فصلنامه علمی زیست‌شناسی کاربردی دانشگاه الزهرا (س)
دوره ۳۶، شماره ۲، پیاپی ۷۶، تابستان ۱۴۰۲، ص ۱۱۲-۹۵
نوع مقاله: پژوهشی
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۳
وب سایت نشریه: https://jab.alzahra.ac.ir

The Quarterly Scientific Journal Of Applied Biology
Vol.36, No.1, Sering. 78, Winter 2024, p. 101-118.
Article type: Research Paper

https://doi.org/10.22051/jab.2023.41521.1507

بررسی اثرات افزودن هم‌زمان آلفا توکوفرول (ویتامین E) و کربن نانوتیوب‌های چند دیواره عامل دار (MWCNT) بر خواص مکانیکی و زیست سازگاری ماتریس پلیمری پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا (UHMWPE) با هدف کاربرد در تعویض مفاصل

محسن فکوری[۱و۲]، محمدتقی خراسانی*[۳]، مهدی کمالی دولت‌آبادی[۴]

چکیده

مقدمه: *پلی‌اتیلن با وزن مولکولی فوق‌العاده بالا (UHMWPE) به علت خواص فیزیکی و شیمیایی فوق‌العاده، طی سه دهه‌ی اخیر به‌عنوان ماده انتخابی در پروتزهای تعویض مفاصل استفاده شده است. با این‌وجود، سایش و اکسیداسیون این پلیمر در درازمدت منجر به استئولیز (تخریب استخوان) و محدودکردن طول عمر این پروتز می‌شود. یکی از روش‌های موثر جهت جلوگیری از اکسیداسیون، استفاده از α-توکوفرول در ماتریس UHMWPE است. اما حضور این افزودنی به تنهایی باعث بهبود عملکرد مکانیکی UHMWPE نمی شود. از طرف دیگر استفاده از نانوتیوب‌های کربنی چند دیواره (MWCNTs) به دلیل خواص استثنایی مانند مدول الاستیک و نسبت سطح به حجم بالا،نشان داده شده است که می توانند موجب بهبود خواص مکانیکی شوند. با این وجود پیدا کردن مقادیر بهینه استفاده از MWCNTs و ویتامین E به صورت همزمان جهت بهبود خواص مکانیکی این پلیمر بسیار حیاتی و مهم است.*

روش‌ها: *در این پژوهش جهت بررسی و مقایسهٔ تاثیر نانوتیوب‌های کربنی بر خواص کامپوزیت UHMWPE حاوی ویتامین E، دو کامپوزیت، یکی حاوی ۰,۲ درصد وزنی ویتامین E و دیگری حاوی ۰,۲۵ درصد وزنی ویتامین E به همراه ۰,۵ درصد وزنی MWCNT تولید شدند.* ***نتایج و بحث:*** *طیف‌سنجی مادون‌قرمز تبدیل فوریه (FTIR) افزایش پیک‌های مشخصه ی کامپوزیت PE-E/CNT را نسبت به کامپوزیت PE-E گزارش داد. گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) افزایش حدود ۷ درصدی بلورینگی را در کامپوزیت PE-E/CNT گزارش داد. آنالیز حرارتی مکانیکی دینامیکی (DMTA) نیز بهبود خواص الاستیک را در کامپوزیت PE-E/CNT نسبت به کامپوزیت حاوی ویتامین E نشان داد. نتایج آزمون بررسی سمیت (MTT assay) زیست سازگاری کامل کامپوزیت‌های تولید شده را نشان داد. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده‌ی بهبود خواص مکانیکی و زیست سازگاری کامل بستر پلیمری در حضور هم‌زمان ویتامین E و کربن نانوتیوب بود.*

واژه های کلیدی: *کامپوزیت UHMWPE/Vitamin E، کامپوزیت UHMWPE/Vitamin E/MWCNT، مفاصل مصنوعی*

---

[۱] دانشجوی دکتری، گروه بیومتریال، پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته، پژوهشگاه مواد و انرژی، مشکین‌دشت، کرج، ایران
[۲] گروه مهندسی پزشکی (بیومتریال)، دانشکده فنی مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
[۳] دانشیار، گروه پلیمرهای زیست‌سازگار و پلیمرهای طبیعی، پژوهشکده علوم پلیمر، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران (*نویسنده مسئول: m.khorrasani@gmail.com)
[۴] استادیار، گروه مهندسی نساجی، دانشکده فنی مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

* این مقاله مستخرج از پایان‌نامه ارشد با عنوان "بررسی تأثیر اختلاط ویتامین E و نانوتیوب‌های کربنی چند دیواره (MWCNTs) بر خواص مکانیکی و زیست سازگاری کامپوزیت زمینه پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا (UHMWPE)" مصوب دانشکده فنی مهندسی دانشگاه علوم و تحقیقات است. اساتید راهنما به ترتیب: دکتر محمد تقی خراسانی، دکتر مهدی کمالی دولت آبادی

مقدمه

پلی‌اتیلن با وزن مولکولی فوق‌العاده بالا (UHMWPE) به دلیل عملکرد موفقیت‌آمیزی که طی سه دهه‌ی اخیر به‌عنوان ماده انتخابی جهت استفاده به‌عنوان جزء مفصلی داشته کاملاً شناخته شده است (Davidson *et al*., 1988). با این حال سایش اجزای این پلیمر به‌عنوان یک مشکل بزرگ در نظر گرفته می‌شود که منجر به استئولیز (تخریب استخوان) و محدود کردن طول عمر این پروتز می‌شود (Paladugu & P.S., 2022). نشان داده شده است که اکسیداسیون در UHMWPE موجب افزایش نرخ سایش این پلیمر و ایجاد مقدار زیادی محصول ناشی از سایش در اطراف پروتز می‌شود (Aliyu *et al*., 2021). ایجاد پیوند عرضی از طریق پرتو گاما با موفقیت ثابت شده است که باعث بهبود چشمگیر مقاومت سایشی این پلیمر در مقایسه با نمونه‌ی بدون تشعشع آن می‌شود. ایجاد پیوند عرضی با تابش پر انرژی پرتو گاما، باعث افزایش چگالی پیوندهای عرضی در فاز آمورف پلیمر، کاهش تحرک زنجیره و در نتیجه کاهش تغییر شکل پلاستیک می‌شود (Wen *et al*., 2022). با این حال، به دلیل شکسته شدن پیوندهای C-H و C-C پلی‌اتیلن در طول فرآیند تابش پرتو، رادیکال‌های آزاد ناخواسته، تولید می‌شوند. در فاز آمورف پلیمر، این رادیکال‌های آزاد با یکدیگر پیوند می‌خورند و پیوندهای عرضی جدید ایجاد می‌کنند، اما در فاز کریستالی، رادیکال‌های آزاد تولید شده به دام می‌افتند و منجر به تخریب اکسیداسیون بلند مدت در UHMWPE می‌شوند. بنابراین، نیاز اساسی جهت بهبود مقاومت به اکسیداسیون و خواص مکانیکی UHMWPE در کاربردهای مفصلی وجود دارد. در حال حاضر بعد از ایجاد پیوند عرضی توسط اشعه‌ی گاما در UHMWPE، ذوب به عنوان یک روش عملیات حرارتی جهت کاهش میزان رادیکال آزاد انجام می‌شود. با این حال، عملیات ذوب منجر به کاهش بلورینگی UHMWPE می‌شود، که این موضوع بر خواص مکانیکی تأثیر منفی می‌گذارد و استحکام خستگی و چقرمگی شکست را کاهش می‌دهد (Muratoglu *et al*., 2003). یکی از روش‌های موثر برای جلوگیری از اکسیداسیون، استفاده از ویتامین E (α-توکوفرول) در ماتریس UHMWPE است (Gaziano, 1994). ویتامین E یک چربی طبیعی است که دارای دو سر به نام‌های کرومن و فتیل است. سر (دم) کرومن وظیفه‌ی جمع‌آوری رادیکال‌های آزاد و سر دیگر فتیل خاصیت چربی دوستی دارد (Dolezel & Adamirova, 1982). در واقع ویتامین E از طریق سر چربی‌دوست فتیل، می‌تواند با پلی‌اتیلن پیوند برقرار کند (Oral *et al*., 2007). لذا در صورت استفاده به عنوان فیلر می‌تواند با رادیکال‌های آزاد موجود در UHMWPE واکنش نشان دهد؛ بنابراین ویتامین E از تخریب اکسیداسیون UHMWPE جلوگیری و مقاومت به اکسیداسیون آن را افزایش می‌دهد (Costa *et al*., 1998). در بعضی از مطالعات انجام شده استفاده از آلفا توکوفرول به‌عنوان آنتی‌اکسیدان طبیعی در آزمون‌های سمیت سلولی، تکثیر، فعالیت‌های میتوکندری و سلامت غشای سلول تأثیر مثبتی نداشته است (Kurtz & Kurtz, 2009). یکی از عیوب ویتامین E که با UHMWPE ترکیب می‌شود، مقدار غلظت بهینه‌ی آن جهت بهبود خواص اکسیداسیونی است، همچنین ویتامین E به تنهایی نمی‌تواند خواص مکانیکی UHMWPE را بهبود ببخشد(Oral *et al*., 2008). با توجه به موارد ذکر شده هنوز محققان به ترکیب ایده آلی از ویتامین E نرسیده‌اند (Oral *et al*., 2005). جهت

بهبود خواص مکانیکی، یکی از پر ارجاع‌ترین فیلرها در پلیمرها نانوتیوب‌های کربنی چند دیواره (MWCNT) هستند. این فیلرها به دلیل خواص استثنایی مانند مدول الاستیک بالا، استحکام کششی، چقرمگی شکست، رسانایی الکتریکی و حرارتی استثنایی و نسبت سطح به حجم عالی موردتوجه هستند (Do Amaral Montanheiro *et al*., 2015). اگرچه حجم زیادی از متون علمی در مورد اثر نانوتیوب‌های کربنی بر عملکرد مکانیکی کامپوزیت‌های UHMWPE منتشر شده است، اما تحقیقات بسیار محدودی در مورد تأثیر هم‌زمان استفاده از نانوتیوب کربنی همراه با ویتامین E بر خواص مکانیکی آن ها انجام شده است؛ به طور مثال، در پژوهش ملک و امامی (Melk & Emami, 2018) کامپوزیت هایی با غلظت های ۰,۵ ، ۰,۷، ۱ و ۲ درصد وزنی MWCNTs و ۱۰۰۰ppm ویتامین E تولید و خواص حرارتی و مکانیکی آن ها بررسی شد و نشان داده شد اضافه کردن نانو تیوب های کربنی تغییری در خواص مکانیکی کامپوزیت ها ایجاد نکرده است که احتمالا این موضوع می تواند به دلیل غلظت بالای استفاده از نانو ذرات کربنی باشد چرا که، نانو ذرات کربنی انرژی سطحی بسیار بالایی دارند و هر چه غلظت (مقدار) استفاده از آنها بیشتر شود احتمال آگلومره شدن (گلوله ای شدن) و در نتیجه کاهش خواص وجود دارد. لازم به ذکر است در پژوهش مذکور خواص مکانیکی بیشتر از بعد چقرمگی و اندازه گیری سختی میکرو ساختاری مورد بررسی قرار گرفته است و با توجه به اینکه پژوهش دیگری در این زمینه صورت نپذیرفته، نیاز است پژوهش های عمیق تری در زمینه ی بررسی خواص مکانیکی این کامپوزیت ها انجام بپذیرد، مضافا مطلوب است غلظت بهینه ای از نانو تیوب های کربنی که بتواند بر روی ویژگی هایی نظیر درصد کریستالی تاثیر مثبت بگذارد نیز مورد بررسی قرار گیرد. همچنین از سوی دیگر طبق بررسی های انجام شده توسط نویسنده، تاکنون پژوهشی خواص زیست سازگاری این کامپوزیت های هیبرید را بررسی نکرده است، که با توجه به کاربرد این کامپوزیت ها در داخل بدن و سطوح مفصلی، بررسی رفتار زیستی این کامپوزیت ها امری مهم و حیاتی به شمار می رود.

هدف از این پژوهش بررسی اثرات افزودن ویتامین E به‌عنوان یک عامل آنتی‌اکسیدان و کربن نانوتیوب‌های چند دیواره به‌عنوان فاز تقویت‌کننده، بر خواص مکانیکی مانند رفتار ویسکو الاستیک، مدول یانگ، اتلاف و تغییرات کریستالی و در نهایت بررسی زیست سازگاری آن ها جهت کاربردهای ارتوپدیک است. در این راستا جهت انجام مقایسه و بررسی تاثیرات افزودن نانوتیوب‌های کربنی ،دو کامپوزیت، یکی حاوی نانو ذرات کربنی و ویتامین E به صورت همزمان (UHMWPE/Vitamin E/MWCNT) و دیگری حاوی ویتامین E (UHMWPE/Vitamin E) تولید شد و نتایج زیستی و مکانیکی آنها با یکدیگر مقایسه شد.

مواد و روش ها

مواد مورد استفاده

پودر UHMWPE-Gur 1020 که به‌عنوان پودر پلی‌اتیلن با درجه‌ی پزشکی در صنعت ارتوپدی استفاده می‌شود (Sobajima *et al*., 2020) از شرکت Ticona GmbH (آلمان)، منطبق بر استاندارد (American Society for Testing and Materials, 2004) استفاده شد. دی - ال آلفا توکوفرول استات (ویتامین E) از شرکت Zheijiang Medicine Co.,Ltd با خلوص بالای ۹۹/۹۹ درصد و مقدار فلزات سنگین کم‌تر از ۰/۰۰۱ درصد است تهیه شد. در بررسی چشمی این ماده، ویسکوز، شفاف، کهربایی رنگ، روغنی و مایع بود. نانوتیوب‌های کربنی چند دیواره عامل دار شده با گروه‌های کربوکسیل (MWCNT-COOH) تولید شده به روش رسوب‌دهی شیمیایی بخار (Chemical vapour deposition) از شرکت Neutrino (چین) مورد استفاده قرار گرفت. این ماده دارای خلوص بالای ۹۵ درصد، قطر بیرونی کم‌تر از ۸ نانومتر و طول ۱۰ الی ۳۰ نانومتر بود. همچنین حلال مورد استفاده اتانول خالص (۹۹/۹۹ درصد) تولید شرکت امرتات شیمی (ایران) بود.

روش تهیه‌ی نانوکامپوزیت

جهت تولید نمونه‌ها ابتدا مقدار مشخص از پودر نانوتیوب کربنی چند دیواره (مطابق با جدول ۱) را از طریق ترازوی آزمایشگاهی بادقت بالا وزن کرده و با ۵۰ میلی‌لیتر حلال آلی (اتانول خالص ۹۹/۹۹ درصد) اختلاط کرده و در ادامه برای به‌دست‌آوردن ترکیب همگن و یکنواخت از نانوتیوب‌های کربنی، محلول به مدت ۱۵ دقیقه با فرکانس ۴۵ مگا هرتز التراسونیک شد (Melk & Emami, 2018). در مرحله‌ی بعد به مایع التراسونیک شده، مقدار مشخص از ویتامین E/ نانوتیوب کربنی چند دیواره (مطابق جدول ۱) اضافه شد و محلول به مدت ۳۰ دقیقه با سرعت ۳۰۰ rpm توسط همزن مغناطیسی هم زده شد. در انتها محلول به دست آمده همراه با ۳۰ گرم پودر UHMWPE خالص و ۱۰۸ گرم گلوله‌های زیرکونیایی با قطر ۵ میلی لیتر به نحوی که ثلث حجم ظرف آسیاب سیاره ای (حجم کل ظرف ۲۵۰ میلی لیتر) خالی باشد، درون ظرف آسیاب ریخته شد تا از این طریق محلول فوق الذکر به صورت یکنواخت درون حجم ذرات پلیمر نفوذ کرده و یک پودر یکنواخت ایجاد شود. در این تحقیق از آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای مدل AS2-600 شرکت بنیان فراگیر صنعت مهربین استفاده شد. طبق تحقیقات صورت گرفته برای نیل به این مقصود می‌بایست پارامترهای دستگاه مانند مدت زمان آسیاب (۲ ساعت) و سرعت آسیاب (۴۰۰rpm) به درستی انتخاب شود (Enqvist, 2013). در ادامه دوغاب به دست آمده به مدت ۲۴ ساعت با دمای ۶۰°C جهت تبخیر حلال اضافه در اون (Oven) قرار گرفت. در نهایت، پودر به‌دست‌آمده با استفاده از دستگاه قالب‌گیری فشاری در دمای ۱۹۰ °C و تحت فشار ۵ مگاپاسکال به مدت ۳۰ دقیقه قالب‌گیری و پرس شد (Fonseca *et al*., 2011). بر اساس گزارش Fonseca و

همکاران (Fonseca *et al.*, 2011) در مرحله‌ی اولیه، بدون اعمال فشار به پودر درون قالب تا $^{\circ}C$ ۱۹۰ حرارت داده شد. در مرحله‌ی بعد، به نمونه‌ی شکل گرفته، ۱۵ مگاپاسکال نیرو وارد شد و سپس نیرو برداشته شد (۰ مگاپاسکال)، این کار پنج مرتبه و هر بار به مدت ۹۰ ثانیه تکرار شد. در این حین دما تا $^{\circ}C$ ۱۹۰ حفظ شد. در طول آخرین چرخه، فشار اعمال شده در ۱۵ مگاپاسکال به مدت ۳۰ دقیقه در $^{\circ}C$ ۱۹۰ حفظ شد. سپس نمونه‌ها با چرخاندن آب به داخل قالب تا دمای اتاق خنک شدند.در این تحقیق نمونه‌ها به صورت قرص‌های دایره‌ای شکل با قطر حدود ۷ سانتی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر تولید شدند.

استریلیزاسیون و کشت سلولی

نمونه‌های تولید شده قبل از انجام بررسی‌های زیست سازگاری، نیاز به فرایند استریلیزاسیون دارند؛ لذا نمونه‌ها تحت اشعه‌ی گاما با دوز ۲۵kGy توسط سازمان انرژی اتمی قرار گرفتند.

در این پروژه برای بررسی عدم سمیت سلولی از روش کشت MTT Assay توسط سلول‌های فیبروبلاست MG-63 (NCBI C555) تهیه شده از بانک سلولی انستیتو پاستور ایران استفاده شد. پس از دی فریز کردن سلول‌ها، آن‌ها را به فلاسک حاوی محیط کشت RPMI شامل FBS ۱۰ درصد منتقل کرده و سپس فلاسک را در انکوباتور در دمای $^{\circ}C$ ۳۷، رطوبت ۹۰ درصد و غلظت اکسیژن ۵ درصد قرار داده شدند (محیط کشت هر ۳ الی ۴ روز تعویض گردید).

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 افزوده گردید. سپس بعد از گذشت ۳ روز محیط کشت خارج و به سلول‌ها افزوده شد. مقدار مشخصی محیط کشت (RPMI) نیز به‌عنوان شاهد (کنترل مثبت) در نظر گرفته شد (Standard, 2009) .

به طور خلاصه، ۱×۱۰^{۴} سلول همراه با ۱۰۰ میکرولیتر محیط کشت درون هر یک از چاهک‌های پلیت کشت سلولی ریخته شد، سپس به مدت ۲۴ ساعت انکوبه شد. پس از آن، محیط کشت خارج شد و ۹۰ میکرولیتر از عصاره‌ی هر نمونه همراه با ۱۰ میکرولیتر FBS به هر چاهک کشت اضافه شد و سلول‌ها به مدت ۲۴ ساعت دیگر در انکوباتور و در معرض عصاره قرار گرفتند. سپس عصاره‌ها برداشته شد و ۱۰۰ میکرولیتر MTT با غلظت ۰/۵ mg/ml (سیگما) به هر چاهک اضافه شد.

پس از ۴ ساعت محلول خارج شد و ایزوپروپانول (سیگما) برای حل کردن بلورهای بنفش به هر چاهک اضافه شد. در نهایت غلظت محلول در ایزوپروپانول توسط الایزا ریدر (STAT FAX 2100, USA) Elisa در طول موج ۵۷۰ نانومتر اندازه‌گیری شد.

جدول ۱ -مشخصات کامپوزیت‌های تولید شده

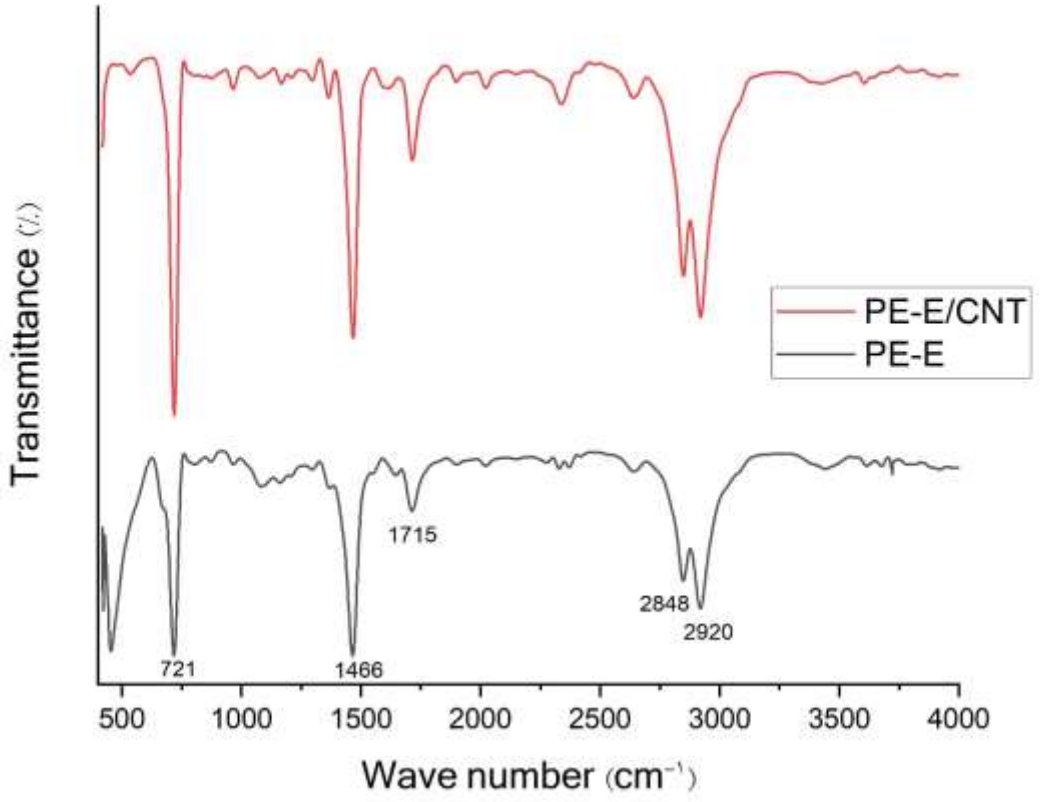
Table 1.Specifications of produced composites

Composition	Sample Name	Abbreviation
0.2٪ by weight alpha-tocopherol (2000 ppm) + 99.8% by weight UHMWPE powder	UHMWPE/Vitamin E composite	**PE-E**
0.5 ٪ by weight MWCNT and 0.25% by weight (ppm 2500) vitamin E + 99.8% by weight UHMWPE powder	UHMWPE/Vitamin E/ MWCNT composite	**PE-E/CNT**

نتایج و بحث

تفسیر آزمون طیف‌سنجی مادون‌قرمز (FTIR)

جهت بررسی نوع و قدرت پیوندهای شیمیایی نمونه‌های تولید شده، از دستگاه FTIR مدل DMA 80- direct mercury analyzer (ایتالیا) در طول موج cm^{-1} ۴۰۰۰-۴۰۰ با دقت cm^{-1} ۲ استفاده شد. لازم به ذکر است تمام طیف‌ها در حالت عبوری گرفته شد. باتوجه‌به شکل ۱ از پیک‌های شاخص که در هر دو کامپوزیت قابل‌مشاهده است، از چپ به راست می‌توان به پیک‌های cm^{-1} ۷۲۰ مربوط به پیوند C-H خمشی (ارتعاش لرزان)، پیک cm^{-1} ۱۴۶۶ مربوط به ارتعاش خمشی پیوند C-H، پیک cm^{-1} ۱۷۱۵ مربوط به پیوند قوی C=O خمشی و پیک‌های cm^{-1} ۲۸۴۸ و cm^{-1} ۲۹۲۰ به ترتیب مربوط ارتعاش کششی متقارن و نامتقارن پیوند C-H اشاره نمود. شدت پیک cm^{-1} ۷۲۰ نمایانگر زنجیره‌ی عریض و درجه‌ی پلیمریزاسیون ماتریس UHMWPE است (Pang *et al*., 2015). شدت تمامی پیک‌ها (قدرت پیوندها) در کامپوزیت PE-E/CNT که شامل حضور هم‌زمان ویتامین E و نانوتیوب‌های کربنی است، نسبت به کامپوزیت حاوی ویتامین E (PE-E) افزایش محسوسی پیدا کرده است.

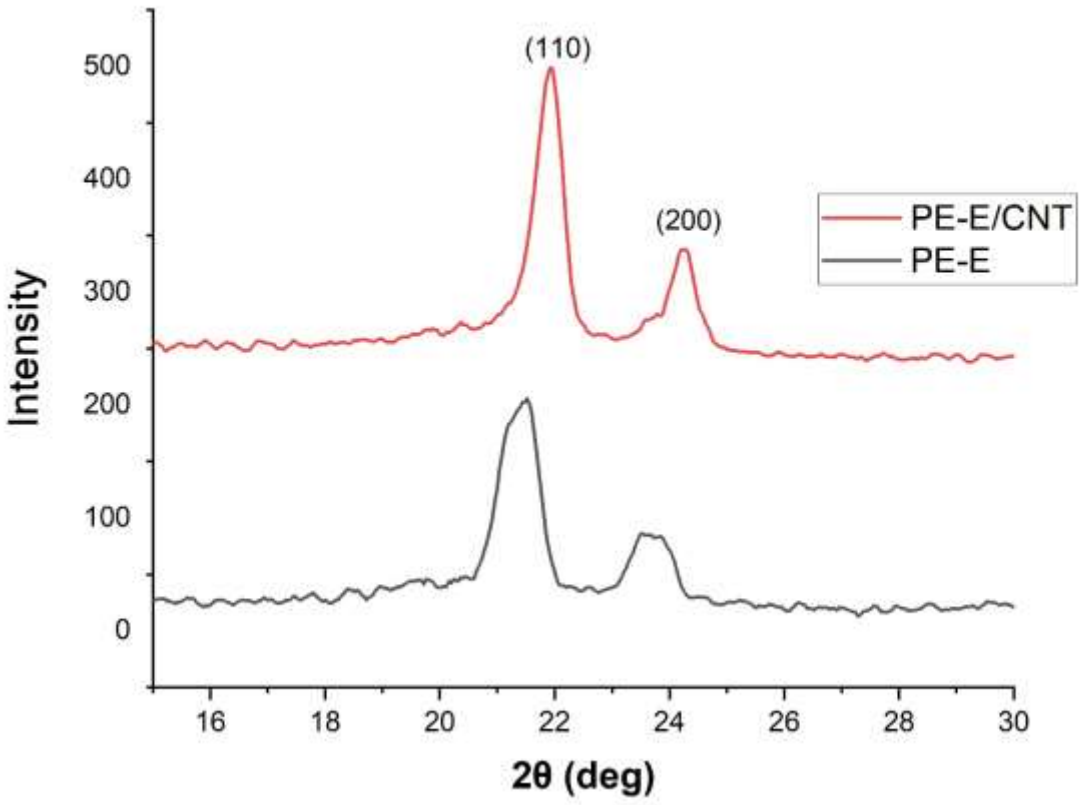


شکل ۱- طیف FTIR کامپوزیت PE-E/CNT و PE-E

Figure 1. FTIR spectrum of PE-E/CNT and PE-E composites

تفسیر آزمون پراش اشعه X (XRD)

آزمون XRD توسط دستگاه with Seifert 3003 pts (آلمان) با استفاده از آند مس و(λ=1.542 Å) Cu K_α به‌منظور بررسی فاز و تغییرات شدت پیک‌ها جهت انجام مقایسه بین نمونه‌های تولید شده و میزان بلورینگی انجام شد. UHMWPE یک پلیمر نیمه کریستالی است که از دوفاز اصلی آمورف و کریستالی تشکیل شده است. فاز کریستالی شامل دو پیک شارپ (۱۱۰) در 2θ=۲۱,۵° و (۲۰۰) در 2θ=۲۴° است (Khalil *et al.*, 2019). (۱۱۰) مربوط به فاز کریستالی پایدار ارترومبیک و (۲۰۰) مربوط به فاز هگزاگونال است. با توجه به شکل ۲، در کامپوزیت حاوی نانوتیوب‌های کربنی PE-E/CNT، پیک‌های کریستالی ماتریس UHMWPE نسبت به کامپوزیت PE-E افزایش شدت قابل توجهی داشتند که این موضوع نشان از افزایش میزان بلورینگی کامپوزیت PE-E/CNT نسبت به PE-E دارد.



شکل ۲- منحنی XRD کامپوزیت‌های تولید شده

Figure 2. X-ray diffraction curve of produced composites

تفسیر آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC)

آزمون DSC توسط دستگاه Setaram Instrumentation (فرانسه) در بازه‌ی دمایی ۲۵°C تا ۲۰۰°C با نرخ گرمایش ۵°C/min جهت بررسی دمای ذوب، آنتالپی و محاسبه‌ی درصد بلورینگی نمونه‌ها (از طریق معادله ۱) انجام پذیرفت (Andjelić & Richard, 2001):

$$X_c = \frac{\Delta H}{\Delta H_{100}} \times 100$$

معادله ۱- محاسبه‌ی درصد بلورینگی (Andjelić & Richard, 2001)

Equation 1. Calculation of crystallinity percentage (Andjelić & Richard, 2001)

در معادله‌ی بالا ΔH آنتالپی پلیمر و ΔH_{100} آنتالپی ذوب UHMWPE ۱۰۰ درصد کریستالی است که طبق تحقیقات قبلی ۲۹۰ ژول بر گرم در نظر گرفته می‌شود (Andjelić & Richard, 2001). معمولا بسیاری از خواص شیمیایی و مکانیکی (مانند مدول یانگ، تنش تسلیم، استحکام، خستگی و...) پلیمرها تحت تاثیر درصد بلورینگی است (Bourell *et al*., 2014).

درصد بلورینگی در پلیمرها را می‌توان با روش‌های مختلفی مانند روش گرماسنجی روبشی تفاضلی، پراش پرتو X و ... اندازه‌گیری نمود. عمدتا به این دلیل که هر آزمون پارامترهای فیزیکی و ساختارهای مورفولوژیکی متفاوتی را اندازه‌گیری می‌کند، هر کدام نتایج متفاوتی گزارش می‌دهند (Zhu *et al*., 2015). طبق جدول ۲ دمای ذوب برای کامپوزیت PE-E/CNT و PE-E به ترتیب ۱۳۵/۶ و ۱۳۴/۹ و درصد بلورینگی به ترتیب ۵۳/۱ و ۴۹/۸درصد گزارش شده است. این نتایج نشان از افزایش ۷ درصدی بلورینگی در کامپوزیت PE-E/CNT نسبت به کامپوزیت ویتامین E دارد، اما دمای ذوب تغییر محسوسی را نشان نداد. این موضوع احتمالا به واسطه ی غلظت بسیار کم نانوتیوب کربنی در ماتریس پلیمری است که نتوانسته است ویژگی هدایت گرمایی بالای ذاتی خود را نشان داده و موجب کاهش دمای ذوب کامپوزیت PE-E/CNT شود.

جدول ۲- نتایج آزمون DSC

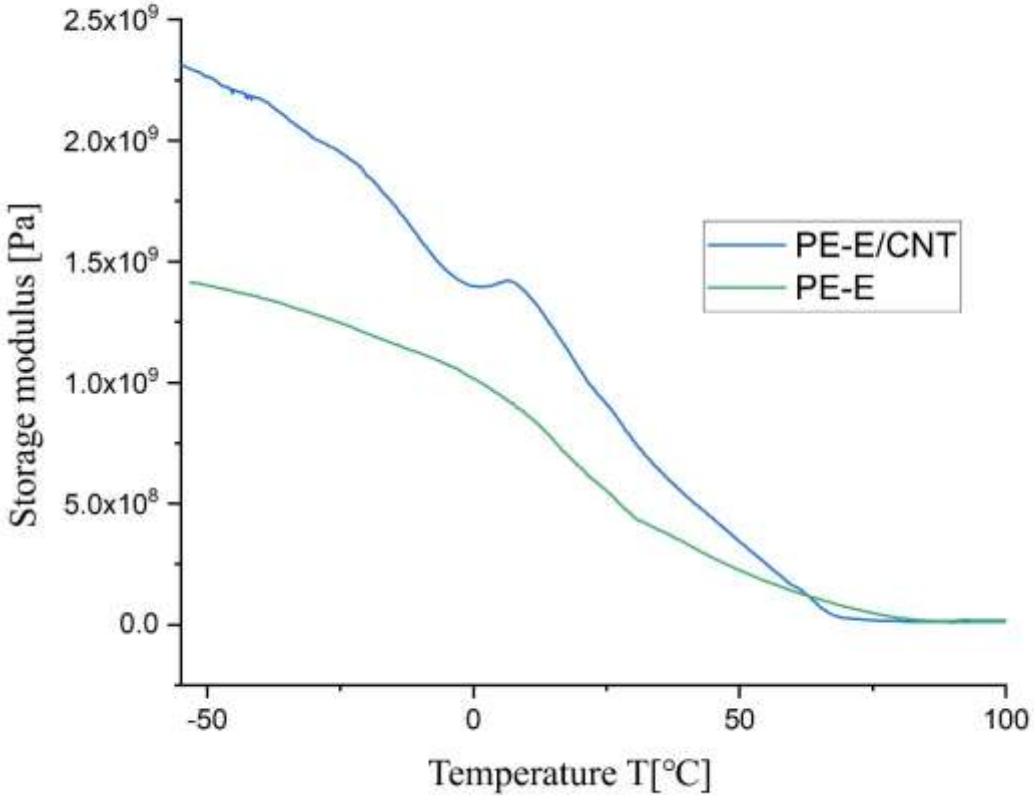
Table 2. Differential scanning calorimetry results

	Samples	
	PE-E/CNT	**PE-E**
Melting Enthalpy (J/g)	154.10	**144.60**
Xc (%)	53.13	**49.86**
Melting temperature ^{o}C	135.61	**134.90**

تفسیر آنالیز حرارتی مکانیکی دینامیکی (DMTA)

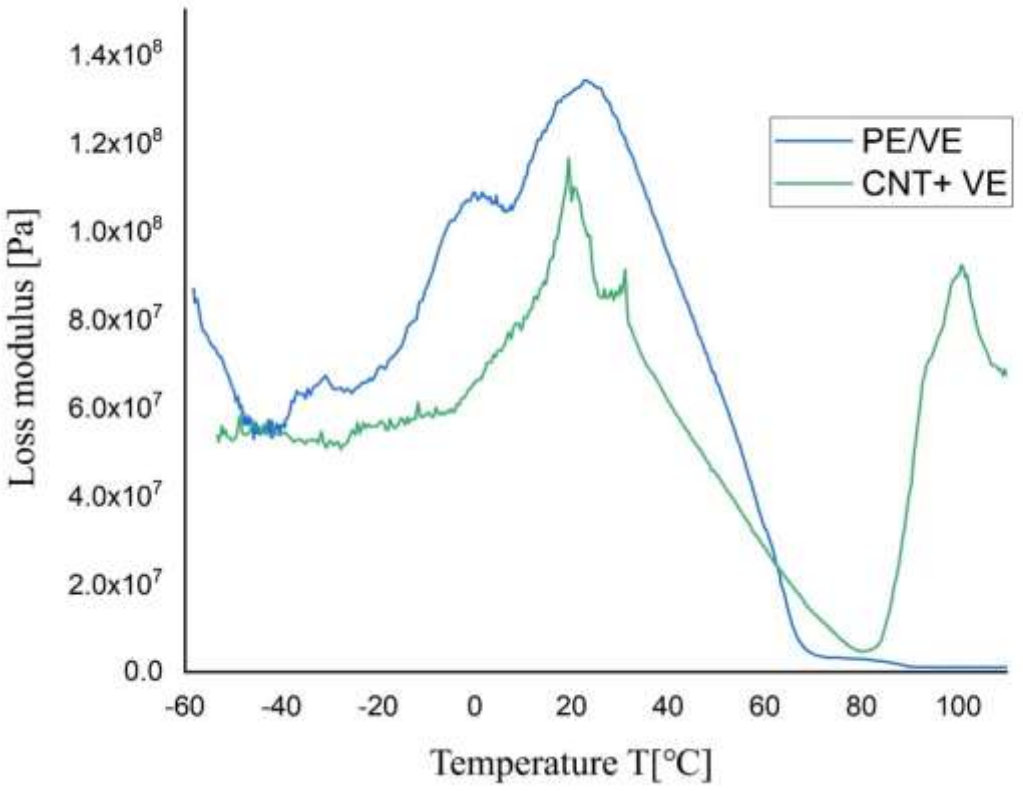
آزمون DMTA توسط دستگاه Triton Technology Ltd., TTDMA model (انگلیس)، جهت بررسی تغییرات در مدول ذخیره الاستیک (E')، مدول اتلاف (E'') و tanδ (E'/E') انجام پذیرفت. این تست در بازه‌ی دمایی ºC ۶۰- الی ºC ۱۵۰ و با نرخ گرمایش °C/min ۳ جهت بررسی خواص ویسکوالاستیک نمونه‌ها انجام پذیرفت. آنالیز حرارتی مکانیکی دینامیکی جهت بررسی خواص ویسکوالاستیک و رئولوژیکی کامپوزیت‌های تولیدی انجام شد. تحلیل منحنی مدول ذخیره‌سازی و tan δ در تعیین عملکرد نمونه‌های تحت تنش و دما بسیار مفید است. باتوجه‌به شکل ۳، روند منحنی مدول ذخیره‌ی کامپوزیت PE-E/CNT تقریبا در تمام بازه‌های دمایی نسبت به منحنی کامپوزیت PE-E، بالاتر قرار دارد که این موضوع نشان‌دهنده‌ی افزایش مدول ذخیره و سختی، در کامپوزیت PE-E/CNT نسبت به کامپوزیت حاوی ویتامین E است، در واقع می‌توان گفت که نانوتیوب کربنی نقش تقویت‌کنندگی خود را به‌خوبی در ماتریس پلیمری ایفا کرده است و سبب بهبود مدول الاستیک شده است. نتایج مدول اتلاف کامپوزیت‌های تولید شده در شکل ۴ نشان می‌دهد که تا دمای ۶۰°C، مدول اتلاف کامپوزیت PE-E بالاتر از

کامپوزیت PE-E/CNT است. در واقع این موضوع بیان‌گر این نکته است که در دمایی که به‌صورت عملی این کامپوزیت‌ها مورداستفاده‌ی پزشکی قرار می‌گیرند، میزان اتلاف و هدررفت انرژی (احتمال ایجاد تغییر شکل پلاستیک) در کامپوزیت حاوی نانوتیوب کربنی به شکل محسوسی کم‌تر از کامپوزیت ویتامین E است.



شکل ۳- منحنی مدول ذخیره‌ی الاستیک

Figure 3. Elastic storage modulus curve

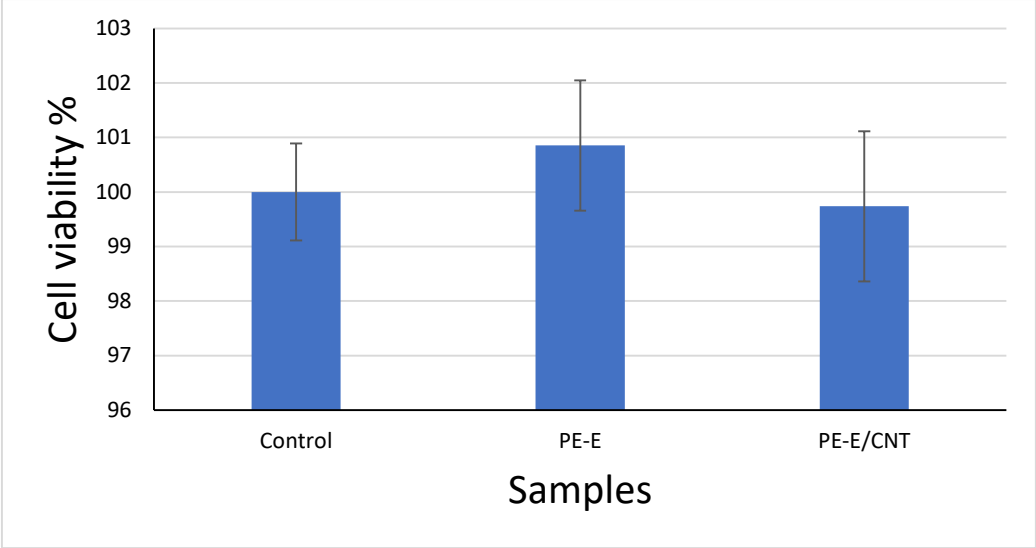


شکل ۴ -منحنی مربوط مدول اتلاف کامپوزیت‌های تولید شده

Figure 4. loss modulus curves of the produced composites

تفسیر آزمون کشت سلولی و بررسی سمیت (MTT assay)

در روش کشت سلولی، عملکرد زنده مانی سلول‌ها از طریق مقایسه آن‌ها با کنترل منفی بررسی می‌شود. کنترل منفی نمونه‌ای است که کاملاً با سلول‌ها سازگار است و با نمونه‌های اصلی کشت می‌شود (Khorasani *et al*., 2005; Hassanein *et al*., 2020) با توجه به شکل ۵، میزان زنده‌مانی سلول‌ها در کامپوزیت PE-E/CNT و PE-E به ترتیب ۱۰۰/۸ و ۹۹/۷ گزارش شده است، که با توجه به این نتایج، میزان زنده مانی سلول ها در کامپوزیت PE-E/CNT کمی بالاتر از نمونه ی کنترل (محیط کشت) گزارش شده است که این پدیده به دلیل خاصیت زیست فعالی بیشتر عصاره ی کامپوزیت مذکور، از نظر تکثیر سلولی و زنده مانی سلول ها نسبت به نمونه ی کنترل که صرفا محیط کشت دست نخورده است، اتفاق افتاده است. با توجه به نتایج، هر دو کامپوزیت تولید شده زیست سازگاری کامل را از خود نشان داده‌اند و تفاوت محسوسی بین نتایج آن‌ها قابل مشاهده نیست که این نتایج نسبت به تحقیق Zavala و همکاران (Zavala *et al*., 2021) افزایش حدود ۱۰ درصدی زنده مانی سلولی را در کامپوزیت حاوی نانو ذرات کربنی نشان می دهد.



شکل ۵- نمودار میزان زنده‌مانی سلول‌های فیبروبلاست از طریق آزمون MTT (نوارهای خطا در سطح ۹۵ درصد ترسیم شده‌اند)

Figure 5. viability percentage of Fibroblast cells in MTT test

پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که ترکیب ویتامین E با پلیمر UHMWPE می‌تواند از اکسایش پلیمر در بلندمدت محافظت کند، اما از طرف دیگر استفاده از ویتامین E موجب کاهش مقاومت مکانیکی پلیمر می‌شود (Affatato *et al*., 2012). در این راستا پژوهش‌های مختلفی جهت بهبود خواص مکانیکی پلیمر UHMWPE با اضافه کردن نانوتیوب های گرافن، الماس و ... انجام پذیرفته است (Pang *et al*., 2017; Fathi *et al*., 2017). از آن جایی که نانوتیوب‌های کربنی (CNT) در مقایسه با سایر مواد کربنی که در کامپوزیت‌های پلیمری استفاده می‌شوند، خواص مکانیکی منحصربه‌فرد، مانند سطح به حجم عالی، مدول یانگ بالا و ... دارند (Aguiar *et al*., 2022; del Prado *et al*., 2018)، در این پژوهش با هدف بهبود خواص مکانیکی پلیمر UHMWPE ترکیب شده با ویتامین E (جهت کاربردهای ارتوپدیک و جایگزینی مفاصل مصنوعی)، از نانوتیوب‌های کربنی چند دیواره به‌عنوان فاز تقویت‌کننده استفاده شد تا بتوان به صورت همزمان هم از خواص آنتی اکسیدانی ویتامین E جهت کاهش اکسیداسیون و هم از خواص منحصر به فرد نانو تیوب های کربنی چند دیواره جهت بهبود خواص مکانیکی بهره جست (Patil *et al*., 2020). دو کامپوزیت یکی حاوی ویتامین E و دیگری حاوی ویتامین E و نانوتیوب‌های کربنی (به صورت هم‌زمان)، به روش اختلاط تر (Wet) و به وسیله‌ی قالب‌گیری فشاری (همراه با دما) تولید شدند و در ادامه مقایسه‌ای بین خواص مکانیکی و زیست سازگاری آن‌ها انجام شد. طیف‌های آزمون FTIR در هر دو کامپوزیت، پیک‌های مشخصه‌ی پلیمر UHMWPE را نشان داد. همچنین تمام پیک‌های مشخصه کامپوزیت PE-E/CNT، نسبت به کامپوزیت PE-E افزایش محسوسی را تجربه کردند. در واقع این نتایج موید، پخش همگون و موفق نانوتیوب کربنی درون ماتریس UHMWPE و افزایش قدرت پیوندی در کامپوزیت حاوی نانوتیوب کربنی نسبت به کامپوزیت E بود (Costa *et al*., 2001). تحلیل و بررسی منحنی های آزمون XRD جزئیاتی را

در مورد بلورینگی، ترکیب فازی و ... در پلیمرهای نیمه کریستالی ارائه می‌دهد (Khalil *et al*., 2019). الگوی XRD یک ماده کاملا کریستالی مجموعه‌ای از قله‌های تیز است که هر یک بازتابی از یکی از سطوح مختلف کریستالوگرافی را نشان می‌دهد. طبق نتایج به‌دست‌آمده با توجه به افزایش شدت فازهای کریستالی UHMWPE (ارترومبیک و هگزاگونال) در کامپوزیت کربنی نسبت به کامپوزیت ویتامین E می‌توان انتظار عملکرد بهتر این کامپوزیت در محیط مفصلی داشت. نتایج مشابه آزمون XRD در آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی نیز مشاهده شد. نتایج DSC نشان از افزایش ۷ درصدی در بلورینگی کامپوزیت PE-E/CNT نسبت به کامپوزیت PE-E داشت که این موضوع موجب کاهش تحرک زنجیره و در نتیجه کاهش تغییر شکل پلاستیک در کامپوزیت می‌شود که این موضوع در پژوهش آن و همکاران (Eun *et al*., 2022) که افزایش ۱۰ درصدی در آنتالپی کامپوزیت حاوی نانو تیوب کربنی را گزارش دادند، نیز مشاهده شد. از سویی دیگر این نتایج برخلاف تحقیق ملک و امامی (Melk & Emami, 2018) بهبود محسوس بلورینگی کامپوزیت های حاوی MWCNTs را نشان داد. زیرا در این پژوهش همانطور که در قسمت مقدمه اشاره شد، به دلیل انرژی سطحی بالای MWCNTs و احتمال آگلومره شدن آن، در این تحقیق سعی شد از غلظت های بهینه و به مراتب کم تری از نانو تیوب های کربنی استفاده شود. همچنین نشان داده شد که اضافه کردن نانوتیوب‌های کربنی بر دمای ذوب کامپوزیت اثر محسوسی نگذشته است. نتایج آزمون DMTA نیز نشان از کاهش مدول اتلاف یا همان خاصیت ویسکوز در کامپوزیت PE-E/CNT نسبت به کامپوزیت PE-E داشت. همچنین از طرف دیگر نیز مدول ذخیره‌ی (الاستیسیته) کامپوزیت PE-E/CNT نسبت به کامپوزیت PE-E، افزایش محسوسی را نشان داد، که در پژوهش ونگ و همکاران(Wang *et al*., 2020) نیز افزودن نانو ذرات کربنی موجب افزایش چشم گیر مدول الاستیک در کامپوزیت زمینه UHMWPE شده است. از آن جایی که این پژوهش با هدف کاربرد ارتوپدیک و سطح مفصلی انجام شده است، انتظار این است که نمونه‌های تولیدی بتوانند به خوبی در مقابل نیروهای مکرر و سایشی محیط مفصلی تاب آورند که با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از طریق آنالیز DMTA می‌توان انتظار نیل به چنین مهمی را داشت. در نهایت از طریق آزمون کشت سلولی و بررسی سمیت سلولی میزان درصد زنده‌مانی سلول‌های فیبروبلاست که در تماس با عصاره‌ی نمونه‌ها بودند بررسی شد و نتایج نشان از زیست سازگاری کامل نمونه‌های تولید شده داشت, که این موضوع در تحقیقات پیشین نیز مشاهده شده است (Amoli *et al*., 2012; Singh & Verma, 2021). همچنین در تحقیقی که توسط آوکی و سایتو (Aoki & Saito, 2020) به صورت مجزا و تخصصی بر روی زیست سازگاری و سرطان زایی نانوتیوب‌های کربنی چند دیواره انجام شد، نشان داده شد این نانو تیوب ها کاملا ایمن هستند و گواه علمی مبنی بر سمیت و سرطان زا بودن این نانو تیوب های کربنی وجود ندارد. البته لازم به ذکر است که برای اولین بار در این مقاله بررسی زیست سازگاری کامپوزیت های دو تایی حاوی MWCNTs و ویتامین E مورد بررسی قرار گرفت.

نتیجه‌گیری کلی

توانایی جایگزینی مفاصل طبیعی بیمار یا آسیب‌دیده با پروتزهای مصنوعی به‌منظور کاهش درد و ناتوانی یکی از موفقیت‌های بزرگ در مهندسی و پزشکی در ۵۰ سال گذشته بوده است. اگرچه UHMWPE به مدت پنج دهه به‌عنوان محبوب-ترین ماده مصنوعی جایگزین در کاربردهای بالینی مورداستفاده قرار گرفته است، تحقیقات مستمری برای بهبود عملکرد این ماده انجام شده است تا عمر مفید آن بیش‌تر شود. این پژوهش با رویکرد بهبود خواص مکانیکی و بررسی زیست سازگاری جزء پلیمری پروتزهای تعویض مفاصل با استفاده از ویتامین E به‌عنوان آنتی‌اکسیدان طبیعی و نانوتیوب‌های کربنی چند دیواره به‌عنوان فاز تقویت‌کننده انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده از آزمون‌های مختلف نشان‌دهنده‌ی بهبود خواص مکانیکی بستر پلیمری در حضور هم‌زمان ویتامین E و کربن نانوتیوب بود و همچنین نشان داده شد که این کامپوزیت ها از نظر سمیت سلولی، کاملا زیست‌سازگار هستند.

عدم تعارض منافع

نویسندگان مقاله اعلام می کنند که هیچ تضادی در منافع ندارند و در قبال ارائه اثر خود وجهی دریافت ننموده‌اند.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از پایان‌نامه ارشد با عنوان "بررسی تأثیر اختلاط ویتامین E و نانوتیوب‌های کربنی چند دیواره (MWCNTs) بر خواص مکانیکی و زیست سازگاری کامپوزیت زمینه پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا (UHMWPE)" مصوب دانشکده فنی مهندسی دانشگاه علوم و تحقیقات است و نویسندگان این مقاله مراتب تشکر خود را از حمایت‌های معاونت محترم پژوهشی دانشگاه، اعلام می‌دارند.

منابع

Affatato, S., Bracco, P., Costa, L., Villa, T., Quaglini, V. and Toni, A. (2012). In vitro wear performance of standard, crosslinked, and vitamin-E-blended UHMWPE. Journal of Biomedical Materials Research Part A, 100:554-560.

Aguiar, V.O., Maru, M.M., Soares, I.T., Kapps, V., Almeida, C.M., Perez, G., Archanjo, B.S., Pita, V.J. and 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, 17:1-13.

Aliyu, I.K., A, M.K. and Mohammed, A.S. (2021). Wear and corrosion resistance performance of UHMWPE/GNPs nanocomposite coatings on AA2028 Al alloys. Progress in Organic Coatings, 151: 1-10.

Amoli, B.M., Ramazani, S.A. and 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: 453-461.

Andjelić, S. and Richard, R.E. (2001). Crystallization behavior of ultrahigh molecular weight polyethylene as a function of in vacuo γ-irradiation. Macromolecules, 34:896–906.

American Society for Testing and Materials. (2004). Standard Specification for Ultra-high-molecular Weight Polyethylene Powder and Fabricated Form for Surgical Implants. ASTM International. 13.01: 1-9

Aoki, K. and Saito, N. (2020). Biocompatibility and carcinogenicity of carbon nanotubes as biomaterials. Nanomaterials, 10:264.

Bourell, D.L., Watt, T.J., Leigh, D.K. and Fulcher, B. (2014). Performance limitations in polymer laser sintering. Physics Procedia, 56:147-156.

Costa, L., Bracco, P., Del Prever, E.B., Luda, M.P. and Trossarelli, L. (2001). Analysis of products diffused into UHMWPE prosthetic components in vivo. Biomaterials, 22: 307-315.

Costa, L., Luda, M.P., Trossarelli, L., Del Prever, E.B., Crova, M. and Gallinaro, P. (1998). Oxidation in orthopaedic UHMWPE sterilized by gamma-radiation and ethylene oxide. Biomaterials, 19: 659-668.

Davidson, J.A., Schwartz, G., Lynch, G. and Gir, S. (1988). Wear, creep, and frictional heating of femoral implant articulating surfaces and the effect on long-term performance--part II, friction, heating, and torque. Journal of Biomedical Materials Research, 22: 69-91.

del Prado, G., Pascual, F.J., Castell, P., Molina-Manso, D., Mahillo, I., Esteban, J. and Puértolas, J.A.(2018).Influence of carbon nanotubes structures embedded in UHMWPE on bacterial adherence. International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials, 67:934-941.

Do Amaral Montanheiro, T.L., Cristóvan, F.H., Machado, J.P.B., Tada, D.B., Durán, N. and Lemes, A.P. (2015). Effect of MWCNT functionalization on thermal and electrical properties of PHBV/MWCNT nanocomposites. Journal of Materials Research, 30: 55-65.

Dolezel, B. and Adamirova, L. (1982). Method of hygienically safe stabilization of polyolefines against thermoxidative and photooxidative degradation. Czechoslovakian Socialist Republic Patent, 221: 403-413.

Enqvist, E. (2013). Carbon nanofiller reinforced UHMWPE for orthopaedic applications: optimization of manufacturing parameters (Doctoral dissertation, Luleå tekniska universitet). Luleå University of Technology, Department of Engineering Sciences and Mathematics, Division of Machine Elements, 94.

Eun, J.H., Kim, D.H., Jang, I.U., Sung, S.M., Kim, M.S., Choi, B.K., Kang, S.W., Kim, M.S. and Lee, J.S. (2022). A study on mechanical properties and thermal properties of UHMWPE/MWCNT composite fiber with MWCNT content and draw ratio. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 17:15589250221108484.

Fathi, M., Nasrabadi, M.N. and Varshosaz, J. (2017). Characteristics of vitamin E-loaded nanofibres from dextran. International Journal of Food Properties, 20: 2665-2674.

Fonseca, A., Kanagaraj, S., Oliveira, M.S. and Simões, J.A. (2011). Enhanced UHMWPE reinforced with MWCNT through mechanical ball-milling. Defect and Diffusion Forum, 312: 1238-1243.

Standard, I. (2009). Part 5: Tests for in vitro cytotoxicity. Pages 60-94 in Biological Evaluation Of Medical Devices. Geneve, Switzerland: International Organization for Standardization.

Gaziano, J.M. (1994). Natural antioxidants and cardiovascular disease: observational epidemiologic studies and randomized trials. Natural Antioxidants in Human Health and Disease, 59: 735-739

Hassanein, N., Bougherara, H. and Amleh, A. (2020). In-vitro evaluation of the bioactivity and the biocompatibility of a novel coated UHMWPE biomaterial for biomedical applications. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 101:103409.

Khalil, Y., Hopkinson, N., Kowalski, A. and Fairclough, J.P.A. (2019). Characterisation of UHMWPE polymer powder for laser sintering. Materials, 12: 1-22.

Khorasani, M.T., Zaghiyan, M. and Mirzadeh, H. (2005). Ultra high molecular weight polyethylene and polydimethylsiloxane blend as acetabular cup material. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 41: 169-174.

Kurtz, S.M. (2009). UHMWPE Biomaterials Handbook, Ultra High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement and Medical Devices. 2nd edn. Academic Press 544Pp. New York.

Melk, L. and Emami, N. (2018). Mechanical and thermal performances of UHMWPE blended vitamin E reinforced carbon nanoparticle composites. Composites Part B: Engineering, 146: 20-27.

Muratoglu, O.K., Mark, A., Vittetoe, D.A., Harris, W.H. and Rubash, H.E. (2003). Polyethylene damage in total knees and use of highly crosslinked polyethylene. The Journal of Bone and Joint Surgery, 85: 7-13.

Oral, E., Beckos, C.G., Malhi, A.S. and Muratoglu, O.K. (2008). The effects of high dose irradiation on the cross-linking of vitamin E-blended ultrahigh molecular weight polyethylene. Biomaterials, 29: 3557-3560.

Oral, E., Greenbaum, E.S., Malhi, A.S., Harris, W.H. and Muratoglu, O.K. (2005) undefined. (2005). Characterization of irradiated blends of α-tocopherol and UHMWPE. Biomaterials, 26: 6657-6663.

Oral, E., Wannomae, K.K., Rowell, S.L. and Muratoglu, O.K. (2007). Diffusion of vitamin E in ultra-high molecular weight polyethylene. Biomaterials, 28: 5225-5237.

Paladugu, S.R.M. and PS, R. S. (2022). Influence of gamma radiation on wear and oxidation properties of cross-linked UHMWPE components used in total knee arthroplasty-a review. Materials Today: Proceedings, 56: 1097-1102.

Pang, W., Ni, Z., Chen, G., Huang, G., Huang, H. and Zhao, Y. (2015). Mechanical and thermal properties of graphene oxide/ultrahigh molecular weight polyethylene nanocomposites. RSC Advances, 5: 63063-63072.

Pang, W., Wu, J., Zhang, Q. and Li, G. (2017). Graphene oxide enhanced, radiation cross-linked, vitamin E stabilized oxidation resistant UHMWPE with high hardness and tensile properties. RSC Advances, 7: 55536-55546.

Patil, N.A., Njuguna, J. and Kandasubramanian, B. (2020). UHMWPE for biomedical applications: Performance and functionalization. European Polymer Journal, 125:109529.

Singh, D.K. and Verma, R.K. (2021). Contemporary development on the performance and functionalization of ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) for biomedical implants. Nano Life, 11:2130009.

Sobajima, A., Okihara, T., Moriyama, S., Nishimura, N., Osawa, T., Miyamae, K., Haniu, H., Aoki, K., Tanaka, M., Usui, Y. and Sako, K.I., Kato, H. and Saito, N. (2020). Multiwall carbon nanotube composites as artificial joint materials. ACS Biomaterials Science and Engineering, 6:7032-7040.

Suñer, S. and Emami, N. (2014). Investigation of graphene oxide as reinforcement for orthopaedic applications. Tribology-Materials, Surfaces and Interfaces, 8: 1-6.

Wang, R., Zheng, Y., Chen, L., Chen, S., Zhuo, D. and Wu, L.(2020). Fabrication of high mechanical performance UHMWPE nanocomposites with high-loading multiwalled carbon nanotubes. Journal of Applied Polymer Science, 137:48667.

Wen, X., Li, Z., Yang, C., Yan, K., Wu, G. and Wang, D. (2022). Electron beam irradiation assisted preparation of UHMWPE fiber with 3D cross-linked structure and outstanding creep resistance. Radiation Physics and Chemistry, 199: 1-10.

Zavala, J.M.D., Gutiérrez, H.M.L., Segura-Cárdenas, E., Mamidi, N., Morales-Avalos, R., Villela-Castrejón, J. and 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.

Zhu, W., Yan, C., Shi, Y., Wen, S., Liu, J. and Shi, Y. (2015). Investigation into mechanical and microstructural properties of polypropylene manufactured by selective laser sintering in comparison with injection molding counterparts. Materials and Design, 82: 37-45.

Investigation on the effects of simultaneous adding of α -tocopherol (vitamin E) and Multi-walled carbon nano tubes (MWCNT) on the mechanical properties and biocompatibility of the ultra-high molecular weight polyethylene polymer matrix (UHMWPE) in joint replacements

M.Fakoori[1,2], M.khorasani[3]*, M. Kamali dolat abadi[4]

Received:2022.12.14
Accepted:2023.03.05

Abstract

Introduction: Ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) has been used as the material of choice in joint replacement prosthesis for the last three decades due to its excellent physical and chemical properties. However, UHMWPE's wear and oxidation in the long term leads to osteolysis and limits the lifespan of this polymer. One of the effective methods to prevent oxidation is presents of α-tocopherol in UHMWPE matrix. But the presence of this additive alone does not improve the mechanical performance of UHMWPE. On the other hand, the use of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) has been shown to improve mechanical properties due to their exceptional properties such as elastic modulus and high surface-to-volume ratio. However, finding the optimal concentration of MWCNTs and vitamin E to improve the mechanical properties of this polymer is very vital and important. **methods** :In this research, to investigate and compare the effects of carbon nanotubes on the properties of UHMWPE/vitamin E composite, two composites were produced, one containing 0.2% by weight of vitamin E and the other containing 0.25% by weight of vitamin E along with 0.5% by weight of MWCNT. **Results and Conclusion**: Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) reported an increase in the characteristic peaks of PE-E/CNT composite compared to PE-E composite. Differential scanning calorimetry (DSC) reported about 7% increase in crystallinity in PE-E/CNT composite. Dynamic thermos mechanical analysis (DMTA) also showed improved elastic properties in the PE-E/CNT composite compared to the composite containing vitamin E. Finally, results of the toxicity test (MTT assay) showed complete biocompatibility of the composites. Totally, the results showed complete biocompatibility and mechanical improvement of the polymer substrate in the presence of vitamin E and carbon nanotubes.

Keywords: ***artificial joint, UHMWPE/Vitamin E composite, UHMWPE/Vitamin E/MWCNT composite***

[1] PhD candidates, Department of nanotechnology and advance materials, Biomaterials research Group, Materials and Energy Research Center, Tehran, Iran

[2] Biomedical Engineering (Biomaterials) Department, Islamic Azad University - Science and Research Branch, Tehran, Iran

[3] Associate professor, Department of Biomaterials, Faculty of polymer science, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran *(corresponding author: m.khorrasani@gmail.com)

[4] Assistant professor, Textile Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran