

تهیه و بررسی خصوصیات نانوالیاف بر پایه پودر سربین ابریشم

چکیده

همکاری حاضر، تولید و بررسی خصوصیات نانوالیاف سربین ابریشم (SS) را از طریق الکتروریسی گزارش می‌دهد. عامل غلظت محلول روی ظاهر مورفولوژیکی و قطر متوسط غشاهای سربین ابریشم الکتروریسی شده، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. ساختار و خواص فیزیکی بواسطه طیفسنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FT-IR)، گرماسنجی پویشی تفاضلی (DSC) و آنالیز گرماوزنسنجی (TGA) مورد مطالعه قرار گرفتند. همه بیدها (نایکنواختی‌ها و برجستگی‌ها) در غلظت‌های کمتر محلول سربین ابریشم (۱/۳-۸/۵ درصد وزنی) مشاهده شدند و الیاف دارای بید از محلول سربین ۹/۶، ۱۱/۷، ۱۴/۲ و ۱۶/۵ درصد وزنی بدست آمدند. نانوالیاف مطلوب و بی‌نقص دارای قطرهای متوسط ۱۴۵ و ۱۸۴ نانومتر بودند که به ترتیب از محلول ۲۰/۹ تا ۲۲/۹ درصد وزنی سربین ابریشم تهیه شدند. نتایج بدست آمده از FT-IR نشان دادند که در الیاف تازه ریسیده شده، سربین ابریشم در صورت بندی مارپیچ تصادفی وجود داشتند، در حالی که بعد از عملیات حرارتی، ساختار مولکولی سربین ابریشم به ساختار حاوی ورقه بتا (β -sheet) تغییر شکل پیدا کرد. آنالیز DSC و TGA نشان دادند که تری فلئورواستیک اسید بواسطه حرارت‌دهی می‌تواند زوده شود. در دسترس بودن نانوالیاف سربین ابریشم، مجموعه جدیدی از کاربردهای این الیاف جالب را در مقیاسی که تاکنون کشف نشده بود، معرفی می‌کند. کاربردهای جدیدی از جمله الیاف با قطر کوچک برای اهداف تکثیر سلولی، نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف برای نانو تکنولوژی، پانسمان‌های مخصوص زخم، داربست یا اسکلت‌ها برای مهندسی بافت و دیگر کاربردهای زیست پزشکی.

مقدمه

منظور افزایش سختی پیلۀ ابریشم، فواصل خالی چهارچوب لیفی را پر می‌کند. سربین نقش مهمی را در فرایند ریسندگی کرم ابریشم و ساخت پیلۀ نیرومند، بازی می‌کند. هرچند، به منظور دستیابی به جلا و زبردست مناسب، پروتئین سربین ابریشم بایستی حذف شود. پروتئین سربین زوده شده، معمولاً دور ریخته می‌شود، اما تلاش‌های زیادی برای بازیافت آن به عنوان یک منبع طبیعی صورت گرفته است.

الکتروریسی یک تکنیک ریسندگی ساده برای ایجاد الیاف با قطر در محدوده ۲ نانومتر تا چندین میکرومتر می‌باشد، که یک شبکه

فیلامنت پیلۀ کرم ابریشم بامبیکس موری از دو پروتئین ابریشم تشکیل شده است: فیبروئین ابریشم (SF) و سربین ابریشم (SS). سربین از خانواده پروتئین‌ها می‌باشد که منحصراً در غدد ترشجی میانی کرم ابریشم سنتز می‌شود و به صورت محلول آبکی تا لحظه ریسندگی ذخیره می‌شود و در محدوده اندازه از ۶۵ تا ۴۰۰ کیلودالتون می‌باشد. مقدار سربین، ۲۰ تا ۳۰ درصد وزنی فیلامنت پیلۀ ابریشم می‌باشد. سربین، الیاف فیبروئین را در پیلۀ ابریشم احاطه می‌کند و به عنوان یک چسب پروتئینی عمل می‌کند و به



کردیم که مواد نانولیفیِ سربسین را از پودر سربسین از طریق فرایند الکترورسی تولید کنیم.

پیدا کردن یک حلال خوب برای تولید پلیمر طبیعی، یک گام بسیار مهم برای کاربرد آن می‌باشد. در مورد فیبروئین ابریشم، HFIP یا اسید فرمیک به عنوان حلال استفاده می‌شوند. بطور غیرمنتظره‌ای، تا آنجایی که ما می‌دانیم، گزارشات معدودی در مورد حلال‌های دیگر برای سربسین ابریشم به منظور دستیابی به نانولیف از طریق الکترورسی وجود دارند. در این مقاله، هدف نهایی، تولید نانولیف سربسین ابریشم از طریق تکنیک الکترورسی و آنالیز ساختار نانولیف سربسین می‌باشد. در ابتدا، ما دریافتیم که سربسین ابریشم می‌تواند در اسید تری‌فلئورواستیک (TFA) حل شود و سپس ما سعی کردیم که بهترین شرایط ممکن را برای فرایند الکترورسی و آنالیز ساختار و خواص نانولیف سربسین ابریشم دریابیم.

۲- مواد و تجربیات

۲-۱- مواد

سربسین به شکل پودر (Lot No.0704206) از کمپانی ژاپنی Seiren تهیه شد. تری‌فلئورواستیک اسید (TFA)، محصول تجاری کمپانی صنعتی ژاپنی Wako، بدون هیچگونه خالص‌سازی مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۲- تهیه محلول سربسین ابریشم

پودر سربسین ابریشم در تری‌فلئورواستیک اسید برای تشکیل محلول رقیق پلیمری یکنواخت حل شد. محلول در ۲۵ درجه سانتیگراد بطور مداوم با همزن مغناطیسی به مدت ۷ روز هم‌زده شد. بدین ترتیب، غلظت‌های مختلف محلول سربسین (۱/۳، ۲/۶، ۳/۸، ۹/۶، ۱۱/۷، ۱۴/۲، ۱۶/۵، ۲۰/۹، ۲۲/۹ درصد وزنی) بدست آمدند.

۲-۳- الکترورسی

الکترورسی محلول‌ها، تحت شرایط جوی طبیعی انجام شد. تجهیزات الکترورسی مورد استفاده در این مطالعه شامل یک سُرنگ (SS-05LZ)، کمپانی Terumo (ژاپن) و سوزن (NN-2238N، کمپانی Terumo)، یک صفحه جمع‌کننده آلومینیومی، پمپ سُرنگ و منبع تغذیه ولتاژ بالا (کمپانی Kato ژاپن) بودند. سرعت ریسندگی پمپ سُرنگ در محدوده ۰/۰۳-۰/۳۲۰ سانتیمتر بر دقیقه تنظیم شده بود. منبع تغذیه ولتاژ بالا در محدوده ۰ تا ۴۰ کیلوولت بکار گرفته شد. محلول نمونه درون سُرنگ ۵ میلی‌لیتری قرار داده شد و سوزن ضد زنگ سُرنگ (قطر داخلی ۰/۳ میلی‌متر) به منبع تغذیه ولتاژ بالا متصل شد. ولتاژ بین انتهای سوزن و صفحه جمع‌کننده بکار رفت. وب‌های نانولیفی روی صفحه جمع‌کننده آلومینیومی تولید شدند. الکترورسی با مقادیر فاصله

متخلخل سه‌بعدی از نانولیف را با نسبت منظر (طول به قطر) بالا و سطح مخصوص بزرگ، بواسطه کشش و تفکیک محلول پلیمری تحت میدان الکتریکی ولتاژ بالا، ایجاد می‌کند. هنگامی که قطره محلول پلیمری تحت میدان الکتریکی کاربردی قرار می‌گیرد، قطره تغییر شکل می‌دهد و به شکل یک ساختار مخروطی شکل به نام مخروط تیلور (Taylor) کشیده می‌شود. جت مایع ابتدا از قطره، در یک خط تقریباً مستقیم خارج می‌شود؛ هرچند، جت در مسیر پیچیده‌ای خم می‌شود و تغییرات دیگر در شکل آن، به دلیل ایجاد ناپایداری خمشی حاصله از نیروهای دافعه متقابل بارهای الکتریکی جت‌ها، به وقوع می‌پیوندد. علاوه بر این، تنش‌های ویسکوالاستیک از ناپایداری موئینگی حاصل از کشش سطحی جلوگیری می‌کنند. در نتیجه جت‌ها به جمع‌کننده متصل به زمین برخورد می‌کنند و به صورت تصادفی مثل یک غشای بی‌بافت روی آن می‌نشینند. لیاف فوق ظریف از انواع گوناگونی از مواد از جمله پلیمرها، کامپوزیتها، مواد سرامیکی، و استات سلولز از طریق فرایند الکترورسی تولید شده بودند. به دلیل نسبت مساحت سطح به حجم یا جرم بالای لیاف الکترورسی شده، کاربردهای بالقوه این مواد لیافی، معالجه زخم، مهندسی بافت، و داروسازی در زمینه زیست‌پزشکی می‌باشند.

هم مواد پلیمری مشتق شده طبیعی و هم مواد پلیمری آبدوست سنتزی، که دارای زیست‌سازگاری خوبی هستند، قویاً به عنوان مواد زیستی پزشکی مورد تحقیق قرار گرفته‌اند. سربسین ابریشم حاوی آمینواسیدهای آبدوست زیادی از جمله سربین (در حدود ۳۵ درصد) می‌باشد، که به آن آبدوستی بالا و حساسیت به اصلاحات شیمیایی را اهدا می‌کند. سربسین ابریشم، به دلیل مشخصات ممتاز، مثل القای هسته‌زایی ناهمگن آپاتیت که اتصال فیبروبلاست پوست انسان را بهبود می‌بخشد و تمایل به پوست انسان و مو، به عنوان یک زیست‌ماده مشتق شده طبیعی در نظر گرفته می‌شود. لوازم آرایشی، موفق‌ترین کاربرد سربسین ابریشم به دلیل اثرات مرطوب‌کنندگی و آنتی‌اکسیدانی آن می‌باشد. جدا از این موارد، مطالعاتی در مورد استفاده از سربسین در زمینه‌های پلیمری مثل فیبروئین ابریشم وجود دارند. علاوه بر این، سربسین فعالیت‌های بیولوژیکی فراوانی، مثل جلوگیری از فعالیت تیروسیناز، عوامل داروشناختی مثل ضد انعقاد، فعالیت‌های ضد سرطان، بهبود هضم غذا، و منبع نیتروژن برای محیط کشت و غیره از خود نشان می‌دهد. بنابراین این گونه در نظر گرفته می‌شود که سربسین یک منبع طبیعی امیدبخش برای توسعه یا گسترش مواد جدید بر پایه پروتئین می‌باشد. یکی از مهمترین مسائل برای مواد زیستی مثل سربسین، تشکیل مواد نانولیفی می‌باشد. اخیراً ما نانولیف سربسین ابریشم را از پیله سربسین ژنتیکی اصلاح شده، و نانولیف سربسین- فیبروئین را از طریق الکترورسی تولید کردیم. در اینجا، ما سعی



الکترورسی (فاصله نوک سوزن تا جمع کننده) ۱۵ سانتیمتر، ولتاژ کاربردی ۲۵ کیلوولت و نرخ جریان محلول پلیمری ۳/۲ میلی لیتر بر ساعت، انجام شد.

۲-۴- بررسی مشخصات

مورفولوژی و قطر نانوالیاف سربسین ابریشم با میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM (Hitachi S-3000N) در دمای اتاق بررسی شد. برای اندازه گیری های SEM، نمونه ها روی صفحه آلومینیومی قرار داده شدند و با لایه طلا به منظور عکس برداری روکش داده شدند و قطر بیدها و نانوالیاف از عکس های SEM بدست آمد. قطرهای متوسط و انحراف معیار (SD) قطرهای بیدها و نانوالیاف سربسین ابریشم از اندازه گیری بخش های مختلف نانوذرات/نانوالیاف سربسین ابریشم با استفاده از بسته نرم افزاری تجاری SPSS محاسبه شدند.

تغییر ساختار نانوالیاف سربسین ابریشم با استفاده از طیفسنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (Prestige-21) سنجیده شد. طیف های نمونه ها در حالت عبوری با قدرت تفکیک ۴ cm⁻¹ و محدوده طیفی ۴۰۰-۵۰۰ cm⁻¹ کسب شدند. طیف های مادون قرمز برای هر نمونه، از ۱۶ پویش ثبت شدند.

منحنی های گرماسنجی پویشی تفاضلی (DSC) نمونه ها با دستگاه (Thermo Plus DSC 8230) DSC تحت شرایط جوی نیتروژن، در نرخ گرمایش ۱۰ درجه سانتیگراد بر دقیقه بررسی شدند. محدوده درجه حرارت از دمای اتاق تا ۳۸۰ درجه سانتیگراد بود و وزن نمونه ۲ میلی گرم بود.

اندازه گیری های آنالیز گرموزنسنجی/گرمایی تفاضلی (TG-DTA) با استفاده از دستگاه (Thermo Plus TG 8120) TG-DTA تحت جو نیتروژن در محدوده از دمای اتاق تا ۳۸۰ درجه سانتیگراد و در نرخ گرمایش ۱۰ درجه سانتیگراد بر دقیقه انجام شدند. وزن نمونه ۶ میلی گرم بود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مورفولوژی سطحی و توزیع قطر الیاف سربسین ابریشم الکترورسی شده

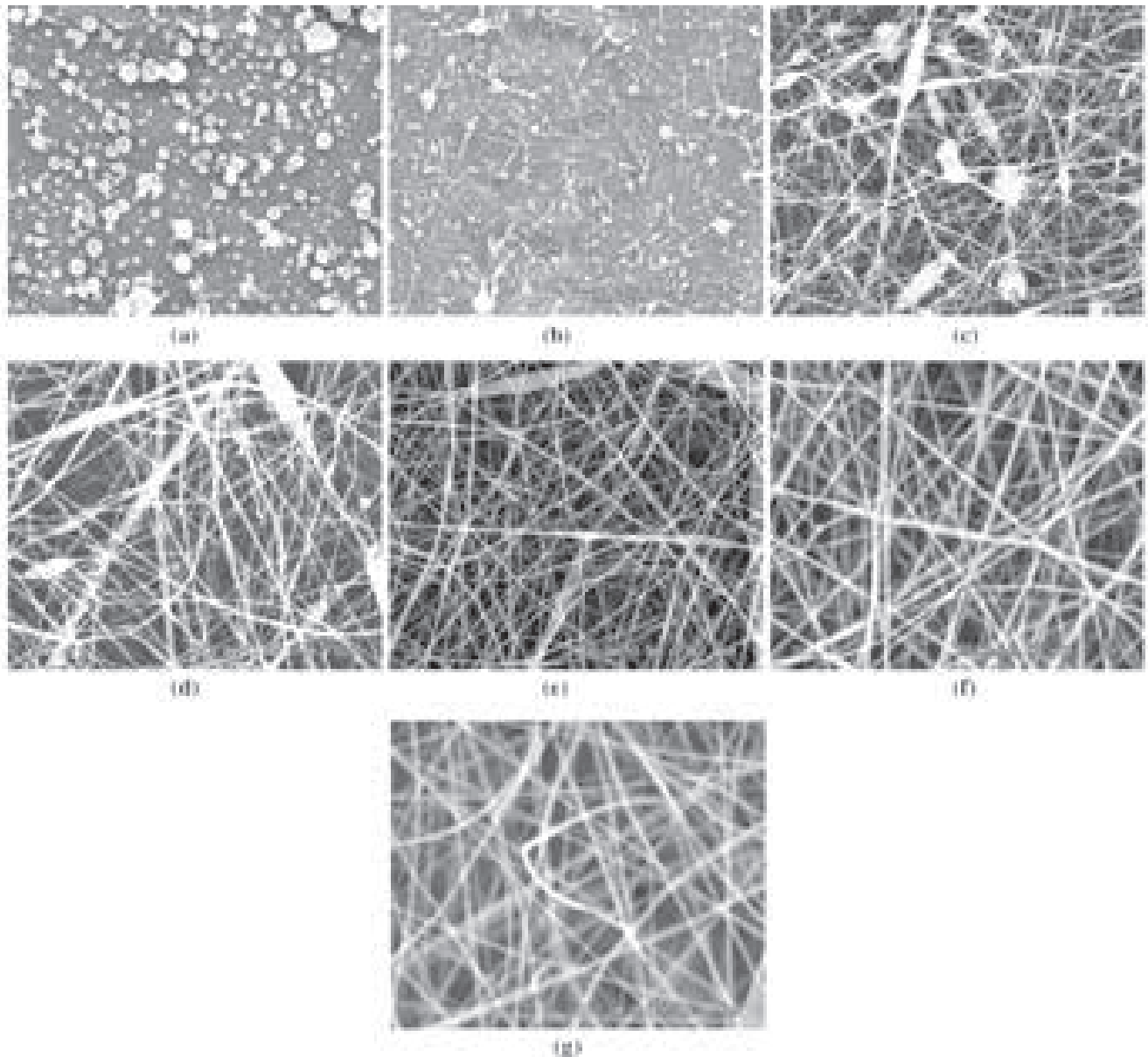
برای بررسی تأثیر غلظت محلول سربسین ابریشم روی مورفولوژی و قطر نانوالیاف تازه رسیده شده، محلول های سربسین ابریشم در محدوده غلظت از ۱/۳ تا ۲۲/۹ درصد وزنی الکترورسی شدند. شکل ۱، عکس های SEM مربوط به بیدها، الیاف دارای بید و نانوالیاف سربسین ابریشم را نشان می دهد. در غلظت های کمتر، از ۱/۳ تا ۳/۸ درصد وزنی (شکل ها نشان داده نشده اند)، فقط بیدهای سربسین بدست آمدند. روزهایی نیمه دایره ای روی بیدها وجود داشت و تعداد و اندازه روزه ها با افزایش غلظت کاهش یافت. هنگامی که غلظت تا ۸/۵ درصد افزایش یافت (شکل ۱.a)، ما

بیدهای مدور یا دایره ای بدست آوردیم و هیچ روزه نیمه مدور روی آنها مشاهده نشد. از ۹/۶ تا ۱۶/۵ درصد وزنی (شکل ۱.b-e)، بیدهای دوکی شکل و الیاف دارای بید بدست آمدند. با افزایش غلظت، تعداد بیدها کاهش یافت و تعداد الیاف افزایش یافت. در غلظت های بالاتر، ۲۰/۹ و ۲۲/۹ درصد وزنی (شکل ۱.f.g)، نانوالیاف بسیار خوبی با سطوح صاف و سطح مقطع دایره ای تولید شدند. به دلیل تبخیر ناقص حلال و گسیختگی یا جدا شدن جت، چسبندگی و دو شاخه شدن نانوالیاف سربسین ابریشم مشاهده شد. در غلظت کم، فقط بیدها به دست آمدند و روزه های روی بیدها با افزایش غلظت ناپدید شدند؛ در غلظت های متوسط، الیاف دارای بید تولید شدند؛ نانوالیاف خوب سربسین با استفاده از غلظت بالای محلول SS/TFA، الکترورسی شدند. غلظت بهینه برای تولید نانوالیاف سربسین با سطوحی صاف، بالاتر از ۲۰/۹ درصد وزنی بود.

شکل ۲ توزیع قطر و ب های لیفی سربسین الکترورسی شده را نشان می دهد، که توسط الکترورسی در محلول های سربسین TFA/ گوناگون بدست آمدند. هنگامی که غلظت از ۱/۳ به ۳/۸ درصد وزنی افزایش یافت (شکل نشان داده نشده است)، قطرهای متوسط بیدهای روزه دار ۲۳۰، ۲۶۵ و ۳۱۱ نانومتر و انحراف معیار آنها ۲۷۵، ۲۸۰ و ۳۳۵ بود. در غلظت های کمتر، قطر میانگین بیدهای سربسین ابریشم، با افزایش غلظت افزایش یافت. قطر میانگین بیدهای بدون روزه، در غلظت های ۶/۲ و ۸/۵ درصد وزنی به ترتیب، ۲۵۴ و ۲۳۰ نانومتر بود و انحراف معیار ۱۶۸ و ۱۵۵ بود. در مطالعه ما، الیاف دارای بید از غلظت ۹/۶ درصد وزنی به بعد شکل یافتند. قطرهای متوسط الیاف دارای بید سربسین ابریشم، به ترتیب ۱۲۹، ۱۷۳ و ۲۰۵ نانومتر بودند. نانوالیاف کامل و بی عیب، از محلول سربسین ابریشم ۲۰/۹ و ۲۲/۹ درصد وزنی بدست آمدند و قطرهای متوسط نانوالیاف سربسین ابریشم به ترتیب ۱۴۵ و ۱۸۴ نانومتر بودند (شکل ۲.e.f). همچنین جالب می باشد که اشاره شود، که قطرهای متوسط نانوالیاف سربسین، با افزایش غلظت محلول سربسین، افزایش یافتند. پیداست که ویسکوزیته یا گرانیروی محلول سربسین ابریشم، با افزایش عامل غلظت، افزایش می یابد و اینکه گرانیروی پارامتر اصلی در قطر لیف می باشد و گرانیروی بیشتر، تهیه الیاف صاف و بدون بید را تقویت می کند و گرانیروی کمتر به ایجاد الیاف نازک تر کمک می کند. روند تغییرات مورفولوژیکی و همچنین قطر الیاف، که در این مطالعه مشاهده شد، با مقالات قبلی در توافق بود.

۳-۲- ساختار کریستالی

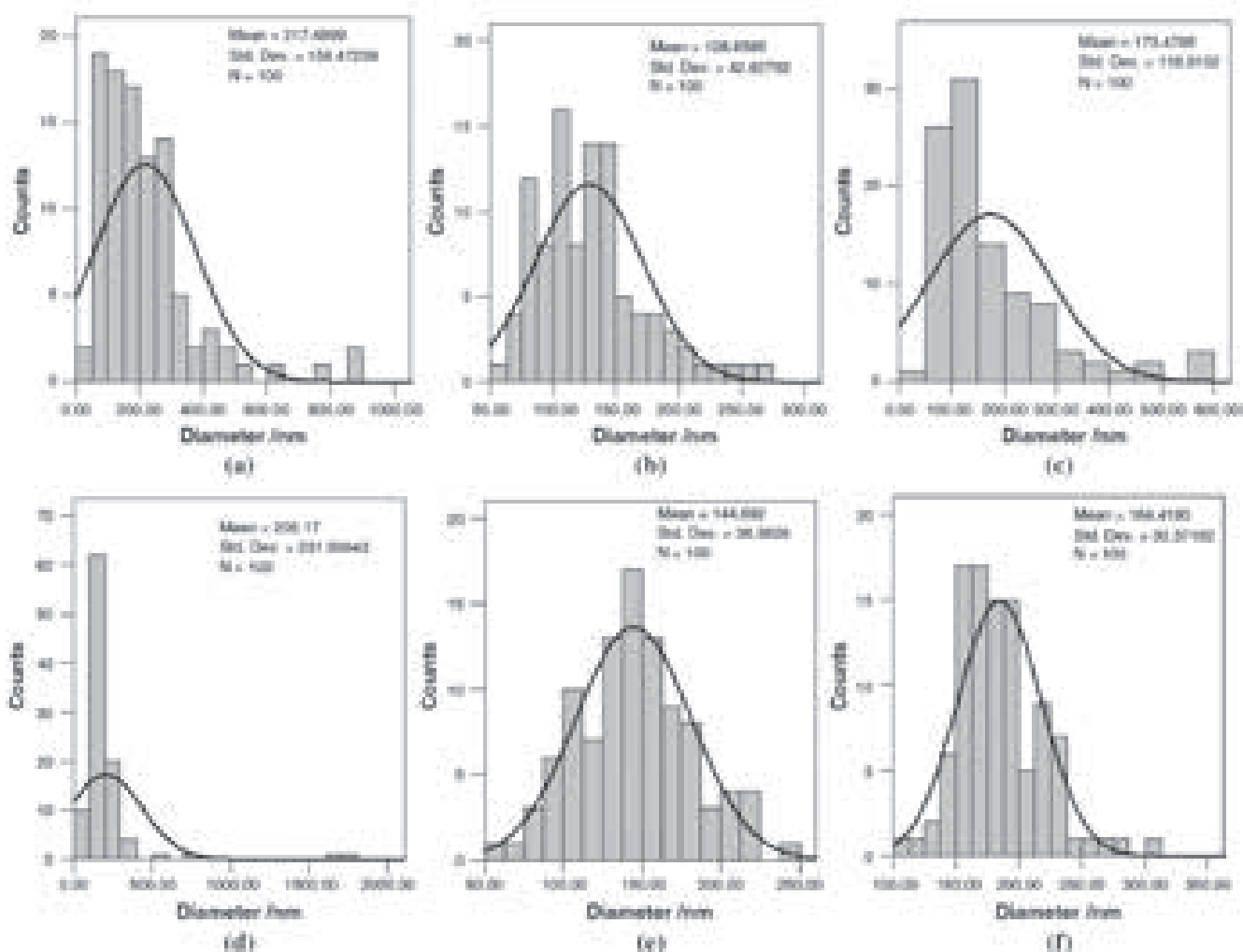
طیف های FTIR، یک تکنیک قدرتمند برای مطالعه ساختار در سطح مولکولی می باشند و باندهای جذبی شاخص حساس به ساختار مولکولی پروتئین های ابریشم را آشکار می سازند. شکل ۳، طیف های



شکل ۱- عکس‌های SEM مربوط به الیاف سربسین ابریشم الکترورسی شده در ولتاژ ۲۵ کیلوولت با فاصله ریسندگی ثابت ۱۵ سانتیمتر در غلظت‌های مختلف محلول سربسین/تری فلئورو استیک اسید: (a) ۸/۵ %، (b) ۹/۶ %، (c) ۱۱/۷ %، (d) ۱۴/۳ %، (e) ۱۶/۵ %، (f) ۲۰/۹ % و (g) ۲۲/۹ %

به ساختار ورقه بتا می‌باشد. باند جذبی در حدود 1233 cm^{-1} (آمید ۳) در نانوالیاف سربسین ابریشم و نانوالیاف حرارت‌دهی شده سربسین، ناپدید شد. جالب است که ذکر شود که باند جذبی در 1787 cm^{-1} که برای محلول TFA (شکل ۳.d) مشاهده شد، در نانوالیاف سربسین ابریشم (شکل ۳.b) آشکار نشد. باندهای جذبی در 1390 cm^{-1} (ارتعاش‌های خمشی C-H و O-H)، 1071 و 1046 (ارتعاش کششی C-OH)، که همچنین قابل نسبت‌دادن به فراوانی زنجیره‌های جانبی آمینو هیدروکسیل اسید هستند (شکل ۳.a)، در نانوالیاف سربسین ابریشم (شکل ۳.b) ناپدید شدند. هرچند، باندهای جدیدی در 1180 ، 1133 ، 837 ، 801 و 721 cm^{-1}

FTIR مربوط به سربسین ابریشم، نانوالیاف سربسین، نانوالیاف سربسین حرارت‌دهی شده، و حلال TFA را نشان می‌دهد. سربسین ابریشم (شکل ۳.a) باندهای جذبی در 1641 cm^{-1} (آمید ۱)، 1514 cm^{-1} (آمید ۲)، و 1233 cm^{-1} (آمید ۳) را به نمایش گذاشت، که مشخصه‌های ساختار ورقه بتا یا β -sheet هستند. نانوالیاف سربسین ابریشم (شکل ۳.b) باندهای جذبی در 1653 cm^{-1} (آمید ۱، ارتعاش کششی گروه آمینو) و 1520 cm^{-1} (آمید ۲، خمش N-H و ارتعاش کششی C-N) را به نمایش گذاشتند که مشخصه‌های ساختار ماریچ تصادفی هستند. بعد از عملیات حرارتی در 160 درجه سانتیگراد به مدت 60 دقیقه، نانوالیاف سربسین (شکل ۳.c) به 1643 (آمید ۱) و 1515 cm^{-1} (آمید ۲) شیف‌ت پیدا کردند که مربوط

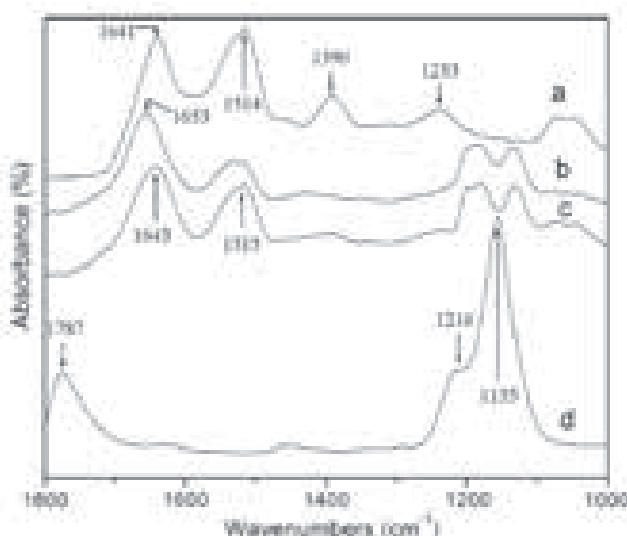


شکل ۲- توزیع قطرهای لیف الیاف سربسیم ابریشم الکترورسی شده در ولتاژ ۲۵ کیلوولت با فاصله ریسندگی ثابت ۱۵ سانتیمتر در غلظت‌های مختلف محلول سربسیم / تری فلورو استیک اسید: (a) ۹/۶٪، (b) ۱۱/۷٪، (c) ۱۴/۳٪، (d) ۱۶/۵٪، (e) ۲۰/۹٪، و (f) ۲۲/۹٪.

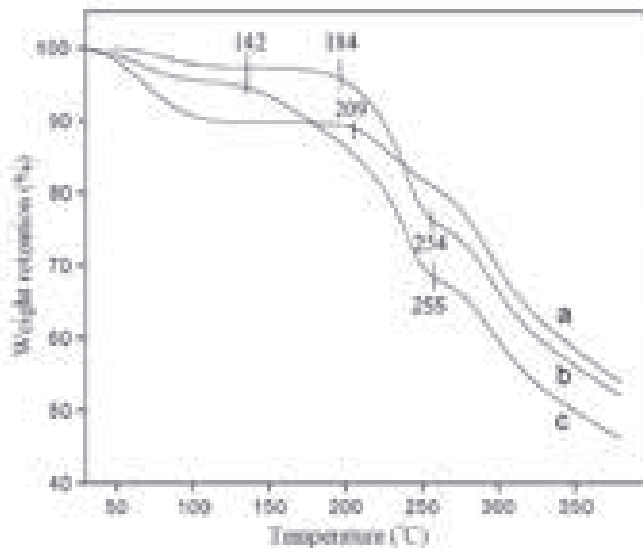
در نانوالیاف سربسیم ابریشم (شکل ۲.۳) در مقایسه با طیف‌های سربسیم ابریشم (شکل ۲.۳) ظاهر شدند. نانوالیاف حرارت‌دهی شده سربسیم ابریشم (شکل ۲.۳) باند جذبی شانه‌ای شکل را در ۱۱۹۷، ۱۰۷۳ و 1043 cm^{-1} در مقایسه با منحنی نانوالیاف سربسیم ابریشم (شکل ۲.۳) به نمایش گذاشتند.

۳-۳- رفتار گرمایی

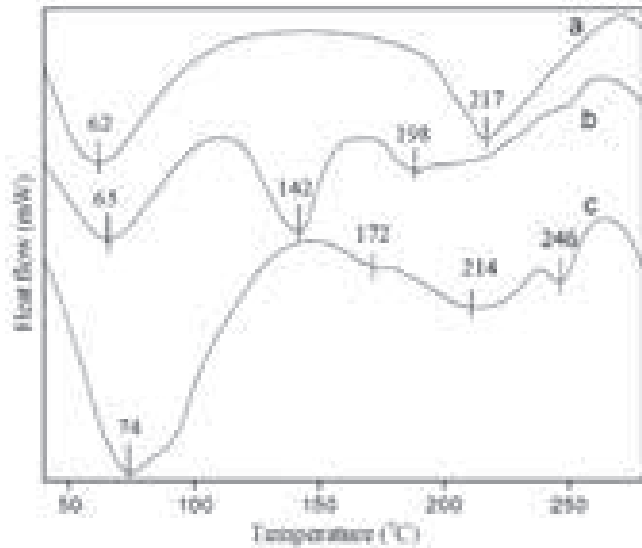
به منظور تجزیه و تحلیل رفتار گرمایی نمونه‌ها، اندازه‌گیری‌های DSC انجام شدند. شکل ۴، منحنی‌های DSC را برای سربسیم ابریشم، نانوالیاف سربسیم ابریشم، و نانوالیاف حرارت‌داده شده سربسیم نشان می‌دهد. همه منحنی‌ها، پیک‌های گرماگیر را در زیر ۱۰۰ درجه سانتیگراد نشان دادند، که مربوط به تبخیر آب موجود در نمونه‌ها هستند. علاوه بر این پیک گرماگیر، سربسیم ابریشم (شکل ۴.۱)، یک پیک گرماگیر اصلی در ۲۱۷ درجه سانتیگراد نشان داد. از سوی دیگر، نانوالیاف سربسیم (شکل ۴.۲) پیک گرماگیر



شکل ۳- طیف‌های FTIR مربوط به نانوالیاف سربسیم ابریشم الکترورسی شده: (a) پودر سربسیم، (b) الیاف تازه ریسیده شده، (c) الیاف عمل‌آوری شده در ۱۶۰ درجه سانتیگراد به مدت ۶۰ دقیقه و TFA. (d)



شکل ۵- منحنی‌های TG مربوط به نانوالیاف سربسیم ابریشم الکترورسی شده: (a) پودر سربسیم، (b) الیاف تازه رسیده شده، (c) الیاف عمل‌آوری شده در ۱۶۰ درجه سانتیگراد به مدت ۶۰ دقیقه.



شکل ۴- منحنی‌های DSC مربوط به نانوالیاف سربسیم ابریشم الکترورسی شده: (a) پودر سربسیم، (b) الیاف تازه رسیده شده، (c) الیاف عمل‌آوری شده در ۱۶۰ درجه سانتیگراد به مدت ۶۰ دقیقه.

سانتیگراد، کاهش وزن سربسیم ابریشم (شکل a.۵) بیشتر از نانوالیاف سربسیم بود (شکل c.۵)، ولی بعد از آن کمتر از نانوالیاف سربسیم بود. قبل از ۲۳۴ درجه سانتیگراد، کاهش وزن سربسیم (شکل a.۵) سریع‌تر از نانوالیاف سربسیم (شکل b.۵) بود ولی بعد از آن آرام‌تر از نانوالیاف حرارت‌داده شده سربسیم، تحت دمای یکسان بود. کاهش وزن نانوالیاف حرارت‌داده شده سربسیم ابریشم (شکل c.۵)، سریع‌تر از پودر سربسیم ابریشم و نانوالیاف سربسیم بود. این امر می‌تواند به دلیل حذف TFA از نانوالیاف سربسیم بعد از عملیات حرارتی در ۱۶۰ درجه سانتیگراد به مدت ۶۰ دقیقه باشد.

۴- نتیجه‌گیری

ما بطور موفقیت‌آمیزی، نانوالیاف سربسیم ابریشم را از طریق الکترورسی محلول SS/TFA تولید کردیم. مورفولوژی، مشخصات ساختاری، و خصوصیت گرمایی نانوالیاف سربسیم ابریشم، با استفاده از آنالیزهای SEM، FTIR، DSC و TGA بررسی شدند. در غلظت کم، فقط بیدها بسدت آمدند و روزه‌های روی بیدها با افزایش غلظت محلول ناپدید شدند؛ در غلظت متوسط، الیاف دارای بید تولید شدند؛ نانوالیاف سربسیم الکترورسی شده کامل و بی‌نقص با استفاده از غلظت بالاتر محلول SS/TFA تولید شدند. نتایج FTIR نشان داد که ساختار نانوالیاف سربسیم ابریشم از ورقه بتا به مارپیچ تصادفی تغییر کرد. ساختار نانوالیاف سربسیم ابریشم می‌تواند بوسیله حرارت‌دهی نانوالیاف سربسیم ابریشم در ۱۶۰ درجه سانتیگراد به مدت ۶۰ دقیقه، به ورقه بتا یا β -sheet تبدیل شود. نتایج DSC و TGA نشان دادند که TFA می‌تواند توسط حرارت زدوده شود.

در حدود ۱۹۸ درجه سانتیگراد نشان دادند. هرچند پیک گرماگیر جدیدی در حدود ۱۴۲ درجه سانتیگراد وجود دارد. پیک گرماگیر در حدود ۲۱۷ درجه سانتیگراد به دلیل تجزیه گرمایی سربسیم ابریشم می‌باشد. موقعیت پیک گرماگیر در ۱۹۸ درجه سانتیگراد برای نانوالیاف سربسیم ابریشم مطابق با تجزیه گرمایی (۲۱۷ درجه سانتیگراد) پیک گرماگیر سربسیم می‌باشد. سربسیم و فیبروئین ابریشم بدست‌آمده از کرم ابریشم B.mori، به ترتیب در حدود ۲۲۰-۲۳۰ و ۳۲۰ درجه سانتیگراد تجزیه می‌شوند. پیک تجزیه در مطالعه حال حاضر با مقالات تطابق داشت. پیک گرماگیر جدید در حدود ۱۴۲ درجه سانتیگراد، بعد از عملیات حرارتی در ۱۶۰ درجه سانتیگراد به مدت ۶۰ دقیقه ناپدید شد (شکل c.۴).

این امر دلالت بر این دارد که TFA می‌تواند توسط حرارت زدوده شود. در ضمن، پیک گرماگیر در ۲۱۴ درجه سانتیگراد و دو شانه پیک گرماگیر حدود ۱۷۲ و ۲۴۶ درجه سانتیگراد در نانوالیاف حرارت‌داده شده، مشاهده شدند.

رفتار گرمایی سربسیم، نانوالیاف سربسیم ابریشم، و نانوالیاف حرارت‌داده شده سربسیم، بوسیله اندازه‌گیری‌های TGA بیشتر مورد مطالعه قرار گرفتند (شکل ۵).

شیب منفی کوچک منحنی‌های TG، آغاز کاهش وزن را مشخص می‌کنند. درصد کاهش وزن، ۱۱، ۳ و ۶ درصد وزنی بود که به ترتیب برای سربسیم، نانوالیاف سربسیم و نانوالیاف حرارت‌داده شده سربسیم، در ۲۰۹، ۱۸۳ و ۱۴۲ درجه سانتیگراد به وقوع پیوست و سپس کاهش وزن به تدریج افزایش یافت، که منجر به تجزیه گرمایی در دماهای بالاتر شد. در دمای یکسان، قبل از ۱۴۲ درجه