ۱ به ۲ درصد، مقاومت به ضربه افزایش یافت. مقاومت به ضربه نشان‌دهنده استحکام مواد در برابر شکستگی بوده و این عمل از طریق شروع ترک در ضعیف‌ترین نقطه چندسازه (نقطه اتصال بین ماده سلولزی و پلیمر) یا از طریق تشکیل کلوخه و تمرکز تنش در این نقاط اتفاق می‌افتد. افزودن نانولوله کربنی با سازوکار تشکیل پل، بیرون کشیدگی و شکستگی الیاف که انرژی حاصل از ضربه را تلف کرده، از گسترش ترک‌ها و کاهش مقاومت به ضربه چندسازه‌ها جلوگیری می‌کند (Kordkheili et al., 2013, Yaghoobi & Fereidoon, 2019, Pundhir et al., 2021). افزایش مقاومت به ضربه چندسازه‌ها با افزودن جفت‌کننده مالئیکی احتمالاً با بهبود سطح اتصال فیبر-پلیمر انجام می‌شود که باعث کاهش تمرکز تنش در چندسازه‌ها و افزایش مقاومت ضربه می‌شود (Farsi 2010, Polec et al., 2010). گروه‌های عاملی در سطح نانولوله کربنی دارای بار منفی هستند، این گروه‌های حاوی اکسیژن، کلوخه‌شکنی (لایه-برداری کلوخه) نانولوله را تسهیل می‌کنند و باعث افزایش پراکندگی و کاهش تجمع این نانو ذرات در زمینه پلیمری می‌شوند (Ghasemi et al., 2012).

با افزایش نانولوله کربنی از ۱ به ۲ درصد، جذب آب و واکنشیدگی ضخامت ۲۴ ساعت کاهش یافت. جذب آب در چندسازه‌های چوب-پلاستیک از طریق سازوکارهای مختلفی انجام می‌شود که مهم‌ترین آنها، جذب آب از طریق دیواره سلولی ماده لیگنوسلولزی، جذب آب به وسیله فرایند مویبندی و خلل و فرج موجود در ماده چوبی و زمینه پلیمری (ناشی از فرایند تولید) است (Espert et al., 2004). استفاده از جفت‌کننده مالئیکی به‌عنوان یک عامل اتصال‌دهنده فعال، باعث پراکنش بهتر و یکنواخت‌تر الیاف چوب در زمینه پلی-اتیلن‌سنگین و بهبود اتصال در سطح مشترک بین الیاف قطبی چوب و پلی‌اتیلن غیر قطبی می‌شود. بهبود اتصال بین پلی-اتیلن و الیاف چوب باعث حذف فضاهای موجود در حدفاصل بین پلی‌اتیلن‌سنگین و الیاف می‌شود، همچنین باعث

محسوس نبود.

- ۳- جفت‌کننده مالئیکی با بهبود اتصال در منطقه بین‌فازی بین الیاف و پلیمر اثر مثبت و چشمگیری بر بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نانوجندسازه داشت.
- ۴- نتایج حاصل از تصاویر میکروسکوپ الکترونی حکایت از پراکنش مناسب نانولوله کربنی عامل دار تا حد ۲ درصد دارد. همچنین اضافه شدن ۳ درصد سازگارکننده همراه با نانولوله کربنی عامل دار موجب پراکنش و دربرگیری بهتر الیاف توسط ماده زمینه می‌شود.
- ۵- نتایج کلی حکایت از اثر مطلوب و تقویت‌کننده نانولوله کربنی خام در زمینه چندسازه چوب-پلاستیک دارد. همچنین به‌کارگیری نانولوله کربنی عامل دار موجب پراکنش بهتر نانو ذرات در ماده زمینه می‌شود. بر این اساس بیشترین میزان مدول و مقاومت کششی، مقاومت به ضربه و کمترین جذب آب و واکنش‌دهی ضخامتی در نمونه‌ها به نانوجندسازه حاوی ۲ درصد نانولوله کربنی عامل دار و ۳ درصد جفت‌کننده مالئیکی تعلق دارد.

### منابع مورد استفاده

- Compatibilizer selection to improve mechanical and moisture properties of extruded wood-HDPE composites. *Forest products journal*, 57(9): 46-54.
- Eichhorn, S.J., Baillie, C.A., Zafeiropoulos, N., Mwaikambo, L.Y., Ansell, M.P., Dufresne, A.A., Entwistle, K.M., Herrera-Franco, P.J., Escamilla, G.C., Groom, L. and Hughes, M., 2001. Current international research into cellulosic fibres and composites. *Journal of materials Science*, 36(9): 2107-2131.
- Espert, A., Vilaplana, F. and Karlsson, S., 2004. Comparison of water absorption in natural cellulosic fibres from wood and one-year crops in polypropylene composites and its influence on their mechanical properties. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, 35(11): 1267-1276.
- Farsheh, A.T., Talaiepour, M., Hemmasi, A.H., Khademiaslam, H. and Ghasemi, I., 2011. Investigation on the mechanical and morphological properties of foamed nanocomposites based on wood flour/PVC/multi-walled carbon nanotube. *BioResources*, 6(1): 841-852.
- Farsi, M., 2010. Wood-plastic composites: Influence of wood flour chemical modification on the mechanical performance. *Journal of reinforced plastics and composites*, 29(24): 3587-3592.
- Farsi, M. and Sani, F.M., 2014. Effects of multi-walled carbon nanotubes on the physical and mechanical properties of high-density polyethylene/wood flour nanocomposites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 27(8): 1139-1154.
- Ghasemi, I., Farsheh, A.T. and Masoomi, Z., 2012. Effects of multi-walled carbon nanotube functionalization on the morphological and mechanical properties of nanocomposite foams based on poly (vinyl chloride)/(wood flour)/(multi-walled carbon nanotubes). *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 18(3): 161-167.
- Gojny, F.H., Wichmann, M.H., Fiedler, B. and Schulte, K., 2005. Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites—a comparative study. *Composites science and technology*, 65(15-16): 2300-2313.
- Kazemi Najafi, S., Younesi Kordkheili, H. and Nasiri Avanaki, R., 2010. Effect of sea water on compatibilizer performance in water absorption behavior of wood-polypropylene composites. *Journal of Forest and Wood Products*, 62(3): 169-186.
- Kim, J.K. and Pal, K., 2010. *Recent advances in the processing of wood-plastic composites*. Springer. Netherlands, 176p
- Kordkheili, H.Y., Farsi, M. and Rezazadeh, Z., 2013. Physical, mechanical and morphological properties of
- Ahmadi, H., Hemmasi, A.H. and Mahdavi, S., 2015. Investigation on mechanical properties of HDPE recycled composite filled by furfural residue produced from bagasse. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 30 (3): 376-387.
- Bag, D.S., Dubey, R., Zhang, N., Xie, J., Varadan, V.K., Lal, D. and Mathur, G.N., 2004. Chemical functionalization of carbon nanotubes with 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane (3-MPTS). *Smart materials and structures*, 13(5): 1263-1267.
- Bai, J.B. and Allaoui, A., 2003. Effect of the length and the aggregate size of MWNTs on the improvement efficiency of the mechanical and electrical properties of nanocomposites—experimental investigation. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 34(8): 689-694.
- Bilbao-Sainz, C., Bras, J., Williams, T., Sénechal, T. and Orts, W., 2011. HPMC reinforced with different cellulose nano-particles. *Carbohydrate polymers*, 86(4): 1549-1557.
- Chowdhury, J.A. and Wolcott, M.P., 2007.

- Journal of Thermoplastic Composite Materials, 34(2): 203-220.
- Salvetat, J.P., Bonard, J.M., Thomson, N.H., Kulik, A.J., Forro, L., Benoit, W. and Zuppiroli, L., 1999. Mechanical properties of carbon nanotubes. Applied Physics A, 69(3): 255-260.
- Sanadi, A.R., Caulfield, D.F. and Jacobson, R.E., 1997. Agro-fiber thermoplastic composites. Paper and composites from agro-based resources. CRC Press, New York, USA
- Weisenberger, M.C., Grulke, E.A., Jacques, D., Rantell, A.T. and Andrews, R., 2003. Enhanced mechanical properties of polyacrylonitrile/multiwall carbon nanotube composite fibers. Journal of nanoscience and nanotechnology, 3(6): 535-539.
- Wu, Y., Gu, Z., Chen, M., Zhu, C. and Liao, H., 2017. Effect of functionalization of multi-walled carbon nanotube on mechanical and viscoelastic properties of polysulfide-modified epoxy nanocomposites. High Performance Polymers, 29(2): 151-160.
- Yaghoobi, H. and Fereidoon, A., 2019. Preparation and characterization of short kenaf fiber-based biocomposites reinforced with multi-walled carbon nanotubes. Composites Part B: Engineering, 162: 314-322.
- Yakobson, B.I., Brabec, C.J. and Bernholc, J., 1996. Nanomechanics of carbon tubes: instabilities beyond linear response. Physical review letters, 76(14): 2511-2514.
- Yu, M.F., Files, B.S., Arepalli, S. and Ruoff, R.S., 2000. Tensile loading of ropes of single wall carbon nanotubes and their mechanical properties. Physical review letters, 84(24): 5552-5555.
- polymer composites manufactured from carbon nanotubes and wood flour. Composites Part B: Engineering, 44(1): 750-755.
- Kordkheili, H.Y., Hiziroglu, S. and Farsi, M., 2012. Some of the physical and mechanical properties of cement composites manufactured from carbon nanotubes and bagasse fiber. Materials & Design, 33: 395-398.
- Park, B.D. and Kadla, J.F., 2012. Thermal degradation kinetics of resole phenol-formaldehyde resin/multi-walled carbon nanotube/cellulose nanocomposite. Thermochemica acta, 540: 107-115.
- Połeć, I., Hine, P.J., Bonner, M.J., Ward, I.M. and Barton, D.C., 2010. Die drawn wood polymer composites. I. Mechanical properties. Composites Science and Technology, 70(1): 45-52.
- Popov, V.N., 2004. Carbon nanotubes: properties and application. Materials Science and Engineering: R: Reports, 43(3): 61-102.
- 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.
- Pundhir, N., Zafar, S. and Pathak, H., 2021. Performance evaluation of HDPE/MWCNT and HDPE/kenaf composites. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 34(10): 1315-1333.
- Salehi, S., Maghmoomi, F., Sahebani, S., Zebarjad, S.M. and Lazzeri, A., 2021. A study on the effect of carbon nanotube surface modification on mechanical and thermal properties of CNT/HDPE nanocomposite.

## Investigating the effect of Functionalized carbon nanotubes on physical and mechanical properties of wood-plastic nanocomposite

M. Farsi<sup>1,\*</sup>, A. Tabei<sup>2</sup>, F. Maashi Sani<sup>3</sup> and M. Ebadi<sup>4</sup>

1\*- Corresponding author, Associate Professor, Faculty of Wood and Paper Science and Technology, Sari Branch, Islamic Azad University, Sari, Iran, Email: moh\_farsi@iausari.ac.ir

2-Assistant Professor, Faculty of Wood and Paper Science and Technology, Astara Branch, Islamic Azad University, Astara, Iran

3- Instructor, Faculty of Industrial Engineering, Sari Branch, Islamic Azad University, Sari, Iran

4-Ph.D. Candidate, Wood and Paper Science, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

Received: Nov., 2021

Accepted: Aug., 2022

### Abstract

The purpose of this research is to investigate the physical and mechanical properties of the wood-plastic nanocomposite made using Blank and Functionalized carbon nanotubes (CNTs). For this purpose, wood flour at a fixed amount of 50%, Blank CNTs at three levels of 0, 1 and 2% and coupling agent at two levels of 0 and 3% and the balance HDPE matrix were used. Also, Functionalized CNTS were used to strengthen the efficiency of nanocomposites at 1 and 2% levels separately. The materials were mixed in an internal mixer (Haake) and then the samples were made by a hot press machine. The results showed that by increasing the amount of CNTs from 0 to 2% wt, the tensile strength and modulus of the samples increased by 58.8% and 12.6% respectively, and water absorption and thickness swelling decreased by 54.5% and 19.4% respectively. Composites containing 2% wt of CNTs showed higher impact resistance compared to control samples. The coupling agent had a positive effect on the performance of nanocomposites. The physical and mechanical properties of the samples were significantly improved by adding the coupling agent and Functionalized CNTs. The results were also confirmed by scanning electron microscopy.

**Keywords:** Coupling agent, physical and mechanical properties, raw and functionalized CNTs.