

## ساخت نانوالیاف جاذب نوترون حرارتی جهت تولید روپوش‌های محافظ در برابر تابش نوترون

معصومه خبازی، شیوا شه‌شناس\* و محمد غفوری

دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر، شبستر، آذربایجان شرقی، ایران.

\*آذربایجان شرقی، شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر، دانشکده علوم پایه، کدپستی: ۵۳۸۱۶-۳۷۱۸۱

پست الکترونیکی: sh.shahshenas@gmail.com

### چکیده

در این مقاله نانوالیاف نیتريدبور (BN) برای جذب تابش نوترون‌های حرارتی با هدف دوخت روپوش‌های بیمارستانی تولید و آزمایش شد. نمونه‌ها با استفاده از روش الکتروریسی با درصد وزنی ۷٪، ۱۰٪، ۱۲٪ و ۱۵٪ برای نیتريدبور تهیه شده‌اند. نمونه‌ها با قرارگرفتن در برابر چشمه نوترون گرمایی با آشکارساز ایندیوم تست شده و سطح مقطع کل در واحد جرم نمونه‌ها و ورقه کادمیوم در شرایط یکسان برای نوترون‌های گرمایی اندازه‌گیری شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان می‌دهند که افزایش نسبت بور در نمونه‌ها مستقیماً بر کاهش نوترون عبوری تأثیرگذار بوده که نشان‌دهنده توزیع یکنواخت بور در نانوالیاف تولیدشده می‌باشد. هم‌چنین سطح مقطع کل در واحد جرم اندازه‌گیری شده نمونه‌ها در مقایسه با کادمیوم بسیار بالاتر می‌باشد. نمونه‌های تولیدشده ساختار پارچه‌مانند دارند، قابلیت برش و دوخت داشته، سبک بوده و برای تولید روپوش‌های محافظ در برابر تابش نوترون کاملاً مناسب هستند.

**کلیدواژگان:** نانوالیاف، نیتريدبور، حفاظت در برابر تابش، نوترون گرمایی، الکتروریسی.

### ۱. مقدمه

مناسب بوده ولی برای جذب نوترون ناکارآمد هستند. به‌علاوه این لباس‌ها علاوه‌بر سمی بودن، سنگین، خشک و شکننده هستند و استفاده طولانی‌مدت آن‌ها برای کارکنان دشوار و گاهی غیرممکن است. نمونه‌هایی از پوشش‌های لیاف‌مانند در سال‌های اخیر به‌صورت پتنت تولید و به بازار عرضه شده‌اند که عمدتاً بسیار گران‌قیمت می‌باشند و جزئیات ساخت آن‌ها در انحصار شرکت تولیدی می‌باشد [۲]. حفاظ‌سازی نوترونی به‌خاطر در نظر گرفتن گستره‌ی بزرگی از انرژی‌ها بسیار پیچیده است. باریکه‌های نوترونی را می‌توان در انواع مختلف

کار در مراکز رادیواکتیو شرایط خاصی دارد. اگر در هنگام استفاده از این پرتوها، بهترین شرایط کنترلی و حفاظتی نیز اعمال شود، باز هم پرسنل در معرض تابش درصدی از این پرتوها خواهند بود. در واقع نمی‌توان به‌طور کامل جلوی نفوذ پرتوها را گرفت بلکه می‌توان متناسب با زمان تابش و شدت آن محافظ‌هایی را طراحی نمود تا دز دریافتی پرسنل و پرتوکاران، در حد مجاز پرتوگیری شغلی کنترل شود [۱].

لباس محافظ استفاده‌شده در مراکز درمانی از پودر سرب ساخته شده‌اند که برای جذب پرتوهای گاما و ایکس ثانویه

واکنش‌های هسته‌ای ایجاد کرد. همه نوترون‌ها در هنگام تولید، نوترون‌های سریع به‌شمار می‌آیند. نوترون‌های سریع ابتدا در اثر برخورد کشسان با اتم‌های محیط، انرژی خود را ازدست می‌دهند و پس از کند شدن و رسیدن به انرژی گرمایی یا نزدیک به آن، توسط هسته‌های ماده جاذب گیراندازی می‌شوند. امکان وقوع چند نوع واکنش هسته‌ای برای نوترون‌ها وجود دارد ولی واکنش‌های غالب همان پراکندگی کشسان و گیراندازی می‌باشند که گیراندازی با گسیل فوتون یا ذره‌ای دیگر از هسته‌ی ماده جاذب همراه خواهد بود [۳ و ۱].

نانوالیاف موادی هستند که خواص مکانیکی و حرارتی منحصربه‌فرد و بالایی دارند. زیادبودن نسبت سطح به حجم این مواد باعث می‌شود تا شدیداً فعال و برهم‌کنش‌گر باشند. به‌همین دلیل از این مواد در علوم و زمینه‌های مختلفی از جمله بیوپزشکی، ساخت پلیمرهای خودتخریب‌شونده و سازگار با محیط زیست، نانو سنسورهای بیولوژیکی و غیره استفاده می‌شود [۵ و ۴]. یکی از ساده‌ترین روش‌های تولید این مواد، روش الکتروروسی است. در این روش، یک اختلاف پتانسیل قوی بین قطره یا محلول (نوک سوزن) و صفحه جمع‌کننده اعمال می‌شود. به‌خاطر بزرگ‌بودن این صفحه، قطره پخش شده و به الیافی با قطرهای نانو تقسیم می‌شود. در کل، سه عامل عمومی در تولید نانوالیاف با این روش تأثیر دارد:

۱) ویژگی‌های محلول (مانند غلظت، وزن مولکولی و ویسکوزیته [۶])، ۲) پارامترهای فرایندی (مانند ولتاژ اعمالی، آهنگ شارش محلول و فاصله سوزن تا جمع‌کننده [۷]) و ۳) پارامترهای محیطی (مانند رطوبت و دما [۸]). اگر چه تمامی پارامترها در به‌دست آوردن یک ساختار مطلوب مهم هستند ولی ولتاژ اعمالی، یکی از مهم‌ترین آن‌ها است. برای تبدیل قطره کروی‌شکل به مخروط تیلور که مهم‌ترین شرط برای تشکیل الیاف یکنواخت است، یک ولتاژ بحرانی و

آستانه وجود دارد [۹]. در این ولتاژ، جریان سریعی از ذرات باردار از مخروط تیلور خارج می‌شود که سرعت این ذرات باردار (که متناسب با میدان الکتریکی اعمالی است) به‌همراه غلظت محلول، قطر نهایی الیاف را تعریف می‌کند [۷].

نیتريدبور به‌خاطر ویژگی‌های منحصربه‌فردش مانند ضریب رسانش گرمایی بالا، انبساط گرمایی کم، مقاومت الکتریکی بالا و غیرسمی بودن معروف است و به شکل‌های مختلفی یافت می‌شود: الف) حالت آمورف، ب) هگزاگونال یا گرافیت سفید و ج) مکعبی یا الماسی. نوع مکعبی آن به‌خاطر مقاومت بسیار بالا در برابر خوردگی در برابر اسیدها، مقاومت الکتریکی بسیار بزرگ و سختی بسیار بالا شهرت دارد [۱۰]. از دیگر کاربردهای نیتريدبور، در نانوتکنولوژی است. نانوالیاف نیتريدبور به روش‌های مختلفی از جمله الکتروروسی تولید می‌شوند که الیاف تولیدشده با این روش، یکنواخت و بلند هستند [۱۱]. نانوالیاف نیتريدبور پیش از این نیز به‌روش الکتروروسی تولید شده‌اند اما برای استفاده به‌عنوان حفاظ هسته‌ای باید درصد بور در بافت لایه به‌حداکثر مقدار ممکن برسد. در روش الکتروروسی تعادل لازم بین حلال، ماده پلیمری و ماده افزودنی که در اینجا BN می‌باشد، باید برقرار شود تا علاوه بر تشکیل شدن نانوالیاف همگن، خواص مورد نظر (که در اینجا حداکثر سطح مقطع جذب نوترون می‌باشد) را دارا باشد [۱۵-۱۲].

هدف اصلی در این تحقیق تولید نانوالیافی است که پایه اصلی تولید لباس‌های جاذب نوترون شود تا دز دریافتی پرسنل و پرتوگیران در مراکز نوترون‌تراپی و یا سایر محیط‌های دارای تابش نوترونی به‌حداقل مقدار خود برسد. بدین منظور در این‌جا روش تولید الیاف اولیه این روپوش‌ها ارائه گردیده است. الیاف تولیدشده علاوه بر خاصیت جذب نوترونی بالا، باید ساختاری پارچه‌مانند داشته باشند تا علاوه بر این‌که قابل برش و دوخته‌شدن باشند، امکان حرکت آزادانه را

شده‌اند و ضخامت نهایی لایه‌های تولیدشده که آزمایش رادیواکتیو روی آن‌ها انجام شده است برای تمامی لایه‌ها ۵۰۰ میکرومتر می‌باشد. هم‌چنین چگالی اندازه‌گیری شده برای لایه‌های نهایی به‌طور میانگین  $0/27$  گرم برسانتی‌مترمکعب می‌باشد.

### ۳.۲. اندازه‌گیری درصد تضعیف نانوالیاف نیتريدبور

تمامی تست‌های پرتوهدی در آزمایشگاه "فیزیک نوترون" سازمان انرژی اتمی ایران انجام شده است. برای اندازه‌گیری قدرت تضعیف نانوالیاف در برابر نوترون گرمایی، از ورق اینیدیوم استفاده شده است. چشمه نوترونی آمرسیوم-برلیوم با اکتیویته ۵ کوری در میانه‌ی استوانه حاوی آب به شعاع تقریبی ۴۰ سانتی‌متر قرار گرفته یک استوانه تفلونی در جلوی یکی از دریچه‌ها نوترون‌های خروجی را به نوترون گرمایی مبدل می‌کند (انرژی نوترون‌ها در محدوده اپتیمال و گرمایی یعنی در بازه  $0/25$  تا  $0/04$  الکترون‌ولت می‌باشد). هر نمونه به مدت ۸ ساعت تحت تابش قرار گرفته و ورق اینیدیوم با برخورد نوترون‌ها فعال شده است، سپس گامای ساطع شده از اینیدیوم فعال شده برای مدت ۱۰۰۰۰ ثانیه شمارش شده است. گاما ساطع شده از اینیدیوم فعال شده متناسب با تعداد نوترون برخوردی به آن می‌باشد. یک ورق اینیدیوم به‌طور مستقیم در برابر باریکه نوترونی قرار گرفته و سپس با قراردادن لایه‌های مختلف نانوالیاف حاوی نیتريدبور بین باریکه نوترونی و سایر ورق‌های اینیدیوم مجدداً تابش انجام شده و گامای ساطع شده از هر ورق اینیدیوم فعال شده جداگانه شمارش شده است.

## ۳. بحث و نتایج

### ۱.۳. ساختار ریز

آنالیز ساختار ریز با استفاده از پراش اشعه ایکس (XRD)، AWXDM300، ASENWARE و میکروسکوپ الکترونی

برای کاربر فراهم کند و هم‌چنین قابل تولید در ابعاد بزرگ باشد تا نیاز مورد نظر را برطرف سازد.

## ۲. مواد و روش‌ها

این قسمت در دو بخش ارائه شده است. بخش اول، مرتبط با تولید نانوالیاف، مواد و روش تولید آن و بخش دوم، مربوط به میزان جذب نوترون حرارتی و تأیید کاربردی یا غیر کاربردی بودن این نانوالیاف می‌شود.

### ۱.۲. مواد

مواد شیمیایی استفاده شده، توسط شرکت مرک آلمان تولید شده است. تمامی نانوپودرهای خریداری شده دارای درصد ترکیب طبیعی ایزوتوپی می‌باشند. ابتدا پلی‌وینیل‌الکل در آب مقطر دی‌یونیزه حل شده و روی دستگاه همزن برقی قرار می‌گیرد. بعد از حل شدن کامل، یک محلول پلیمری یکنواخت و شفاف حاصل می‌شود. سپس، نیتريدبور با محلول پلیمری به دست آمده با نسبت‌های ۷، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ درصد وزنی مخلوط شده و روی همزن برقی هم زده می‌شود تا یکدست شود. محلول به دست آمده سفیدرنگ بوده و کاملاً یکنواخت می‌باشد.

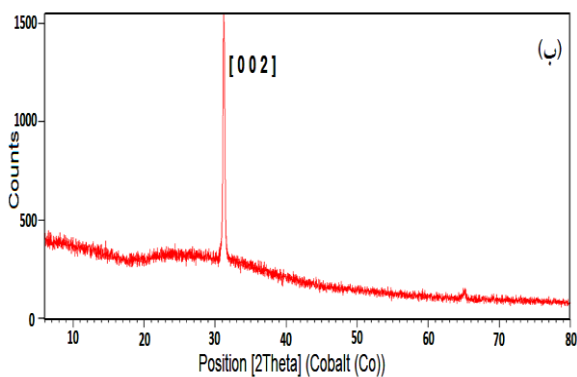
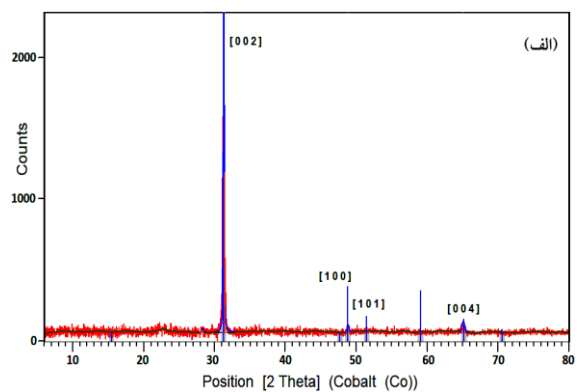
### ۲.۲. روش تولید

با استفاده از روش الکتروریسی از محلول آماده شده نانوالیاف مورد نظر تولید شد. پارامترهای اصلی کاربردی دستگاه الکتروریسی به شرح زیر است: ولتاژ اعمال شده بین سوزن و جمع‌کننده: ۱۹ کیلوولت، دبی انتشار محلول از سرنگ: ۵ میلی‌لیتر بر ساعت، فاصله بین نوک سوزن و صفحه جمع‌کننده: ۱۲ سانتی‌متر، سرعت خطی جمع‌کننده: ۱ میلی‌متر بر ثانیه و سرعت چرخش جمع‌کننده: ۱۲۵۰ دور در دقیقه. نمونه‌های تولیدشده به دلیل عایق الکتریکی بودن دارای ضخامت کم می‌باشند و برای افزایش ضخامت الیاف در نمونه آزمایشگاهی لایه‌های متوالی آن‌ها بر روی یکدیگر پرس

شکل ۲- الف طیف پراش پرتو X این نانوالیاف را نشان می‌دهد. تحلیل‌های انجام‌یافته با نرم‌افزار High Score plus Analyzer وجود نیتريدیور را به‌طور کامل تأیید می‌کند که با شماره مرجع ۹۶-۲۰۶-۶۱۷۱ منطبق است که بیانگر ساختار هگزاگونال است [۱۶].

### ۲.۱.۳. بررسی ساختاری نانوالیاف نیتريدیور ۱۰ درصد

شکل ۱- ب تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوالیاف نیتريدیور ۱۰ درصد تولیدشده به‌روش الکتروریسی را نشان می‌دهد. استفاده از تحلیل‌گر میکروسکوپ الکترونی قطر نانوالیاف را در محدوده ۱۹۰ تا ۳۸۰ نانومتر محاسبه می‌کند. نانوالیاف نیتريدیور ۱۰ درصد نیز دارای بافت نرم و همگن همانند نمونه‌ی ۷ درصد می‌باشد که بیانگر توزیع همگن و همسانگرد ذرات نیتريدیور داخل محلول پلی‌وینیل‌الکل است (شکل ۲- ب).



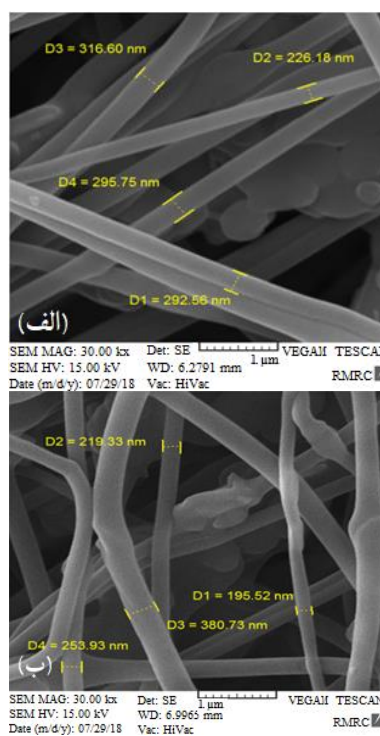
شکل (۲): نمودار نتایج به‌دست آمده از پرتونگاری XRD برای

نانوالیاف (الف): BN ۷٪ (ب): BN ۱۰٪.

روبشی (SEM)، VEGA\TESCAN-XMU، برای دو نمونه ۷ و ۱۰ درصد انجام شده است. تا حضور ذرات نیتريدیور در محلول تأیید گردد. چرا که به‌دلیل عدم حل شدن ذرات در محلول تهیه‌شده امکان ته‌نشینی و عدم حضور ماده افزوده‌شده در الیاف تشکیل‌شده نهایی وجود دارد.

### ۱.۱.۳. بررسی ساختاری نانوالیاف نیتريدیور ۷ درصد

شکل ۱- الف تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوالیاف نیتريدیور ۷ درصد تولیدشده به‌روش الکتروریسی را نشان می‌دهد. استفاده از تحلیل‌گر میکروسکوپ الکترونی قطر نانوالیاف را در محدوده ۲۲۰ تا ۳۲۰ نانومتر محاسبه می‌کند. بافت نرم و همگن این نانوالیاف بیانگر توزیع همگن و همسانگرد ذرات نیتريدیور داخل محلول پلی‌وینیل‌الکل است. این توزیع همگن بور در بافت حفاظ، امکان جذب یکنواخت نوترون را در همه‌ی قسمت‌های آن فراهم می‌نماید.



شکل (۱): مورفولوژی نانوالیاف در تصویر میکروسکوپ الکترونی

روبشی (SEM) (الف): BN ۷٪ (ب): BN ۱۰٪.

جدول (۱): میانگین شمارش نوترون حرارتی در حضور دو نمونه نانوالیاف و ورق کادمیوم و بدون حضور حفاظ و مشخصات فیزیکی حفاظ‌ها.

نوع حفاظ	شمارش	سطح مقطع کل در واحد جرم (cm <sup>2</sup> /g)
نمونه بدون BN	۲۹۲۳	۵/۳
BN ۷٪	۲۴۲۷	۱۹/۱
BN ۱۰٪	۲۳۱۰	۲۲/۸
BN ۱۲٪	۲۱۲۷	۲۸/۹
BN ۱۵٪	۱۹۷۵	۳۴/۴
Cd لایه	۲۴۱	۴/۲
بدون حفاظ	۳۱۴۲	-

#### ۴. نتیجه‌گیری

برای جذب نوترون‌های حرارتی نانوالیاف‌های BN با دو درصد جرمی متفاوت ۷، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ درصد تولید و در محدوده انرژی این نوترون‌ها به همراه کادمیوم از لحاظ قدرت حفاظ‌سازی تست شد. نتایج نشان‌دهنده این است که سطح مقطع برهم‌کنش نمونه‌ها در واحد جرم بسیار بالاتر از کادمیوم در شرایط یکسان می‌باشد و بنابراین لایه‌هایی با قدرت جذب نوترون یکسان از نمونه مورد نظر، بسیار سبک‌تر از کادمیوم با همان میزان قدرت جذب می‌باشد.

همان‌طور که از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده مشخص است، قدرت جذب در ۱۵ درصد جرمی بیش‌تر است؛ افزایش بیش‌تر پودر نیتريدبور در محلول، ویسکوزیته محلول را افزایش داده و محلول قابل ریسندهی نخواهد بود. با توجه به این‌که نمونه نهایی کاملاً مشابه یک لایه پارچه می‌باشد، به راحتی قابل برش و دوخت بوده و می‌توان از آن‌ها در ساختار هر گونه لباس، پوشش و دستکش استفاده کرد.

#### ۲.۳. نتایج اندازه‌گیری سطح مقطع ماکروسکوپیکی و

#### سطح مقطع کل در واحد جرم

جدول ۱ نتایج شمارش و سطح مقطع کل در واحد جرم اندازه‌گیری‌شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که از داده‌های جدول مشخص است با افزایش درصد حضور بور در نانوالیاف شدت تضعیف افزایش می‌یابد. ضخامت تمامی لایه‌ها ۵۰۰ میکرومتر بوده که نتایج آن‌ها با کادمیوم ۷۰۰ میکرومتری مقایسه شده است و سپس با استفاده از چگالی و ضخامت لایه‌ها و کادمیوم سطح مقطع کل در واحد جرم  $\Sigma_{tg} = \frac{\Sigma t}{\rho}$  (cm<sup>2</sup>/g) محاسبه شده است. چگالی

کادمیوم ۸/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شده است و چگالی نمونه‌ها به‌طور میانگین ۰/۷۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. سطح مقطع کل در واحد جرم اندازه‌گیری‌شده به‌صورت تجربی در جدول ۱ برای هر چهار نمونه و هم‌چنین کادمیوم که هم‌زمان با نمونه تست‌شده، آورده شده است. بدین ترتیب می‌توان سطح مقطع به‌ازای واحد جرم نمونه را به‌دست آورد و به راحتی مقایسه کرد که کدام یک از نمونه‌ها و هم‌چنین کادمیوم با قدرت تضعیف یکسان جرم کم‌تری خواهند داشت. از آن‌جا که هدف، تولید نانوالیافی به‌عنوان مواد اولیه لباس محافظ در برابر تابش نوترون است، سبک بودن و ساختاری الیاف‌گونه داشتن نمونه نهایی، مهم‌ترین ویژگی مد نظر ما می‌باشد. همان‌طور که داده‌های جدول نشان می‌دهد، سطح مقطع کل در واحد جرم با افزایش درصد نیتريدبور در نمونه افزایش یافته است و هم‌چنین سطح مقطع کل در واحد جرم نمونه‌ها نسبت به کادمیوم بسیار بالاتر است. این بدان معنی است که با داشتن تضعیف یکسان توسط نانوالیاف تولیدشده و کادمیوم جرم نهایی حفاظ حاصل از نانوالیاف بسیار سبک‌تر خواهد بود.

## ۵. مراجع

- [1] N. Tsoulfanidis. Measurement and Detection of Radiation, Taylor & Franc.
- [2] M.W. Friedman and M.S. Sign. Radiation Transmission Measurements For Demron Fabric, UCRL-ID-151234, Lawrence Livermore National Library, January 7 (2003).
- [3] H. Cember and T.E. Johnson. Introduction to Health Physics, Fourth Edition (2008).
- [4] A. Haider, K.C. Gupta and I.K. Kang. PLGA/nHA hybrid nanofiber scaffold as a nanocargo carrier of insulin for accelerating bone tissue regeneration, *Nanoscale research letters*, 314 (2014) 1165–1188.
- [5] G. Wei and P.X. Ma. Nanostructured biomaterials for regeneration, *Advanced functional materials*, 18 (2008) 3568–3582.
- [6] A. Koski, K. Yim and S. Shivkumar. Effect of molecular weight on fibrous PVA produced by electrospinning, *Materials Letters*, 58 (2004) 493–497.
- [7] O. Yördem, M. Papila and Y.Z. Menceloğlu. Effects of electrospinning parameters on polyacrylonitrile nanofiber diameter: An investigation by response surface methodology, *Materials & design*, 29 (2008) 34–44.
- [8] C.L. Casper, J.S. Stephens, N.G. Tassi, D.B. Chase and J.F. Rabolt. Controlling surface morphology of electrospun polystyrene fibers: effect of humidity and molecular weight in the electrospinning process, *Macromolecules*, 37 (2004) 573–578.
- [9] M.J. Laudenslager and W.M. Sigmund. Electrospinning, in: *Encyclopedia of nanotechnology*, Springer (2012) 769–775.
- [10] X.F. Jiang, Q. Weng, X.B. Wang, X. Li, J. Zhang, D. Golberg and Y. Bando. Recent progress on fabrications and applications of boron nitride nanomaterials: a review. *Journal of Materials Science & Technology*, 31 (2015) 589–598.
- [11] J. Lin, L. Xu, Y. Huang, J. Li, W. Wang, C. Feng and Z. Liu. Ultrafine porous boron nitride nanofibers synthesized via a freeze-drying and pyrolysis process and their adsorption properties, *RSC Advances*, 6 (2016) 1253–1259.
- [12] G. Eda and S. Shivkumar. Bead-to-fiber transition in electrospun polystyrene, *Journal of Applied Polymer Science*, 106 (2007) 475–487.
- [13] S. Nagarajan, H. Belaid, C. Pochat-Bohatier, C. Teyssier, I. Iatsunskyi, E. Coy, S. Balme, D. Cornu, P. Miele, N.S. Kalkura, V. Cavailes and M. Bechelany. Design of Boron Nitride/Gelatin Electrospun Nanofibers for Bone Tissue Engineering, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 9(39) (2017) 33695–33706.
- [14] J. Lin, L. Xu, Y. Huang, J. Li, W. Wang, C. Feng, Z. Liu, X. Xu, J. Zou and C. Tang. Ultrafine porous boron nitride nanofibers synthesized via a freeze-drying and pyrolysis process and their adsorption properties, *RSC Adv*, 6 (2016), 1253–1259.
- [15] H.J. Hwang, N.A.M. Barakat, M.A. Kanjwal, F.A. Sheikh, H.Y. Kim and M.F. Abadir. Boron nitride nanofibers by the electrospinning technique, *Macromolecular Research*, 18(6) (2010) 551–557.
- [16] B. Ertuğ, T. Boyraz and A.O. Addemir. Microstructural Aspects Of The Hot Pressed Hexagonal Boron Nitride Ceramics With Limited Content Of Boron Oxide, *Materials Science Forum*, 554 (2007) 197–200.