



Part B: Persian Edition

Journal of Textiles and Polymers

Vol. 11, No. 2, 29-47, April 2023

<https://doi.org/10.48302/jtp.2024.358037.1248>



REVIEW PAPER

An Overview of Synthetic Microfibers: Fabrication, Properties, Applications, and Environmental Problems

Hamid Reza Moradi* and Komeil Nasouri

Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology, P.O. Box 84156-83111, Isfahan, Iran

Received: 26 August 2022, Accepted: 3 April 2023

Abstract

In the past two decades, the importance of microfibers has increased dramatically in the global fiber market. Synthetic microfibers have many advantages for the future of the textile industry. They are known as fibers with a linear density in the range of 0.3 dtex to 1 dtex or an average diameter of less than 10 μm . The diameter of microfibers is half the diameter of silk fibers, one third of the diameter of cotton fibers, and a 100 times finer than human hair, so it can make amazing changes in the improvement of textile products. Various methods have been reported for the production of synthetic microfibers, including CO_2 laser, melt spinning, melt blowing, flash spinning, spunbonding, and electrospinning. Textiles made from microfibers are lightweight, wrinkle-resistant, and retain their shape. These fibers are also resistant to pilling, they are also relatively stronger and more durable than textiles with similar conditions, and they are more comfortable. Due to the fact that microfibers have a high specific surface area, they are suitable for various applications such as separation and filtration, construction, medicine, energy, smart textiles and sensors. In contrast, microplastic fibers are the most abundant pollution found in the environment. Synthetic microplastic fibers are made up of non-biodegradable polymers with a diameter less than 5 mm and are released from textile garments during textile finishing and home laundering. In this paper, after introducing synthetic microfibers, its fabrication methods, properties and applications are reviewed.

Keywords: synthetic fibers, microfibers, linear density, melt spinning, electrospinning

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: k.nasouri@iut.ac.ir

مروری بر میکروالیاف مصنوعی: ساخت، خواص، کاربردها و مشکلات زیست محیطی

حمیدرضا مرادی، کمیل نصوری*

اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی نساجی، صندوق پستی ۸۴۱۵۶-۸۳۱۱۱

دریافت: ۱۴۰۱/۶/۴، پذیرش: ۱۴۰۲/۱/۱۴

چکیده

منسوجات در حین فرایندهای تکمیلی و شست و شوهای خانگی آزاد می‌شوند. در این مقاله، پس از معرفی میکروالیاف مصنوعی، روش‌های تولید، خواص و کاربردهای آن بررسی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: الیاف مصنوعی، میکروالیاف، چگالی خطی، مذاب‌ریسی، الکتروریسی

۱ مقدمه

توسعه تجاری فناوری تولید الیاف مصنوعی به منظور دستیابی به الیافی با ظرافت و استحکام بیش از الیاف ابریشم تحت عنوان میکروالیاف از دهه ۱۹۷۰ میلادی آغاز شد. ابتدا شرکت‌های ژاپنی، اولین محصولات خود را با نام میکرودنیر به بازار معرفی کردند. بعدها در دهه ۱۹۸۰ در اروپا این روند دنبال شد و از دهه ۱۹۹۰ تولیدکنندگان آمریکایی الیاف نیز این روند را دنبال کردند. بنابراین یکی از مهم‌ترین تحولات در حوزه الیاف مصنوعی، فناوری تولید رشته‌های فیلامنتی میکروالیاف با حفظ خواص مکانیکی آن است [۱]. به‌طور کلی، اصطلاح میکروالیاف برای رشته‌هایی با چگالی خطی 0.3 dtex تا 1 dtex به کار برده می‌شود. با فرض سطح مقطع دایره‌ای، بین قطر (D)، چگالی خطی و حجمی میکروالیاف می‌توان نوشت (معادله (۱)):

در دو دهه اخیر، اهمیت میکروالیاف به‌طور چشمگیری در بازار جهانی الیاف افزایش یافته است. میکروالیاف مصنوعی مزایای زیادی برای آینده صنعت نساجی دارند و به‌عنوان الیافی با چگالی خطی در محدوده 0.3 dtex تا 1 dtex یا با قطر متوسط کمتر از $10 \mu\text{m}$ شناخته می‌شوند. قطر میکروالیاف، نصف قطر الیاف ابریشم، یک سوم قطر الیاف پنبه و ۱۰۰ برابر ظریف‌تر از موی انسان است، بنابراین می‌تواند تغییرات شگفت‌انگیزی در ارتقای محصولات نساجی ایجاد کند. روش‌های مختلف برای تولید میکروالیاف، از جمله لیزر CO_2 ، مذاب‌ریسی، دمش مذاب، ریسندگی فلاش، اسپان باندینگ و الکتروریسی گزارش شده است. منسوجات تولیدشده از میکروالیاف، سبک‌وزن و مقاوم در برابر چروک‌شدن هستند و شکل خود را حفظ می‌کنند. این الیاف در برابر پرزدهی مقاوم بوده و نسبت به منسوجات با شرایط مشابه نیز نسبتاً محکم و بادوام‌ترند و راحتی بیشتری دارند. با توجه به اینکه میکروالیاف، سطح ویژه زیادی دارند، برای کاربردهای مختلف از جمله جداسازی و صاف‌کردن، ساخت‌وساز، پزشکی، انرژی، منسوجات هوشمند و حسگرها مناسب هستند. درمقابل، الیاف میکروپلاستیکی به‌عنوان فراوان‌ترین آلودگی در محیط زیست به‌شمار می‌روند. الیاف میکروپلاستیکی مصنوعی از پلیمرهای زیست‌تخریب‌ناپذیر با قطر کمتر از 5 mm ساخته شده و از

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار: k.nasouri@iut.ac.ir

رشته نهایی تحلیل کرد.

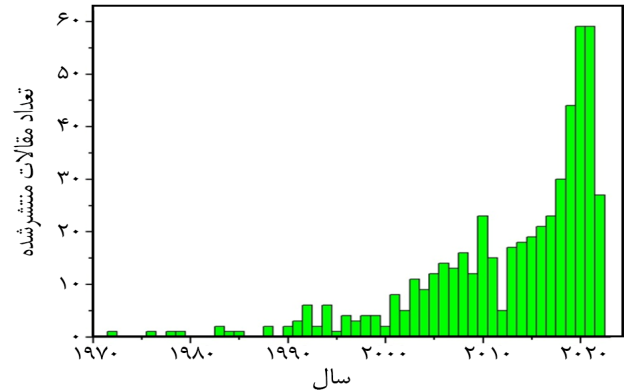
۱-۲ فناوری تولید میکروالیاف فیلامنتی

تولید میکروالیاف فیلامنتی، به دو روش ریسندگی مستقیم و ریسندگی دوگانه (conjugate spinning) انجام می‌شود. بنابراین، میکروالیاف فیلامنتی را می‌توان طی یک مرحله در فرایند ریسندگی به‌طور مستقیم تولید کرد. در فرایند تولید میکروالیاف به روش دوگانه ابتدا با روش‌های ریسندگی مثل مذاب‌ریسی یا محلول‌ریسی، الیاف با متوسط قطر در محدوده الیاف نساجی تولید شده و سپس طی یک مرحله جداگانه، قطر آن‌ها تا محدوده میکروالیاف کاهش می‌یابد.

۱-۱-۲ ریسندگی مستقیم

در روش ریسندگی مستقیم مانند روش‌های ریسندگی معمولی (مذاب‌ریسی یا محلول‌ریسی) سیال پلیمری در فاز مذاب یا محلول تولید می‌شود. پلیمر با توجه به اینکه گرمانرم یا گرماسخت است، پس از ذوب یا حل شدن در حلال و عبور از سایر قسمت‌ها از رشته‌ساز می‌گذرد و پس از خنک شدن یا انعقاد، رشته‌های لیفی تشکیل می‌شوند. فرایند ریسندگی تک‌مرحله‌ای نسبتاً ساده است و می‌توان در ادامه با فرایندهای دیگری که پیچیدگی خاصی ندارند (شامل گرمایش و کشش) یک لیف ظریف تولید کرد. این روش نیز مانند سایر روش‌های ریسندگی، محدودیت‌هایی از جمله محدود بودن افزایش ظرافت (حداکثر ظرافت ۰/۱ den)، پاره شدن لیف رشته‌ها هنگام ریسندگی و نداشتن لیف با کیفیت عالی دارد [۱].

برای به‌دست آوردن لیفی با ظرافت عالی در روش ریسندگی تک‌مرحله‌ای باید پس از تولید رشته‌های لیفی، عملیات کشش و تثبیت گرمایی انجام شود. بدین دلیل، عملیات پس از ریسندگی با دستگاه گرمایش لیزری انجام می‌شود که این روش مطابق با شکل ۲ الف و ب است و به ترتیب به دو صورت پیوسته و ناپیوسته انجام می‌شود. دستگاه گرمایش لیزری شامل لیزر CO₂ برای تولید موج پیوسته است. میزان ظرافت و تکامل بلورها در لیف وابسته به شدت تابش لیزر است. هر چه شدت تابش بیشتر باشد، قطر لیف بیشتر کاهش می‌یابد و بلورها بیشتر رشد می‌کنند. پژوهشگران بدین نتیجه رسیده‌اند که افزون بر موارد پیش‌گفته، می‌توان با افزایش سرعت جمع‌کننده درجه بلورینگی را زیاد کرد [۲،۳]. گرمایش لیزری، ابتدا برای پلی‌استر استفاده شد. اما پژوهشگران توانستند این روش را برای پلی‌پروپیلن [۴]، نایلون ۶ [۵] و نایلون ۶۶ [۶] نیز به‌کار برند.



شکل ۱- روند رشد تعداد مقالات چاپ‌شده در مجلات در زمینه میکروالیاف مصنوعی در بین سال‌های ۱۹۷۰ تا ۲۰۲۲ (منبع: Sco- pus، جست‌وجو در ۳۰ مه ۲۰۲۲).

$$D (\mu\text{m}) = 11.29 \sqrt{\frac{\text{dtex}}{\rho (\text{g/cm}^3)}} \quad (1)$$

متوسط قطر میکروالیاف مصنوعی در صنعت نساجی در گستره ۱۰-۳ μm بوده، در حالی که متوسط قطر الیاف متداول در نساجی بیش از ۱۵ μm است. معادله (۲)، ارتباط بین سطح مخصوص (SSA)، چگالی حجمی و قطر الیاف را نشان می‌دهد:

$$\text{SSA} (\text{m}^2/\text{g}) = \frac{12.57}{\rho (\text{g/cm}^3) \times D (\mu\text{m})} \quad (2)$$

سطح مخصوص میکروالیاف به‌علت کاهش متوسط قطر آن نسبت به الیاف متداول صنایع نساجی، افزایش یافته که موجب ایجاد خواص منحصر به فرد کاربردی در این الیاف شده است. بنابراین از ابتدای معرفی میکروالیاف در دهه ۱۹۷۰، پژوهش‌های مختلفی در جهان در این باره انجام شده است. در شکل ۱، مقالات با کلیدواژه «میکروالیاف مصنوعی» به استناد پایگاه Scopus را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در دو دهه اخیر، پژوهش‌ها در زمینه طراحی و تولید میکروالیاف به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. از این رو، روش‌های تولید، خواص و حوزه‌های کاربردی میکروالیاف در ادامه مرور می‌شوند.

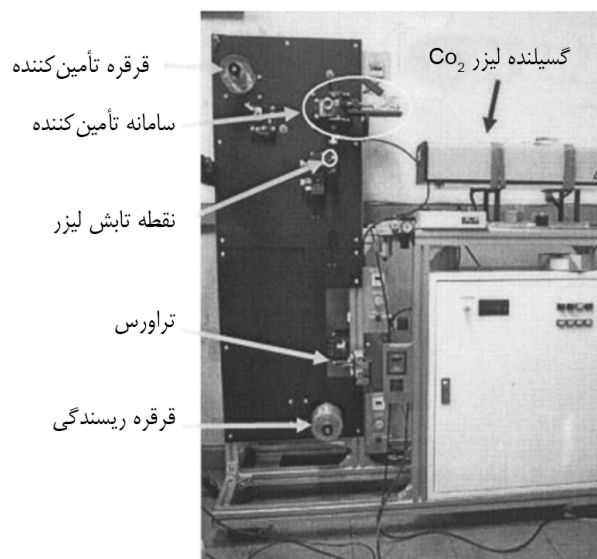
۲ روش‌های تولید میکروالیاف

رشته‌های میکروالیاف به دو دسته کلی فیلامنت و بریده تقسیم‌بندی می‌شوند که می‌توان روش‌های تولید آن‌ها را براساس شکل ظاهری

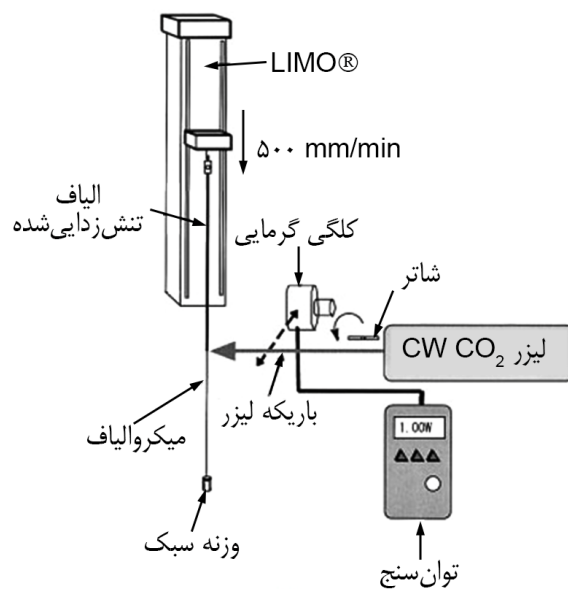
جریان الکتریکی و الیاف برای تولید گرماسفت [۹-۷]. هنگامی که دو پلیمر مختلف با تفاوت‌های درخور توجه در خواص ذاتی مانند انرژی فعال‌سازی، گرانروی کششی و دمای انجماد برای تشکیل یک رشته واحد با هم اکستروود می‌شوند، انتظار می‌رود که خواص تنش گرمایی هر جزء به‌طور درخور توجهی با آنچه در تک‌جزء وجود دارد، متفاوت باشد. بنابراین ممکن است، تفاوت‌های شایان توجهی در توسعه ساختار لیف ایجاد شود [۱۱، ۱۰]. این نوع ریسندگی برای میکروالیاف، نوعی نوآوری در زمینه ریسندگی دوجزئی محسوب می‌شود. استفاده از الیاف دوجزئی به ایجاد طیف گسترده‌ای از الیاف با قطرهای مختلف در ساختار نهایی آن پس از شکافتن دو جزء منجر شده و در نهایت الیاف میکرونیتر تولید می‌شود.

استفاده از این روش، سبب به‌وجود آمدن ویژگی‌هایی چون انعطاف‌پذیری، قابلیت تنفس، استحکام و همچنین بازده صاف کردن و خواص گرمایی در لیف تولیدشده می‌شود. روش‌های ریسندگی دوجزئی که برای تولید میکروالیاف استفاده می‌شود، به دو نوع جزایر در دریا (islands-in-sea) و ریسندگی الیاف دوجزئی تقسیم‌پذیر (splittable bicomponent fiber) دسته‌بندی می‌شود. روش‌های دیگری هم مانند ریسندگی لایه‌ای وجود دارد که بیشتر در تولید ورق‌های پلیمری با ضخامت میکرو کاربرد دارد و برای تولید رشته‌های الیافی استفاده نمی‌شود.

روش ریسندگی جزیره در دریا، روش کارایی برای تولید مواد با عملکرد عالی است. فرایند ریسندگی الیاف جزیره در دریا، مطابق با شکل ۳ الف با استفاده از دو پلیمر امتزاج‌ناپذیر انجام می‌شود. فرایند به گونه‌ای است که پلیمر در دریایی از پلیمر دیگر تزریق می‌شود. نتیجه این کار تشکیل یک قسمت پراکنده (جزیره) و یک قسمت پیوسته (دریا) است [۱۲]. این روش سبب تشکیل ساختار ماتریس-لیفچه (MFIM) می‌شود. با استفاده از این ساختار خاص می‌توان خواص مکانیکی و رنگ‌پذیری الیاف را بهینه کرد. همچنین با حل کردن فاز ماتریس (دریا) در حلال مناسب می‌توان فاز لیفچه (جزیره) را استخراج کرد و به الیاف بسیار ظریف تک‌جزئی دست یافت [۱۶-۱۳]. پلی‌استر، نایلون، پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن و پلی‌فیلن سولفید از جمله پلیمرهایی هستند که به‌عنوان اجزای قسمت جزیره استفاده می‌شوند. جزء دریا که شامل موادی مانند پلی‌استیرن، کوپلیمر ۲-اتیل هگزیل آکریلات یا کوپلیمر اتیلن ترفتالات و سدیم سولفوازیوفتالات است با حل شدن در حلال (که باید غیرحلال استفاده‌شده جزء جزیره باشد) پس از ریسندگی معمولی حذف می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۲- (الف) نمای دستگاه لیزر CO₂ برای تولید پیوسته میکروالیاف [۵] و (ب) طرحواره‌ای از دستگاه ناپیوسته به‌کاررفته برای گرمایش لیزری [۲، ۳].

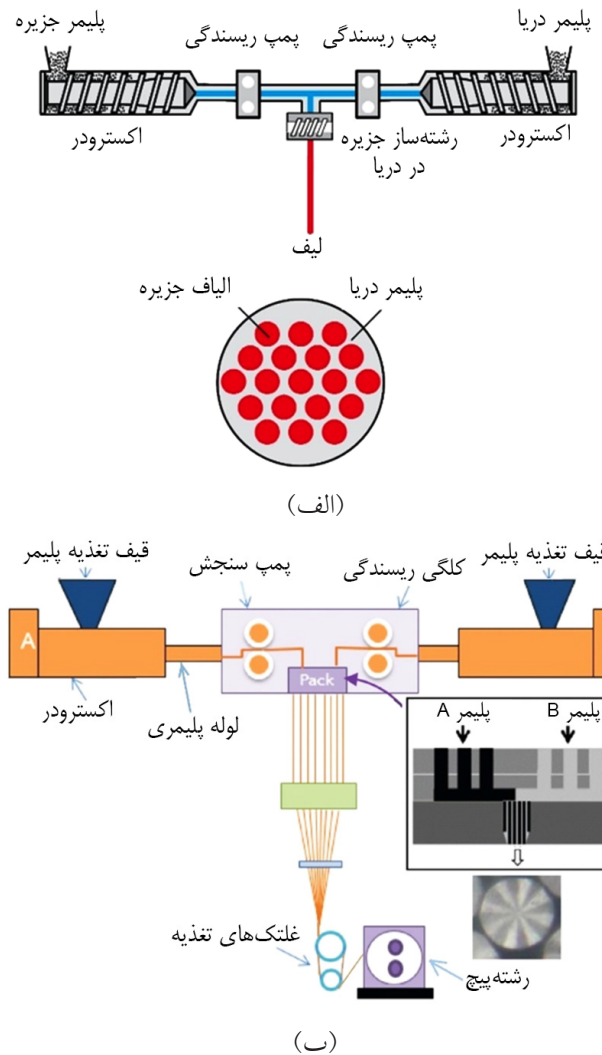
۲-۱-۲ ریسندگی دوگانه

برای توسعه فناوری‌های تولید محصولات با ارزش افزوده زیاد از پلیمرهای تجاری مهم مانند پلی‌اتیلن ترفتالات، پژوهش‌های درخور توجهی در صنعت الیاف مصنوعی انجام شده است. فرایند ریسندگی مذاب دوجزئی که در آن دو پلیمر با هم اکستروود می‌شوند تا رشته واحدی را تشکیل دهند، روش تولید شناخته‌شده‌ای برای تولید الیاف با مقطع غیردایره‌ای، الیاف چین‌دار، الیاف رسانای

N تعداد جزایر در سطح مقطع رشته اکستروژده شده است. در فناوری تولید الیاف دوجزئی تقسیم‌پذیر، الیاف اولیه از بخش‌هایی از دو پلیمر متفاوت (A و B) مطابق با شکل ۳ب تشکیل شده است. هر گروه پلیمر A را گروهی از پلیمر B احاطه کرده است. این نوع ریسندگی با نوع جزایر در دریا متفاوت بوده و هدف از آن، استفاده از پلیمر دوم در محصول نهایی و همچنین جدایی دو پلیمر به‌طور مکانیکی به جای حذف پلیمر دوم به‌طور شیمیایی و فرایندهای انحلال است [۱۷]. برای تبدیل الیاف دوجزئی تقسیم‌پذیر به میکروالیاف می‌توان از سه روش کلی استفاده کرد. روش اول، تقسیم الیاف دوجزئی به میکروالیاف شامل تقسیم ساختار لیفی با یک امولسیون آبی مثل بنزیل الکل یا فینیل اتیل الکل برای تقسیم الیاف به رشته‌های فیلامنتی ظریف‌تر است. روش دوم، شامل تشکیل رشته‌های تقسیم‌پذیر و سپس تقسیم الیاف با خم کردن یا کار مکانیکی آن‌ها در حالت خشک یا در آب گرم است. در روش سوم، الیاف به‌صورت هیدرولیکی یا مکانیکی برای شکستن و جداسازی سطح مقطع الیاف دوجزئی، سوزن‌زنی می‌شوند و الیاف شکافته‌شده با نمره کم را تشکیل می‌دهند [۱۸]. از فرایند سوزن‌زنی تحت جریان آب تحت فشار یا درهم‌رفتگی آبی (hydroentanglement) برای تقسیم الیاف مزدوج و چندجزئی استفاده می‌شود. این فرایند موجب می‌شود، الیاف به‌طور هم‌زمان از لیف مادر جدا و درهم پیچیده شوند و لایه بدون بافتی را ایجاد کنند [۱۹]. با استفاده از این فناوری در ریسندگی می‌توان الیافی با سطح مقطع‌های مختلف تولید کرد. الیاف تقسیم‌پذیر را می‌توان با سطح مقطع سه‌گوش تولید کرد. سطح پارچه‌های میکروالیاف تهیه‌شده با ریسندگی دوجزئی تقسیم‌پذیر به‌دلیل تقسیم رشته‌ها دارای مویرگ‌های متعددی هستند، بدین دلیل رطوبت را به‌سرعت جذب و منتقل می‌کنند. این پارچه‌های تولیدی از میکروالیاف، دارای قابلیت کشسانی بوده و از نرمی، صافی و حجم برخوردارند، بنابراین کاربردهای زیادی دارند [۲۰].

۲-۲ فناوری تولید میکروالیاف بریده

این نوع میکروالیاف به‌شکل رشته‌های الیاف پیوسته و جدا از هم نیستند، بلکه به‌شکل بریده‌بریده و رشته‌های کاملاً درهم‌تیده هستند. میکروالیاف بریده معمولاً با روش‌های دمش مذاب، اسپان باند، ریسندگی فلاش (flash spinning)، ریسندگی گریز از مرکز و الکترورسی تولید می‌شوند. البته روش‌های دیگری همچون ریسندگی غلاف-مغزی (sheath-core spinning)، جریان متلاطم، ریسندگی جت، ریسندگی امولسیون وجود دارند که از اهمیت



شکل ۳- فرایند تولید میکروالیاف: (الف) جزیره در دریا [۲۱] و (ب) دوجزئی تقسیم‌پذیر [۱۸].

الیاف تولیدی با این روش دارای نمره تقریبی در حدود $1/0000$ den بوده و سطح مقطع لیف غیردایره‌ای است. این فناوری برای تولید صنعتی چرم مصنوعی از نوع جیر، پارچه‌های ابریشم مانند پارچه‌های پاک‌کن و صافی‌های ظریف ساخته‌شده از الیاف بسیار ریز استفاده می‌شود. با طراحی رشته‌ساز، تعداد جزایر در نخ چندرشته‌ای بسیار ریز مشخص و نسبت جزء جزیره به دریا با سرعت اکستروژد کردن هر جزء تعیین می‌شود [۷]. برای محاسبه ظرافت میکروالیاف تولیدشده (F_{mf}) با روش جزیره در دریا می‌توان از معادله (۳) استفاده کرد [۱]:

$$F_{mf} = F_f \frac{R}{N} \quad (3)$$

که در آن، F_f ظرافت رشته اکستروژده‌شده، R کسر وزنی بخش جزیره و

کمتری برخوردارند.

بر کاهش قطر لیف اثرگذارند. کاهش قطر لیف در نزدیکی مجموعه ریسندگی بسیار سریع رخ می‌دهد و قطر رشته به محدوده میکروالیاف می‌رسد. افزون بر این، جریان هوا سازوکار ضروری در کاهش قطر لیف است [۳۰، ۳۱]. به‌طور کلی، ضخامت نمد لیفی تشکیل شده با افزایش فشار هوا کاهش می‌یابد. کاهش قطر لیف با افزایش فشار هوا موجب طولانی‌تر شدن زمان جمع‌آوری برای دستیابی به وزن یکسان می‌شود. زمان جمع‌آوری طولانی‌الیاف بیشتر به نمدهای ضخیم‌تر منجر می‌شود. با افزایش فشار هوا، این پدیده باعث کاهش ضخامت لایه و ایجاد منافذ کوچک‌تر با تراکم بسته‌بندی بیشتر می‌شود. اثر افزایش دمای هوا و مذاب به کاهش گرانروی پلیمر منجر شده که باعث افزایش نقاط ضعف می‌شود. به‌طور کلی، دمای بیشتر در دمیدن مذاب با توجه به تخریب پلیمر مطلوب نیست [۳۲]. در ادامه فرایند، جمع‌کننده جریان‌های ضعیف را می‌گیرد که سبب تشکیل رشته‌های بی‌بافت یا شبکه‌ای از الیاف می‌شود [۲۳].

در فناوری دمزش مذاب متغیرهای مختلف، مانند نوع پلیمر؛ دما و گرانروی مذاب؛ سرعت، فشار و دمای هوا؛ فاصله مجموعه تا جمع‌کننده؛ سرعت جمع‌کننده؛ دمای مجموعه ریسندگی و نوع مجموعه بر منسوجات بی‌بافت تولیدی اثرگذارند. از جمع‌بندی مطالب پیش‌گفته می‌توان نتیجه گرفت، قطر متوسط الیاف در منسوجات بی‌بافت تولیدی عمدتاً به توان عملیاتی، گرانروی و دمای مذاب و دما و سرعت هوا بستگی دارد [۲۸].

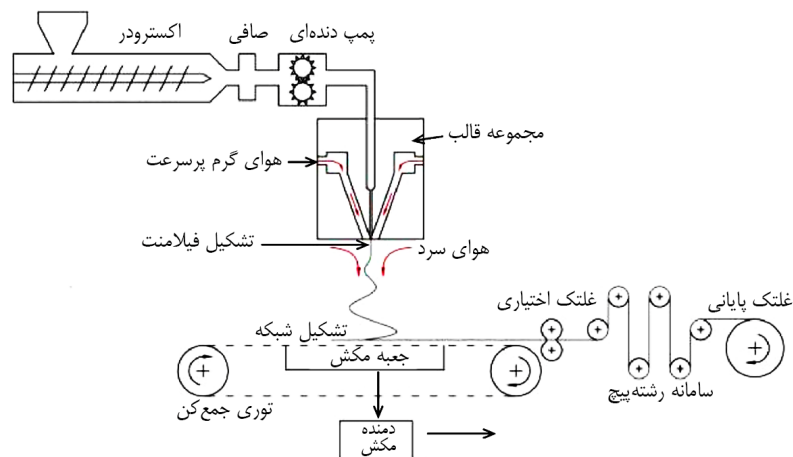
۲-۲-۲ روش اسپان باند

فرایند اسپان باند برای اولین بار در دهه ۱۹۴۰ معرفی و توسط Freudenberg و DuPont در دهه ۱۹۵۰ تجاری شد. در فرایند اولیه

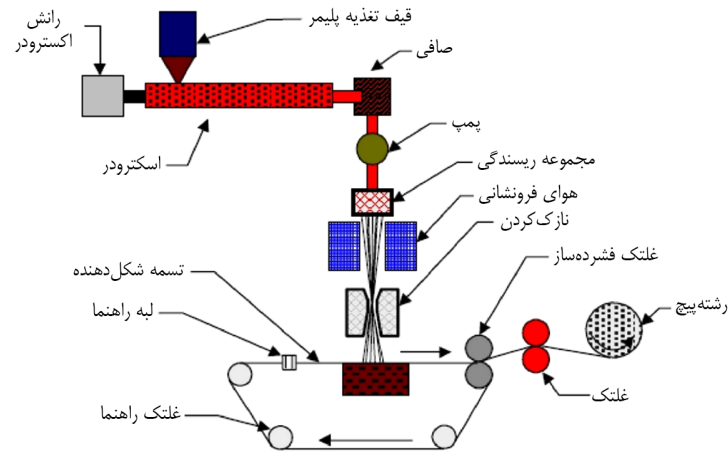
۲-۲-۱ دمزش مذاب

در سال ۱۹۵۴، ونت و همکاران [۲۲] مفهوم فرایند دمزش مذاب را برای پلیمرهای گرمانرمی معرفی کردند که میکروالیاف یا الیافی با قطر کمتر از $10 \mu\text{m}$ تشکیل می‌دادند. این پژوهشگران تحقیقات خود را در آزمایشگاه تحقیقاتی نیروی دریایی ایالات متحده برای توسعه میکروالیاف به‌منظور تولید صافی‌هایی روی هواپیماهای بی‌سرنشین استفاده کردند. فرایند دمزش مذاب، همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، نوعی فرایند تک‌مرحله‌ای برای تبدیل مواد پلیمری به الیاف بریده است. دمزش مذاب شامل قسمت‌های اکسترودر، پمپ دنده‌ای، مجموعه ریسندگی، خنک‌کن و جمع‌کن است [۲۳، ۲۴]. پلیمر به‌شکل گرانول، پودر یا تراشه با سرعت معینی از منبع تغذیه به اکسترودر تغذیه می‌شود [۲۷-۲۵]. پلیمرهای رایج استفاده‌شده در این فرایند پلی‌پروپیلن، پلی‌استیرن، پلی‌استر، پلی‌یورتان، پلی‌آمید ۶، پلی‌آمید ۶،۶، پلی‌آمید ۱۱، پلی‌آمید ۱۲، پلی‌اتیلن و پلی‌کربنات هستند [۲۸].

پلیمر مذاب از طریق روزنه‌های کوچک دارای جریان هوای داغ به بیرون اکسترودر می‌شود. نیروی اصطکاک هوا باعث دراز شدن مذاب و تبدیل آن به لیف با قطر کم می‌شود [۲۱-۱۹]. جریان هوای داغ که معمولاً دمایی برابر با مذاب پلیمر دارد در انتقال الیاف به جمع‌کننده نیز کمک می‌کند [۲۷]. دمای هوا در اثر انتقال گرما و اختلاط با هوای اطراف، به‌طور تصاعدی میان مجموعه ریسندگی و جمع‌کننده کاهش می‌یابد که به انجماد لیف منجر می‌شود [۲۹]. یکی از ویژگی‌های متمایز فرایند دمزش مذاب آسانی تولید لیف‌های ظریف است، چون در این فرایند سرعت هوا و دما به‌طور هم‌زمان



شکل ۴- فرایند دمزش مذاب برای تولید میکروالیاف [۲۸].



شکل ۵- فرایند اسپان باند برای تولید میکروالیاف [۳۶].

ریسندگی منتقل و از رشته ساز خارج می شود. بنابراین، رشته های پلیمری مذاب تشکیل می شود. رشته های خروجی وارد محفظه خنک سازی می شوند، جایی که با هوای خنک کن سرد و جامد می شوند. سپس به الیاف تبدیل شده و پس از آن به شکاف هوای درون تضعیف کننده هدایت می شوند. الیاف در تضعیف کننده به وسیله مکنده با سرعت زیاد کشیده شده، در حالی که رشته ها با سرعت زیاد روی تسمه جمع آوری می شوند. از آنجا که الیاف با سرعت بسیار زیاد جمع آوری می شوند، تحت کشش قرار می گیرند که به کاهش قطر لیف منجر می شود. ناپایداری خمشی نیز ممکن است رخ دهد که موجب نایکنواختی لیف می شود.

هنگامی که لیف به تسمه نزدیک است، سرعت جریان هوا در تضعیف کننده کاهش می یابد. از این رو، سرعت حرکت لیف کند می شود و روی تسمه متحرک قرار می گیرد و به لایه بی بافت تبدیل می شود. نوعی سامانه خلأ در زیر تسمه وظیفه مکش هوا را برعهده دارد و شکل دهی را آسان می کند. سپس پارچه با تسمه به خط اتصال منتقل می شود که در آنجا پیونددهی گرمایی و شیمیایی یا درهم تنیدگی هیدرولیکی اعمال می شود. پس از اتصال، محصول پارچه بی بافت به طور کامل شکل می گیرد [۳۶]. پارچه میکروالیافی اسپان باند به دلیل خواص گرمایی خوب، استحکام زیاد، نفوذپذیری خوب و بسیاری از خواص جذاب دیگر، به طور گسترده در کاربردهای بهداشتی، پزشکی، ساختمانی و کشاورزی و همچنین در ظرفیت های مختلف در زندگی روزمره استفاده می شود.

۲-۲-۳ روش فلاش

ریسندگی فلاش نوعی فناوری اصلاح شده براساس ریسندگی اسپان باند است که در آن پلیمری مانند پلی پروپیلن، حل و اکسترودر

مشکل جداسازی الیاف وجود داشت که بعدها با چند پیشرفت مهم برطرف شد. در سال ۱۹۷۴، اولین نوآوری در این زمینه برای دستیابی به شبکه ای با یکنواختی بیشتر معرفی شد. پیشرفت بعدی که در این زمینه به ثبت رسید، در سال ۱۹۸۲ انجام شد و شامل کپسول کردن سامانه خنک کن و کشیدن الیاف به داخل یک محفظه است که به آن سامانه بسته می گویند. یکی دیگر از پیشرفت های در زمینه اسپان باند چندجزئی توسط Hills در سال ۱۹۹۲ به ثبت رسید که در آن تعداد و ساختار اکسترودرها تغییر کرد و مجموعه ریسندگی بسیار پیچیده تری برای دستیابی به آرایش های مقطعی متفاوت برای پلیمرهای مختلف استفاده شد [۳۳، ۳۴]. بی بافت های پلیمری به دلیل فرایندهای تولید کارآمد و بسیاری از ویژگی های برتر در مقایسه با پارچه های رایج، به طور گسترده تری در دسترس بوده و مقرون به صرفه تر هستند. محدوده قطر الیاف حاصل از این روش ۱۵-۳۵ μm است [۳۵].

فرایند اسپان باند مطابق با شکل ۵، شامل مراحل تشکیل رشته لیفی، سرد کردن، کشش، پیوند و جمع کردن است. مواد اولیه پلیمرهایی با وزن مولکولی زیاد و توزیع وزن مولکولی پهن مانند پلی پروپیلن، پلی آمیدها و پلی استرها هستند. پلی آمیدها و پلی استرها نیاز به خشک کردن دارند، زیرا دارای رطوبت زیادی هستند. در این فرایند، پلیمر به شکل گرانول به اکسترودر تغذیه می شود. گرانول های پلیمری به دلیل گرمای اعمالی به وسیله المنت های الکتریکی و پیچ های اکسترودر ذوب و مخلوط می شوند. مخلوط مذاب پلیمری و سایر افزودنی ها از اکسترودر به پمپ دنده ای وارد می شود که سرعت جریان مخلوط پلیمری ورودی به مجموعه ریسندگی را کنترل می کند. مجموعه ریسندگی، برای حفظ یکنواختی دما و توزیع پلیمر استفاده می شود. مذاب پلیمری از پمپ به مجموعه

همان‌طور که رشته‌ها در حال رشد هستند به الیاف بسیار نازک و بلند کشیده می‌شوند تا زمانی که روی جمع‌کننده قرار می‌گیرند که در آن شبکه الیاف ظریف حاصل، جمع می‌شود. اما با وجود سادگی فرایند، جت در آن ناپایدار بوده و ممکن است به شکل قطره بشکند یا به تشکیل لیف مهره‌ای منجر شود. همه این عوامل سبب کاهش کیفیت رشته حاصل می‌شود [۴۰]. در این فرایند، همان‌طور که رشته از رشته‌ساز خارج می‌شود، تحت تأثیر نیروها از جمله نیروهای اینرسی، کشش سطحی، گرانشی و گریز از مرکز قرار می‌گیرد. همچنین، محلول و فرایند نه تنها بر ساختار، بلکه بر خواص گرمایی و مکانیکی الیاف نیز اثر می‌گذارند. بلورینگی لیف با سرعت ریسندگی نسبت معکوس دارد. عوامل دیگری هم مثل تبخیر حلال، تغییر دما و پارامترهای هندسی نیز وجود دارد که بر الیاف اثرگذارند [۴۴-۴۱].

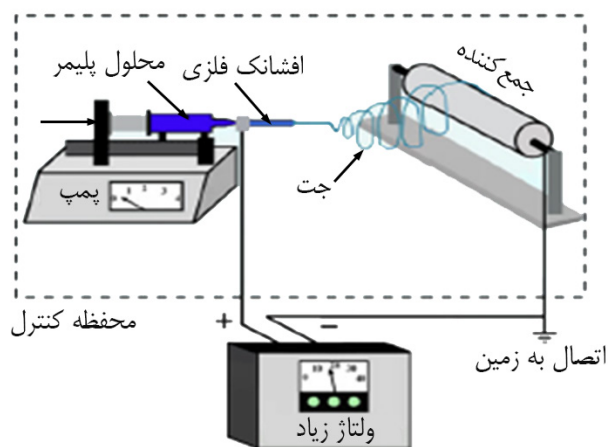
۲-۲-۵ الکتروریسی

الکتروریسی در دهه ۱۹۳۰ اختراع شد که با استفاده از آن، تولید الیاف بسیار ظریف با قطر کمتر از $1 \mu\text{m}$ امکان‌پذیر شد. الکتروریسی روشی برای تولید الیاف پلیمری بسیار ظریف بوده که ساخت آن‌ها با سایر روش‌ها دشوار است. الکتروریسی روشی ساده و کاربردی برای تولید الیاف از پلیمرها، سرامیک‌ها و فلزات به شکل محلول یا مذاب با قطری در گستره نانومتر تا میکرومتر است [۴۵، ۴۶]. در این روش، محلول یا مذاب از درون یک سوزن باریک یا رشته‌ساز تغذیه می‌شود. محلول یا مذاب پلیمری با سرعت جریان مناسب و بهینه از روزنه خارج می‌شود. سوزن که الکتروود نیز هست با یک منبع ولتاژ زیاد باردار می‌شود و در فضای بین نوک سوزن و جمع‌کننده فلزی با فاصله 10 cm تا 25 cm از آن

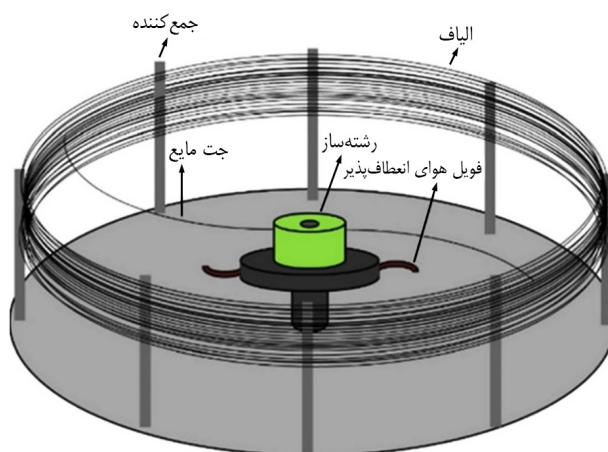
می‌شود. سپس، حلال پس از خروج از رشته‌ساز به سرعت تبخیر می‌شود. این کار باعث می‌شود تا رشته‌های منفرد به شکل بسیار ظریف درآیند و روی صفحه متحرک جمع شوند. بررسی اختراعات در پایگاه داده جهانی نشان می‌دهد، حدود ۹۰ ثبت اختراع درباره ریسندگی فلاش برای بهبود فرایند ثبت شده است. تولید الیاف مجزا از پلیمرهایی با وزن مولکولی زیاد در ریسندگی فلاش نسبت به سایر فرایندها آسان‌تر است. با این حال، فرایندهای ریسندگی فلاش که تا به امروز توسعه یافته‌اند، رشته‌های الیافی کاملاً ظریف را تولید نمی‌کنند. با این حال، الیاف ریسیده با این روش به عنوان میکروالیاف بسیار ظریف شناخته می‌شوند [۳۷، ۳۸]. ظرافت رشته در محدوده $0/1 \text{ den}$ تا 10 den متغیر بوده و میانگین دنیر در هر رشته به طور تقریبی در محدوده $0/1 \text{ den}$ تا $0/15 \text{ den}$ است. سطح مقطع فیلامنت‌ها غیردایره‌ای است، همچنین برخی از رشته‌ها حباب‌های ریز دارند [۳۹]. در ریسندگی بدین روش پس از مدتی، در رشته تولیدشده نایکنواختی ایجاد می‌شود که نگرانی عمده‌ای به شمار می‌رود. برای به دست آوردن لایه بی‌بافت با ظاهر مناسب و وزن یکنواخت، باید برخی از الزامات را فراهم کرد [۴۰].

۲-۲-۴ روش گریز از مرکز

روش ریسندگی گریز از مرکز برای اکستروود کردن مذاب یا محلول‌های پلیمری به الیاف بسیار ظریف اختراع شده است. به تازگی، فناوری ریسندگی گریز از مرکز اختراع شده که برای تولید انبوه تارهای الیاف ظریف بی‌بافت از محلول‌های پلیمری و مذاب استفاده می‌شود. در فرایند گریز از مرکز مطابق با شکل ۶، رشته‌های مذاب یا محلول پلیمری از یک افشانک خارج می‌شوند که تحت نیروی گریز از مرکز به سرعت در حال چرخش است.



شکل ۷- دستگاه الکتروریسی [۵۲].



شکل ۶- فرایند گریز از مرکز برای تولید میکروالیاف [۴۳].

الکتروریسی شده، دانه تشکیل می‌شود. بنابراین، این مواد حلال‌های مناسبی برای الکتروریسی این نوع پلیمر نیستند. اما با استفاده از حلال‌هایی چون DMF و EtOH الیافی با باریک‌ترین توزیع قطر و یکنواختی زیاد را می‌توان تولید کرد [۵۲]. با استفاده از اتانول به‌عنوان حلال، نانوالیاف با توزیع قطر پهن را می‌توان تولید کرد، از این رو برای تولید میکروالیاف حلال مناسبی است [۵۰]. الکتروریسی را می‌توان به سه مرحله بررسی پلیمرهای الکتروریسی‌شونده، کنترل قطر الیاف الکتروریسی‌شده و توسعه نخ‌های نانو و میکروالیاف تقسیم کرد. اخیراً، الکتروریسی به‌طور هدفمند با استفاده از فناوری دمش مذاب یا ریسندگی فلاش در تولید انبوه نانوالیاف و میکروالیاف استفاده شده است.

۳ پیشرفت‌های اخیر در زمینه تولید میکروالیاف

پیشرفت‌های اخیر در زمینه تولید میکروالیاف را می‌توان به دو دسته استفاده از پلیمرهای مختلف در تولید و پیشرفت در فرایند تولید تقسیم‌بندی کرد. در حال حاضر، میکروالیاف پلی‌استر و نایلون تنها میکروالیافی هستند که به‌طور تجاری تولید می‌شوند. با پیشرفت دانش‌های فنی، پژوهش‌ها به‌سمت تولید میکروالیاف از سایر پلیمرها حرکت کرده است. کارخانه تولید الیاف Mont، از اولین تولیدکنندگان الیاف مصنوعی است که در توسعه و تولید میکروالیاف آکرلیک فعالیت داشته است. این کارخانه با استفاده از روش‌های ریسندگی رایج برای پلیمرها فقط با چند تغییر کوچک در خط تولید و بدون کاهش ظرفیت خط تولید توانسته است میکروالیاف آکرلیک با استحکام مناسب و نمره ۰/۸ dtex تا ۰/۹ dtex را تولید کند. این الیاف با نام‌های تجاری Myliss و Leacril Micro شناخته می‌شوند [۱]. از پلی‌پروپیلن می‌توان برای تولید میکروالیاف نیز استفاده کرد. دو روش تولید برای آن مطرح شده است، روش اول الکتروریسی مذاب است که میکروالیاف پلی‌پروپیلن صاف و یکنواخت تولید می‌شوند. روش دوم، تولید رشته الیافی پلی‌پروپیلن با روش‌های رایج است که سپس تحت تأثیر گرما و کشش هم‌زمان با دستگاه گرمایش لیزری CO₂ قرار می‌گیرند [۴، ۵۳، ۵۴]. در پژوهش دیگری از سلولوز در تولید میکروالیاف استفاده شده است. میکروالیاف تولیدشده از سلولوز، زیردست نرم‌تری دارند. همچنین، این میکروالیاف برخلاف پلی‌استر و نایلون، قابلیت جذب آب خوبی دارند. بدین سبب، راحتی پوشش در لباس‌های تولیدی از میکروالیاف سلولوزی ایجاد می‌شود [۵۵].

قرار می‌گیرد و پتانسیل الکتریکی زیادی بین ۵ kV تا ۳۰ kV ایجاد می‌کند. این میدان الکتریکی با ایجاد نیروهای الکتروستاتیکی بین نوک سوزن و جمع‌کننده باعث کشیده‌شدن قطره محلول پلیمری و تغییر شکل آن می‌شود. بنابراین، باعث تغییر شکل قطره نیمه‌کروی به‌شکل قیفی شده که مخروط تیلور نامیده می‌شود. زمانی که ولتاژ به حد مناسب می‌رسد، بارهای سطحی قطره بر کشش سطحی غلبه می‌کنند. در این حالت، الیاف کشیده‌شده به‌سمت هدف متصل به زمین (جمع‌کننده) حرکت می‌کند. سپس، بار الکتروستاتیکی به درون زمین تخلیه شده و الیاف جمع‌آوری می‌شوند. حلال موجود در سیال در حین حرکت به‌سمت هدف متصل به زمین، تبخیر می‌شود. زمانی که الیاف از سوزن جدا می‌شوند به‌دلیل نیروهای الکتروستاتیکی ناشی از میدان الکتریکی خارجی و بار سطحی جمع‌شده روی الیاف الکتروریسی‌شده، حرکت می‌کنند [۴۷]. قطر، تخلخل و سایر خواص الیاف الکتروریسی‌شده به عواملی مانند خواص محلول پلیمری (نوع حلال، غلظت، گرانروی و عدد بری)، ولتاژ اعمالی و فاصله افشانک تا جمع‌کننده بستگی دارد. تحلیل داده‌های تجربی نشان می‌دهد، غلظت محلول الکتروریسی و فاصله سوزن تا جمع‌کننده بر ساختار الیاف الکتروریسی شده تأثیر زیادی دارند و آن‌ها را تغییر می‌دهند [۴۸].

در پژوهشی، نانوالیاف و میکروالیاف پلی‌آکریلونیتریل به‌عنوان تابعی از خواص محلول در غلظت‌های مختلف مطالعه و مشخص شد، گرانروی محلول‌ها به غلظت محلول، قطر و یکنواختی الیاف، کشش سطحی و رسانندگی الکتریکی محلول پلیمری، بستگی دارد. همچنین، غلظت محلول و گرانروی نقش مهمی در مهره‌ای شدن آن دارد. متوسط قطر الیاف الکتروریسی‌شده با افزایش غلظت محلول و گرانروی آن، افزایش می‌یابد. درهم‌تنیدگی‌های زنجیرها یکی از عواملی است که می‌تواند به‌طور درخور توجهی بر تشکیل الیاف در طول فرایند الکتروریسی پلیمری اثر بگذارد. با افزایش بیشتر غلظت پلیمر، دانه‌ها از بین می‌روند و رشته‌ای از الیاف پیوسته الکتروریسی می‌شود. نتایج نشان داد، غلظت پلیمر تا حد زیادی بر قطر الیاف و یکنواختی آن‌ها اثرگذار است [۴۹، ۵۰]. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل‌ها نشان داد، غلظت پلیمر و ولتاژ اعمالی از اصلی‌ترین عوامل مؤثر بر قطر الیاف هستند [۵۱]. اثر حلال نیز به‌عنوان یکی دیگر از عوامل اثرگذار بر ساختار الیاف الکتروریسی‌شده بررسی شد. در این بررسی، پلی‌وینیل پیرولیدون و حلال‌های N₂O-N-دی‌متیل فرمامید (DMF)، (N-متیل پیرولیدون (NMP)، کلروفرم، EtOH و ProOH استفاده شد. نتایج نشان داد، زمانی که از حلال‌های NMP، کلروفرم و ProOH استفاده شود با وجود کمی متوسط قطر الیاف

جدول ۱- مقایسه روش‌های تولید میکروالیاف.

روش تولید	مزایا	چالش‌ها
ریسندگی مستقیم	روش تولید نسبتا ساده، هزینه کمتر تولید و بی‌نیازی به عملیات ثانویه	محدودیت در ظرافت، پارگی زیاد در حین تولید، نایک‌نواختی لیف تولیدی و تولید الیاف پرزدار
ریسندگی دوگانه	روش تولید نسبتا ساده، امکان تولید لیف چندجزئی، زیردست نرم، نداشتن محدودیت در ظرافت، قابلیت تولید در سطح تجاری و تولید الیاف با سطح مقطع‌های خاص	محدودیت در انتخاب پلیمر، نیاز به عملیات شیمیایی یا مکانیکی ثانویه، مشکلات زیست‌محیطی ناشی از به‌کارگیری حلال، سطح مقطع غیردایره‌ای و هزینه‌بری تولید
دمش مذب	تولید صفحه‌های بی‌بافت، آسانی تولید لیف‌های ظریف، عدم استفاده از حلال، مشکلات زیست‌محیطی کمتر و هزینه تولید کمتر	محدودیت در انتخاب پلیمر (پلیمرهای گرماترم) و عدم تولید لیف چندجزئی
اسپان باند	مقرون به‌صرفگی، خواص گرمایی خوب، استحکام زیاد و نفوذپذیری مناسب	جداسازی سخت الیاف از یکدیگر، محدودیت در ظرافت و انتخاب پلیمر
فلاش	ظرافت زیاد، سهولت تولید الیاف ظریف از پلیمر با وزن مولکولی زیاد	نایک‌نواختی، مشکلات زیست‌محیطی ناشی از به‌کارگیری حلال، به‌وجود آمدن یک لایه بی‌بافت و سپس جداسازی الیاف
گریز از مرکز	تولید الیاف بسیار ظریف و نداشتن محدودیت در انتخاب پلیمر	کنترل سخت فرایند تولید، ناپایداری زیاد در تولید و نداشتن قابلیت رقابت در سطح تجاری
الکتروریسی	سادگی فرایند، تولید الیاف بسیار ظریف و تولید لیف از پلیمر، سرامیک و فلز	عوامل اثرگذار زیاد بر فرایند تولید، مشکل مهره‌ای شدن لیف و سرعت تولید بسیار کم

۴ میکروالیاف کربنی

الیاف کربن تولیدشده با کربنی کردن الیاف پیش‌ماده برپایه قیر یا پلی‌آکریلونیتریل را می‌توان به‌عنوان یک محصول صنعتی در مقیاس بزرگ دانست. الیاف کربن با وجود استحکام مکانیکی زیاد در کاربردهای خاص بسیار شکننده است [۵۹]. الیاف نانولوله کربنی و گرافن در مقایسه با الیاف کربن جامد، دارای خواص مکانیکی عالی، وزن کم، رسانندگی الکتریکی خوب، ساختار متخلخل و امکان ادغام با نانومواد مختلف هستند [۶۰، ۶۱]. نانولوله‌های کربنی خواص مکانیکی، شیمیایی و الکتریکی بسیار خوبی دارند [۶۲-۶۴]. روش‌های مختلفی برای تولید میکروالیاف کربنی ظریف وجود دارد که به‌طور کلی می‌توان آن‌ها را به دو دسته تریسی و خشک‌ریسی تقسیم کرد [۷۰-۶۵]. میکروالیاف کربنی را می‌توان با استفاده از روش تریسی مشابه روش تولید الیاف پلیمری، تولید کرد. هنگامی که یک پلیمر پراکنده در حلال A از طریق یک لوله موئین به حلال B (که در آن A محلول است، اما پلیمر نیست) اکستروژد می‌شود، پلیمر به‌دلیل جدایی فاز، متراکم می‌شود و لیف را تشکیل می‌دهد. چنین رویکردی در ریسندگی در ابتدا برای ریسندگی الیاف نانولوله

در پژوهش‌های جدیدتر پژوهشگران توانسته‌اند، بدون تغییر رشته‌ساز، الیافی با سطح مقطع‌های خاص تولید کنند. در ثبت اختراعی، مذاب دو پلیمر را از یک رشته‌ساز با هندسه ثابت عبور دادند و به لیف دوجزئی با سطح مقطع مطلوب دست یافتند. در تولید این الیاف دوجزئی برای دستیابی به سطح مقطع‌های متفاوت باید یکی از عوامل مثل گرانروی نسبی یکی از اجزای پلیمر نسبت به سایر پلیمرها را تغییر داد [۵۶]. پیشرفت دیگری در فرایند تولید میکروالیاف استفاده از سامانه‌های فرو نشان شعاعی (radial quenching system) و خنک‌کن خودمکش (self-suction cooling device) است که برای سازنده امکان تولید الیافی با ظرافت بیشتر و کیفیت بهتری را فراهم می‌آورد [۵۷، ۵۸]. با توجه به مرور روش‌های تولید میکروالیاف می‌توان مزایا و معایب هر یک از آن‌ها را مطابق با جدول ۱ خلاصه کرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر یک از روش‌ها دارای مزایا و معایبی است که باید با توجه به شرایط کاربری و خواص مورد نیاز یکی از این روش‌ها انتخاب شود. برای مثال، اگر هدف تولید الیاف بسیار ظریف باشد، روش الکتروریسی بهترین روش است. در حالی که سرعت تولید این روش بسیار کم است و قابلیت رقابت در سطح تجاری را ندارد.

۳- پیرولیز یک پیش‌ماده آلی نظیر قطران نفت، قطران زغال سنگ، الیاف سلولوزی (مانند ویسکوز ریون)، پلی(وینیل‌الکل)، پلی(وینیل استات)، پلی(وینیل کلرید)، پلی پروپیلن، پلی بوتادیان و پلی(آکریلونیتریل).

در حال حاضر، روش‌های اول و دوم به خاطر بازده کم و ناپیوستگی الیاف تولیدی در مرحله پژوهش هستند و تنها روش پیرولیز ترکیبات آلی، روش اقتصادی برای تولید الیاف کربن است. بنابراین، ساخت الیاف کربن از پلیمرها و قیر متداول‌تر از ساخت الیاف کربن از حالت گازی است. زیرا الیاف کربن حاصل از گازها کوتاه است، در حالی که الیاف تولیدی از پلیمرها و قیر می‌تواند هم کوتاه و هم پیوسته باشد. البته الیاف تولیدی از گازها گرافیت بیشتری داشته و بدین دلیل رسانندگی گرمایی و الکتریکی بیشتری دارند. تفاوت نوع پلیمرهای استفاده‌شده در تولید الیاف کربن سبب تغییر بازده تولید آن‌ها شده به طوری که پلیمر پلی(آکریلونیتریل) دارای بیشترین بازده برای تولید الیاف کربن است [۷۸، ۷۹].

۵ خواص ویژه میکروالیاف

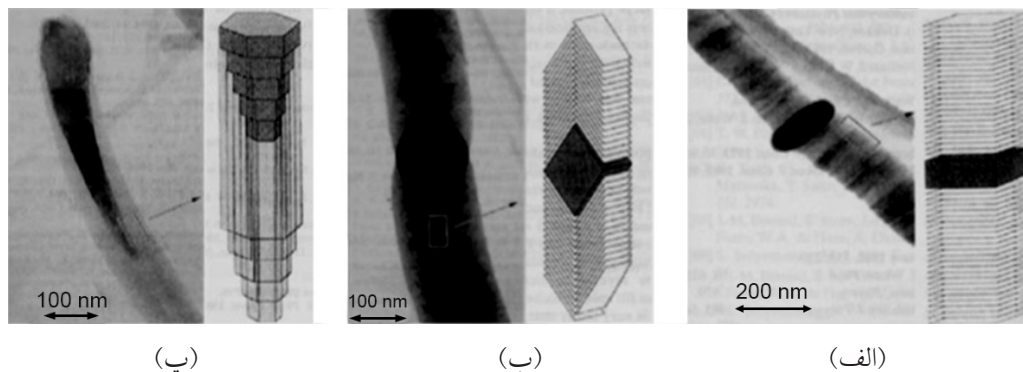
خواص میکروالیاف به‌طور جالب توجهی با کاهش دیر هر رشته (dpf) تحت تأثیر قرار می‌گیرد. این تغییر خواص ممکن است بر شرایط تولید و کاربرد نهایی اثرگذار باشد. کاهش dpf اثر زیادی بر انعطاف‌پذیری الیاف دارد که به نوبه خود مشکلات تولید را افزایش می‌دهد. زیرا در هر مرحله که الیاف تحت عملیات قرار می‌گیرند، احتمال تشکیل پرز و شکستن لیف بیشتر می‌شود و نیاز است که مراحل تولید را کاهش داد. این افزایش انعطاف‌پذیری با کاهش dpf به دلیل کاهش استحکام خمشی است. کاهش استحکام خمشی میکروالیاف به آسیب دیدن لیف در فرایند برش منجر می‌شود. تولید

کربنی توسط گروه Polin استفاده شد [۶۵]. به‌طور خلاصه، ساخت نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره به‌وسیله یک سطح‌فعال در محلول آبی و سپس تزریق به حمام انعقادی پلی‌وینیل‌الکل، انجام می‌شود. چون سطح‌فعال به‌وسیله پلیمر جابه‌جا می‌شود، لیف ژل‌مانندی از نانولوله‌های کربنی فروریخته تشکیل می‌شود. الیاف نانولوله کربنی برخلاف الیاف کربن معمولی، می‌توانند به‌خوبی خم و بدون شکستگی محکم بسته شوند. خواص مکانیکی الیاف را می‌توان با بهینه‌سازی فرایند ریسندگی و مراحل پس از آن (کشش) بهینه کرد [۷۴-۷۱]. با این حال، اغلب پلیمرها به‌طور اجتناب‌ناپذیری رسانندگی گرمایی و الکتریکی لیف حاصل را کاهش می‌دهند.

Giang و همکاران برای اولین بار در سال ۲۰۰۲ از روش خشک‌ریسی برای تولید میکروالیاف نانولوله کربنی استفاده کردند [۶۷]. آن‌ها یک نخ نانولوله کربنی با طول ۳۰ cm را از یک نانولوله کربنی عمودی به‌کمک رسوب بخار شیمیایی بیرون کشیدند. Zhang و همکاران، یک میکروالیاف پیوسته با استحکام زیاد تولید کردند [۷۰]. تا کنون، راهبردهای مختلفی چون تنظیم طول [۷۵]، چگالی بسته‌بندی [۷۶] یا ساختار نانولوله‌ها [۷۷] برای بهبود عملکرد لیف پیشنهاد شده است.

با توجه به چگونگی قرارگیری صفحات گرافیتی در کنار یکدیگر سه نوع مختلف از میکروالیاف کربنی با ساختارهای صفحه‌ای، لوله‌ای و جناغی وجود دارند که در شکل ۸ ساختار آن‌ها نشان داده شده است. برای تولید میکروالیاف کربنی تاکنون سه روش مختلف زیر بیان شده است:

- ۱- رشد تک‌بلور کربن با استفاده از تخلیه قوس الکتریکی تحت یک گاز خنثی؛
- ۲- رشد شیمیایی کربن از فاز بخار با تخریب گرمایی گازهای هیدروکربنی مانند استیلن و استفاده از کاتالیزگرهایی چون آهن، مس یا پالادیم در دمای زیاد و



شکل ۸- ساختار میکروالیاف: (الف) صفحه‌ای، (ب) جناغی و (پ) لوله‌ای [۷۹].

به الیاف معمولی بیشتر شود. همچنین، عامل مزبور سبب شده که میکروالیاف مثل یک شبکه مویرگی قوی عمل کنند که افزون بر کشیدن مایعات، ذرات و میکروکروم‌های موجود در مایع را نیز می‌توانند جذب کنند. بنابراین، ترکیب افزایش سطح مؤثر و عمل مویرگی به میکروالیاف قابلیت جذب مقدار زیادی مایع (چند برابر وزن آن) را می‌دهد [۸۱].

میکروالیاف مصنوعی تقسیم‌پذیر، سبب افزایش سرعت صاف کردن می‌شود و عملکرد آن را بهبود می‌بخشد. قطر بسیار کم میکروالیاف نسبت به سایر الیاف باعث شده است تا برای کاربرد در صافی‌ها مناسب باشند که در آن اثر الکترواستاتیکی الیاف نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند. برخی از الیاف جداسازی از دو پلیمر متفاوت در شرایطی که دارای بار الکتریکی باشند، می‌توانند یک لیف را تشکیل دهند و برای مجموعه جدید مواد صاف‌کننده استفاده شوند. میکروالیاف تقسیم‌شدنی بیشتر به‌عنوان مواد مقاوم در برابر خم شدن در کاربردهای پالسی مناسب هستند که در آن‌ها محیط صافی به‌طور مداوم خم می‌شود [۶۹]. استفاده از میکروالیاف در صافی خودروها برای صاف کردن روغن و هوا سبب بهبود عملکرد موتور و عمر طولانی آن می‌شود [۸۱].

۶-۲ کاربردهای صنعتی

در ثبت اختراعی از میکروالیاف برای جذب روغن استفاده شده است. این محصول شامل الیاف پلیمری بسیار ظریف است که از پلیمر گرمانرم با اکستروود کردن از طریق مجموعه ریسندگی تولید می‌شود [۸۳]. در گزارش دیگر، پژوهشگران با استفاده از واکنش میکروالیاف مصنوعی با یک ماده مذاب، استحکام و مقاومت در برابر سایش و جذب آب و روغن را افزایش دادند [۸۴].

دستمال‌های یکبار مصرف شامل میکروالیاف پلیمری ذوب‌شده با الیاف تولیدشده از خمیر چوب است. الیاف خمیر چوب با درهم‌تنیدگی مکانیکی به هم متصل شده و درون ماتریسی از جنس میکروالیاف نگهداری می‌شوند. مواد بی‌بافت مناسب برای دستمال مرطوب یکبار مصرف که شامل لایه‌ای از میکروالیاف پلیمری با الیاف جاذب است، می‌تواند مایعاتی مثل روغن را به‌راحتی جذب کرده و بعداً به‌راحتی نیز از آن خارج کرد [۸۵]. از جمله کاربردهای صنعتی میکروالیاف می‌توان به مواردی مثل استفاده در پدهای موشواره رایانه‌ای است که در آن موشواره می‌تواند به‌راحتی در امتداد منسوج بلغزد. فرچه‌های پرداخت و هارد دیسک، عایق صوتی کارا، دیواره‌های جذب، روکش صندلی‌ها و چرم مصنوعی نیز از سایر موارد کاربرد آن‌هاست [۸۱].

پارچه از میکروالیاف چند مزیت دارد، اما به‌دلیل ظرافت الیاف، مشکلات زیادی در حین تولید رخ می‌دهد. محصولات نهایی تولیدشده از میکروالیاف افزون بر ویژگی‌های ظاهری و مد مانند تزئینات، نرمی و زیبایی، باید عایق هوا و ضدآب نیز باشند. بنابراین، نخ‌های میکرو در لباس‌های ورزشی، لایه بیرونی لباس‌های زنانه و مردانه و پارچه‌های خانگی کاربردهای زیادی دارند [۱].

در میکروالیاف به‌دلیل کاهش قطر، خواصی همچون سفتی خمشی، استحکام کششی و اصطکاک سطحی به‌طور درخور توجهی کم می‌شود. ویژگی‌هایی مثل چگالی خطی بسیار کمتر از ظرفیت‌ترین ابریشم، قابلیت پوشاندگی زیاد، زبردست بسیار نرم و یکنواخت، قابلیت شست‌وشو، جمع‌شدگی کم، استحکام زیاد، عایق باد، باران و سرما، عدم تشکیل الکتریسیته ساکن در میکروالیاف، جاذب فوق‌العاده (۷ برابر وزن خود) و خشک‌شدن سریع (در یک سوم زمان برای الیاف معمولی) باعث شده میکروالیاف قیمت بسیار بیشتر و کاربردهای ویژه‌ای در مقایسه با الیاف معمولی داشته باشند [۸۰، ۸۱].

۶ حوزه‌های کاربردی میکروالیاف

صنعت الیاف بازار جهانی دارد که بسیاری از تولیدکنندگان سهم بزرگی در آن دارند. زیرمجموعه‌های صنعتی صافی بی‌بافت از عوامل مؤثر در رشد بازار است. با این رشد مستمر پیش‌بینی می‌شود، بازار بی‌بافت در سال ۲۰۲۲ به ۶/۵ میلیارد دلار برسد. این بازار نشانگر نرخ رشد ترکیبی سالانه ۷٪ طی سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۲۱ براساس گزارش بازار از میکروالیاف و نانوالیاف است. گفتنی است، داده‌های واقعی درباره بازارهای نانوالیاف به‌تنهایی موجود نیست. با این حال، برنامه‌های کاربردی آینده در ارتباط با صنعت رو به رشد میکروالیاف باید به‌طور بالقوه دیده شود [۸۲].

۶-۱ جداسازی و صاف کردن

شیوع ویروس کرونا (COVID-19) نشان داد، حفاظت تنفسی نقشی حیاتی در دنیای کنونی ایفا می‌کند. توسعه صافی‌های لیفی بسیار ریز پلیمری که امکان صاف کردن طیف وسیعی از ذرات، ویروس‌ها و هواسل‌ها را فراهم می‌کنند، ضروری است. صافی‌های تولیدشده از روش دمش مذاب، ماسک‌های باکیفیت با قابلیت جلوگیری از همه‌گیری یک ویروس را دارند [۳۲]. سطح دسترس‌پذیر میکروالیاف بیش از ۱۰ برابر یک لیف معمولی است. قطر کوچک میکروالیاف باعث شده که مساحت مؤثر آن‌ها نسبت

۳-۶ ساخت و ساز

Sheng و Banthia روش‌های بهینه‌سازی استحکام ماتریس‌های برپایه سیمان با تقویت میکروالیاف را بررسی کردند. در این پژوهش، ملات سیمان با استفاده از ۱، ۲ و ۳٪ حجمی میکروالیاف مختلف از جمله پلی‌پروپیلن تقویت شده و این کامپوزیت در حالت سخت شده تحت بار خمشی قرار گرفت. این عامل سبب تقویت ماتریس میکروالیاف و افزایش مقاومت در برابر رشد ترک شد [۸۶]. رفتار تقویت کننده میکروالیاف در سیمان نیز بررسی شده است. آزمایش‌های چقرمگی شکست روی ورق نازک سیمان تقویت شده با پلی‌پروپیلن، پلی‌وینیل الکل و الیاف سلولوزی بازیافتی در شرایط خشک انجام شده است. چقرمگی بدون آسیب میکروسکوپی برای این کامپوزیت اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد، میکروالیاف پلی‌وینیل الکل و الیاف سلولوزی قابلیت آن را دارند تا به طور مؤثری تشکیل ترک را به تعویق بیندازند. در نتیجه، ترک‌برداری را که سبب خرابی می‌شود، به تأخیر می‌اندازند، اما میکروالیاف پلی‌پروپیلن قابلیت ایجاد سطح یکسانی از تقویت را ندارند [۸۷].

۴-۶ کاربردهای پزشکی

پارچه‌های تولید شده از میکروالیاف دارای منافذ تنفسی عالی هستند، بدین علت برای پوشش زخم استفاده می‌شوند. میکروالیاف به طور معمول از نظر سطح مقطع مثلثی هستند و لبه‌های تیز و قطر تقریبی $3 \mu\text{m}$ را دارند. به طور معمول، یک باکتری قطری بین $2 \mu\text{m}$ تا $5 \mu\text{m}$ دارد، بنابراین اندازه و ساختار بسیار کوچک میکروالیاف ابریز باعث می‌شود که باکتری‌ها از آن عبور نکنند. پیوندهای میکروالیاف پلی‌پروپیلن در مراقبت از زخم کاربرد دارند. همچنین، به عنوان لباس محافظ آب‌گریز برای جلوگیری از برخورد ترشحات بیماران و محافظت بیشتر در برابر آلودگی لباس کادر درمان استفاده می‌شوند. نرمی و انعطاف‌پذیری آن‌ها باعث می‌شود تا سازگاری عالی با پوست داشته باشند. افزون بر این، میکروالیاف کاربرد بالقوه‌ای در روپوش و ماسک‌های جراحی یکبار مصرف دارند [۱]. در ماسک‌های پزشکی، پارچه‌های بافته شده از میکروالیاف توخالی با ظرافت $0/1 \text{ dtex}$ به همراه الیاف بریده تک‌حفره‌ای استفاده می‌شوند. این محصول دارای ویژگی‌های منحصر به فردی مثل نرمی زیاد و وزن کم است [۸۸].

۵-۶ حوزه انرژی

دستگاه‌های فتوولتایی مانند سلول‌های خورشیدی پلیمری و خورشیدی حساس به رنگ را نیز می‌توان به صورت پارچه لباس از

جنس میکروالیاف ساخت که وزن کمی داشته و قابلیت ادغام با سایر دستگاه‌های میکرو را نیز دارند [۸۹،۹۰]. انرژی مکانیکی را می‌توان با استفاده از یک نانوذراتور لیفی شکل برای تولید نیروی الکتریکی استفاده کرد. Wang و همکاران این مفهوم را با پوشش دهی میکروالیاف کربنی با لایه نازکی از فیلم روی اکسید نشان دادند [۹۱]. ساختار با بافت لایه‌ای روی اکسید تحت کرنش فشاری می‌تواند خاصیت پیزوپتانسیل را در سراسر سطوح داخلی و خارجی ایجاد کند. در نتیجه، جریان الکتریکی در بخش خارجی ایجاد می‌شود [۹۲]. پیل‌های سوختی زیستی با استفاده از انرژی حاصل از سوخت‌های سبز و پایدار و کاتالیزگرهای زیستی یعنی آنزیم‌ها یا میکروارگانیسم‌ها می‌توانند انرژی تولید کنند [۹۳،۹۴]. پیل‌های سوختی زیستی در اندازه میکروالیاف کوچک شده و در مقایسه با همانندهای حجیم آن‌ها، به عنوان منابع انرژی قابل استفاده برای وسایل پزشکی استفاده می‌شوند. همچنین، الکترودهای میکروالیاف برای غلبه بر مشکلات مربوط به انتقال ضعیف الکترون و انتقال آهسته جرم استفاده می‌شوند که معمولاً در سلول‌های کوچک وجود دارند. الکترودهای میکروالیاف کربنی نسبت به الکتروود پلاتین معمولی پتانسیل‌های اضافی کمتری دارند [۹۵]. اما سطح ویژه کوچک میکروالیاف کربنی سبب محدود شدن توان خروجی و طول عمر عملیاتی محصول می‌شود. Mano و همکاران از میکروالیاف متخلخل نانولوله‌های کربنی را با استفاده از گلوکوز اکسید به عنوان آند و بیلی‌روبین اکسید به عنوان کاتد ساختند [۹۶]. لوازم الکترونیکی به واحدهای ذخیره انرژی مانند باتری‌های یونی لیتیومی نیاز دارند که چگالی انرژی زیادی را ارائه می‌دهند. Ren و همکاران با پیچاندن الیاف کامپوزیتی MnO_2/CNT با سیم لیتیوم که در جریان تخلیه $0/5 \text{ mA}$ داشت، به ظرفیت ویژه 100 mA.h/cm^3 رسیدند [۹۷]. با قراردادن سیلیسیم روی میکروالیاف نانولوله کربنی، عملکرد لیف کامپوزیتی به 1670 mA.h/g بهبود یافت [۹۸].

چند کار جالب درباره ادغام برداشت و ذخیره انرژی تاکنون گزارش شده است. در سلول خورشیدی و دستگاه هیبریدی ابرخازن، یک سیم تیتانیم با مواد فعال نوری در یک بخش و الکتروولیت ژل در بخش دیگر پوشش داده می‌شود تا به طور هم‌زمان تبدیل فتوولتایی و ذخیره انرژی محقق شود [۹۹]. بخش ابرخازن پس از قرارگیری در معرض نور به وسیله بخش فتوولتایی متصل شده به طور متوالی شارژ می‌شود. سپس، دستگاه می‌تواند انرژی ذخیره‌سازی را هنگامی تخلیه کند که دو بخش عملکردی جدا می‌شوند. Wang و همکاران [۱۰۰] نوعی ابرخازن الیافی را روی یک ژنراتور گرماالکتریکی انعطاف‌پذیر ادغام کردند تا انرژی مکانیکی را برداشت کنند. آن‌ها با استفاده از

میکروالیاف مصنوعی در صنعت نساجی قرار دارد که به عنوان یکی از فراوانترین آلاینده‌های محیط زیست به حساب می‌آید. الیاف میکروپلاستیکی مصنوعی از پلیمرهای زیست‌تخریب‌ناپذیر شامل پلی(اتیلن ترفتالات)، نایلون ۶، نایلون ۶۶، پلی پروپیلن و اسپاندکس با قطر کمتر از ۵ mm ساخته شده و در حین فرایندهای تکمیلی و شست‌وشوهای خانگی از منسوجات آزاد می‌شوند. ورود الیاف میکروپلاستیکی مصنوعی به اکوسیستم از طریق شست‌وشوی منسوجات است و استفاده روزافزون از ماشین لباس‌شویی خانگی، نقش مهمی در آلودگی محیط زیست ایفا می‌کند. مناطق شهری به دلیل جمعیت زیاد، سهم عمده‌ای در آلودگی اقیانوس‌ها دارند. پژوهش‌های علمی مختلف آثار نامطلوب این میکروآلاینده‌ها را در محیط‌های آبی، خشک، زنجیره غذایی و سلامت انسان گزارش کرده‌اند [۱۰۷]. الیاف میکروپلاستیکی مصنوعی اغلب در طول ساخت منسوجات، استفاده زیاد از این منسوجات و دفع زباله این کالاها در محیط آزاد می‌شوند [۱۰۸]. جداسدن الیاف میکروپلاستیکی از لباس‌های مصنوعی و منسوجات خانگی، از جمله پتو، ژاکت، جوراب، شلوار، حوله، لباس و غیره در طول چرخه کاربری آن‌ها بسیار رایج است [۱۰۹]. این الیاف در اثر عملیات مکانیکی و شیمیایی در هنگام شست‌وشوی منسوجات وارد فاضلاب می‌شوند [۱۰۷]. در زمان شست‌وشو، یک ژاکت می‌تواند تقریباً ۲۰۰۰ لیف میکروپلاستیکی را وارد محیط زیست کنند. به طور مشابه، از یک لباس شویی معمولی هنگام شست‌وشوی ۵ kg تا ۶ kg لباس از جنس الیاف مصنوعی، حدود ۶۵۰۰۰۰ لیف میکروپلاستیکی خارج شود. شست‌وشوی لباس‌ها بدون استفاده از مواد شیمیایی در مقایسه با شست‌وشو با مواد شوینده حدود ۳۰ برابر الیاف کمتری آزاد می‌کند [۱۱۰]. همچنین، خارج شدن الیاف از منسوجات به چگالی بستگی دارد و پوشاک ضخیم‌تر میکروالیاف بیشتری نسبت به پارچه‌های با چگالی کمتر آزاد می‌کند. در نتیجه می‌توان مشاهده کرد، پلی‌استر با چگالی بیشتر نسبت به نایلون، میکروالیاف بیشتری آزاد می‌کند [۱۱۱].

۷-۱ اثر الیاف میکروپلاستیکی بر حیات موجودات دریایی

میکروالیاف در محیط‌های مختلف از محیط‌های اقیانوس تا مناطق قطبی مشاهده شده است حتی اگر فاصله زیادی با خشکی داشته باشند. این آلاینده‌ها در محیط خشکی و دریایی اثر بدی بر محیط زیست آن ناحیه می‌گذارند و تهدیدی برای جانوران آبی به شمار می‌روند. میکروالیاف موجود در آب‌ها به دلیل بار الکتریکی ساکن، تمام مواد شیمیایی سمی، فلزات سنگین، مواد نفتی را که از پیش در

یک سوساز، جریان متناوب تولید شده را به طور مکانیکی به جریان مستقیم تبدیل کردند تا ابرخازن شارژ شود.

۶-۶ منسوجات هوشمند

حسگرهای دما بر پایه میکروالیاف نوری در مصارف مختلف صنعتی، از جمله کاربردهای زیست‌پزشکی، زمین‌شناسی، خودروسازی و دفاعی پیشنهاد شده‌اند. تقاضای فزاینده برای این دستگاه‌ها به علت دامنه دینامیکی زیاد، حساسیت زیاد، پاسخ سریع، فشردگی و استحکام آن‌هاست. افزون بر این، آن‌ها می‌توانند اندازه‌گیری‌های از راه دور و در محیط‌های سخت انجام دهند [۱۰۱]. اگر چه استفاده از دستگاه‌های بر پایه میکروالیاف پایه کربنی هنوز در مرحله اولیه بوده، اما به سرعت در حال تکامل است و قابلیت زیادی برای کاربردهای پوشیدنی انعطاف‌پذیر دارد. این دستگاه‌ها در اندازه کوچک برای تبدیل و ذخیره‌سازی انرژی، سنجش، فعال‌سازی و غیره استفاده می‌شود. الیاف الکترونیکی برای تحقق منسوجات هوشمند مورد نیاز است. با این حال، چالش مزبور تا حد زیادی ناشناخته باقی مانده است. تاکنون تنها یک دستگاه حافظه غیر فرار و یک نور آشکارساز با میکروالیاف کربن ساخته شده است. درخور توجه است که دستگاه‌های ترانزیستوری قبلاً با استفاده از میکروالیاف پلی‌امید و الیاف ابریشم ساخته شده‌اند [۱۰۴-۱۰۲]. Sun و همکاران یک دستگاه حافظه غیر فرار بر پایه میکروالیاف را گزارش کردند که در آن از میکروالیاف نانولوله کربنی و گرافن اکسید به ترتیب به عنوان الکترود رسانا و ماده فعال استفاده و با قراردادن میکروالیاف با ساختار هسته-پوسته، نوعی دستگاه حافظه بر پایه الیاف ساخته شد [۱۰۵]. آشکارساز لیفی توسط گروه Wang [۱۰۶] ارائه شده است. لیف پوشش‌یافته با نیکل با نانوسیم CO_3O_4 به عنوان الکترود مثبت عمل کرده، در حالی که میکروالیاف کربنی با پوشش گرافن اکسید هم به عنوان الکترود منفی و هم جمع‌کننده نور عمل می‌کند. هنگامی که دستگاه به عنوان یک ابرخازن شارژ می‌شود، جفت الکترون در حفره ایجاد شده در گرافن اکسید کاهش یافته در اثر میدان الکتریکی ناشی از تابش نور از هم جدا می‌شوند. در نتیجه، الکترون‌هایی از آند به سمت کاتد حرکت می‌کنند و باعث افزایش جریان ناشی می‌شوند.

۷ مشکلات زیست‌محیطی الیاف میکروپلاستیکی

الیاف میکروپلاستیکی در حوزه محیط زیست در برابر واژه

گزارش شده است که از طریق هوا و گرده‌های معلق در هوا آلوده شده‌اند. وجود این الیاف در آب آشامیدنی نیز گزارش شده که اکنون به‌عنوان موضوع مهمی در سلامت انسان مورد توجه قرار گرفته است [۱۰۷].

۸ نتیجه‌گیری

میکروالیاف را می‌توان نسل جدیدی از الیاف مصنوعی فوق‌ظریف به‌شمار آورد که هنوز به اوج خود در صنعت نساجی نرسیده‌اند. در طراحی، مواد اولیه، فرایندهای تولید، خواص و حوزه‌های کاربردی این نوع از الیاف مصنوعی هنوز طیف وسیعی از احتمالات وجود دارد که می‌تواند در آینده نزدیک تحول عظیمی در صنایع ایجاد کند. در حال حاضر، میکروالیاف گران بوده و قیمت آن‌ها در حدود ۵٪ تا ۱۰٪ و گاهی تا ۲۰٪ بیشتر از الیاف مصنوعی معمولی است. تولید میکروالیاف نسبت به الیاف معمولی هزینه‌بر است و بنابراین این الیاف نمی‌توانند بدون تغییرات درخور توجه در روش‌های تولید، جایگزین محصولات معمولی شوند. قیمت زیاد از موانع توسعه میکروالیاف در بسیاری از کاربردهای نساجی و صنعتی است. تاکنون هدف استفاده از میکروالیاف، کاربردهای خاص و ویژه به‌جای کاربردهای رایج بوده است. با این حال، اندازه بازار این الیاف در مقایسه با الیاف مصنوعی خیلی بزرگ نیست. بنابراین در سال‌های اخیر، شرکت‌های زیادی به‌سمت تولید میکروالیاف برای کاهش قیمت آن سوق یافته‌اند تا قیمت الیاف جدید را کاهش دهند. با توجه به شرایط بازار الیاف مصنوعی در ایران، که تولیدکنندگان علاقه‌ای به ریسک‌کردن در تولید الیاف با خواص جدید ندارند، شاید بتوان روش‌های ریسندگی دومارحله‌ای شامل ریسندگی جزیره در دریا و دوجزئی تقسیم‌پذیر را به‌دلیل آسانی تولید، هزینه‌بری کمتر تولید، امکان تولید الیاف ظریف، قابلیت تجاری‌سازی آسان و نیز بازگشت سرمایه سریع، روش‌های مناسبی برای تولید میکروالیاف در نظر گرفت.

مراجع

- [1] S. Mukhopadhyay and G. Ramakrishnan, "Microfibres", *Text. Prog.*, vol. 40, no. 1, pp. 1-86, 2008.
 [2] A. Suzuki and N. Mochizuki, "Mechanical properties and microstructure of poly(ethylene terephthalate)

آب وجود دارند، به خود جذب می‌کنند. آلاینده‌هایی مانند ترکیبات آلی پایدار و فلزات سنگین به‌وسیله این الیاف از آب به‌همراه سایر مواد مضر جذب می‌شوند که آثار مخربی بر حیات حیوانات دریایی دارند. الیاف میکروپلاستیکی با توجه به نسبت سطح به حجم زیاد آن‌ها، قابلیت جذب انواع زیادی از آلاینده‌ها را دارند که می‌تواند اثر مواد شیمیایی کشنده را افزایش دهند. آلودگی شیمیایی در حیوانات دریایی عمدتاً به مقدار و نوع سمیت مواد، سطح تجمع زیستی و ترشحات سمی بستگی دارد که به آثار احتمالی بر سلامتی و زندگی آبزیان منجر می‌شود. این الیاف ریز به‌اشتباه توسط انواع موجودات دریایی شامل مرجان‌ها، فیتوپلانکتون‌ها، زئوپلانکتون‌ها، ماهی‌ها، خارپشت‌های دریایی، خرچنگ‌ها، لاک‌پشت‌ها، پنگوئن‌ها، سخت‌پوستان و پرندگان دریایی خورده می‌شوند که بدین ترتیب جذب شده و کل زنجیره غذایی آن‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرد. پلانکتون‌ها که پایه زنجیره غذایی آبزیان هستند نیز تحت تأثیر آلودگی میکروالیاف پلاستیکی قرار می‌گیرند. افزون بر این، نیمی از گونه‌های پرندگان دریایی که از آبزیان تغذیه می‌کنند، به‌دلیل مواد شیمیایی سمی خطرناک ناشی از میکروالیاف پلاستیکی موجود در آن‌ها، آلوده شده و در خطر انقراض هستند [۱۰۷].

۲-۲ اثر الیاف میکروپلاستیکی بر انسان

میکروالیاف پلاستیکی از طریق غذا، آب و هوا وارد بدن انسان می‌شوند و از طریق مصرف غذاهای دریایی که عنصر تغذیه‌ای ضروری است وارد بدن ما می‌شود. آبزیان ۲۰٪ پروتئین حیوانی را برای جمعیت جهان تأمین می‌کنند و متأسفانه در معرض این آلاینده‌ها قرار می‌گیرند. وجود الیاف مصنوعی در دستگاه گوارش و بافت‌های غذاهای دریایی در بسیاری از پژوهش‌های اخیر گزارش شده است. تخمین زده می‌شود، تقریباً ۱۱۰۰۰ ذره میکروالیاف در سال توسط مصرف‌کنندگانی خورده می‌شوند که به‌طور منظم از صدف‌های دریایی تغذیه می‌کنند. مصرف غذاهای دریایی در صورت آلودگی آن‌ها به مقادیر زیادی از آلاینده‌ها، می‌تواند آثار مضری برای سلامتی انسان ایجاد کند. افزون بر غذاهای دریایی، وجود میکروالیاف پلاستیکی در سراسر جهان در عسل و شکر نیز

microfiber prepared by carbon dioxide laser heating", *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 90, no. 7, pp. 1955-1958, 2003.

- [3] A. Suzuki and D. Mizuochi, "Zone-drawing and zone-

- annealing of poly(L-lactic acid) microfiber prepared by CO₂ laser-thinning method”, *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 102, no. 1, pp. 472-478, 2006.
- [4] A. Suzuki and S. Narusue, “Isotactic polypropylene microfiber prepared by carbon dioxide laser-heating”, *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 92, no. 3, pp. 1534-1539, 2004.
- [5] A. Suzuki and K. Kamata, “Nylon 6 microfiber obtained by a continuous-thinning method with a carbon dioxide laser”, *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 92, no. 3, pp. 1454-1458, 2004.
- [6] A. Suzuki and T. Hasegawa, “High temperature zone-drawing of nylon 66 microfiber prepared by CO₂ laser-thinning”, *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 101, no. 1, pp. 42-47, 2006.
- [7] T. Nakajima, K. Kajiwara, and J.E. McIntyre, *Advanced Fiber Spinning Technology*, Woodhead, 1994.
- [8] W. Stibal and G. Schach, “New economic method to produce polyester bicomponent fibers”, *Chem. Fiber. Int.*, vol. 45, no. 4, pp. 296-300, 1995.
- [9] S. Tomioka and M. Kojima, “Spinnability and adhesiveness of polypropylene-polyethylene bicomponent fibers”, *Sen'i Gakkaishi*, vol. 35, no. 12, pp. T542-T547, 1979.
- [10] T. Kikutani, J. Radhakrishnan, S. Arikawa, A. Takaku, N. Okui, X. Jin et al., “High-speed melt spinning of bicomponent fibers: Mechanism of fiber structure development in poly(ethylene terephthalate)/polypropylene system”, *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 62, no. 11, pp. 1913-1924, 1996.
- [11] E. Giza, H. Ito, T. Kikutani, and N. Okui, “Fiber structure formation in high-speed melt spinning of polyamide 6/ clay hybrid nanocomposite”, *J. Macromol. Sci., Part B*, vol. 39, no. 4, pp. 545-559, 2000.
- [12] C.W. Macosko, “Morphology development and control in immiscible polymer blends”, in *Macromolecular Symposia*, Online Library: Wiley, vol. 149, no. 1, 2000, pp. 171-184.
- [13] J.Y. Kim, S.H. Kim, and T. Kikutani, “Fiber property and structure development of polyester blend fibers reinforced with a thermotropic liquid-crystal polymer”, *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.*, vol. 42, no. 3, pp. 395-403, 2004.
- [14] S.Y. Kim, S.H. Kim, S.H. Lee, and J.R. Youn, “Internal structure and physical properties of thermotropic liquid crystal polymer/poly(ethylene 2, 6-naphthalate) composite fibers”, *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.*, vol. 40, no. 5, pp. 607-612, 2009.
- [15] R. McCardle, D. Bhattacharyya, and S. Fakirov, “Effect of reinforcement orientation on the mechanical properties of microfibrillar PP/PET and PET single-polymer composites”, *Macromol. Mater. Eng.*, vol. 297, no. 7, pp. 711-723, 2012.
- [16] S. Sombatdee, T. Amornsakchai, and S. Saikrasun, “Reinforcing performance of recycled PET microfibrils in comparison with liquid crystalline polymer for polypropylene based composite fibers”, *J. Polym. Res.*, vol. 19, no. 3, pp. 1-13, 2012.
- [17] R.D. Pike, Sasse, P. Anthony, White, Edward Jason, Stokes, and Ty Jackson, and I. US Pat. No. 5759926 (to Kimberly-Clark Worldwide, Neenah, WI), 2 June 1998.
- [18] P. Jingjit and N. Srisawat, “Spinning of photocatalytic fiber as splittable segmented-pie bi-component fibers for antibacterial textiles”, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 19, no. 3, pp. 1554-1561, 2019.
- [19] C. Sun, D. Zhang, Y. Liu, and J. Xiao, “Bicomponent meltblown nonwovens and fibre splitting”, *J. Ind. Text.*, vol. 34, no. 1, pp. 17-26, 2004.
- [20] J.H. Lee, S.H. Kim, K.J. Lee, D.Y. Lim, and H.Y. Jeon, “Determining the absorption properties of split-type microfiber fabrics by measuring the change in color depth”, *Text. Res. J.*, vol. 74, no. 3, pp. 271-278, 2004.
- [21] K. Koenig, K. Beukenberg, F. Langensiepen, and G. Seide, “A new prototype melt-electrospinning device for the production of biobased thermoplastic sub-microfibers and nanofibers”, *Biomater. Res.*, vol. 23, no. 1, pp. 1-12, 2019.
- [22] J.G. McCulloch, “The history of the development of melt blowing technology”, *Int. Nonwoven. J.*, no. 1, 1999. <https://doi.org/10.1177/1558925099OS-80012>
- [23] K.C. Dutton, “Overview and analysis of the meltblown process and parameters”, *J. Text. Appar. Technol. Manag.*, vol. 6, no. 1, 2008.
- [24] R. Nayak, “Fabrication and characterisation of polypropylene nanofibres by melt electrospinning and meltblowing”, *Ph.D dissertation*, RMIT University, 2012.
- [25] N. Deng, H. He, J. Yan, Y. Zhao, E. Ben, J. Yan et al., “One-step melt-blowing of multi-scale micro/nano fabric membrane for advanced air-filtration”, *Polymer*, vol. 165, pp. 174-179, 2019.
- [26] Y. Pu, J. Zheng, F. Chen, Y. Long, H. Wu, Q. Li et al., “Preparation of polypropylene micro and nanofibers by electrostatic-assisted melt blown and their application”, *Polymers*, vol. 10, no. 9, pp. 959, 2018.
- [27] R.R. Bresee and W.-C. Ko, “Fiber formation during melt blowing”, *Int. Nonwoven. J.*, vol. 12, no. 2, 2003. <https://doi.org/10.1177/1558925003os-1200209>
- [28] J. Drabek and M. Zatloukal, “Meltblown technology for production of polymeric microfibers/nanofibers: A review”, *Phys. Fluid.*, vol. 31, no. 9, pp. 091301, 2019.
- [29] S. Xie, W. Han, G. Jiang, and C. Chen, “Turbulent air flow field in slot-die melt blowing for manufacturing microfibrillar nonwoven materials”, *J. Mater. Sci.*, vol. 53, no. 9, pp. 6991-7003, 2018.

- [30] B.R. Shambaugh, D.V. Papavassiliou, and R.L. Shambaugh, "Modifying air fields to improve melt blowing", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 51, no. 8, pp. 3472-3482, 2012.
- [31] L. Jarecki, A. Ziabicki, Z. Lewandowski, and A. Blim, "Dynamics of air drawing in the melt blowing of nonwovens from isotactic polypropylene by computer modeling", *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 119, no. 1, pp. 53-65, 2011.
- [32] Y. Kara and K. Molnár, "A review of processing strategies to generate melt-blown nano/microfiber mats for high-efficiency filtration applications", *J. Ind. Text.*, vol. 51, no. 1, pp. 137S-180S, 2022.
- [33] S.K. Batra and B. Pourdeyhimi, *Introduction to Nonwovens Technology*, DEStech Publications, Inc, 2012.
- [34] W.H. Hills, Method of making plural component fibers, US Patent No. 5162074, 1992.
- [35] V. Midha and A. Dakuri, "Spun bonding technology and fabric properties: A review", *J. Text. Eng. Fash. Technol.*, vol. 1, no. 4, pp. 1-9, 2017.
- [36] H. Lim, "A review of spunbond process", *J. Text. Appar., Technol. Manag.*, vol. 6, no. 3, 2010.
- [37] H. Blades and J.R. White, Fibrillated strand, US Patent 3081519, 1963.
- [38] S. Cloutier and L.M. Manuel, Flash spinning process for forming strong discontinuous fibres, US Patent 5415818, 1995.
- [39] M. Okamoto, "Spinning of ultra-fine fibers", *Adv. Fiber Spinn. Technol.*, pp. 187-207, 1994.
- [40] S. Noroozi and S.M. Taghavi, "Ultrafine nanofiber formation by centrifugal spinning", *Adv. Mater.*, pp. 143, 2020.
- [41] M.R. Badrossamay, H.A. McIlwee, J.A. Goss, and K.K. Parker, "Nanofiber assembly by rotary jet-spinning", *Nano lett.*, vol. 10, no. 6, pp. 2257-2261, 2010.
- [42] P. Andrade, A. Santo, M. Costa, and A.O. Lobo, "Production of rotary jet spun ultrathin fibers of poly-butylene adipate-co-terephthalate (PBAT) filled with nanocomposites", in *European Conference on Biomedical Optics*, pp. 1041400, 2017. <https://doi.org/10.1117/12.2286008>
- [43] B. Atici, C.H. Ünlü, and M. Yanilmaz, "A review on centrifugally spun fibers and their applications", *Polym. Rev.*, vol. 62, no. 1, pp. 1-64, 2022.
- [44] Z. McEachin and K. Lozano, "Production and characterization of polycaprolactone nanofibers via forcespinning™ technology", *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 126, no. 2, pp. 473-479, 2012.
- [45] A. Formhals, Apparatus for producing artificial filaments from material such as cellulose acetate, US Patent 1975504, 1934.
- [46] P.K. Baumgarten, "Electrostatic spinning of acrylic microfibers", *J. Colloid Interf. Sci.*, vol. 36, no. 1, pp. 71-79, 1971.
- [47] S.K. Chae, H. Park, J. Yoon, C.H. Lee, D.J. Ahn, and J.M. Kim, "Polydiacetylene supramolecules in electrospun microfibers: fabrication, micropatterning, and sensor applications", *Adv. Mater.*, vol. 19, no. 4, pp. 521-524, 2007.
- [48] K. Nasouri, "Novel estimation of morphological behavior of electrospun nanofibers with artificial intelligence system (AIS)", *Polym. Test.*, vol. 69, pp. 499-507, 2018.
- [49] K. Nasouri, A. Shoushtari, and A. Kafrou, "Investigation of polyacrylonitrile electrospun nanofibres morphology as a function of polymer concentration, viscosity and Berry number", *Micro Nano Lett.*, vol. 7, no. 5, pp. 423-426, 2012.
- [50] K. Nasouri, A.M. Shoushtari, and M.R.M. Mojtahedi, "Effects of polymer/solvent systems on electrospun polyvinylpyrrolidone nanofiber morphology and diameter", *Polym. Sci. Ser. A*, vol. 57, no. 6, pp. 747-755, 2015.
- [51] K. Nasouri, H. Bahrambeygi, A. Rabbi, A.M. Shoushtari, and A. Kafrou, "Modeling and optimization of electrospun PAN nanofiber diameter using response surface methodology and artificial neural networks", *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 126, no. 1, pp. 127-135, 2012.
- [52] K. Nasouri, A.M. Shoushtari, and M.R.M. Mojtahedi, "Thermodynamic studies on polyvinylpyrrolidone solution systems used for fabrication of electrospun nanostructures: Effects of the solvent", *Adv. Polym. Technol.*, vol. 34, no. 3, 2015.
- [53] J.N. Haigh, T.R. Dargaville, and P.D. Dalton, "Additive manufacturing with polypropylene microfibers", *Mater. Sci. Eng.: C*, vol. 77, pp. 883-887, 2017.
- [54] G. Hochleitner, J.F. Hümmel, R. Luxenhofer, and J. Groll, "High definition fibrous poly(2-ethyl-2-oxazoline) scaffolds through melt electrospinning writing", *Polymer*, vol. 55, no. 20, pp. 5017-5023, 2014.
- [55] J.R. Collier, I.I. Negulescu, B.J. Collier, Cellulosic Microfibers, US Pat. No. 6511746, 28 Jan 2003.
- [56] F.C. Helms Jr., M.O. Ilg, R.D. Kent, B.M. Hoyt, and A.J. Hodan, US Pat. No. 5948528 (to BASF Corporation, Mt. Olive, NJ), 7 September 1999.
- [57] W. Stibal, 35th International MMF Congress Proc Conference, Dornbirn, 1996.
- [58] W. Peschke, D. Schilo, and M. Weber, *Chem. Fibre. Int.*, vol. 62, pp. 197-218, 1997.
- [59] E. Frank, L.M. Stuedle, D. Ingildeev, J.M. Spörl, and M.R. Buchmeiser, "Carbon fibers: Precursor systems, processing, structure, and properties", *Angew. Chem. Int. Edit.*, vol. 53, no. 21, pp. 5262-5298, 2014.
- [60] X. Wang, G. Sun, P. Routh, D.-H. Kim, W. Huang,

- and P. Chen, "Heteroatom-doped graphene materials: syntheses, properties and applications", *Chem. Soc. Rev.*, vol. 43, no. 20, pp. 7067-7098, 2014.
- [61] Y. Liu, X. Dong, and P. Chen, "Biological and chemical sensors based on graphene materials", *Chem. Soc. Rev.*, vol. 41, no. 6, pp. 2283-2307, 2012.
- [62] G. Sun, Y. Zhang, and L. Zheng, "Fabrication of microscale carbon nanotube fibers", *J. Nanomater.*, vol. 2012, 2012.
- [63] N. Behabtu, M.J. Green, and M. Pasquali, "Carbon nanotube-based neat fibers", *Nano Today*, vol. 3, no. 5-6, pp. 24-34, 2008.
- [64] W. Lu, M. Zu, J.H. Byun, B.S. Kim, and T.W. Chou, "State of the art of carbon nanotube fibers: Opportunities and challenges", *Adv. Mater.*, vol. 24, no. 14, pp. 1805-1833, 2012.
- [65] B. Vigolo, A. Pénicaud, C. Coulon, C. Sauder, R. Pailler, C. Journet et al., "Macroscopic fibers and ribbons of oriented carbon nanotubes", *Science*, vol. 290, no. 5495, pp. 1331-1334, 2000.
- [66] L.M. Ericson, H. Fan, H. Peng, V.A. Davis, W. Zhou, J. Sulpizio et al., "Macroscopic, neat, single-walled carbon nanotube fibers", *Science*, vol. 305, no. 5689, pp. 1447-1450, 2004.
- [67] K. Jiang, Q. Li, and S. Fan, "Spinning continuous carbon nanotube yarns", *Nature*, vol. 419, no. 6909, pp. 801-801, 2002.
- [68] K. Koziol, J. Vilatela, A. Moisala, M. Motta, P. Cunniff, M. Sennett et al., "High-performance carbon nanotube fiber", *Science*, vol. 318, no. 5858, pp. 1892-1895, 2007.
- [69] Y.-L. Li, I.A. Kinloch, and A.H. Windle, "Direct spinning of carbon nanotube fibers from chemical vapor deposition synthesis", *Science*, vol. 304, no. 5668, pp. 276-278, 2004.
- [70] M. Zhang, K.R. Atkinson, and R.H. Baughman, "Multifunctional carbon nanotube yarns by downsizing an ancient technology", *Science*, vol. 306, no. 5700, pp. 1358-1361, 2004.
- [71] A.B. Dalton, S. Collins, E. Muñoz, J.M. Razal, V. Howard Ebron, J.P. Ferraris et al., "Super-tough carbon-nanotube fibres", *Nature*, vol. 423, no. 69, pp. 703-703, 2003.
- [72] P. Miaudet, S. Badaire, M. Maugey, A. Derré, V. Pichot, P. Launois et al., "Hot-drawing of single and multiwall carbon nanotube fibers for high toughness and alignment", *Nano lett.*, vol. 5, no. 11, pp. 2212-2215, 2005.
- [73] M.K. Shin, B. Lee, S.H. Kim, J.A. Lee, G.M. Spinks, S. Gambhir et al., "Synergistic toughening of composite fibres by self-alignment of reduced graphene oxide and carbon nanotubes", *Nat. Commun.*, vol. 3, no. 1, pp. 1-8, 2012.
- [74] B. Vigolo, P. Poulin, M. Lucas, P. Launois, and P. Bernier, "Improved structure and properties of single-wall carbon nanotube spun fibers", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 81, no. 7, pp. 1210-1212, 2002.
- [75] X. Zhang, Q. Li, Y. Tu, Y. Li, J.Y. Coulter, L. Zheng et al., "Strong carbon-nanotube fibers spun from long carbon-nanotube arrays", *Small*, vol. 3, no. 2, pp. 244-248, 2007.
- [76] X. Zhang, K. Jiang, C. Feng, P. Liu, L. Zhang, J. Kong et al., "Spinning and processing continuous yarns from 4-inch wafer scale super-aligned carbon nanotube arrays", *Adv. Mater.*, vol. 18, no. 12, pp. 1505-1510, 2006.
- [77] L. Zheng, G. Sun, and Z. Zhan, "Tuning array morphology for high-strength carbon-nanotube fibers", *Small*, vol. 6, no. 1, pp. 132-137, 2010.
- [78] D.D.L. Chung, *Carbon Fiber Composite*, Butterworth-Heinemann, First Edition, 1994.
- [79] P. Morgan, *Carbon Fibers and Their Composites*, CRC, Taylor & Francis Group, First edition, 2005.
- [80] B. Vishwanath and H. Bhonde, "Comparative study on spinning of POY for normal and microdenier polyester yarn", *Man Made Text. India*, vol. 41, pp. 293-296, 1998.
- [81] S.V. Purane and N.R. Panigrahi, "Microfibers, microfilaments and their applications", *AUTEX Res. J.*, vol. 7, no. 3, pp. 148-158, 2007.
- [82] J.J. Rogalski, C.W. Bastiaansen, and T. Peijs, "Rotary jet spinning review—A potential high yield future for polymer nanofibers", *Nanocomposites*, vol. 3, no. 4, pp. 97-121, 2017.
- [83] M.L. Robeson, J.R. Axelrod, and A.T. Manuel, US Pat. No. 5120598 (Air Products and Chemicals, Inc., Allentown, PA) 9 January 1992.
- [84] H.G. Meitner, US Pat. No. 4307143 (to Kimberly-Clark Corporation, Neenah, WI), 22 December 1981.
- [85] G.D. Storey and P. Maddern, US Pat. No. 4784892 (to Kimberly-Clark Corporation, Neenah, WI), 15 November 1988.
- [86] N. Banthia and J. Sheng, "Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites", *Cem. Concr. Compos.*, vol. 18, no. 4, pp. 251-269, 1996.
- [87] P.K. Nelson, V.C. Li, and T. Kamada, "Fracture toughness of microfiber reinforced cement composites", *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 14, no. 5, pp. 384-391, 2002.
- [88] N. Tanaka and J. Tanaka, "Textile systems and Breathable films", *Melliand Int.*, vol. 6, pp. 137-141, 2000.
- [89] T. Chen, L. Qiu, Z. Yang, and H. Peng, "Novel solar cells in a wire format", *Chem. Soc. Rev.*, vol. 42, no. 12, pp. 5031-5041, 2013.
- [90] D. Zou, D. Wang, Z. Chu, Z. Lv, and X. Fan, "Fiber-

- shaped flexible solar cells”, *Coord. Chem. Rev.*, vol. 254, no. 9-10, pp. 1169-1178, 2010.
- [91] F.-R. Fan, L. Lin, G. Zhu, W. Wu, R. Zhang, and Z.L. Wang, “Transparent triboelectric nanogenerators and self-powered pressure sensors based on micropatterned plastic films”, *Nano lett.*, vol. 12, no. 6, pp. 3109-3114, 2012.
- [92] G. Sun, X. Wang, and P. Chen, “Microfiber devices based on carbon materials”, *Mater. Today*, vol. 18, no. 4, pp. 215-226, 2015.
- [93] Y. Chen, K. Priyanka Prasad, X. Wang, H. Pang, R. Yan, A. Than et al., “Enzymeless multi-sugar fuel cells with high power output based on 3D graphene-Co₃O₄ hybrid electrodes”, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 15, no. 23, pp. 9170-9176, 2013.
- [94] K.P. Prasad, Y. Chen, and P. Chen, “Three-dimensional graphene-carbon nanotube hybrid for high-performance enzymatic biofuel cells”, *ACS Appl. Mater. Interf.*, vol. 6, no. 5, pp. 3387-3393, 2014.
- [95] N. Mano, J.L. Fernandez, Y. Kim, W. Shin, A.J. Bard, and A. Heller, “Oxygen is electroreduced to water on a “wired” enzyme electrode at a lesser overpotential than on platinum”, *J. Am. Chemical Soc.*, vol. 125, no. 50, pp. 15290-15291, 2003.
- [96] F. Gao, L. Viry, M. Maugey, P. Poulin, and N. Mano, “Engineering hybrid nanotube wires for high-power biofuel cells”, *Nat. Commun.*, vol. 1, no. 1, pp. 1-7, 2010.
- [97] J. Ren, L. Li, C. Chen, X. Chen, Z. Cai, L. Qiu et al., “Twisting carbon nanotube fibers for both wire-shaped micro-supercapacitor and micro-battery”, *Adv. Mater.*, vol. 25, no. 8, pp. 1155-1159, 2013.
- [98] H. Lin, W. Weng, J. Ren, L. Qiu, Z. Zhang, P. Chen et al., “Twisted aligned carbon nanotube/silicon composite fiber anode for flexible wire-shaped lithium-ion battery”, *Adv. Mater.*, vol. 26, no. 8, pp. 1217-1222, 2014.
- [99] T. Chen, L. Qiu, Z. Yang, Z. Cai, J. Ren, H. Li et al., “An integrated “energy wire” for both photoelectric conversion and energy storage”, *Angew. Chem. Int. Ed.*, vol. 51, no. 48, pp. 11977-11980, 2012.
- [100] X. Xiao, T. Li, P. Yang, Y. Gao, H. Jin, W. Ni et al., “Fiber-based all-solid-state flexible supercapacitors for self-powered systems”, *Acs Nano*, vol. 6, no. 10, pp. 9200-9206, 2012.
- [101] W. Talataisong, R. Ismaeel, and G. Brambilla, “A review of microfiber-based temperature sensors”, *Sensors*, vol. 18, no. 2, pp. 461, 2018.
- [102] M. Hamed, R. Forchheimer, and O. Inganäs, “Towards woven logic from organic electronic fibres”, *Nat. Mater.*, vol. 6, no. 5, pp. 357-362, 2007.
- [103] M. Hamed, L. Herlogsson, X. Crispin, R. Marcilla, M. Berggren, and O. Inganäs, “Fiber-embedded electrolyte-gated field-effect transistors for e-textiles”, *Adv. Mater.*, vol. 21, no. 5, pp. 573-577, 2009.
- [104] C. Müller, M. Hamed, R. Karlsson, R. Jansson, R. Marcilla, M. Hedhammar et al., “Woven electrochemical transistors on silk fibers”, *Adv. Mater.*, vol. 23, no. 7, pp. 898-901, 2011.
- [105] G. Sun, J. Liu, L. Zheng, W. Huang, and H. Zhang, “Preparation of weavable, all-carbon fibers for non-volatile memory devices”, *Angew. Chem.*, vol. 125, no. 50, pp. 13593-13597, 2013.
- [106] X. Wang, B. Liu, R. Liu, Q. Wang, X. Hou, D. Chen et al., “Fiber-based flexible all-solid-state asymmetric supercapacitors for integrated photodetecting system”, *Angew. Chem.*, vol. 126, no. 7, pp. 1880-1884, 2014.
- [107] R.P. Singh, S. Mishra, and A.P. Das, “Synthetic microfibers: pollution toxicity and remediation”, *Chemosphere*, vol. 257, pp. 127199, 2020.
- [108] B. Henry, K. Laitala, and I.G. Klepp, “Microfibres from apparel and home textiles: Prospects for including microplastics in environmental sustainability assessment”, *Sci. Total Environ.*, vol. 652, pp. 483-494, 2019.
- [109] I.E. Napper and R.C. Thompson, “Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: effects of fabric type and washing conditions”, *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 112, no. 1-2, pp. 39-45, 2016.
- [110] U. Pirc, M. Vidmar, A. Mozer, and A. Kržan, “Emissions of microplastic fibers from microfiber fleece during domestic washing”, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 23, no. 21, pp. 22206-22211, 2016.
- [111] F. De Falco, E. Di Pace, M. Cocca, and M. Avella, “The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution”, *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, pp. 1-11, 2019.