

ارزیابی تأثیر میزان اکسید روی و مورفولوژی داربستهای نانوکامپوزیتی پلیکاپرولاکتون/ نانوذرات اکسید روی بر خواص مکانیکی این داربستها

فاطمه رفعتی، نرگس جوهری* و فائزه زهری

گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، گلپایگان، ۸۷۷۱۷۶۷۹۴۸ ایران

(دریافت مقاله: ۱۲/۰۰/۱۲– دریافت نسخه نهایی: ۱۲/۱۱/۱۰)

چکیده – ویژگیهای مکانیکی و ساختاری داربستهای مهندسی بافت یکی از عوامل مهم در بازسازی و ترمیم بافت محسوب می شوند. از این رو، در پژوهش حاضر، به بررسی تأثیر میزان نانوذرات اکسید روی و مورفولوژی داربست بر خواص مکانیکی داربست های نانوکامپوزیتی پلی کاپرولاکتون/ نانوذرات اکسید روی پرداخته شد. در این پژوهش، داربستهای نانوکامپوزیتی پلی کاپرولاکتون/ نانوذرات اکسید روی به روش ریخته گری حلال/ شستشوی ذرات نمک و با سه غلظت متفاوت ۵، ۵ و ۱۵ درصد وزنی نانوذرات اکسید روی تهیه شدند. سپس، از روش پراش پرتو ایکس (XRD) به منظور تأیید فازهای مطلوب در ترکیب داربست استفاده شد. استحکام فشاری داربستهای ساخته شده نیز به عنوان شاخصی از خواص مکانیکی، ارزیابی شد. همچنین، به منظور بررسی مورفولوژی و تخلخل داربستها و توزیع نانوذرات اکسید روی در داربست از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزودن نانوذرات اکسید روی به عنوان تقویت کننده، استحکام فشاری داربستها افزایش می یابد. از سوی دیگر، با افزایش نانوذرات اکسید روی به بیش از ۵ درصد وزنی، استحکام فشاری کاهش یافتر. در واقع، داربست الا افزایش می یابد. از سوی دیگر، با فزایش نانوذرات اکسید روی به بیش از ۵ درصد وزنی، استحکام فشاری کاهش یافت. در واقع، داربست می یابد. از سوی دیگر، با افزایش نانوذرات اکسید روی با اکسید روی بیش رین استحکام فشاری و یکپارچگی ساختار را داشت.

واژههای کلیدی: داربست نانوکامپوزیتی پلیکاپرولاکتون/ اکسید روی، مورفولوژی، خواص مکانیکی.

۱ – مقدمه

پوست بهعنوان یکی از مهمترین بافت های بدن انسان، نقش بسیار مهمی در سلامت انسان دارد و نقص در آن می تواند مشکلات عمدهای را در روند طبیعی فیزیولوژی بدن ایجاد کند. پوست نازکترین، وسیع ترین و در دسترس ترین عضو بدن است [۱]. یکی از مهمترین روش های ترمیم پوست، استفاده از

جایگزینهای پوستی است که به روش مهندسی بافت ساخته می شوند [۲]. در واقع، مهندسی بافت به کمک سلول ها، زیست مولکول ها و ساختارهای نگهدارنده مکانیکی برای بازسازی بافت های آسیب دیده به کار می رود. به عبارت دیگر، هدف اصلی مهندسی بافت پوست، بازگرداندن بخش آسیب دیده آن به مراحل اولیه رشد بافت و ایجاد قابلیت مجدد رشد و

* : مسئول مكاتبات، پست الكترونيكي: n.johari@iut.ac.ir

بازسازی بافت است [۳ و ۴]. برای بازسازی و ترمیم بافته لازم است از فاکتورهای رشد به همراه سلولهایی که در داخل یک سیستم پشتیبانی مصنوعی قرار می گیرند، استفاده شود. این سلولها داخل ساختارهای مصنوعی به نام داربست کشت داده می شوند و این ساختارها قادر به حمایت از ساختار سهبعدی بافت هستند. داربستهای سهبعدی و متخلخل، چهارچوبی برای اتصال سلولها، تکثیر و تمایز آنها فراهم می کنند و یک ماتریس خارج سلولی تشکیل می دهند که باعث بهبود استحکام ساختاری بافت می شوند [۵]. درصد و اندازه تخلخل و نفوذپذیری از جمله خواص به هم وابسته هستند که بر خواص مکانیکی داربست اثر می گذارد. همچنین توزیع اندازه تخلخل و میزان به هم پیوستگی تخلخلها نقش مهمی در خواص مکانیکی دارد [۶ و ۷]. بنابراین افزایش درصد تخلخل در مکانیکی می شود [۸].

تشابه خواص مكانيكي داربستهاي مهندسي بافت به بافت طبيعي پوست سبب ميشود سلولها بر همكنش بهتـري داشـته باشند و بافت جدید سریعتر تشکیل شود. در نمونههای کامپوزیتی، توزیع نانوذرات در زمینه و بر همکنش اجزاء زنجیره پلیمری باعث بهبود خواص مکانیکی داربست،ای مهندسی بافت میشوند [۹]. در فراینـد سـاخت داربسـت.هـای مهندسـی بافت، تاکنون بسیاری از پلیمرهای زیست تخریب پذیر و سرامیکهای زیست فعال بهعنوان مواد زیست سازگار استفاده شدهاند [۱۰]. در بین مواد مختلف، سرامیکها بهعلت تـردی و برخی از پلیمرها بهدلیل عدم استحکام کافی، ایجاد سمیّت سلولي و رهايش محصولات نامطلوب ناشبي از تخريب شان، عملکرد مطلوبی از خود بهعنوان داربست به نمایش نگذاشتهاند. از اینرو، از کامپوزیتهای پلیمر / سرامیک زیست سازگار در مهندسی بافت استفاده میشود [۱۱]. نانوکامپوزیتها عـلاوه بـر حفظ ویژگیهای کامپوزیتها، بهعلت دارا بودن سطح آزاد بیشتر، درگیری مکانیکی بیشتری با زمینه داشته و در صورت شكل گيري ييوندهاي شيميايي، استحكام افزايش مي يابد [١٢].

در میان پلیمرهای زیست سازگار، پلی کاپرولاکتون یک پلی استر نیمه-بلورین است که بهراحتی در دماهای پایین فر آوری میشود. اما بهدلیل ماهیت نیمهبلورین و آب گریزی شدید آن، تخریب این پلیمر در شرایط فیزیولوژیکی بدن انسان بسیار کند است [۱۳–۱۵]. علاوه بر این، پلی کاپرولاکتون توانایی ترکیب شدن با مواد گوناگون را دارد. رفتار این پلیمر به شدت تابع جزئی است که با آن ترکیب شده و تبدیل به کامپوزیت می شود [۱۶ و ۱۷].

در میان نانوذرات سرامیکی، نانوذرات اکسید روی کاربردهای متعددی در زمینههای مختلف بهخصوص پزشکی، مهندسی بافت، نانوفناوری و غیره دارند. این نانوذرات بـهدلیـل نسبت سطح به حجم بالا، غیر سمّی بودن، زیست سازگاری و خاصیت آنتیباکتریال، یکی از کاندیدهای مناسب برای استفاده بهعنوان تقویتکننده در زمینه کامپوزیتهای پلیمری است [۱۸ و ۱۹]. با توجه به شرایط فرآوری نانوذرات اکسید روی، مورفولوژي اين نانوذرات مي تواند كروي- الماسي شكل باشـد. توزیع یکنواخت نانوذرات اکسید روی و غلظتهای بیشتر نانوذرات اکسید روی در ساختار پلیمر و ایجاد سطحی اتصالدهنده بین مولکولها و تشکیل پیوندهای یونی میان نانوذرات و تركيبات تشكيل دهنده پليمر باعث افزايش استحكام فشاری میشود که با نتایج سایر پژوهشگران مطابقت دارد [۱۲]. همچنین، نانوذرات اکسید روی علاوه بر تأثیر قابل تـوجهی کـه در ترمیم بافت پوست دارند [۲۰]، رفتار آنتیباکتریال ویـژهای نیز از خود نشان دادهاند [۲۱].

از اینرو، در پژوهش حاضر، تلاش شد تا داربست نانوکامپوزیتی پلیکاپرولاکتون/ نانوذرات اکسید روی به روش ریخته گری حلال/ شستشوی ذرات ساخته شود. به این منظور، مقادیر ۵، ۵ و ۱۵ درصد وزنی از نانوذرات اکسید روی در زمینه پلی کاپرولاکتون اضافه شد تا مورفولوژی داربستهای ساخته شده بررسی شود و تأثیر این مورفولوژی بر خواص مکانیکی نهایی داربستهای ساخته شده تحلیل شود.

	5	•
مشخصات		مواد اوليه
۹۰۰۰۰ g/mol	جرم مولى	پلىكاپرولاكتون
V∘-¥∘ nm	اندازه ذرات	اکسید روی

جدول ۱- مشخصات مواد اولیه مصرف شده

نسبت های وزنی $\frac{PCI+ZnO}{NaCl} = \frac{2ml}{3g}$ در قالب ریخته شده و محلول های نانو کامپوزیتی به آنها اضافه شدند. مخلوط های حاصل به مدت ۷۲ ساعت در دمای محیط خشک شدند. در مرحله بعد، نمونه ها به مدت یک هفته با آب مقطر شسته شدند. برای اطمینان از خروج کامل ذرات سدیم کلراید از آب مقطر تعویض شد. پس از خروج کامل ذرات سدیم کلراید، داربست ها به مدت ۲۷ ساعت در دمای محیط و در مجاورت داربست ها به مدت ۲۷ ساعت در دمای محیط و در مجاورت

۲-۳- ارزیابی ساختار فازی، خواص مکانیکی و مورفولوژی داربستهای نانوکامپوزیتی پلی کاپرولاکتون/ اکسید روی ساختار فازی داربستهای ساخته شده، با استفاده از الگوی پراش پرتو ایکس^۱ ارزیابی شد. این ارزیابی از طریق تابش پرتو پراش پرتو ایکس^۱ ارزیابی شد. این ارزیابی از طریق تابش پرتو دست پراش پرتو ایکس^۱ ارزیابی شد. این ارزیابی از مریق تابش در محدوده زاویهای پرتو ۱۰ درجه اندازه گیری شد. پیوندها و گروههای عاملی نانوذرات اکسید روی و پلی کاپرولاکتون با استفاده از طیف فروسرخ با تبدیل فوریه مورد بررسی قرار گرفتند.

برای بررسی خواص مکانیکی این داربستها، داربستهای ساخته شده مطابق استاندارد ASTM به شماره -D3410 D3410M به شکل استوانههایی به قطر ۱۰ میلیمتر و ارتفاع ۱۰ میلیمتر برش زده شده و با استفاده از دستگاه آزمون استحکام فشاری، تحت آزمون استحکام فشاری قرار گرفتند.

همچنین، مورفولوژی، اندازه و توزیع تخلخل داربستهای ساخته شده از طریق میکروسکوپ الکترونی روبشی^۳ ارزیابی شدند. علاوهبر این، به کمک آنالیز عنصری طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس^{*}، حضور و میزان عناصر تقویت کننده در ۲– مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد مصرفی

مواد اولیه مصرف شده در این پژوهش شامل پلی کاپرولاکتون (شرکت مرک، PCL، -(CH₂)₅COO]، -، M_w=70000-90000))،)، حالال دیکلرومتان (شرکت سیگما- آلدریچ، CH₂Cl₂)،)، نیترات روی (شرکت مرک)، هیدروکسید سدیم (شرکت سیگما- آلدریچ) و ذرات میکرونی سدیم کلراید (مرک، NaCl) است (جدول ۱).

۲–۲– ساخت داربسـتهـای پلـیکاپرولاکتون/ نـانوذرات اکسید روی (PCI-ZnO)

برای ساخت نانوذرات اکسید روی از روش جوهری و همکارانش [۲۲] استفاده شد. از اینرو، از پیش ساز نیترات روی و روش همرسوبی استفاده شد. بدین منظور، یک محلول ۲ مولار هیدروکسید سدیم و یک محلول ۵/۵ مولار نیترات روی به طور جداگانه تهیه شدند. در مرحله بعد، محلول هیدروکسید سدیم در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد به محلول نیترات روی اضافه شد. نانوذرات اکسید روی دارای مورفولوژی کروی-الماسی شکل و اندازه ۲۰–۲۰ نانومتر بودند [۲۲].

برای ساخت داربستهای نانوکامپوزیتی پلی کاپرولاکتون/ نانوذرات اکسید روی، از روش ریخته گری حلال/ شستشوی ذرات استفاده شد. برای این منظور، مقادیر ۵، ۵ و ۱۵ درصد وزنی از نانوذرات اکسید روی به حلال دی کلرومتان اضافه شده و به مدت سه ساعت در دمای محیط هم زده شدند. سپس پلی کاپرولاکتون با نسبت ۷ / 10w = PCl CH₂CL₂ به ترکیب اضافه شد. ذرات سدیم کلراید در سه دانهبندی متفاوت، با



داربستهای نانوکامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفتند. توزیع نانوذرات ذرات اکسید روی در زمینه از طریق نقشه عنصری طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس^۵ ارزیابی شد.

٣- نتايج و بحث

الگوی پراش پرتو ایکس داربست پلی کاپرولاکتون/ نانوذرات اکسید روی که حاوی ۵، ۵ و ۱۵ درصد وزنی نانوذرات اکسید روی، در شکل (۱) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، الگوی پراش پرتو ایکس داربستهای تهیه شده، پیکهای واضح و متمایز نانوذرات اکسید روی که با کارت مرجع فاز به شماره ۶۰۶۰–۲۱۰–۹۶ مطابقت دارد و پلی کاپرولاکتون [۲۳] را نشان می دهد. میزان بلورینگی داربستهای ساخته شده نیز با بررسی الگوی پراش پرتو ایکس این داربستهای ساخته شده نیز با بررسی الگوی پراش پرتو ایکس این داربست مقدار تقریبی ۴۸ درصد به دست آمد که نزدیک است [۲۴]. همان طور که در شکل (۱) مشاهد می شود، با افزایش درصد نانوذرات اکسید روی در داربست نانو کامپوزیتی ساخته شده، بر شدت پیکهای مربوط به نانوذرات اکسید روی افزوده و از شدت پیکهای مربوط به پلی کاپرولاکتون کاسته می شود.



شکل (۲) طیف فروسرخ داربست های نانو کامپوزیتی پلی کاپرولاکتون حاوی ۵، ۵ و ۱۵ درصد وزنی اکسید روی را نشان می دهد. همان گونه که در شکل مشاهده می شود، پیوندهای O-C، O=C و H-O مطابق با گروههای عاملی پلی کاپرولاکتون است [۲۵] و پیوند O-T هم به نانوذرات اکسید روی نسبت داده شده است [۲۶].

شکل (۳) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی داربست های نانوکامپوزیتی پلیکاپرولاکتون/ نانوذرات اکسید روی را که با مقادیر ۵، ۵ و ۱۵ درصد وزنی اکسید روی نانومتری تهیه شدهاند را نشان میدهد. در این تصاویر مشاهده میشود که داربست نانوکامپوزیتی که حاوی ۵ درصد وزنی نیانوذرات اکسید روی است یکپارچهترین مورفولوژی ساختاری را دارد. در واقع، نیانوذرات اکسید روی در این داربست به طور کاملاً یکنواخت در زمینه پلیمری پراکنده شدهاند و یکپارچگی و انسجام مطلوبی در ساختار ایجاد کردهاند. درحالی که، با افزایش درصد وزنی نانوذرات اکسید روی در زمینه پلی کاپرولاکتون، عدم یکپارچگی و از هم گسیختگی ساختار مشاهده می شود که به دلیل کلوخهای شدن نانوذرات و از بین رفتن یکنواختی توزیع نانوذرات در زمینه



شکل ۳– تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی داربستهای نانوکامپوزیتی پلیکاپرولاکتون/ اکسید روی با: الف) صفر، ب) ۵ و ج) ۱۵ درصد وزنی نانوذرات اکسید روی.

> علاوه بر این، شکل (۴) آنالیز عنصری طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس داربستهای نانوکامپوزیتی پلی کاپرولاکتون/ نانوذرات اکسید روی را نشان میدهد. آنالیز عنصری نشان میدهد که اکسیژن و کربن عناصری هستند که در ساختار پلی کاپرولاکتون وجود دارند [۲۹]. شکل (۴- الف) نشان میدهد اکسیژن و کربن تنها عناصر در داربست نانوکامپوزیتی وجود دارد و هیچ تقویتکنندهای در داربست نانوکامپوزیتی وجود ندارد. در شکل (۴- ب) و شکل (۴- ج) عناصر روی و اکسیژن نشاندهنده وجود تقویتکننده اکسید روی در داربست نانوکامپوزیتی است.

> به منظور بررسی دقیق تر یکنواختی توزیع نانوذرات اکسید روی در زمینه پلیمر، از نمونههای ساخته شده، نقشه آنالیز عنصری تهیه شد. شکل (۵) نقشه آنالیز عنصری داربستهای نانوکامپوزیتی پلیکاپرولاکتون/ نانوذرات اکسید روی را نشان می دهد. شکل (۵- الف) نشان می دهد، اکسیژن و کربن تنها عناصر در داربست نانوکامپوزیتی هستند و هیچ تقویت کننده ای در داربست نانوکامپوزیتی وجود ندارد. در شکل (۵- ب)، نقشه آنالیز عنصری توزیع یکنواخت نانوذرات اکسید روی در زمینه پلیکاپرولاکتون نشان می دهد. شکل (۵- ج) نشان می دهد که با افزایش درصد وزنی نانوذرات اکسید روی در زمینه پلیمری داربست، همچنان نانوذرات اکسید روی به طور یکنواخت در زمینه توزیع شده اند.

برای بررسی اثر مورفولوژی داربست و میزان نانوذرات دیاکسید روی وارد شده در زمینه پلیمر بـر خـواص مکـانیکی داربستهای ساخته شده، نمونهها مورد آزمون استحکام فشاری قرار گرفتند. تغییرات استحکام فشاری و مدول فشاری داربست، ای نانوکامپوزیتی پلیکاپرولاکتون/ اکسید روی، بەمنظور ارزیابی خواص مکانیکی داربست، ا بەترتیب در شکلهای (۶) و (۷) نشان داده شده است. همچنین، نمودارهای تنش – کرنش داربست های ساخته شده در شکل (۸) آورده شدهاند. در شکل (۶) مشاهده میشود که با افزایش مقدار نانوذرات اکسید روی تـا ۵ درصـد وزنـی، اسـتحکام فشـاری افزایش می یابد که این نتایج با تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشى داربست نانوكامپوزيتى پلىكاپرولاكتون/ نانوذرات اكسيد روی که حاوی ۵ درصـد وزنـی نـانوذرات اکسـید روی اسـت مطابقت دارد چراکه نانو ذرات اکسید روی در این داربست بهطور كاملاً يكنواخت در زمينه پليمري پراكنده شدهاند و یکپارچگی و انسجام مطلوبی در ساختار ایجاد کردهانـد. چراکـه این داربست، بالاترین استحکام و مدول فشاری را نیےز از خود نشان داد. در شکل (۷) دیده می شود که با همین مقدار افزایش در مقدار نانوذرات اکسید روی، میزان مدول فشاری داربست، کاهش مییابد که با توجه به انحراف معیار مشخص شده مي توان نتيجه گرفت كه اين افت مدول، قابل اغماض است. اما با افزایش بیشتر مقدار نانوذرات تا ۱۵ درصد وزنی، میزان



شکل ۴– آنالیز عنصری طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس داربستهای نانوکامپوزیتی پلیکاپرولاکتون/ اکسید روی با: الف) صفر ب) ۵ و ج) ۱۵ درصد وزنی نانوذرات اکسید روی.



شکل ۵– نقشه عنصری طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس داربستهای نانوکامپوزیتی پلیکاپرولاکتون/ اکسید روی با: الف) صفر ب) ۵ و ج) ۱۵ درصد وزنی نانوذرات اکسید روی.





شکل ۷- تغییرات مدول فشاری داربست.های نانوکامپوزیتی پلیکاپرولاکتون/ اکسید روی با درصدهای وزنی متفاوت اکسید روی.



شکل ۸– نمودار تنش– کرنش داربست.های نانوکامپوزیتی پلیکاپرولاکتون/ اکسید روی با درصدهای وزنی متفاوت اکسید روی.

تقویت کننده بیش از ۵ درصد وزنی استحکام نمونه ها کاهش یافته است، ولی نسبت به نمونه مرجع استحکام بیشتر است. دیبا و همکارانش [۲۸] نشان دادند با افزودن تقویت کننده به پلیمر به دلیل کاهش تخلخل، اندازه منافذ و پودر تقویت کننده باعث افزایش استحکام فشاری می شود. افزایش درصد وزنی استحکام و مدول فشاری رو به کاهش بوده است. در پژوهشی، قاسمیه [۲۷] نشان داد که با افزودن بیوسرامیک به پلیمر، خواص مکانیکی داربست افزایش مییابد. با توجه به شکل (۶) مشاهده میشود که با افزایش ۵ درصد وزنی اکسید روی، استحکام نمونه ها افزایش یافته است. با افزایش درصد به ۵ درصد وزنی افزایش پیدا میکند استحکام فشاری داربستها رو به افزایش بوده و موروفولوژی داربستها هم یکپارچهتر میشود. درحالی که، با افزایش مقدار نانوذرات اکسید روی در زمینه پلیکاپرولاکتون به مقادیر بیش از ۵ درصد وزنی، استحکام و مدول فشاری داربستها کاهش یافته و یکپارچگی مورفولوژی و انسجام ساختار این داربستها هم از بین میرود. در واقع، افزایش تقویتکننده باعث کلوخهای شدن نانوذرات اکسید روی شده و این غیریکنواختی در توزیع نانوذرات باعث عدم یکپارچگی ساختار و از هم گسیختگی مورفولوژی داربست میشود.

تشکر و سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله بر خود لازم میدانند از تمام حمایتهای مادی دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان دانشگاه صنعتی اصفهان تقدیر و تشکر بهعمل آورند.

- 1. X-ray diffraction (XRD) pattern
- 2. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy

تقویتکننده تا درصد بالاتر باعث کلوخهای شدن پودر و عـدم یکنواختی توزیع تقویتکننده میشود، بنابراین با افـزایش بـیش از ۵ درصد وزنی اکسید روی استحکام داربست کاهش مییابد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، داربستهای نانوکامپوزیتی پلی کاپرولاکتون/ نانوذرات اکسید روی با مقادیر ۵، ۵ و ۱۵ درصد وزنی از نانوذرات اکسید روی و به روش ریخته گری حلال/ شستشوی ذرات نمک ساخته شدند. مورفولوژی و خواص مکانیکی این داربستها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و استحکام فشاری ارزیابی شدند. نتایج ارزیابی استحکام و مدول فشاری داربستهای نانوکامپوزیتی پلی کاپرولاکتون/ نانوذرات اکسید روی نشان داد که با افزایش درصد وزنی نانوذرات اکسید روی بهعنوان تقویتکننده در زمینه پلی کاپرولاکتون منجر به افزایش استحکام و مدول فشاری داربستهای ساخته شده می شود. تا زمانی که مقدار نانوذرات پراکنده شده در زمینه پلی کاپرولاکتون

واژەياب

- 3. Scanning Electron Microscopy (SEM)
- 4. Energy Dispersive X-ray (EDX)

مراجع

- 1. Kanitakis, J., "Anatomy, Histology and Immunohistochemistry of Normal Human Skin", *European Journal of Dermatology*, Vol. 12, No. 4, pp 390-401, 2002.
- Debels, H., Hamdi, M., Abberton, K., and Morrison, W., "Dermal Matrices and Bioengineered Skin Substitutes: A Critical Review of Current Options", *Plastic Reconstructive Surgery Global Open*, Vol. 3, No. 1, pp 1-6, 2015
- 3. Ma, P.X., Elisseeff, J., *Scaffolding in Tissue Engineering*, CRC press, 2005.
- 4. Drury, J.L., and Mooney, D.J., "Hydrogels for Tissue Engineering: Scaffold Design Variables and Applications", *Biomaterials*, Vol. 24, No. 24, pp 4337-4351, 2003.
- Liu, C., Xia, Z., Czernuszka, J., "Design and Development of Three-dimensional Scaffolds for Tissue Engineering", *Chemical Engineering Research Design*, Vol. 85, No. 7, pp 1051-1064,

2007.

- Sumner, D., and Heseltine, J., "Tip Vortex Structure for A Circular Cylinder with A Free End", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, No. 6-7, pp 1185-1196, 2008.
- 7. Adaramola, M., Akinlade, O., Sumner, D., Bergstrom, D., and Schenstead, A. "Turbulent Wake Of A Finite Circular Cylinder of Small Aspect Ratio", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 22, No. 6-7, pp 919-928, 2006.
- Lemos, E.M., Patrício, P.S., and Pereira, M.M., "3D Nanocomposite Chitosan/Bioactive Glass Scaffolds Obtained Using Two Different Routes: An Evaluation of the Porous Structure and Mechanical Properties", *Química Nova*, Vol. 39, pp 462-466, 2016.
- 9. Gaharwar, A.K., Rivera, C.P., Wu, C.J., and Schmidt, G., "Transparent, Elastomeric and Tough Hydrogels From Poly (Ethylene Glycol) and Silicate

Nanoparticles", *Acta Biomaterialia*, Vol. 7, No. 12, pp 4139-4148, 2011.

- Rezwan, K., Chen, Q., Blaker, J.J., and Boccaccini, A.R., "Biodegradable and Bioactive Porous Polymer/Inorganic Composite Scaffolds for Bone Tissue Engineering", *Biomaterials*, Vol. 27, No. 18, pp 3413-3431, 2006.
- 11. Depan, D., Girase, B., Shah, J., and Misra, R., "Structure–Process–Property Relationship of the Polar Graphene Oxide-Mediated Cellular Response and Stimulated Growth of Osteoblasts on Hybrid Chitosan Network Structure Nanocomposite Scaffolds", *Acta Biomaterialia*, Vol. 7, No. 9, pp 3432-3445, 2011.
- 12. Hu, X., Jia, X., Zhi, C., Jin, Z., and Miao, M., "Improving the Properties of Starch-Based Antimicrobial Composite Films Using Zno-Chitosan Nanoparticles", *Carbohydrate Polymers*, Vol. 210, pp 204-209, 2019.
- Puppi, D., Chiellini, F., Piras, A.M., and Chiellini, E., "Polymeric Materials for Bone and Cartilage Repair", *Progress in Polymer Science*, Vol. 35, No. 4, pp 403-440, 2010.
- 14. Dillow, A., and Lowman, A., *Biomimetic Materials* and Design: Biointerfacial Strategies, Tissue Engineering and Targeted Drug Delivery, CRC Press, 2002.
- Shalumon, K., Anulekha, K., Chennazhi, K.P., Tamura, H., Nair, S., and Jayakumar, R., "Fabrication of Chitosan/Poly (Caprolactone) Nanofibrous Scaffold for Bone and Skin Tissue Engineering", *International Journal of Biological Macromolecules*, Vol. 48, No. 4, pp 571-576, 2011.
- Okada, M., "Chemical Syntheses of Biodegradable Polymers", *Progress in Polymer Science*, Vol. 27, No. 1, pp 87-133, 2002.
- 17. Woodruff, M.A., and Hutmacher, D.W., "The Return of a Forgotten Polymer—Polycaprolactone in the 21st Century", *Progress in Polymer Science*, Vol. 35, No. 10, pp 1217-1256, 2010.
- 18. Zare, E., Pourseyedi, S., Khatami, M., and Darezereshki, E., "Simple Biosynthesis of Zinc Oxide Nanoparticles Using Nature's Source, And It's in Vitro Bio-Activity", *Journal of Molecular Structure*, Vol. 1146, pp 96-103, 2017.
- Ahmed, S., Chaudhry, S.A., and Ikram, S., "A Review on Biogenic Synthesis of ZnO Nanoparticles Using Plant Extracts and Microbes: A Prospect Towards Green Chemistry", *Journal of Photochemistry Photobiology B: Biology*, Vol. 166, pp 272-284, 2017.

- 20. Ågren, M.S., Studies on Zinc in Wound Healing, 1990.
- 21. Manuja, A., Raguvaran, R., Kuma, T. B., Kalia, A., and Tripathi, B., "Accelerated Healing of Full Thickness Excised Skin Wound in Rabbits Using Single Application of Alginate/Acacia Based Nanocomposites of ZnO Nanoparticles", *International Journal of Biological Macromolecules*, Vol. 155, pp 823-833, 2020.
- 22. Johari, N., Zohari, F., and Rafati, F., "Evaluation of the Morphologies and Formation Mechanisms of ZnO and CuO Nanoparticles Synthesized via the Coprecipitation Method", *Metallurgical and Materials Engineering*, Vol. 40, No. 1, pp 50-56, 2021.
- Ansari, Z., Kalantar, M., Kharaziha, M., Ambrosio, L., and Raucci, M.G., "Polycaprolactone/Fluoride Substituted-hydroxyapatite (PCL/FHA) Nanocomposite Coatings Prepared by In-situ Sol-gel Process for Dental Implant Applications", *Progress in Organic Coatings*, Vol. 147, pp 105873, 2020.
- 24. Khatiwala, V.K., Shekhar, N., Aggarwal, S., and Mandal, U., "Biodegradation of Poly (εcaprolactone)(PCL) Film by Alcaligenes Faecalis", *Journal of Polymers and the Environment*, Vol. 16, No. 1, pp 61-67, 2008.
- 25. Lamas, M.L., Lima, M.S., Pinho, A.C., Tugushi, D., Katsarava, R., Costa, E.C., Correia, I.J., Serra, A.C., Coelho, J.F., and Fonseca, A.C., "Towards the Development of Electrospun Mats from Poly (εcaprolactone)/Poly (ester amide) s Miscible Blends", *Polymer*, Vol. 150, pp 343-359, 2018.
- 26. Wang, L., Wu, Y., Chen, F., and Yang, X., "Photocatalytic Enhancement of Mg-doped ZnO Nanocrystals Hybridized with Reduced Graphene Oxide Sheets", *Progress in Natural Science: Materials International*, Vol. 24, No. 1, pp 6-12, 2014.
- 27. Ghassemieh, E., "Morphology and Compression Behaviour of Biodegradable Scaffolds Produced by the Sintering Process", *Proceedings of the Institution* of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine, Vol. 222, No. 8, pp 1247-1262, 2008.
- 28. Diba, M., Kharaziha, M., Fathi, M., Gholipourmalekabadi, M., Samadikuchaksaraei, A., "Preparation and Characterization of Polycaprolactone/Forsterite Nanocomposite Porous Scaffolds Designed for Bone Tissue Regeneration", *Composites Science Technology*, Vol. 72, No. 6, pp 716-723, 2012.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF ZINC OXID CONTENT AND SCAFFOLD MORPHOLOGY ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF POLY(ε-CAPROLACTONE) / ZINC OXIDE NANOCAMPOSITE SCAFFOLDS

F. Rafati, N. Johari and F. Zohari

Materials Engineering Group, Golpayegan College of Engineering, Isfahan University of Technology

(Received: 2 November 2021; Accepted: 2 March 2022)

ABSTRACT

In the present study, PCL/ZnO nanocomposite scaffolds containing 0, 5, and 15 wt.% of ZnO nanoparticles were prepared via the salt leaching/solvent casting method. The influence of ZnO nanoparticles on the morphology of prepared PCL/ZnO scaffolds was investigated using SEM images. The compressive strength test evaluated the effect of scaffolds' morphology on mechanical properties. The XRD technique confirmed the desired phases in the scaffold composition. The results showed that the compressive strength and structural integrity of the scaffolds increased by increasing ZnO nanoparticles content as the reinforcement. However, the compressive strength and structural integrity decreased by increasing the amount of ZnO nanoparticles up to more than 5 wt.%. In summary, PCL/ZnO nanocomposite scaffold containing 5 wt.% of ZnO nanoparticles revealed the highest strength, compressive modulus, and structural integrity.

Keywords: Poly(ɛ-caprolactone)/zinc oxide; Morphology; Mechanical properties.

1. INTRODUCTION

As one of the most important tissues of the human body, the skin plays an important role in human health as its defects can cause significant problems in the natural physiological process of the body [1]. For healing skin defects, biocompatible polymer / ceramic composites are used in skin tissue engineering [2]. In the present study. PCL/ZnO nanocomposite scaffolds containing 0, 5, and 15 wt.% zinc oxide nanoparticles were prepared by solvent casting/particle leaching. The effect of the morphology on the final mechanical properties of the fabricated scaffolds was studied.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Fabrication of PCL/ ZnO nanocomposite scaffolds

To synthesize zinc oxide nanoparticles via the coprecipitation method, zinc nitrate was used as a Zn precursor. The solvent casting/particle leaching method was employed to fabricate PCL/ZnO nanocomposite scaffolds.

*: n.johari@iut.ac.ir

2.2. Evaluation of phase structure, morphology, and mechanical properties of PCL/ZnO nanocomposite scaffolds

The phase structure of the synthesized scaffolds was evaluated using the X-ray diffraction (XRD) analysis. Also, the morphology, size, porosity distribution of the fabricated scaffolds, and the distribution of zinc oxide nanoparticles were observed by scanning electron microscopy (SEM). Afterward, the compressive strength test evaluated the effect of the scaffolds' morphology on mechanical properties.

3. RESULT AND DISCUSSION

The XRD patterns of PCL/ ZnO scaffolds containing 0, 5, and 15 wt.% ZnO nanoparticles are presented in Figure 1. As shown, ZnO peaks correspond to JCPDS card No. 7060-210-96, and PCL peaks are clear. The intensity of ZnO peaks increased, and PCL peaks decreased with increasing the percentage of ZnO in the nanocomposite scaffold.

SEM images of PCL/ZnO nanocomposite scaffolds, as shown in figure 2, an exhibit that the



Figure 1. XRD patterns of PCL/ZnO nanocomposite scaffolds with 0, 5, and 15 wt.% ZnO nanoparticles.



Figure 2. SEM images of PCL/ZnO nanocomposite scaffolds with a) 0, b) 5, c) 15 wt.% ZnO nanoparticles, and d) compressive strength changes of PCL/ ZnO nanocomposite scaffolds.

nanocomposite scaffold containing 5 wt.% ZnO has the most integral structural morphology. By increasing the weight percentage of ZnO nanoparticles, the lack of integration and disintegration of the structure was observed due to the aggregation of the nanoparticles and the lack of the uniform distribution of nanoparticles in the polymer matrix.

As shown in Figure 2d, by increasing ZnO content up to 5 wt.%, the compressive strength of

the prepared scaffolds increased. However, by a further increase of ZnO content, the compressive strength of the samples decreased. Diba et al. [3] showed that the compressive strength increased by adding the reinforcement to the polymer matrix due to the reduction of porosity and pore size.

4. CONCLUSION

In this study, PCL/ ZnO nanocomposite scaffolds containing 0, 5, and 15 wt.% of ZnO nanoparticles

were synthesized by the salt leaching/solvent casting method. PCL/ZnO nanocomposite scaffold containing 5 wt.% of ZnO nanoparticles revealed the highest strength, compressive modulus, and structural integrity.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors acknowledge the support provided by Isfahan University of Technology for this research.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare that there is no conflict of interest for this paper.

REFERENCE

1. Kanitakis, J., "Anatomy, Histology, and

Immunohistochemistry of Normal Human Skin" *European Journal of Dermatology*, Vol. 12, No. 4, pp 390-401, 2002.

- Depan, D., Girase, B., Shah, J., and Misra, R., "Structure–Process–Property Relationship of the Polar Graphene Oxide-Mediated Cellular Response and Stimulated Growth of Osteoblasts on Hybrid Chitosan Network Structure Nanocomposite Scaffolds", *Acta Biomaterialia*, Vol. 7, No. 9, pp 3432-3445, 2011.
- Diba, M., Kharaziha, M., Fathi, M., Gholipourmalekabadi, M., Samadikuchaksaraei, A., "Preparation and Characterization of Polycaprolactone/Forsterite Nanocomposite Porous Scaffolds Designed for Bone Tissue Regeneration," *Composites Science Technology*, Vol. 72, No. 6, pp 716-723, 2012.