

## مقاله پژوهشی

## اثرات افزودن کربن نانوتیوب‌های چنددیواره عامل‌دار (MWCNT) بر خواص مکانیکی و زیست‌سازگاری ماتریس پلیمری پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا (UHMWPE) در تعویض مفاصل

محسن فکوری<sup>۱، ۲</sup>، محمدتقی خراسانی<sup>۳\*</sup>، مهدی کمالی دولت‌آبادی<sup>۴</sup>

- ۱- گروه مهندسی پزشکی (بیومتریال)، دانشکده فنی مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
- ۲- گروه بیومتریال، پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته، پژوهشگاه مواد و انرژی، مشکین‌دشت، کرج، ایران
- ۳- گروه پلیمرهای زیست‌سازگار و پلیمرهای طبیعی، پژوهشکده علوم پلیمر، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران
- ۴- گروه مهندسی نساجی، دانشکده فنی مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

\*مسئول مکاتبات: m.khorrasani@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۹

DOI: 10.22034/ascij.2022.1974726.1446

## چکیده

پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا (UHMWPE) چندین سال است که به‌عنوان ماده‌ی انتخابی در پروتزهای تعویض مفاصل به‌عنوان جزء مفصلی استفاده می‌شود. علی‌رغم ویژگی‌های بارز فیزیکی و شیمیایی، طول عمر این پلیمر محدود است. یکی از راه‌های افزایش طول عمر و خواص مکانیکی این پلیمر استفاده از نانوتیوب‌های کربنی چنددیواره (MWCNT) است. این نانوذرات به علت خواص مکانیکی فوق‌العاده و نسبت سطح به حجم بالا کاندید مطلوبی جهت استفاده به‌عنوان فیلر در پلیمرها هستند. در این پژوهش بررسی افزودن ۰/۱ درصد وزنی نانوتیوب‌های کربنی به ماتریس زمینه UHMWPE جهت بررسی خواص مکانیکی و زیست‌سازگاری این کامپوزیت و مقایسه‌ی آن نسبت به نمونه UHMWPE خالص انجام شد. بررسی طیف‌سنجی مادون‌قرمز تبدیل فوریه (FTIR) وجود پیک‌های مشخصه‌ی پلیمر UHMWPE و نانوذره‌ی کربنی را تایید کرد. پراش اشعه‌ی X (XRD) نشان از افزایش شدت پیک‌های مشخصه‌ی کامپوزیت نسبت به نمونه‌ی خالص داشت. آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) افزایش حدود ۱۰ درصدی در بلورینگی کامپوزیت حاوی نانوتیوب کربنی را نشان داد. آنالیز حرارتی مکانیکی دینامیکی (DMTA) افزایش حدود ۲۲ درصدی مدول ذخیره را نسبت به نمونه‌ی کنترل نشان داد و در نهایت میزان زنده‌مانی سلول‌ها از طریق آزمون کشت سلولی (MTT assay) انجام شد که نشان از افزایش ۱۵ درصدی در زنده‌مانی سلولی در کامپوزیت PE/MWCNT داشت. باتوجه به نتایج مکانیکی و زیست‌سازگاری مطلوب کامپوزیت نانو کربنی، می‌توان انتظار داشت که این نمونه بتواند در شرایط بارگذاری‌های مکانیکی در ناحیه‌ی مفصلی عملکرد بهتری را در مقایسه با UHMWPE خالص به نمایش بگذارد.

کلمات کلیدی: نانوتیوب‌های کربنی چند دیواره، پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا، کامپوزیت UHMWPE/MWCNT، تعویض مفاصل

## مقدمه

انجام می‌شود که بیشتر آن‌ها توسط این پلیمر انجام شده است. علی‌رغم ویژگی‌هایی مطلوبی که این پلیمر دارد، طول عمر آن محدود است. در ابعاد ماکرو مولکولی، این پلیمر به صورت پودر (رزین) است که باید در دما و فشار بالا به صورت یک توده‌ی مستحکم درآید (۱، ۲). در ابعاد مولکولی در شاخه‌ی اصلی آن کربن وجود دارد که می‌تواند چرخش و پیچش داشته باشد که البته می‌توان این تغییرات را توسط تابش، استریل کردن و تغییر در نحوه فرایند در ساختار پلی‌اتیلن ایجاد کرد (۲۶).

علی‌رغم خواص بی‌نظیر این پلیمر، محصولات ناشی از سایش پلی‌اتیلن، بعد از گذشت چند سال از کاشت آن در درون بدن شکل می‌گیرد که با یک واکنش التهابی، تشکیل یک غشا سست و خورده شدن ثانویه استخوان آغاز می‌گردد (۳۰)؛ لذا جلوگیری و یا به تعویق انداختن تخریب جز پلی‌اتیلنی پروتزهای تعویض زانو و لگن باعث نجات زندگی و همچنین افزایش امید به زندگی می‌شود. به همین دلیل بحث بهبود خواص پلی‌اتیلن در تمام نقاط جهان بسیار حائز اهمیت است (۲).

یکی از راه‌های تقویت پلی‌اتیلن استفاده از ذرات پخش شونده تحت عنوان فاز تقویت‌کننده است که از این جمله تقویت‌کننده‌ها می‌توان به هیدروکسی آپاتیت، کربن و الماس اشاره کرد (۱۰).

در مطالعات اخیر علاقه زیادی به استفاده از نانوذرات کربنی به عنوان فاز تقویت‌کننده برای بهبود عملکرد مکانیکی UHMWPE و افزایش عملکرد و طول عمر ایمپلنت‌های UHMWPE نشان داده شده است (۱۰، ۳۶).

خواص مکانیکی ذاتی کربن مانند: چگالی پایین، مدول الاستیک حدود ۱ تتر پاسکال و استحکام کششی نزدیک به ۳۰ الی ۱۰۰ گیگاپاسکال، کربن را

مشکل تعویض مفاصل روزبه‌روز افزایش می‌یابد، بنابراین فناوری می‌بایست در این زمینه نقش خود را ایفا کند و تکنیک‌های قدیمی را به‌روزرسانی و سازگارتر کند (۲۱). یکی از رایج‌ترین بیماری‌های تخریبی، پوکی استخوان است که ۹/۶ درصد از مردان و ۱۸ درصد از زنان بالای سن ۶۰ سال در جهان به آن دچار می‌شوند. اگرچه افزایش سن یکی از فاکتورهای مهم به شمار می‌آید؛ اما این پدیده در بیماران جوان‌تر نیز به علت دلایلی مانند تصادف، تروما و بیماری‌های مادرزادی نیز مشاهده می‌شود (۲۴). نرخ استفاده از پروتزهای تعویض زانو و لگن در طی پانزده سال گذشته در بیشتر کشورهای اروپایی به علت بالارفتن میانگین سنی جمعیت و همچنین افزایش اعتماد به تکنیک‌های عمل‌های جراحی تعویض مفصل، افزایش پیدا کرده است. عمل تعویض مفصل لگن و زانو در حال حاضر بهترین و مؤثرترین روش برای از بین بردن آرتروز، کاهش درد و بازیابی حرکتی بیمار و برگشت به زندگی عادی است (۳۶).

پلی‌اتیلن یک پلیمر ترموپلاستیک است و از گاز اتیلن ( $C_2H_4$ ) با وزن مولکولی ۲۸ تشکیل شده است. فرمول کلی شیمیایی پلی‌اتیلن  $-(C_2H_4)_n-$  است؛ که  $n$  درجه پلیمریزاسیون است. یکی از زیرمجموعه‌های پلی‌اتیلن، پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا (UHMWPE) است که دارای زنجیره‌های بسیار طولانی است (۱۲، ۲۸، ۳۵).

پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا، یک پلیمر ویژه است که خواص فیزیکی و شیمیایی برجسته‌ای دارد. از مهم‌ترین خواص آن می‌توان خثی بودن، خاصیت روغن‌کاری، استحکام در مقابل ضربه و استحکام سایشی را نام برد. حدوداً ۵۰ سال است که از این پلیمر در ارتوپدی استفاده می‌شود (۶).

سالانه حدود ۳ میلیون عمل تعویض مفصل در جهان

### مواد و روش‌ها

**مواد مورد استفاده:** در این پژوهش طبق استاندارد ASTM F648-13 (۳) از پودر درجه‌ی پزشکی UHMWPE مدل GUR ۱۰۲۰ متعلق به شرکت Ticona GmbH (آلمان) استفاده شد. پودر GUR1020 حضور گسترده‌ای در تولید تجاری پروتزهای تعویض مفاصل دارد (۳۰). نانوتیوب‌های کربنی چند دیواره عامل‌دار شده با گروه‌های کربوکسیل از شرکت Neutrino (چین) با خلوص بالای ۹۵ درصد، قطر بیرونی کم‌تر از ۸ نانومتر و طول ۱۰ الی ۳۰ نانومتر به‌عنوان فاز تقویت‌کننده استفاده شد. این نانوتیوب‌ها از طریق فرایند رسوب‌دهی شیمیایی بخار تولید شده بودند. علت استفاده از نانوتیوب عامل‌دار شده با گروه‌های کربوکسیل، ایجاد پیوند بهتر نانوذرات با بستر پلی‌اتیلنی است. همچنین از اتانول خالص (۹۹/۹۹ درصد) شرکت امرتات شیمی (ایران) به‌عنوان حلال استفاده شد.

**دستگاه‌ها:** به‌منظور بررسی پیوندهای شیمیایی و بررسی حضور موفق نانوذرات در کامپوزیت تولید شده، از دستگاه طیف‌سنجی مادون‌قرمز (FTIR) مدل DMA 80- direct mercury analyzer (ایتالیا) در طول موج  $400-4000 \text{ cm}^{-1}$  با دقت  $2 \text{ cm}^{-1}$  طیف نمونه‌ها گرفته شد. آزمون گرماسنجی روشی تفاضلی (DSC) توسط دستگاه Setaram Instrumentation مدل DSC-131 (فرانسه) در محدوده‌ی دمایی بین ۲۵ تا ۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد با نرخ گرمایش ۵ درجه بر دقیقه به‌منظور دستیابی به نقطه‌ی ذوب و محاسبه‌ی درصد بلورینگی نمونه‌ها از طریق معادله‌ی زیر انجام شد (۴):  $X_c = \frac{\Delta H}{\Delta H_{100}} \times 100$  معادله ۱ محاسبه درصد بلورینگی (۱۷). در این معادله  $\Delta H$  آنتالپی پلیمر،  $\Delta H_{100}$  آنتالپی ذوب UHMWPE ۱۰۰ درصد کریستالی است که ۲۹۰ ژول بر گرم محاسبه می‌شود (۴). پراش پرتوی x (XRD) توسط دستگاه Seifert

یک نماینده بسیار عالی به‌عنوان تقویت‌کننده برای پلی‌اتیلن معرفی می‌کند (۱۱، ۱۲).

نانوتیوب‌های کربنی نسبت سطح به حجم بالا، قطری بین ۵ الی ۱۵ نانومتر و طولی تا ۵۰ نانومتر دارند. ساختار توخالی کربن توسط یک اتم با دیواره ضخیم (صفحات گرافن) شکل می‌گیرد (۳۲).

استفاده از نتایج تحقیقاتی نشان می‌دهد که استفاده از کربن به‌عنوان تقویت‌کننده در ماتریس UHMWPE باعث افزایش مدول یانگ می‌شود (۲۰، ۳۳، ۳۴).

همچنین نشان داده شده که استفاده از نانوتیوب‌های کربنی چنددیواره در ماتریس پلیمری باعث افزایش پایداری حرارتی و کاهش مقاومت به اکسیداسیون و کاهش سایش شده است (۱۴).

روان و همکاران نشان دادند که افزودن ۱ درصد وزنی MWCNT به UHMWPE مدول یانگ را ۱۵ درصد افزایش داده است (۲۷). علی‌رغم پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی تقویت خواص ماتریس UHMWPE و به صورت خاص استفاده از فاز تقویت‌کننده مانند نانوتیوب‌های کربنی چنددیواره، کماکان به دست آوردن پراکندگی یکنواخت از نانو ذرات درون ماتریس پلیمری و مقدار غلظت بهینه‌ی آنها جهت بهبود خواص مکانیکی و طول عمر این جز پلیمری جای بحث و مطالعه‌ی بیشتری دارد (۷، ۸، ۹). علاوه بر این به ندرت در پژوهش‌های صورت گرفته، سمیت سلولی و زیست سازگاری کامپوزیت‌های تولید شده بررسی شده است. لذا در این پژوهش جهت دستیابی به غلظت بهینه و پراکندگی مناسب فاز تقویت‌کننده درون ماتریس پلیمری، اثر افزودن ۰/۱ درصد وزنی کربن نانوتیوب‌های چند دیواره به ماتریس UHMWPE با هدف بررسی تغییرات خواص مکانیکی و زیست سازگاری آن در مقایسه با نمونه‌ی خالص UHMWPE انجام شد.

کیفیت ساخت کامپوزیت نهایی می‌گذارد. مدت زمان و سرعت ترکیب مواد با یکدیگر برای به‌دست‌آوردن یک انتشار مؤثر برای نفوذ نانوذرات کربن به درون حجم پودرهای UHMWPE بسیار حائز اهمیت است. طبق تحقیقات گذشته سرعت ترکیب ۴۲۰ rpm یک سرعت ایده‌آل است که باعث آسیب پلاستیک به پودر UHMWPE نمی‌شود. سرعت کم تر از این مقدار انتشار مناسبی از نانوذرات به درون پودر را باعث نمی‌شود و سرعت بالاتر نیز باعث آسیب فیزیکی به نانوذرات و تغییر شکل مولکول‌های پودر UHMWPE می‌شود (۱۸).

آخرین مرحله قبل از به‌دست‌آوردن پودر نهایی، خشک‌کردن دوغابی است که از آسیاب گلوله‌ای خارج شده است. بدین منظور دوغاب به‌دست‌آمده از آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای به مدت یک روز در دمای ۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در اون (Oven) به‌منظور خارج‌شدن اتانول باقی‌مانده قرار داده شد. از آنجایی‌که پودر UHMWPE جاری نمی‌شود به همین دلیل روش‌های متداول قالب‌گیری پلیمرهای ترموپلاست مانند قالب‌گیری تزریقی، به‌صورت عملی برای شکل‌دادن به این پودر کاربردی نیست. یکی از معروف‌ترین روش‌های قالب‌گیری پودر UHMWPE، استفاده از قالب‌گیری فشاری مستقیم است که برای تولید قطعه از یک قالب فلزی استفاده می‌شود و از این طریق نمونه‌ی نهایی تولید می‌شود. مکانیزم کلی این روش برای شکل‌دهی به پودر پدیده‌ی خود انتشاری است (۱۳). از آنجایی‌که پدیده‌ی خود انتشاری یک فرایند محدود به شمار می‌آید، نیاز به زمان، فشار و دمای کافی برای مهاجرت زنجیره‌ها از طریق مرز دانه‌ها و تشکیل یک توده‌ی شکل‌گرفته منسجم دارد. شرایط انجام عمل قالب‌گیری فشاری به‌صورت مستقیم و خیلی زیاد بر روی خواص قطعه‌ی نهایی تولید شده تأثیر می‌گذارد. به همین دلیل

3003 pts (آلمان) با استفاده از آند مس و Cu K $\alpha$  ( $\lambda=1.542 \text{ \AA}$ ) به‌منظور شناسایی فاز و میزان بلورینگی نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. آنالیز حرارتی دینامیکی مکانیکی (DMTA) جهت بررسی تغییرات در مدول ذخیره (E')، مدول اتلاف (E'') و  $\tan\delta$  (E'/E) انجام پذیرفت. دستگاه مورد استفاده Triton Technology Ltd., TTDMA model (انگلیس) بود. این تست در بازه‌ی دمایی ۶۰- الی ۱۵۰ درجه سانتیگراد و با نرخ گرمایش ۳ درجه سانتیگراد در دقیقه انجام پذیرفت.

**روش تهیه‌ی نانوکامپوزیت:** در فرایند تولید، مشابه تحقیق ملک و امامی (۱۸) به‌منظور به‌دست‌آوردن محلولی یکنواخت از پودر نانوتیوب کربنی، ابتدا مقدار ۰/۱ درصد وزنی نانوتیوب کربنی چند دیواره توسط ترازو بادقت بسیار بالا اندازه‌گیری و با ۵۰ میلی‌لیتر اتانول خالص ترکیب شد. ترکیب اتانول و نانوتیوب کربنی چند دیواره به مدت ۱۵ دقیقه (۶) بازه‌ی ۲/۵ دقیقه‌ای برای تسهیل و انتشار هر چه بهتر مواد با یکدیگر قبل از ترکیب با پودر UHMWPE، التراسونیک شد. سپس مایع به دست آماده هم‌مره با پودر UHMWPE (۳۰ گرم) درون ظرف آسیاب گلوله‌ای ریخته شد. در این پروژه از دستگاه آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای مدل AS2-600 ساخت شرکت دانش بنیان فراگیر صنعت مهرین استفاده شد. حجم ظرف مورد استفاده ۲۵۰ ml و لایه‌ی درونی ظرف و گلوله‌ها از جنس زیرکونیا (ZrO $_2$ ) بود. قطر گلوله‌ها نیز ۵ mm بود. در جدول ۱ جزئیات مربوط به نسبت استفاده از گلوله به پودر و فضای خالی در هنگام استفاده از آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای آورده شده است (۳۲).

عملیات آسیاب گلوله‌ای باید تحت یک سری شرایط بهینه صورت گیرد تا یک انتشار مناسب به درون پودرها را شاهد باشیم که این عامل تأثیر مستقیم بروی

برای تولید این قطعات باید یک سری الزامات که توسط استاندارد ASTM F648 مطرح شده است رعایت شود (۳). در این پروژه از قالب دایره‌ای شکل به قطر ۷ سانتی‌متر و ضخامت تقریبی ۲ میلی‌متر به روش پرس ایزو استاتیک گرم برای تولید قطعات استفاده شد. بین مواد داخل قالب و بدنه‌ی قالب یک فیلم CuZn با ضخامت ۰.۰۵ میلی‌متر به‌عنوان عامل جداکننده قرار داده شد. به‌منظور پاک‌کردن تاریخیچه حرارتی، قبل از پرس به ماده گرما داده شد و حداکثر فشار قالب‌گیری از طریق یک چرخه خاص اعمال شد (طبق استاندارد فوق‌الذکر). در نهایت بعد از انجام پرس گرم قبل از خروج نمونه‌ها، قالب با استفاده از دستگاه عبور آب، سرد شد و در نهایت نمونه‌ها از درون قالب خارج شدند و لایه‌ی نازک از روی نمونه‌ها جدا شد (۳۳). در جدول ۲ نام اختصاری و ترکیب ماده‌ی استفاده شده و نمونه‌های تولید شده در این پژوهش آورده شده است.

**استریلیزاسیون و کشت سلولی:** در قدم بعدی، فرایند استریلیزاسیون از طریق اشعه گاما برای مطالعه خواص زیست‌سازگاری انجام شد که به این منظور قطعات تولید شده توسط سازمان انرژی اتمی تحت اشعه با دوز ۲۵K Gy قرار گرفتند. به‌منظور بررسی سمیت نمونه‌ها و تأثیر آنها بر رشد و تکثیر سلول‌ها، فرایند عصاره‌گیری بر اساس استاندارد ایزو ۵-۱۰۹۹۳ انجام شد که طی آن به هر نمونه استریل به‌ازای هر ۳ سانتی‌متر مربع سطح، مقدار یک میلی‌لیتر محیط کشت (RPMI) افزوده گردید. سپس بعد از گذشت ۳ روز محیط کشت خارج و به سلول‌ها افزوده شد. مقدار مشخصی محیط کشت نیز به‌عنوان شاهد (کنترل) در نظر گرفته شد. یکی از بهترین روش‌های غیرمستقیم موجود جهت تعیین ازدیاد سلول‌ها آزمون دی‌متیل تیازل دی‌فنیل تترازولیوم بروماید (MTT, Sigma, USA) است که بر پایه تغییر پودر زردرنگ تترازولیوم

به کریستال‌های نامحلول بنفش مایل به سیاه فورمازان است. این پدیده تنها در سلول‌های زنده و با استفاده از آنزیم موجود در میتوکندری آنها به نام سوکسینات دهیدروژناز اتفاق می‌افتد. کریستال‌های فورمازان با استفاده از حلال آلی مثل ایزوپروپانول قابل‌حل گردیده و چگالی نوری (OD: Optical density) حاصل از آن با استفاده از دستگاه الیزاریدر خوانده می‌شود. میزان چگالی نوری نسبت مستقیم با غلظت فورمازان داشته که آن هم متناسب با فعالیت متابولیکی سلول‌های زنده است. در این مطالعه برای بررسی میزان تکثیر سلولی ابتدا  $1 \times 10^4$  سلول به همراه ۱۰۰ میکرولیتر محیط کشت درون هر چاهک پلیت کشت سلولی ۹۶ چاهکی ریخته شد و سپس به مدت ۲۴ ساعت در انکوباتور ۳۷ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا سلول‌ها به کف پلیت بچسبند. پس از اطمینان از چسبیدن سلول‌ها، محیط کشت روی سلول‌ها تا حد امکان خارج کرده و ۹۰ میکرولیتر از عصاره هر نمونه به همراه ۱۰ میکرولیتر FBS به هر چاهک کشت افزوده شد و سلول‌ها برای مدت ۲۴ ساعت دیگر در مجاورت این عصاره‌ها قرار گرفتند. پس از آن محیط کشت خارج شد و ۱۰۰ میکرولیتر MTT با غلظت ۰/۵ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر در هر چاهک ریخته شد و به مدت ۴ ساعت در انکوباتور قرار گرفت. پس از گذشت ۴ ساعت محلول روی سلول‌ها خارج شد و ایزوپروپانول به آن‌ها اضافه گردید تا بلورهای بنفش رنگ ایجاد شده حل شود. برای حل شدن بهتر رسوب MTT، پلیت به مدت ۱۵ دقیقه بر روی دستگاه شیکر قرار گرفت. سپس مقدار غلظت ماده حل شده در ایزوپروپانول با استفاده از دستگاه الیزاریدر (STAT FAX 2100, USA) در طول موج ۵۷۰ نانومتر محاسبه شد. چاهک دارای سلول‌های بیشتر چگالی نوری (OD) بالاتری نسبت به چاهک با سلول کمتر نشان می‌دهد؛ بنابراین می‌توان از رابطه زیر چاهک

$$\text{دارای مقدار سلول بیشتر را مشخص کرد و با نمونه شاهد مقایسه نمود (معادله ۲ و ۳).} \quad (2) \quad \left(1 - \frac{\text{متوسط چگالی نوری نمونه}}{\text{متوسط چگالی نوری نمونه کنترل}}\right) \times 100 = \% \text{ درصد سمیت}$$

$$(3) \quad \% \text{ درصد سمیت} = 100 - \% \text{ درصد زنده مانده سلول}$$

جدول ۱- نسبت گلوله به پودر و فضای خالی در دستگاه آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای (۱۲)

ترکیب	مقدار استفاده شده
پودر UHMWPE به همراه کربن	۳۰ gr
گلوله‌های زیکنویایی	۱۰۸ gr
فضای خالی	$\frac{1}{3}$ حجم کل ظرف (حجم کل ظرف ml ۲۵۰ است)

جدول ۲- مشخصات نمونه‌های تولید شده

نام اختصاری	نام کامل نمونه	ترکیب مواد
PE powder	پودر UHMWPE	GUR 1020 پودر
Pure PE	UHMWPE قالب‌گیری شده	۱۰۰ درصد وزنی پودر UHMWPE
PE/MWCNT	کامپوزیت UHMWPE/MWCNT	۰/۱ درصد وزنی ۹۹/۹+MWCNT درصد وزنی پودر UHMWPE

## نتایج

**تفسیر طیف FTIR مربوط به نانوکامپوزیت کربنی:**  
 طیف FTIR به صورت کلی به دو ناحیه تقسیم می‌شود. ناحیه‌ی اول مربوط به عدد موج‌های بین  $400 \text{ cm}^{-1}$  الی  $4000 \text{ cm}^{-1}$  است که به‌عنوان ناحیه گروه‌های عاملی شناخته می‌شود و ناحیه‌ی دوم که شامل عددهای موج کم‌تر از  $1500 \text{ cm}^{-1}$  است و به‌عنوان ناحیه‌ی اثر انگشتی شناخته می‌شود (۲۲).  
 ناحیه متعلق به گروه‌های عاملی حاوی اطلاعات کلی در مورد پیوندها است درحالی‌که در کارهای دقیق، مانند بیومتریال، نیاز به ناحیه اثر انگشت بیشتر از ناحیه‌ی گروه عاملی است؛ چراکه ناحیه‌ی اثر انگشتی برای هر ماده متمایز و یکتا است (۲۳). همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، پیک‌های واقع در  $2848 \text{ cm}^{-1}$  و  $2920 \text{ cm}^{-1}$  را می‌توان به ترتیب به ارتعاشات کششی متقارن و نامتقارن مربوط به پیوند (C-H) نسبت داد. علاوه بر این، پیک  $721 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به پیوند (C-H) خمشی (ارتعاش لرزان) و پیک  $1466 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاش خمشی پیوند (C-H) است. تمامی این پیک‌ها تاییدکننده وجود ماتریس

(بستر UHMWPE) می‌باشند. لازم به ذکر است که پیک  $721 \text{ cm}^{-1}$  (ارتعاش لرزان) به دلیل درجه بالای پلیمریزاسیون و زنجیره مولکولی طویل UHMWPE است (۲۴).  
**تفسیر نتایج گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC):**  
 آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی جهت بررسی و مطالعه میزان تغییر بلورینگی و دمای ذوب در نمونه‌های تولید شده انجام پذیرفت. درصد بلورینگی پلیمر تأثیر مستقیمی بر مقاومت سایشی آن دارد. آنتالپی و درصد بلورینگی نمونه‌ی Pure PE و کامپوزیت PE/MWCNT در جدول ۳ گزارش شد. نتایج نشان داد که اضافه‌کردن MWCNT باعث افزایش حدوداً ۱۰ درصدی در میزان بلورینگی شده است (نسبت به نمونه کنترل) و درصد بلورینگی به حدود ۵۰ درصد رسیده است؛ لذا با استفاده از MWCNT به‌عنوان فاز تقویت‌کننده می‌توان گفت تحرک زنجیره‌ها به علت تعامل مناسب افزودنی با زمینه پلیمری، کاهش پیدا کرده است.  
**تفسیر الگوی پراش اشعه‌ی x (XRD):** الگوهای

درجه سانتیگراد، مدول اتلاف کامپوزیت PE/MWCNT و نمونه‌ی Pure PE به ترتیب ۲/۱ و ۳/۶ گیگا پاسکال است، در واقع نمونه‌ی کامپوزیتی حدود ۴۰ درصد اتلاف انرژی کم تری از خود نشان داده است. در واقع، هر چه ماده مدول اتلاف بالاتر داشته باشد، خاصیت الاستیک کم‌تر و خاصیت ویسکوز بالاتری خواهد شد. فاکتور اتلاف شکل ۶ در واقع حاصل تقسیم مدول ذخیره بر مدول اتلاف است. در واقع هرچه فاکتور اتلاف (تانژانت دلتا) افزایش یابد نشان‌دهنده‌ی خواص الاستیک بهتر و در نتیجه نشان‌دهنده‌ی میزان بلورینگی بالاتر نمونه است. با توجه به شکل مذکور، پیک مربوط به نمونه‌ی کامپوزیتی در دمای حدود ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، بالاتر از پیک نمونه‌ی خالص قرار گرفته است که این موضوع نیز گواهی بر بهبود خواص الاستیک نمونه‌ی کامپوزیتی در مقایسه با نمونه‌ی خالص است.

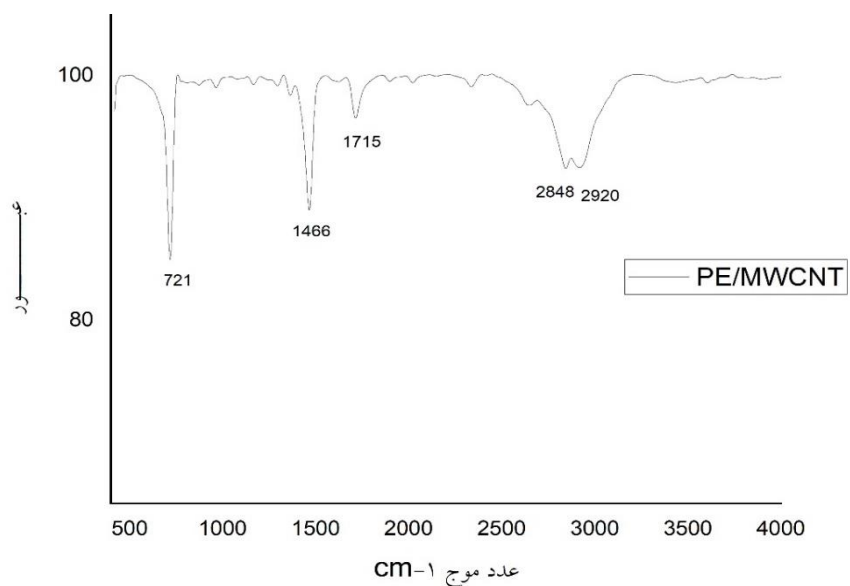
**کشت سلول و بررسی سمیت:** نتایج آزمون کشت سلول‌های فیبروبلاست بر روی سطح نمونه‌های تولید شده در شکل ۷ آورده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده میزان زنده‌مانی سلول‌ها در نمونه‌ی Pure PE در حدود ۸۲ درصد و در کامپوزیت PE/MWCNT حدود ۹۵ درصد گزارش شد. در واقع با اضافه کردن نانوذرات کربنی میزان زنده‌مانی سلول‌های فیبروبلاست در حدود ۱۵ درصد افزایش یافت که نشان از بهبود محسوس زیست‌سازگاری در نمونه‌ی نانو کامپوزیتی بود.

XRD مربوط به نمونه‌ی کنترل و کامپوزیت PE/MWCNT در شکل ۲ آورده شده است. به طور کلی، UHMWPE دارای دو پیک اصلی است. ارتورومبیک (۱۱۰) و هگزاگونال (۲۰۰). ارتورومبیک یک فاز پایدار است و زنجیره‌ها در مقایسه با فاز هگزاگونال که یک فاز ناپایدار است، تحرک کمی دارند. در نمونه‌ی کامپوزیتی قدرت و شدت پیک‌های مشخصه نمونه Pure PE، مخصوصاً پیک ارتورومبیک (۱۱۰) که مربوط به فاز پایدار UHMWPE است با اضافه کردن نانوتیوب کربنی افزایش پیدا کرده است در واقع وجود پیک‌های تیز و با شدت بالا بعد از افزودن کربن نانوتیوب نشان دهنده ماهیت کریستالی بالا وعدم وجود ناخالصی در ساختار نانوکامپوزیت PE/MWCNT است.

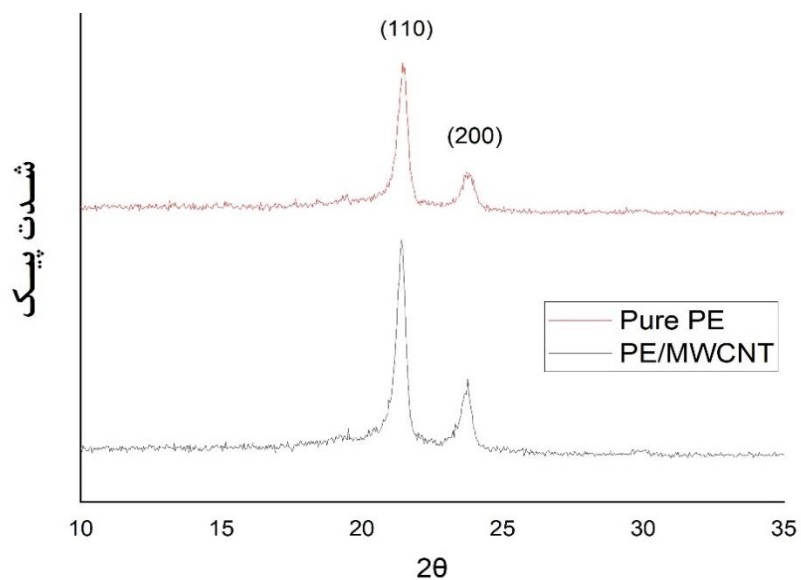
**تفسیر آنالیز مکانیکی دینامیکی (DMTA):** از طریق آنالیز حرارتی مکانیکی دینامیکی می‌توان به خواص ویسکوالاستیک پلیمر در دماهای مختلف پی برد. باتوجه به اشکال ۳ و ۴ در دمای (۳۷ °C) (دمای طبیعی بدن)، مدول ذخیره‌ی الاستیک به ترتیب در کامپوزیت PE/MWCNT و نمونه‌ی خالص، ۵/۱ و ۶/۱ گیگا پاسکال گزارش شده است، در واقع مدول ذخیره در کامپوزیت حدود ۲۲ درصد نسبت به نمونه‌ی Pure PE افزایش داشته است لذا می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌ی کامپوزیتی بتواند بیشتر در بارگذاری‌های مکانیکی، تنش‌های وارده را تحمل کند. با توجه به نمودار مدول اتلاف (شکل ۵)، در دمای بدن ۳۷

جدول ۳- نتایج آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC)

نمونه‌ها		
PE/UHMWPE	Pure PE	
۱۴۴/۶	۱۳۰/۵	آنتالپی ذوب اولیه (J/g)
۴۹/۸	۴۵	بلورینگی درصد
۱۳۲/۰۲	۱۳۱/۲۱	دمای ذوب (°C)

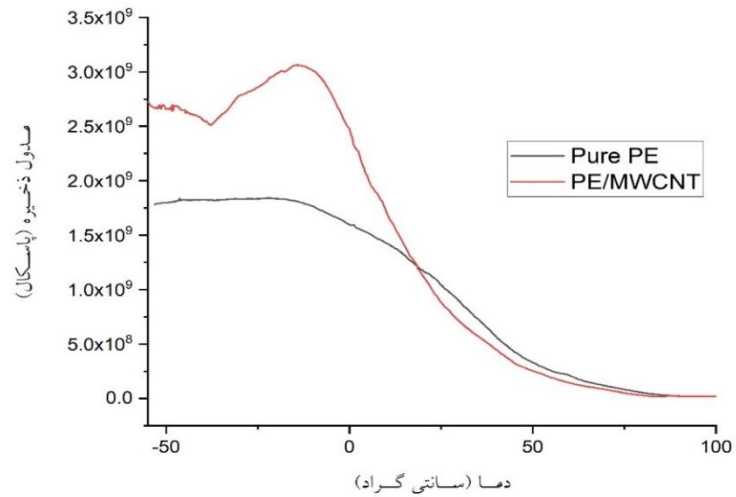


شکل ۱- طیف FTIR کامپوزیت PE/MWCNT

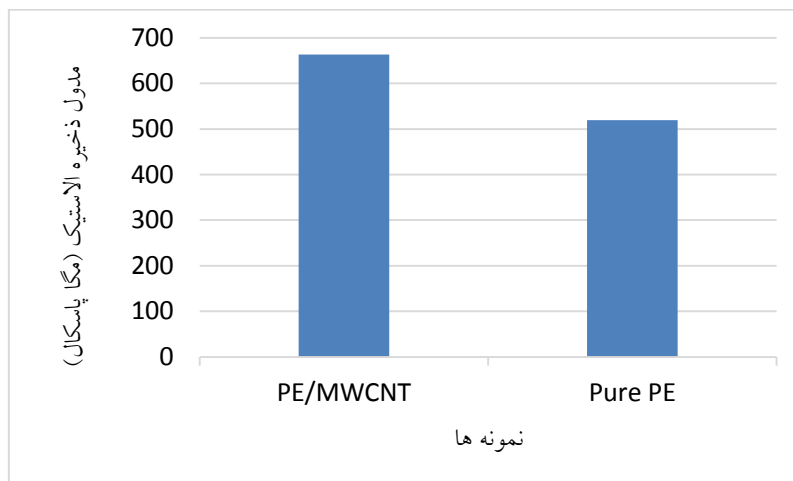


شکل ۲- منحنی پیک‌های پراش اشعه X نمونه های تولید شده

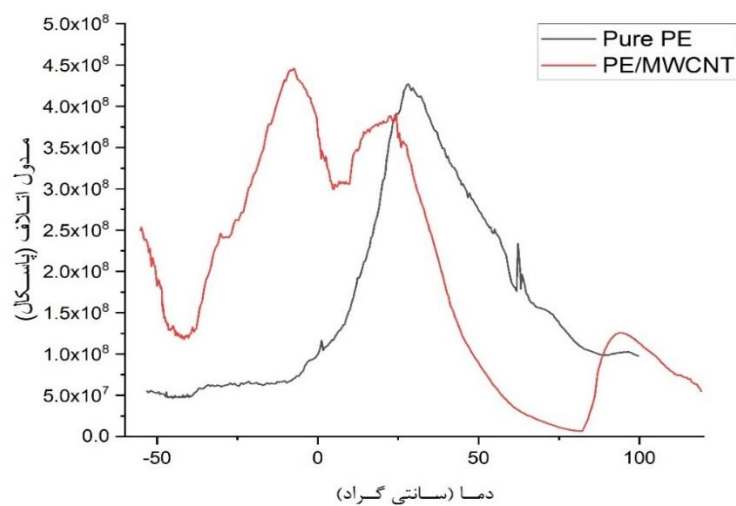




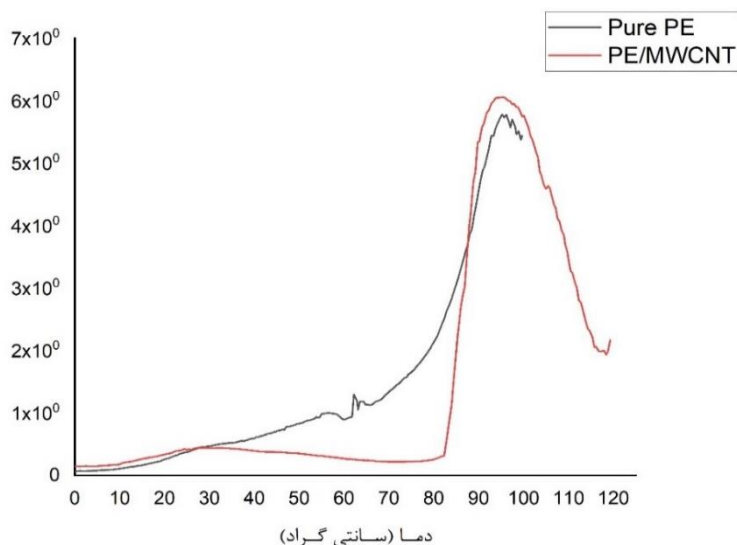
شکل ۳- نمودار مدول ذخیره (ارتجاعیت) نمونه‌ها



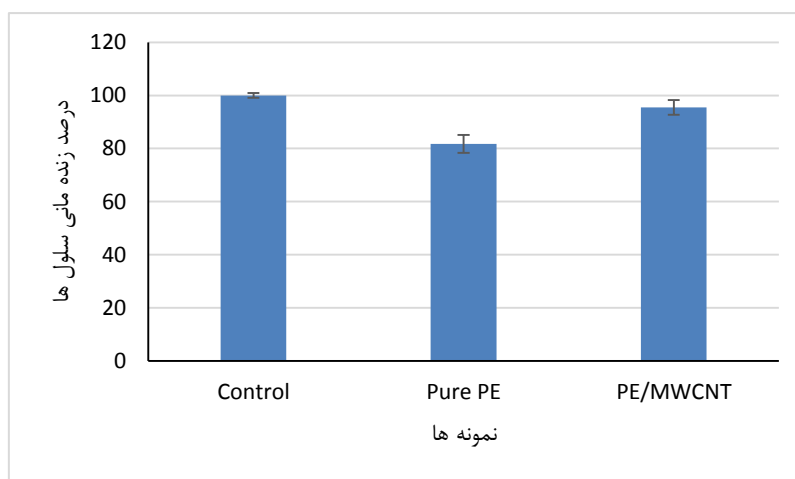
شکل ۴- مدول یانگ نمونه‌ها در دمای بدن (C) ۳۷



شکل ۵- نمودار مدول اتلاف نمونه‌ها



شکل ۶- نمودار تانژانت دلتا (فاکتور اتلاف) نمونه‌ها



شکل ۷- درصد زنده‌مانی سلول‌ها از طریق آزمایش کشت سلولی و سمیت (نوارهای خطا در سطح ۹۵ درصد ترسیم شده‌اند)

## بحث

همچنین پیک شاخص گروه کربونیل (C=O) در  $\text{cm}^{-1}$  ۱۷۱۵ (که نشان‌دهنده حضور موفق نانوتیوب کربنی در ماتریس پلیمری است) در طیف کامپوزیت تولید شده مشاهده شد، در واقع تمامی ارتعاشات به‌دست‌آمده از طریق آنالیز FTIR، سنتز موفقیت‌آمیز UHMWPE/MWCNT را تایید کردند (۲۵).

در آزمون XRD می‌توان از طریق ارتفاع پیک‌های به‌دست‌آمده میزان بلورینگی نمونه‌ها را با هم مقایسه کرد. باتوجه به نتایج، شدت دو پیک اصلی UHMWPE در نمونه‌ی کامپوزیتی نسبت به نمونه‌ی

در پژوهش حاضر، دو نمونه شامل Pure PE و کامپوزیت PE/MWCNT، حاوی ۰/۱ درصد وزنی MWCNT توسط پرس ایزواستاتیک گرم تولید و سپس استریل شدند و در ادامه خواص مکانیکی و زیست‌سازگاری آنها با رویکرد استفاده به‌عنوان مفاصل مصنوعی بررسی شد. آزمون FTIR جهت بررسی پیوندهای موجود در کامپوزیت تولید شده و بررسی حضور موفقیت‌آمیز فیلر کربنی در ماتریس پلیمری انجام پذیرفت. باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده، پیک‌های مشخصه مربوط به UHMWPE خالص و

توجه به نتایج میزان مدول ذخیره در نانوکامپوزیت تولید شده ۲۲ درصد افزایش نسبت به نمونه‌ی خالص را تجربه کرد، که این مسئله نشان‌دهنده‌ی بهبود خواص الاستیک کامپوزیت به علت افزایش بلورینگی و در نتیجه افزایش نیروی بین مولکولی و وزن مولکولی است (۱۰، ۲۹).

این یافته مطابق و هم راستا با تحقیق صورت‌گرفته توسط مسچی آملی و همکاران (۱۹) است که گزارش شد استفاده از نانوذرات کربن به‌عنوان فیلر موجب افزایش مدول یانگ کامپوزیت تولیدی شده است. همچنین مدول اتلاف کامپوزیت نیز حدود ۴۰ درصد کاهش را نسبت به نمونه‌ی UHMWPE خالص نشان داد، در واقع هر چه مدول اتلاف در نمونه کاهش یابد می‌توان انتظار داشت که شاهد پخش و انتقال انرژی اتلاف شده از سطح مفصلی به سایر اجزا یا تولید گرما در ناحیه‌ی کاشتنی نباشیم، زیرا در صورتی که این بارگذاری به‌صورت مداوم اتفاق بیفتد ممکن است در درازمدت منجر به شل‌شدگی و یا ایجاد آسیب فیزیکی به بخش‌های دیگر کاشتنی شود. به‌صورت کلی باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان انتظار داشت که نمونه‌ی کامپوزیتی بتواند در شرایط بارگذاری‌های مکانیکی در ناحیه‌ی مفصلی عملکرد بهتری را از خود به نمایش بگذارد. در ارزیابی زیست‌سازگاری نانوکامپوزیت تولید شده زنده‌مانی سلول‌های فیبروبلاست بیش از ۹۵ درصد گزارش شد که این موضوع در تحقیقات محققان زیادی نیز مشاهده شده است (۵، ۲۱، ۲۵) و نشان از افزایش محسوس زیست‌سازگاری ماده در حضور نانو ذرات کربنی دارد.

با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان انتظار داشت که با استفاده از مقادیر کم (۰/۱ درصد وزنی) از نانوتیوب‌های کربنی بتوان خواص مکانیکی و دوام پلیمر UHMWPE را جهت استفاده به عنوان سطح

Pure PE افزایش محسوسی پیدا کرد، لذا می‌توان گفت در نمونه‌ی کامپوزیتی افزایش میزان بلورینگی و کاهش تحرک زنجیره‌های کامپوزیت را نسبت به نمونه‌ی کنترل شاهد بودیم (۲۶).

لازم به ذکر است که پیک مشخصه نانوتیوب‌های کربنی در حدود  $20=26^\circ$  است که به علت ادغام کامل با ماتریس پلیمری و همچنین به علت استفاده مقادیر بسیار کم از فاز تقویت‌کننده (۰/۱ درصد وزنی) دیگر در کامپوزیت جدید به‌صورت یک پیک مجزا ظهور نمی‌کند که این موضوع نشان داد پلیمر تغییر فاز نداده و ماهیت خود را حفظ کرده است (۲۳).

در آزمون DSC مشاهده شد که افزودن نانوتیوب کربنی منجر به افزایش حدود ۱۰ درصدی در بلورینگی کامپوزیت شد. این نتایج با مطالعه‌ی دیگری که گزارش دادند با اضافه‌کردن MWCNT میزان بلورینگی کامپوزیت افزایش یافته است (۳۱)، مطابقت دارد. آنها ادعا کردند که نانوذرات به‌عنوان یک مکان برای هسته‌زایی بلورهای ماتریس پلیمری عمل می‌کنند که نشان می‌دهد نانوذرات کربنی با فاز پلیمری در سطح مشترک خود تعامل دارند و باعث افزایش بلورینگی شده‌اند (۳۱).

همچنین مشاهده شد که افزودن نانوتیوب‌های کربنی، تأثیر کمی بر افزایش یا کاهش نقطه ذوب کامپوزیت در مقایسه با UHMWPE خالص داشت که این موضوع نیز توسط ملک و همکاران (۱۸) نیز مشاهده شد و اشاره کردند که افزودن نانوتیوب‌های کربنی چند دیواره تأثیر بسزایی بر روی نقطه‌ی ذوب کامپوزیت نگذاشته است. تست حرارتی مکانیکی دینامیکی، ابزاری مؤثر برای مطالعه سازگاری اجزای سازنده‌ی کامپوزیت با یکدیگر است.

در آزمون DMTA، مدول ذخیره انرژی نشان دهنده‌ی مدول الاستیک نمونه‌ها است (بخش الاستیک یک ماده ویسکوالاستیک را نشان می‌دهد) (۲۹) که با

کمال تشکر و قدردانی را به عمل می‌آورند.

#### منابع

1. Agrawal, G., Negi, Y.S., Pradhan, S., Dash, M., Samal, S.K., 2017. Wettability and contact angle of polymeric biomaterials. In *Characterization of Polymeric Biomaterials*. Woodhead Publishing, pp. 57-81.
2. Aguiar V.O., Maru M.M., Soares I.T., Kapps V., Almeida C.M., Perez G., Archanjo B.S., Pita V.J., Marques M.D.F.V. 2022. Effect of incorporating multi-walled carbon nanotube and graphene in UHMWPE matrix on the enhancement of thermal and mechanical properties. *Journal of Materials Science*, 57:21104-21116.
3. American Society for Testing and Materials. 2004. Standard Specification for Ultra-high-molecular Weight Polyethylene Powder and Fabricated Form for Surgical Implants. ASTM International.
4. Andjelić S, Richard RE. 2001. Crystallization behavior of ultrahigh molecular weight polyethylene as a function of in vacuo  $\gamma$ -irradiation. *Macromolecules*, 34(4):896-906.
5. Aoki K., Saito N. 2020. Biocompatibility and carcinogenicity of carbon nanotubes as biomaterials. *Nanomaterials*, 10(2):264.
6. Bin Ali A., Mohammed A.S., Merah N. 2018. Tribological investigations of UHMWPE nanocomposites reinforced with three different organo-modified clays. *Polymer Composites*, 39(7):2224-2231.
7. Camacho N., Carmona J.M.G., Arbeláez D.E., Mondragón G.C., Stafford S. 2020. UHMWPE in total knee arthroplasty: successes and failures. *Revista Colombiana de Materiales*, 16:3-28.
8. Chhetri S., Bougherara H. 2021. A comprehensive review on surface modification of UHMWPE fiber and interfacial properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 140:106146.

مفصلی در پروتئزهای تعویض مفاصل بهبود ببخشید. در واقع با توجه به انرژی و نسبت سطح به حجم بالای نانوتیوب‌های کربنی، استفاده از غلظت‌های بالای این فیلر احتمال آگلومره شدن و کاهش خواص را در پی خواهد داشت. لذا در این تحقیق نیز نشان داده شد که با ایجاد یک پراکندگی مناسب از نانوتیوب‌ها درون حجم پودر UHMWPE و قالب گیری اصولی می‌توان طول عمر این پلیمر را افزایش داد.

#### نتیجه‌گیری

روش موفق پردازش پودر با استفاده از اختلاط تر (wet) با استفاده از هموژنایزر و آسیاب گلوله‌ای منجر به ایجاد نانوذرات کربنی کامل پراکنده شده در ماتریس UHMWPE شد. برای ایجاد شکل نهایی نانوکامپوزیت از قالب‌گیری فشاری همراه با دما استفاده شد. افزودن MWCNT نه تنها بر پارامترهای تبلور UHMWPE تأثیر منفی نداشت؛ بلکه باعث افزایش درصد بلورینگی، استحکام پیوندی و وزن مولکولی کامپوزیت نانوکربنی نیز شد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان انتظار داشت که نمونه‌ی کامپوزیتی بتواند در شرایط بارگذاری‌های مکانیکی و تنش‌های اعمالی در ناحیه‌ی مفصلی عملکرد بهتری را از خود در مقایسه با UHMWPE خالص به نمایش بگذارد.

#### تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از پایان‌نامه با عنوان "بررسی تأثیر اختلاط ویتامین E و نانوتیوب‌های کربنی چنددیواره (MWCNTs) بر خواص مکانیکی و زیست‌سازگاری کامپوزیت زمینه پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا (UHMWPE)" مصوب دانشکده فنی مهندسی دانشگاه علوم و تحقیقات است و نویسندگان این مقاله از زحمات و پشتیبانی معاونت پژوهشی واحد،

16. Måge I., Böcker U., Wubshet S.G., Lindberg D., Afseth N.K. 2021. Fourier-transform infrared (FTIR) fingerprinting for quality assessment of protein hydrolysates. *Lwt*, 152:112339.
17. Mamidi N., Gamero M.R.M., Castrejón J.V., Zúñiga A.E. 2019. Development of ultra-high molecular weight polyethylene-functionalized carbon nano-onions composites for biomedical applications. *Diamond and Related Materials*, 97:107435.
18. Melk L., Emami N. 2018. Mechanical and thermal performances of UHMWPE blended vitamin E reinforced carbon nanoparticle composites. *Composites Part B: Engineering*, 146:20-27.
19. Meschi Amoli B., Ramazani S.A., Izadi H. 2012. Preparation of ultrahigh-molecular-weight polyethylene/carbon nanotube nanocomposites with a Ziegler-Natta catalytic system and investigation of their thermal and mechanical properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 125(S1):E453-461.
20. Omprakash P., Kuruveri U.B., Panemangalore D.B. 2021. Carbon and Metallic-based Nanomaterials for Strain Sensors-A Review. *Current Nanomaterials*, 6(3):172-184.
21. Paladugu S.R.M., PS R.S. 2022. Mechanical and wear performances of UHMWPE composites used for orthopaedic applications—A review. *Materials Today: Proceedings*, 56:1103-1108.
22. Pang W., Ni Z., Chen G., Huang G., Huang H., Zhao Y. 2015. Mechanical and thermal properties of graphene oxide/ultrahigh molecular weight polyethylene nanocomposites. *Rsc Advances*, 5(77):63063-63072.
23. Parkatzidis K., Wang H.S., Truong N.P., Anastasaki A. 2020. Recent developments and future challenges in controlled radical polymerization: a 2020 update. *Chemistry*, 6(7):1575-1588.
24. Rahman M.M., Biswas M.A.S., Hoque K.N. 2022. Recent development on micro-
9. Da Silva B.C., dos Santos C.M., de Oliveira Couto C.A., Backes E.H., Passador F.R. 2019. February. Evaluation of Aging Resistance in UHMWPE/LLDPE BlendBased Carbon Nanotubes Nanocomposites. In *Macromolecular Symposia*, 383(1):1700079.
10. Drakopoulos S.X., Psarras G.C., Forte G., Martin-Fabiani I., Ronca S. 2018. Entanglement dynamics in ultra-high molecular weight polyethylene as revealed by dielectric spectroscopy. *Polymer*, 150:35-43.
11. Hiremath, N., Mays, J., Bhat G. 2017. Recent developments in carbon fibers and carbon nanotube-based fibers: a review. *Polymer Reviews*, 57(2):339-368.
12. Hussain M., Naqvi R.A., Abbas N., Khan S.M., Nawaz S., Hussain A., Zahra N., Khalid M.W. 2020. Ultra-high-molecular-weight-polyethylene (UHMWPE) as a promising polymer material for biomedical applications: a concise review. *Polymers*, 12(2):323.
13. Jana A., Selvaraj S., Subramani K., 2021. A novel technique for the development of acetabular cup by cold isostatic compaction and sintering of UHMWPE powder with optimized processing parameters. *Polymer Engineering and Science*, 61(10):2536-2556.
14. Kumar P.S., Reddy K.S.N., Unnikrishnan D., Balachandran M. 2019. Performance Enhancement of UHMWPE with Surface Functionalized Multiwalled Carbon Nanotubes/Graphite. *Structural Integrity Assessment: Proceedings of ICONS 2018*:231.
15. Lambert B., Neut D., van der Veen H.C., Bulstra S.K. 2019. Effects of vitamin E incorporation in polyethylene on oxidative degradation, wear rates, immune response, and infections in total joint arthroplasty: a review of the current literature. *International Orthopaedics*, 43(7):1549-1557.

- R., Emami, N., Tipper, J.L., 2018. Ultrahigh molecular weight polyethylene/graphene oxide nanocomposites: Wear characterization and biological response to wear particles. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 106(1):183-190.
32. Standard A.S.T.M. 1996. Standard Practice for Preparation of Compression-Molded Polyethylene Test Sheets and Test Specimens. *ASTM International*.
33. Suresha B., Harshavardhan B., Rao A.M., Koushik U.R., Hemanth R. 2020. Role of nano-fillers on tribological behaviour of ultra high molecular weight polyethylene composites. *Materials Today: Proceedings*, 27:2169-2173.
34. Zavala J.M.D., Gutiérrez H.M.L., Segura-Cárdenas E., Mamidi N., Morales-Avalos R., Villela-Castrejón J., Elías-Zúñiga A. 2021. Manufacture and mechanical properties of knee implants using SWCNTs/UHMWPE composites. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 120:104554.
35. Zexiong W., Anqi L., Zishou Z., Kancheng M. 2021. Crystallization of UHMWPE nanocomposites filled by multi-wall carbon nanotubes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 146(5):2223-2232.
36. Zhang K., Peng X., Cheng C., Zhao Y., Yu X. 2021. Preparation, characterization, and feasibility study of Sr/Zn-doped CPP/GNS/UHMWPE composites as an artificial joint component with enhanced hardness, impact strength, tribological and biological performance. *RSC Advances*, 11(36): 21991-21999.
- texturing of UHMWPE surfaces for orthopedic bearings: A review. *Biotribology*, 31(1):100216.
25. Reddy S.K., Kumar S., Varadarajan K.M., Marpu P.R., Gupta T.K., Choosri M., 2018. Strain and damage-sensing performance of biocompatible smart CNT/UHMWPE nanocomposites. *Materials Science and Engineering: C*, 92:957-968.
26. Ruan SL, Gao P, Yang XG, Yu TX. Toughening high performance ultrahigh molecular weight polyethylene using multiwalled carbon nanotubes. *Polymer*. 2003 Sep 1;44(19):5643-54.
27. Said A., 2021. Ultra-High-Molecular-Weight-Polyethylene (UHMWPE) as Desired Polymer Material for Biomedical. *Khalij-Libya Journal of Dental and Medical Research*, 2021:11-16.
28. Sarath Kumar P., Sai Narendra Reddy K., Unnikrishnan D., Balachandran M. 2020. Performance Enhancement of UHMWPE with Surface Functionalized Multiwalled Carbon Nanotubes/Graphite. In *Structural Integrity Assessment* (pp. 231-240). Springer, Singapore.
29. Sobajima A., Okihara T., Moriyama S., Nishimura N., Osawa T., Miyamae K., Haniu H., Aoki K., Tanaka M., Usui Y., Sako K.I. 2020. Multiwall carbon nanotube composites as artificial joint materials. *ACS Biomaterials Science and Engineering*, 6(12):7032-7040.
30. Sreekanth P.R., Kanagaraj S. 2013. Assessment of bulk and surface properties of medical grade UHMWPE based nanocomposites using Nanoindentation and microtensile testing. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 18:140-51.
31. Suñer S., Gowland N., Craven R., Joffe

## **The Effects of Adding Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNT) on the Mechanical Properties and Biocompatibility of The Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Polymer Matrix (UHMWPE) in Joint Replacements**

**Mohsen Fakoori<sup>1,2</sup>, Mohammad Taghi Khorasani<sup>3\*</sup>, Mehdi Kamali Aolatabadi<sup>4</sup>**

1- Department of Nanotechnology and Advance Materials, Biomaterials Research Group, Materials and Energy Research Center, Tehran, Iran

2- Department of Biomedical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Department of Biomaterials, Faculty of Polymer Science, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran

4- Department of Textile, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

### **Abstract**

Ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) has been used as the material of choice in joint replacement prosthesis as an articular component for several years. Despite its distinct physical and chemical characteristics, the lifespan of this polymer is limited. One approach to increase the lifespan and mechanical properties is the use of multi-walled carbon nanotubes (MWCNT). Multi-walled carbon nanotubes are promising candidates for use as a filler phase in polymers due to their excellent mechanical properties and excellent surface-to-volume ratio. In this research, the addition of 0.1% by weight of multi-walled carbon nanotubes functionalized with carboxyl groups was investigated on the mechanical properties and biocompatibility of the UHMWPE base matrix and its comparison with the pure UHMWPE sample. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) confirmed the presence of characteristic peaks of UHMWPE and carbon nanoparticle in the matrix. X-ray diffraction (XRD) showed an increase in the intensity of the characteristic peaks of the composite compared to the pure sample. The differential scanning calorimetry test (DSC) showed an increase of about 10% in the crystallinity of the composite containing carbon nanotubes (PE/MWCNT). The dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) showed an increase of about 22% in the storage modulus compared to the control sample, and finally, the cell viability through the cell culture test in the PE/MWCNT composite showed a 15 % increase in cell viability. According to mechanical and biocompatibility results, the composite sample can perform better in terms of mechanical loads in bearing surfaces compared to pure UHMWPE.

**Keywords:** Multi-walled Carbon Nanotubes, Ultra-high Molecular Weight Polyethylene, UHMWPE/MWCNT Composite, Joint Replacement.

