

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: ۱۴۰۰/۸/۱۱ - دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۱۲/۱۱)

چکیده - ویژگی‌های مکانیکی و ساختاری داربست‌های مهندسی بافت یکی از عوامل مهم در بازسازی و ترمیم بافت محسوب می‌شوند. از این‌رو، در پژوهش حاضر، به بررسی تأثیر میزان نانوذرات اکسید روی و مورفولوژی داربست بر خواص مکانیکی داربست‌های نانوکامپوزیتی پلی‌کاپرولاکتون/ نانوذرات اکسید روی پرداخته شد. در این پژوهش، داربست‌های نانوکامپوزیتی پلی‌کاپرولاکتون/ نانوذرات اکسید روی به روش ریخته‌گری حلال/ شستشوی ذرات نمک و با سه غلظت متفاوت ۰، 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 به‌عنوان 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 به‌دست آمده نشان داد که با افزودن نانوذرات اکسید روی به‌عنوان تقویت‌کننده، استحکام فشاری داربست‌ها افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، با افزایش نانوذرات اکسید روی به بیش از ۵ درصد وزنی، استحکام فشاری کاهش یافت. در واقع، داربست نانوکامپوزیتی پلی‌کاپرولاکتون/ اکسید روی با ۵ درصد وزنی اکسید روی بیشترین میزان استحکام و مدول فشاری و یکپارچگی ساختار را داشت.

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

۱- مقدمه

جایگزین‌های پوستی است که به روش مهندسی بافت ساخته می‌شوند [۲]. در واقع، مهندسی بافت به کمک سلول‌ها، زیست‌مولکول‌ها و ساختارهای نگهدارنده مکانیکی برای بازسازی بافت‌های آسیب دیده به‌کار می‌رود. به عبارت دیگر، هدف اصلی مهندسی بافت پوست، بازگرداندن بخش آسیب دیده آن به مراحل اولیه رشد بافت و ایجاد قابلیت مجدد رشد و

پوست به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بافت‌های بدن انسان، نقش بسیار مهمی در سلامت انسان دارد و نقص در آن می‌تواند مشکلات عمده‌ای را در روند طبیعی فیزیولوژی بدن ایجاد کند. پوست نازک‌ترین، وسیع‌ترین و در دسترس‌ترین عضو بدن است [۱]. یکی از مهم‌ترین روش‌های ترمیم پوست، استفاده از

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: n.johari@iut.ac.ir

در میان پلیمرهای زیست سازگار، پلی‌کاپرولاکتون یک پلی‌استر نیمه-بلورین است که به‌راحتی در دماهای پایین فرآوری می‌شود. اما به دلیل ماهیت نیمه‌بلورین و آب‌گریزی شدید آن، تخریب این پلیمر در شرایط فیزیولوژیکی بدن انسان بسیار کند است [۱۳-۱۵]. علاوه بر این، پلی‌کاپرولاکتون توانایی ترکیب شدن با مواد گوناگون را دارد. رفتار این پلیمر به‌شدت تابع جزئی است که با آن ترکیب شده و تبدیل به کامپوزیت می‌شود [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 به دلیل نسبت سطح به حجم بالا، غیر سمی 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، مورفولوژی این نانوذرات می‌تواند کروی-الماسی شکل باشد. 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 ترکیبات تشکیل دهنده پلیمر باعث افزایش استحکام فشاری می‌شود که با نتایج سایر پژوهشگران مطابقت دارد [۱۲]. همچنین، نانوذرات اکسید روی علاوه بر تأثیر قابل توجهی که در ترمیم بافت پوست دارند [۲۰]، رفتار آنتی‌باکتریال ویژه‌ای نیز از خود نشان داده‌اند [۲۱].

از این‌رو، در پژوهش حاضر، تلاش شد تا داربست نانوکامپوزیتی پلی‌کاپرولاکتون/نانوذرات اکسید روی به روش ریخته‌گری حلال/شستشوی ذرات ساخته شود. به این منظور، مقادیر ۰، ۵ و ۱۵ درصد وزنی از نانوذرات اکسید روی در زمینه پلی‌کاپرولاکتون اضافه شد تا مورفولوژی داربست‌های ساخته شده بررسی شود و تأثیر این مورفولوژی بر خواص مکانیکی نهایی داربست‌های ساخته شده تحلیل شود.

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

تشابه خواص مکانیکی داربست‌های مهندسی بافت به بافت طبیعی پوست سبب می‌شود سلول‌ها بر هم کنش بهتری داشته باشند و بافت جدید سریع‌تر تشکیل شود. در نمونه‌های کامپوزیتی، توزیع نانوذرات در زمینه و بر هم کنش اجزاء زنجیره پلیمری باعث بهبود خواص مکانیکی داربست‌های مهندسی بافت می‌شوند [۹]. در فرایند ساخت داربست‌های مهندسی بافت، تاکنون بسیاری از پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر و سرامیک‌های زیست فعال به‌عنوان مواد زیست سازگار استفاده شده‌اند [۱۰]. در بین مواد مختلف، سرامیک‌ها به‌علت تردی و برخی از پلیمرها به دلیل عدم استحکام کافی، ایجاد سمیت سلولی و رهايش محصولات نامطلوب ناشی از تخریب‌شان، عملکرد مطلوبی از خود به‌عنوان داربست به نمایش نگذاشته‌اند. از این‌رو، از کامپوزیت‌های پلیمر/سرامیک زیست سازگار در مهندسی بافت استفاده می‌شود [۱۱]. نانوکامپوزیت‌ها علاوه بر حفظ ویژگی‌های کامپوزیت‌ها، به‌علت دارا بودن سطح آزاد بیشتر، درگیری مکانیکی بیشتری با زمینه داشته و در صورت شکل‌گیری پیوندهای شیمیایی، استحکام افزایش می‌یابد [۱۲].

جدول ۱- مشخصات مواد اولیه مصرف شده

مشخصات	مواد اولیه
۹۰۰۰۰-۷۰۰۰۰ g/mol	پلی‌کاپرولاکتون
۷۰-۴۰ nm	اکسید روی
	جرم مولی
	اندازه ذرات

۲- مواد و روش تحقیق

۱-۲- مواد مصرفی

نسبت‌های وزنی $\frac{PCL + ZnO}{NaCl} = \frac{2ml}{3g}$ در قالب ریخته شده و محلول‌های نانوکامپوزیتی به آنها اضافه شدند. مخلوط‌های حاصل به مدت ۷۲ ساعت در دمای محیط خشک شدند. در مرحله بعد، نمونه‌ها به مدت یک هفته با آب مقطر شسته شدند. برای اطمینان از خروج کامل ذرات سدیم کلراید از داربست‌های ساخته شده، هر پنج ساعت یکبار محیط حاوی آب مقطر تعویض شد. پس از خروج کامل ذرات سدیم کلراید، داربست‌ها به مدت ۷۲ ساعت در دمای محیط و در مجاورت هوا خشک شدند.

مواد اولیه مصرف شده در این پژوهش شامل پلی‌کاپرولاکتون (شرکت مرک، $M_w=70000-90000$ ، $-(CH_2)_5COO)_n-$ ، PCL)، حلال دی‌کلرومتان (شرکت سیگما-آلدریج، $(CH_2Cl)_2$)، نیترات روی (شرکت مرک)، هیدروکسید سدیم (شرکت سیگما-آلدریج) و ذرات میکرونی سدیم کلراید (مرک، NaCl) است (جدول ۱).

۲-۲- ساخت داربست‌های پلی‌کاپرولاکتون/نانوذرات

اکسید روی (PCL-ZnO)

برای ساخت نانوذرات اکسید روی از روش جوهری و همکاریانش [۲۲] استفاده شد. از این‌رو، از پیش‌ساز نیترات روی و روش هم‌رسوبی استفاده شد. بدین منظور، یک محلول ۲ مولار هیدروکسید سدیم و یک محلول ۰/۵ مولار نیترات روی به‌طور جداگانه تهیه شدند. در مرحله بعد، محلول هیدروکسید سدیم در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به محلول نیترات روی اضافه شد. نانوذرات اکسید روی دارای مورفولوژی کروی-الماسی شکل و اندازه ۷۰-۴۰ نانومتر بودند [۲۲].

برای ساخت داربست‌های نانوکامپوزیتی پلی‌کاپرولاکتون/نانوذرات اکسید روی، از روش ریخته‌گری حلال/شستشوی ذرات استفاده شد. برای این منظور، مقادیر ۵ و ۱۵ درصد وزنی از نانوذرات اکسید روی به حلال دی‌کلرومتان اضافه شده و به مدت سه ساعت در دمای محیط هم زده شدند. سپس پلی‌کاپرولاکتون با نسبت $\frac{PCL}{CH_2Cl_2} = 10w/v$ به ترکیب اضافه شد. ذرات سدیم کلراید در سه دانه‌بندی متفاوت، با

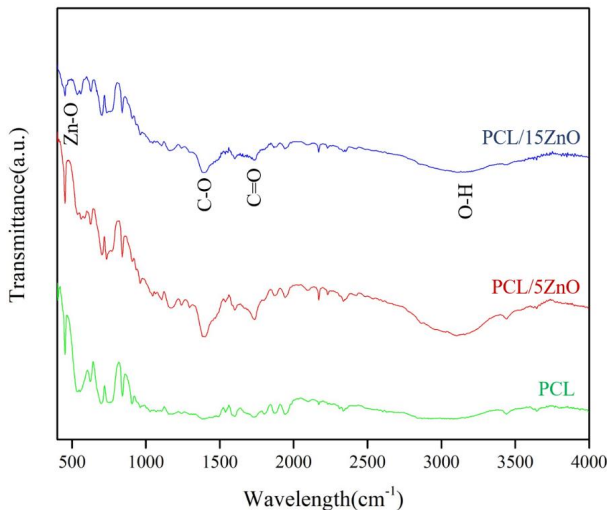
۲-۳- ارزیابی ساختار فازی، خواص مکانیکی و مورفولوژی

داربست‌های نانوکامپوزیتی پلی‌کاپرولاکتون/اکسید روی

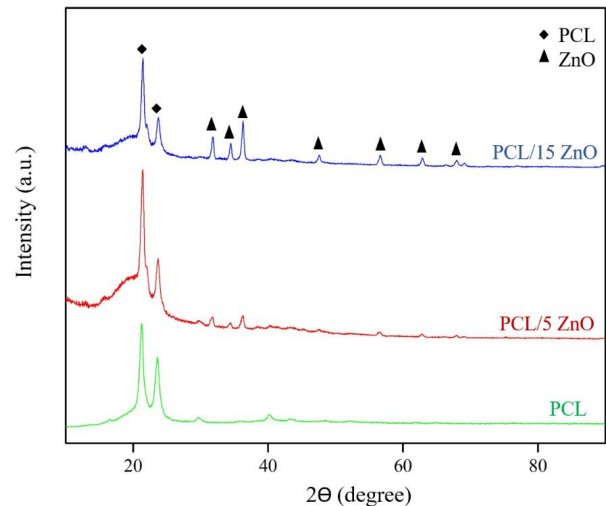
ساختار فازی داربست‌های ساخته شده، با استفاده از الگوی پراش پرتو ایکس^۱ ارزیابی شد. این ارزیابی از طریق تابش پرتو CuK α با طول موج ۱/۵۴ آنگستروم در محدوده زاویه‌ای ۸۰-۱۰ درجه اندازه‌گیری شد. پیوندها و گروه‌های عاملی نانوذرات اکسید روی و پلی‌کاپرولاکتون با استفاده از طیف فروسرخ با تبدیل فوریه^۲ مورد بررسی قرار گرفتند.

برای بررسی خواص مکانیکی این داربست‌ها، داربست‌های ساخته شده مطابق استاندارد ASTM به شماره D3410-3410M 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. علاوه بر این، به کمک آنالیز عنصری طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس^۴، حضور و میزان عناصر تقویت کننده در



شکل ۲- طیف فروسرخ با تبدیل فوریه داربست‌های نانوکامپوزیتی پلی‌کاپرولاکتون/اکسید روی.



شکل ۱- الگوی پراش پرتو ایکس داربست‌های پلی‌کاپرولاکتون حاوی ۵، ۱۵ درصد وزنی نانوذرات اکسید روی.

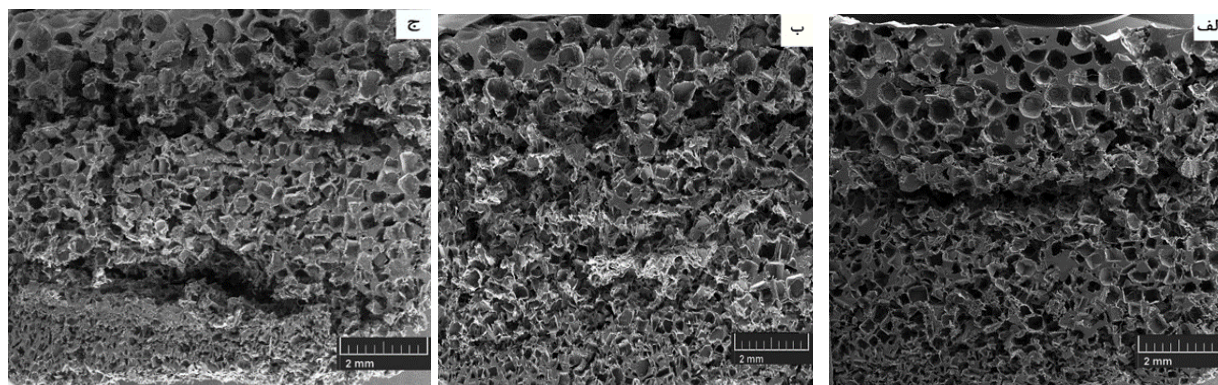
شکل (۲) طیف فروسرخ داربست‌های نانوکامپوزیتی پلی‌کاپرولاکتون حاوی ۵ و ۱۵ درصد وزنی اکسید روی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، پیوندهای C-O، C=O و O-H مطابق با گروه‌های عاملی پلی‌کاپرولاکتون است [۲۵] و پیوند Zn-O هم به نانوذرات اکسید روی نسبت داده شده است [۲۶].

شکل (۳) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی داربست‌های نانوکامپوزیتی پلی‌کاپرولاکتون/نانوذرات اکسید روی را که با مقادیر 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 نانوذرات اکسید روی است یکپارچه‌ترین مورفولوژی ساختاری را دارد. در واقع، نانوذرات اکسید روی در این داربست به‌طور کاملاً یکنواخت در زمینه پلیمری پراکنده شده‌اند و یکپارچگی و انسجام مطلوبی در ساختار ایجاد کرده‌اند. درحالی‌که، با افزایش درصد وزنی نانوذرات اکسید روی در زمینه پلی‌کاپرولاکتون، عدم یکپارچگی و از هم گسیختگی ساختار مشاهده می‌شود که به دلیل کلوخه‌ای شدن نانوذرات و از بین رفتن یکنواختی توزیع نانوذرات در زمینه پلیمر است.

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.

۳- نتایج و بحث

الگوی پراش پرتو ایکس داربست پلی‌کاپرولاکتون/نانوذرات اکسید روی که حاوی ۵ و ۱۵ درصد وزنی نانوذرات اکسید روی، در شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوی پراش پرتو ایکس داربست‌های تهیه شده، پیک‌های واضح و متمایز نانوذرات اکسید روی که با کارت مرجع فاز به شماره ۷۰۶۰-۲۱۰-۹۶ مطابقت دارد و پلی‌کاپرولاکتون [۲۳] را نشان می‌دهد. میزان بلورینگی داربست‌های ساخته شده نیز با بررسی الگوی پراش پرتو ایکس این داربست‌ها مقدار تقریبی ۴۸ درصد به‌دست آمد که نزدیک به مقدار بلورینگی پلی‌کاپرولاکتون با وزن مولکولی ۸۰۰۰۰ است [۲۴]. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، با افزایش درصد نانوذرات اکسید روی در داربست نانوکامپوزیتی ساخته شده، بر شدت پیک‌های مربوط به نانوذرات اکسید روی افزوده و از شدت پیک‌های مربوط به پلی‌کاپرولاکتون کاسته می‌شود.

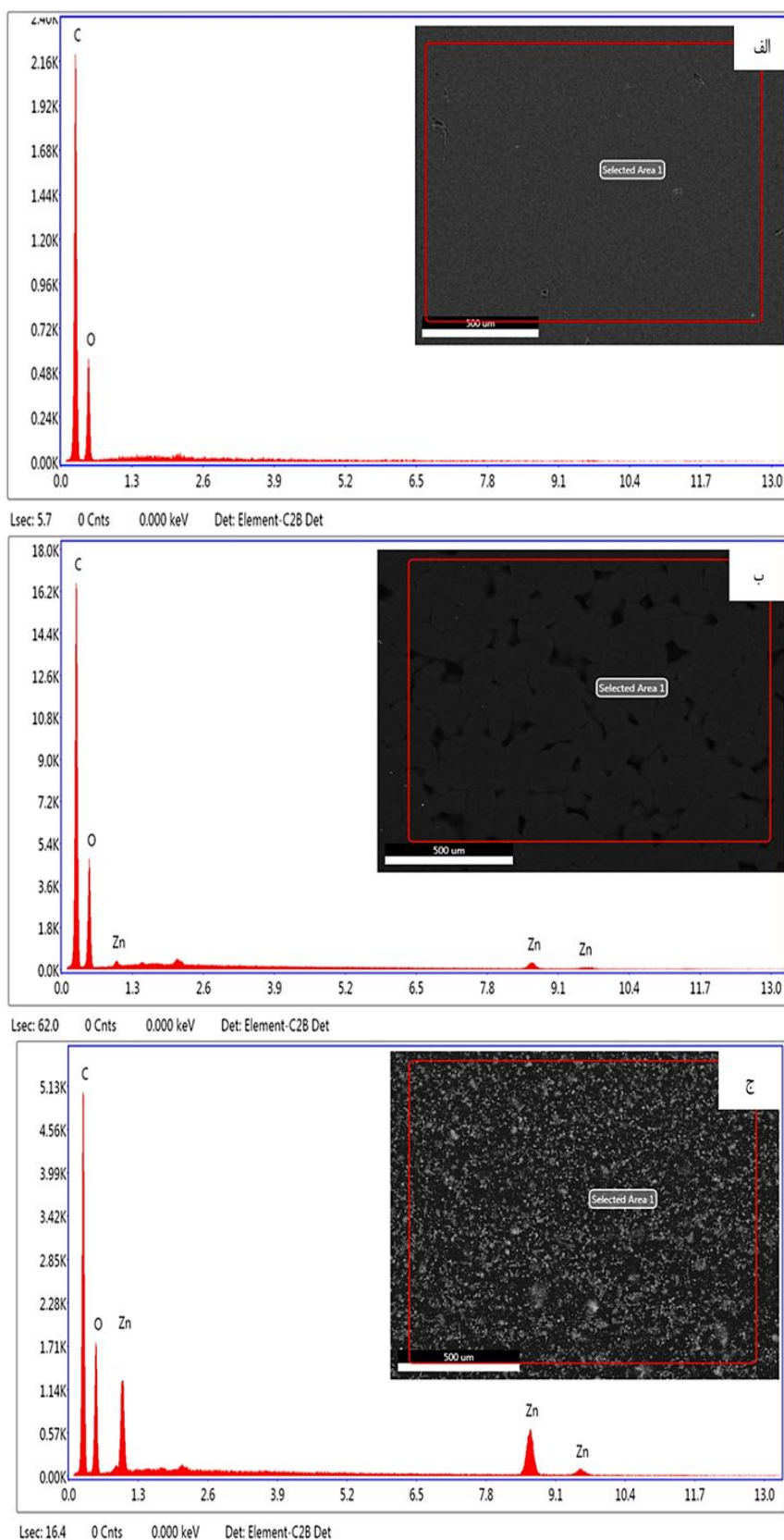


شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی داربست‌های نانوکامپوزیتی پلی‌کاپرولاکتون/ اکسید روی با: (الف صفر، ب ۵ و ج) ۱۵ درصد وزنی نانوذرات اکسید روی.

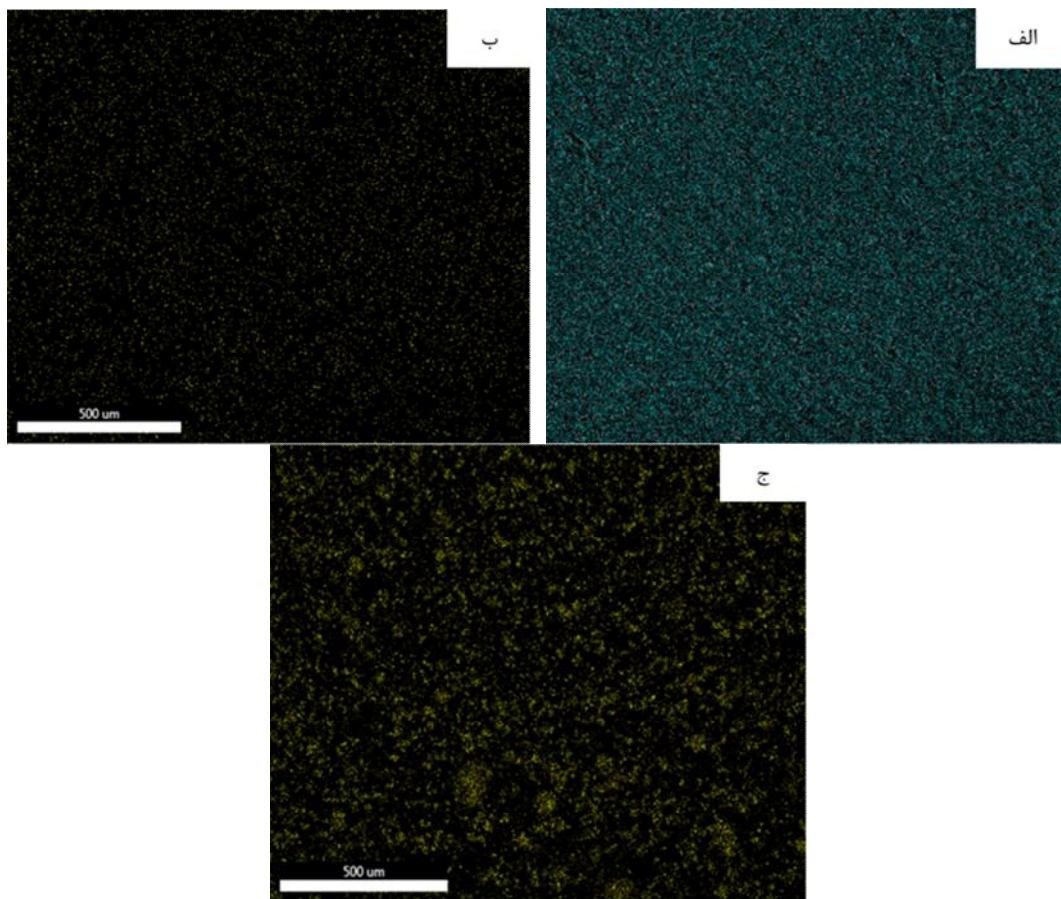
برای بررسی اثر مورفولوژی داربست و میزان نانوذرات دی‌اکسید روی وارد شده در زمینه پلیمر بر خواص مکانیکی داربست‌های ساخته شده، نمونه‌ها مورد آزمون استحکام فشاری قرار گرفتند. تغییرات استحکام فشاری و مدول فشاری داربست‌های نانوکامپوزیتی پلی‌کاپرولاکتون/ اکسید روی، به‌منظور ارزیابی خواص مکانیکی داربست‌ها به‌ترتیب در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است. همچنین، نمودارهای تنش- کرنش داربست‌های ساخته شده در شکل (۸) آورده شده‌اند. در شکل (۶) مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار نانوذرات اکسید روی تا ۵ درصد وزنی، استحکام فشاری افزایش می‌یابد که این نتایج با تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی داربست نانوکامپوزیتی پلی‌کاپرولاکتون/ نانوذرات اکسید روی که حاوی ۵ درصد وزنی نانوذرات اکسید روی است مطابقت دارد چراکه ذرات اکسید روی در این داربست به‌طور کاملاً یکنواخت در زمینه پلیمری پراکنده شده‌اند و یکپارچگی و انسجام مطلوبی در ساختار ایجاد کرده‌اند. چراکه این داربست، بالاترین استحکام و مدول فشاری را نیز از خود نشان داد. در شکل (۷) دیده می‌شود که با همین مقدار افزایش در مقدار نانوذرات اکسید روی، میزان مدول فشاری داربست، کاهش می‌یابد که با توجه به انحراف معیار مشخص شده می‌توان نتیجه گرفت که این افت مدول، قابل اغماض است. اما با افزایش بیشتر مقدار نانوذرات تا ۱۵ درصد وزنی، میزان

علاوه بر این، شکل (۴) آنالیز عنصری طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس داربست‌های نانوکامپوزیتی پلی‌کاپرولاکتون/ نانوذرات اکسید روی را نشان می‌دهد. آنالیز عنصری نشان می‌دهد که اکسیژن و کربن عناصری هستند که در ساختار پلی‌کاپرولاکتون 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.

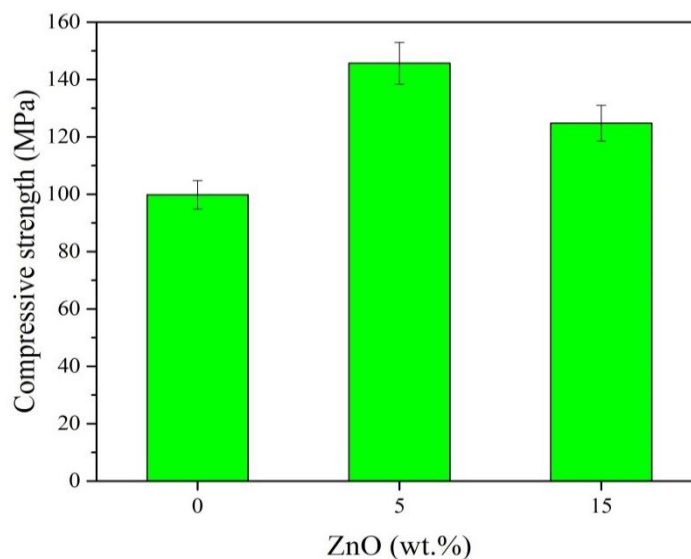
به‌منظور بررسی دقیق‌تر یکنواختی توزیع نانوذرات اکسید روی در زمینه پلیمر، از نمونه‌های ساخته شده، نقشه آنالیز عنصری تهیه شد. شکل (۵) نقشه آنالیز عنصری داربست‌های نانوکامپوزیتی پلی‌کاپرولاکتون/ نانوذرات اکسید روی را نشان می‌دهد. شکل (۵-الف) نشان می‌دهد، اکسیژن و کربن تنها عناصر در داربست نانوکامپوزیتی هستند و هیچ تقویت‌کننده‌ای در داربست نانوکامپوزیتی وجود ندارد. در شکل (۵-ب)، نقشه آنالیز عنصری توزیع یکنواخت نانوذرات اکسید روی در زمینه پلی‌کاپرولاکتون نشان می‌دهد. شکل (۵-ج) نشان می‌دهد که با افزایش درصد وزنی نانوذرات اکسید روی در زمینه پلیمری داربست، همچنان نانوذرات اکسید روی به‌طور یکنواخت در زمینه توزیع شده‌اند.



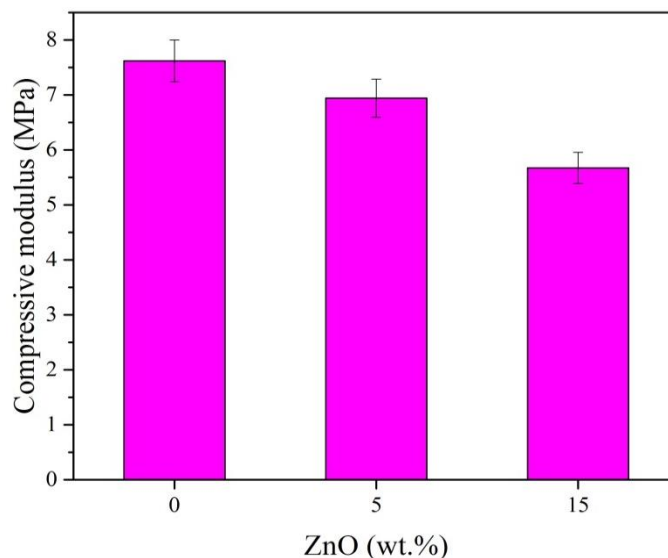
شکل ۴- آنالیز عنصری طیف‌سنجی پراش انرژی پروتو ایکس داربست‌های نانوکامپوزیتی پلی‌کاپرولاکتون/ اکسید روی با: (الف) صفر ب) ۵ و ج) ۱۵ درصد وزنی نانوذرات اکسید روی.



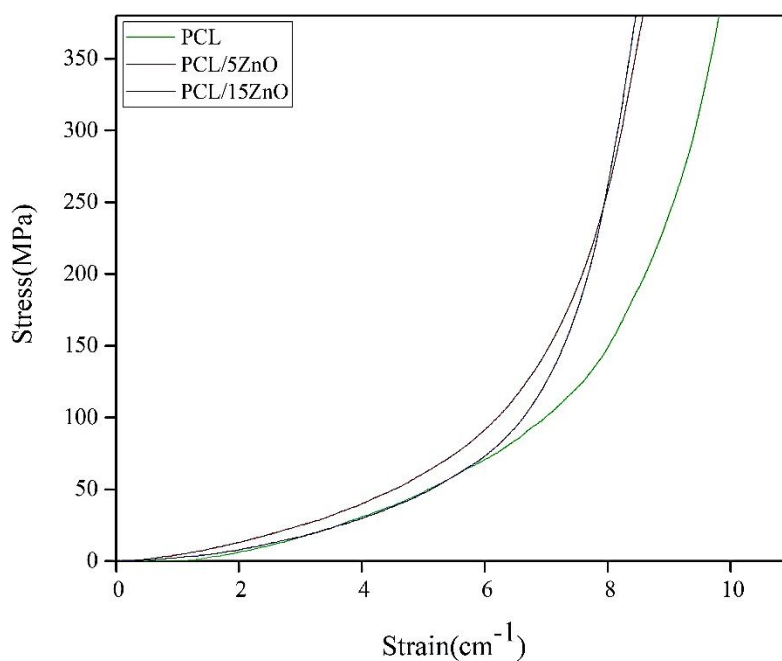
شکل ۵- نقشه عنصری طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس داربست‌های نانوکامپوزیتی پلی‌کاپرولاکتون/ اکسید روی با: (الف) صفر ب) ۵ و ج) ۱۵ درصد وزنی نانوذرات اکسید روی.



شکل ۶- تغییرات استحکام فشاری داربست‌های نانوکامپوزیتی پلی‌کاپرولاکتون/ اکسید روی تهیه شده با درصدهای وزنی متفاوت اکسید روی.



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



شکل ۸- نمودار تنش - کرنش داربست‌های نانوکامپوزیتی پلی‌کاپرولاکتون/ اکسید روی با درصدهای وزنی متفاوت اکسید روی.

تقویت‌کننده بیش از ۵ درصد وزنی استحکام نمونه‌ها کاهش یافته است، ولی نسبت به نمونه مرجع استحکام بیشتر است. دیبا و همکارانش [۲۸] نشان دادند با افزودن تقویت‌کننده به پلیمر به دلیل کاهش تخلخل، اندازه منافذ و پودر تقویت‌کننده باعث افزایش استحکام فشاری می‌شود. 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 نمونه‌ها افزایش یافته است. با افزایش درصد

به ۵ درصد وزنی افزایش پیدا می‌کند استحکام فشاری داربست‌ها رو به افزایش بوده و مورفولوژی 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 به عمل آورند.

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

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

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، داربست‌های نانوکامپوزیتی پلی‌کاپرولاکتون/نانوذرات اکسید روی با مقادیر ۰، ۵ و ۱۵ درصد وزنی از نانوذرات اکسید روی و به روش ریخته‌گری 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 پلی‌کاپرولاکتون/نانوذرات اکسید روی نشان داد که با افزایش درصد وزنی نانوذرات اکسید روی به‌عنوان تقویت‌کننده در زمینه پلی‌کاپرولاکتون منجر به افزایش استحکام و مدول فشاری داربست‌های ساخته شده می‌شود. تا زمانی که مقدار نانوذرات پراکنده شده در زمینه پلی‌کاپرولاکتون

واژه‌یاب

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.
2. 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.
5. 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.
6. 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.
8. Lemos, E.M., Patricio, 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.
10. 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.
 13. 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.
 15. 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.
 16. 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.
 19. 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., Kumar 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.
 23. 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 (ϵ -caprolactone)(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 (ϵ -caprolactone)/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 OXIDE CONTENT AND SCAFFOLD MORPHOLOGY ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF POLY(ϵ -CAPROLACTONE) / ZINC OXIDE NANOCOMPOSITE 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(ϵ -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 co-precipitation 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

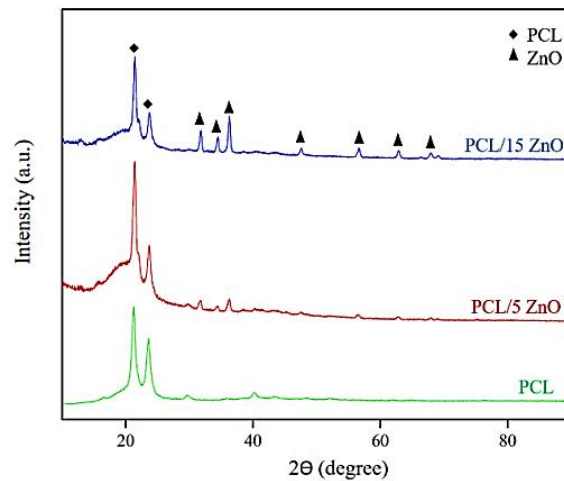


Figure 1. XRD patterns of PCL/ZnO nanocomposite scaffolds with 0, 5, and 15 wt.% ZnO nanoparticles.

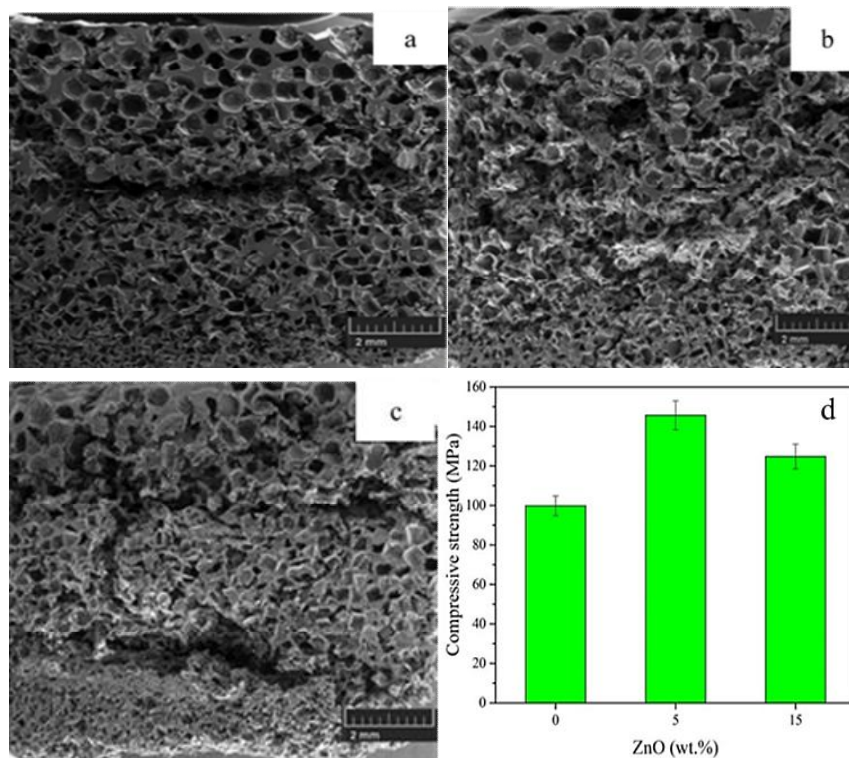


Figure 2. SEM images of PCL/ZnO nanocomposite scaffolds with a) 0, b) 5, c) 15 wt.% ZnO nanoparticles, and d) compressive strength changes of PCL/ ZnO nanocomposite scaffolds.

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.

2. 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.
3. 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.