

مقاله علمی-پژوهشی

## کاربرد زیست محیطی و صلح آمیز از نانوذرات - نانوالیاف در تصفیه آب های آلوده آبیاری و

### پساب های سمی زهکشی (مطالعه موردی: یون سمی مس)

سید هادی ابطی<sup>۱</sup>، محمدتقی احمدی<sup>۲</sup>، مهدی محمودیان<sup>۳</sup>، مرتضی شکری<sup>۴\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۶/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۵

#### چکیده

امروزه کاربرد علوم و فناوری های پیشرفته، در مدیریت بهینه مخاطرات کیفی تحمیلی بر منابع زیست محیطی، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. با توجه به سمیت پساب های کشاورزی، صنعتی و خانگی برای محیط زیست، بررسی مبسوط و جداگانه موضوع تصفیه زهاب های سمی و به طور کلی آب های آلوده، جهت تکمیل روند توسعه غیرمخرب، امری ضروری به نظر می رسد. در این راستا و به منظور بازیافت ترکیبات حاوی فلزات سنگین و آلوده کننده همچون مس، در زهاب های محتوی کودها و سموم مضر، تولید نانوالیاف (نانوذرات پلیمری) در قالب روش الکتروریسی (تحت چهار تیمار غلظت محلول الکتروریسی، ولتاژ اعمالی، فاصله جمع کننده با سوزن تزریق و آهنگ تزریق)، با استفاده از دستگاه الکتروریسی و ترکیب منتخب پلیمری پلی متیل متاکریلات و حلال دی متیل فرمامید با رویکرد استفاده از مواد اولیه ارزان قیمت، جهت تصفیه آلودگی های مخاطره آمیز انتخاب شدند. هم چنین فناوری تولید نانوذرات در قالب روش انفجار سیم (تحت چهار تیمار غلظت محلول نانوذرات، قطر سیم های کربن استفاده شده، جریان و نیروی آرک) مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت، با استخراج نتایج در هر فاز، به تحلیل و بررسی آن ها پرداخته شد و نتایج نشان داد که ترکیب تیمار پلیمری پلی متیل متاکریلات و حلال دی متیل فرمامید در شرایط غلظت در حلال برابر ۲۵wt%، ولتاژ اعمال شده ۳۰ kV، فاصله بین نوک سوزن و صفحه جمع کننده ۱۵cm و آهنگ تغذیه ۲ ml/h بهترین عملکرد را داشته است. بدین ترتیب، با تهیه نانوالیاف و نیز استفاده از مواد آزمایشگاهی نسبتاً ارزان، در مقایسه با روش های پرهزینه تصفیه آب، نتایج قابل توجهی در رندارزایی و تحلیل حذف فلز سمی مس (>۵۰٪) در کلیه نمونه های منتخب مشاهده گردید، که حکایت از تأثیر گذاری مثبت و بالای نانوذرات و نانوالیاف ها داشته است.

**واژه های کلیدی:** الکتروریسی، انفجار سیم، تصفیه آب، حفاظت محیط زیست، نانوذرات-نانوالیاف، یون مس

#### مقدمه

تقاضای آب در سال های اخیر، موجب تحمیل فشار بیشتر به منابع آبی و ظهور تنش و بحران آب شده است. البته مفهوم تنش های آبی زمانی اهمیت بیشتری پیدا می نماید که علاوه بر کاهش حجم آب در دسترس موجودات زنده، معضل آلودگی آب ها نیز به مسائل موجود اضافه شود. در چنین شرایطی است که مسئله تنش آبی به بحران آب تبدیل شده و حتی موجب ایجاد مشکلات جدی در محیط های خاکی نیز می گردد. در نتیجه می توان مسئله آلودگی منابع آبی مورد استفاده در کشاورزی و صنعت را که به شکل زنجیروار به مدیریت بهینه منابع آب گره خورده است، از مهم ترین این مشکلات برشمرد (قدمی و همکاران، ۱۳۸۸). بطور مثال، در بخش کشاورزی، پساب و زهاب خروجی از چنین مجموعه ای نیز در صورت عدم توجه به مشخصات منابع آب و البته استفاده نابجا و سرسام آور از نهاده های شیمیایی و سموم دفع آفات، می تواند به مراتب آلوده تر از آب آبیاری باشد. در نهایت نیز همین آب با آلوده نمودن منابع دیگر آبی در پایین دست موجب ادامه روند باطل آلوده سازی ها می گردد. وضعیت کیفی این

کشور ایران از نظر اقلیم آب و هوایی، در منطقه خشک و نیمه خشک کره زمین قرار گرفته است. محدودیت منابع آب (سطحی و زیرزمینی) در این منطقه موجب شده، تا تلاش مضاعفی در حفظ کیفیت آب و پیشگیری از بیماری های گوناگون صورت گیرد و از مهم ترین اولویت های زندگی بشر و دیگر موجودات زنده تلقی گردد (شاه ولی و عابدی، ۱۳۸۵). همچنین، خشکسالی و افزایش

۱- دکتری تخصصی (Ph.D) علوم و مهندسی آب، گروه پژوهشی اکولوژی انسانی

شهری کارگشا، ایران

۲- دانشیار گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه

۳- استادیار گروه نانوفناوری، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه

۴- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی کبودراهنگ، دانشگاه

پوعلی سینا، همدان

(Email: Msh.shokri@gmail.com)

(\*- نویسنده مسئول)

صنعتی، شهری و زباله‌ها موجبات آلودگی موجودات آبی را فراهم نموده و با مصرف برخی آبیان توسط انسان، این آلودگی انتقال پیدا می‌کند. فلز مس به‌عنوان یکی از فلزات سنگین، اثرات مخربی بر سلامت انسان و موجودات زنده با تاثیر بر معده، روده، کبد و کلیه دارد. در یک پژوهش، حسینی و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی راندمان یک نوع جاذب در حذف فلز مس از محلول‌های آبی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با استفاده از آن جاذب، بیشترین درصد حذف مس برابر با ۹۹/۸mg گزارش گردید. ملکوتیان و همکاران (۱۳۹۳) نیز به کارایی روش نانوفیلتراسیون در حذف فلزات سنگین همچون مس از آبهای حاوی سولفات پرداختند و نتیجه کار آنها حذف فلز فوق با راندمان ۹۸ و ۸۷ درصد در نمونه‌های سنتتیک و واقعی بود. وجود آلاینده‌های فوق‌الذکر علاوه بر اینکه زیست‌بوم هر منطقه را در معرض نابودی قرار می‌دهند، همچنین باعث ایجاد بیماری‌های خطرناک متعدد می‌شوند. از این‌رو، از سال‌های قبل تحقیقات بسیاری جهت تصفیه و پاکسازی آب‌های آلوده انجام شده که منجر به تولید و ابداع روش‌های متنوعی شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان که می‌توان به روش رسوب شیمیایی (Hutchison et al., 2008)، انعقاد (Henneberry et al., 2011)، تبادل یونی (Monteagudo et al., 2000)، کاهش شیمیایی (Wiatrowski et al., 2009)، جداسازی غشایی (Urgun-Demirtas et al., 2012)، درمان بیولوژیکی (Schiewer & Balaria, 2009) و جذب (Hasima, 2010; Yu et al., 2011) اشاره نمود؛ که عمدتاً این روش‌ها پرهزینه و بسیار گران می‌باشند (Saleh and Gupta, 2012, Pamukoglu and Kargi, 2006.)

فرآیند جذب به دلیل کم هزینه بودن، کارایی بالا، ساده و غیرحساس بودن نسبت به مواد سمی، یک فرآیند مؤثر برای حذف مواد آلاینده‌ها از فاضلاب می‌باشد. به‌طور مقایسه‌ای، در بین روش‌های پاکسازی باتوجه به تأثیر فرایندهای پاکسازی، روش جذب بهترین روش می‌باشد (Sonune and Ghate, 2004). در فرآیند جذب همیشه رسیدن به بالاترین ظرفیت جذب آلاینده، یکی از مهم‌ترین اهداف بوده است

از بین روش‌های تولید نانوالیاف، روش الکتروریسی به‌دلیل سهولت فرآیند و امکان کاربرد آن در اکثر پلیمرها، سرامیک‌ها و فلزات، به‌عنوان روشی کارآمد برای ساخت نانوالیاف پلیمری در محدوده ۱ تا ۱۰۰ نانومتر به رسمیت شناخته شده است (Habibi and Hashemi, 2013).

در دهه اخیر، تحقیقات گسترده‌ای در مورد درک عملکرد میکروفیلتراسیون بوسیله‌ی الیاف الکتروریسی شده صورت گرفته است. ونگ و همکاران در سال ۲۰۰۵، یک فیلم سه‌لایه جهت فیلتراسیون جریان بالا تهیه کردند. تست فیلتراسیون امولسیون آب و روغن، در سرعت جریان بالاتر از ۳۳۰ لیتر بر متر مربع ساعت در

زهاب‌ها لزوم توجه بیشتر به بحث تصفیه را یادآور می‌شود. البته همین بحران‌ها در صورت تکرار و همچنین تداوم تخلیه پساب‌ها و نیز زهاب‌ها به محیط زیست می‌توانند نتایج و تبعات زیان‌بار شدیدتر و بیش‌تری داشته باشند و درنهایت به فجایع زیست‌محیطی مبدل شوند. همچنین تخلیه میلیون‌ها مترمکعب فاضلاب‌های سمی بخش‌های صنعتی همراه با وارد نمودن پساب‌های کشاورزی، طی سالیان متمادی و در طی دهه‌های اخیر می‌تواند باعث تشدید آلودگی‌های زیاد در تالاب‌ها و رودخانه‌های هر جلگه و تشدید وضعیت اسفناک محیط زیست شود (پی‌نبر و همکاران، ۱۳۹۸). بیش از ۹۰٪ آب موجود در منابع آبی کشور در رودخانه‌ها و ذخایر زیرزمینی به مصرف کشاورزی می‌رسند (عینالی و همکاران، ۱۳۹۵). در برخی از نقاط کشور، در حدود ۸۰٪ از این آب مصرفی مبدل به پساب-فاضلاب کشاورزی می‌شود. این میزان زه‌آب دوباره به منابع آبی یا اتمسفر باز می‌گردد. در عین حال به دلیل هم‌جواری رودخانه‌ها با مزارع و باغات کشاورزی، بخش زیادی از مواد شیمیایی مصرف شده به رودخانه‌های کشور سرازیر می‌شوند. در حال حاضر ساماندهی آب‌های آبیاری و زه-آب‌های خروجی، مهم‌ترین مسأله کشاورزی کشور است. بدیهی است مقدار زیادی از انواع آلاینده‌های سرطان‌زا مانند فلزات سنگین، علف‌کش‌ها، قارچ‌کش‌ها، مواد و ترکیبات کلروره، سولفات، سدیم، پتاسیم، کلسیم، ذرات کلوییدی، ترکیبات فسفر و سایر املاح محلول و جامد موجود در خاک، به زهاب‌های قبلی اضافه می‌شوند (Turek et al., 2018; Mohamed, 2019). در نتیجه، یکی از کاربردهای مهم نانوذرات و فناوری‌های مرتبط را می‌توان استفاده در راستای کاهش معضلات متعددی هم‌چون آلودگی آب‌ها و خاک‌ها به‌شمار آورد.

آب سالم یکی از مهم‌ترین عوامل حیات برای تمام موجودات زنده است. به همین دلیل در هر قرن، به اهمیت و کیفیت وجود این عنصر حیاتی توجهی خاص شده است؛ اما امروزه با پیشرفت صنعت و اهمیت حضور آن در زندگی انسان، عوارض بسیار مخربی متوجه آب‌ها شده است (Nemerow and Dasgupta, 1991). کمبود جهانی انرژی، منابع طبیعی و آب نیز از چالش‌های بزرگ امروزی هستند که بشر با آن‌ها روبرو شده است. ورود پساب‌های صنعتی، فاضلاب شهری، کودهای شیمیایی و آلاینده‌های بسیار زیاد دیگر در آب‌های سطحی و زیرزمینی باعث توسعه آلودگی‌ها شده و حیات انسان و زیست‌بوم‌ها را در معرض خطر قرار دهند (Ali and Aboul-Enein, 2005). از مهم‌ترین منابع آلوده‌کننده آب، می‌توان به آلاینده‌های حاصل از کودها و صنایع کشاورزی (۷۰٪)، آلاینده‌های حاصل از پساب‌های صنعتی و معدنی (۲۲٪) و آلاینده‌های حاصل از فاضلاب شهری (۸٪) اشاره نمود. از خطرناک‌ترین و محتمل‌ترین آلاینده‌ها در آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌توان به فلزات سنگین همچون مس اشاره نمود. این فلز، در خاک مانع از انجام فعالیت‌های طبیعی گیاهان و موجودات خاکزی و در آب به‌واسطه آلودگی هوا، خاک، فاضلاب‌های

حذف آلاینده‌های آبی مورد استفاده قرار گرفت.

### تولید نانوالیاف به روش الکتروریسی

به منظور آماده سازی مواد ریسندگی، محلول‌های حاصل از پلیمرهای PMMA به مدت چهار ساعت در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد بر روی همزن مغناطیسی گرم‌کننده به آرامی همزده شد. سپس محلول‌ها به سرنگ‌های دستگاه الکتروریسی تزریق گردید. از روش‌های جدید برای تولید نانوالیاف پلیمری، استفاده از یک میدان الکترواستاتیکی قوی است. این روش به نام ریسندگی الکترواستاتیکی الیاف یا الکتروریسی شناخته می‌شود. الکتروریسی شبیه فرآیند کشش است که در آن به جای نیروی مکانیکی از نیروی الکترواستاتیکی برای بیرون کشیدن محلول و کشش الیاف استفاده شده است. در این روش، محلول یا مذاب پلیمری از درون یک نازل موئینه به بیرون هدایت می‌شود. سپس ولتاژ بالایی بین نازل و صفحه جمع‌کننده رسانا برقرار می‌شود. در اثر ولتاژ اعمال شده، رشته الیاف شارژ می‌شوند. میدان الکتریکی سبب می‌شود تا قطره تشکیل شده بر سر نازل، شکل مخروطی به خود بگیرد. در رأس مخروط شارش میدان ناپایدار بوده و با افزایش میدان، نیروی الکترواستاتیک بر کشش سطحی محلول غلبه کرده، جت از رأس آن خارج شده و به سمت جمع‌کننده شتاب می‌گیرد. در این هنگام، جت وارد مرحله دیگری از ناپایداری شده و پس از تقسیم شدن شروع به شلاق‌زنی می‌کند. این عمل سبب ازدیاد طول جت و شکل‌گیری نانوالیاف می‌شود. فرآیند تشکیل نانوالیاف بسیار سریع بوده و الیاف به‌طور پیوسته تا طول چند صدمتر تا چند هزارمتر به‌طور پیوسته تولید می‌شوند (Formhals, 1934). با این روش می‌توان شبکه‌های بافته نشده با نخ‌های درهم تابیده از نانوالیاف نیز تولید نمود. الکتروریسی یک تکنولوژی جدید برای ساخت غشای غیر بافته با قطر الیاف در محدوده نانوالیاف می‌باشد. قطر این الیاف در محدوده چند صد نانومتر بوده و شبکه بافته‌نشده حاصل از آن‌ها متخلخل است. هنگامی که قطر به محدوده نانومتر کاهش می‌یابد، چندین ویژگی جالب مانند نسبت سطح به حجم بالا، منافذ در محدوده نانومتر و خواص مکانیکی عالی نمایان می‌شود. این ویژگی‌ها باعث شده تا غشای نانوالیاف الکتروریسی برای جذب و فیلتر کردن آلاینده‌ها از آب آلوده مناسب باشند.

در ادامه، تیمارها تحت شرایطی در قالب تیمارهای ترکیبی مختلف از پلیمر و حلال شامل پلیمر PMMA با حلال DMF (C<sub>2</sub>) در قالب جدول ۱ و تحت تکرارهای متعدد تعریف گردیدند. هم‌چنین از دستگاه میکروسکوپ نافوکوس، به منظور مطالعات میکروسکوپی و مشاهده و بررسی خصوصیات سطحی و مشاهده سطح مقطع الیاف الکتروریسی شده تحت تیمارهای گوناگون استفاده گردید. عملگر نانو فوکوس یک جایگر نانومتری محور z می‌باشد که با بهره‌گیری از فناوری پیزوالکتریک، قادر به تنظیم فوکوس لنز

فشار خوراک ۱۰۰ psi، با فیلتر ۹۹/۸٪ اصلاح آلی بدون رسوب، بازاریابی قابل توجهی نشان داد. Gopal و همکاران در سال ۲۰۰۷ نیز با تست فیلتراسیون آب بر پایه ذرات پلی‌استایرن با قطرهای ۰/۵، ۱، ۶ و ۱۰ میکرومتر نشان دادند که همه ذرات در محدوده ۱۰-۱ میکرومتر و حدود ۹۰٪ ذرات پلی‌استایرن با قطر ۰/۵ میکرومتر نیز حذف شدند. Ma و همکاران در سال ۲۰۰۵، تشک الیاف سلولز استات توسط الکتروریسی سلولز استات (۰/۱۶ گرم بر میلی‌لیتر) از مخلوط حلال استون، دی متیل فرمامید و تری فلورواتیلن تهیه نمودند. سپس سطح آن بوسیله حرارت و تصفیه محلول آکالی به عنوان غشا جهت جداسازی مولکول‌های زیستی در محلول آب عامل‌دار و نیز تصفیه آب استفاده گردید. در پژوهش دیگری Shin and Chase در سال ۲۰۰۴، یک فیلتر بهم‌پیوسته برای جداسازی قطرات مختلف از روغن، توسط الکتروریسی چهار نوع پلیمر نایلون ۶، پلی آمید، پلی آکریلونیتریل و پلی‌استایرن، روی شیشه رشته مانند ساختند. هم‌چنین تست فیلتراسیون تفاوت قابل توجهی در بهره‌وری فیلتراسیون (حدود ۷۷-۷۱٪) در میان چهار نوع پلیمر را نشان نداد (Kiani et al., 2015).

در پایان، با عنایت به موارد اشاره شده، در این پژوهش سعی شده است، تا ضمن استفاده از فناوری صلح‌آمیز زیست محیطی و تهیه توده نانوالیاف الکتروریسی و نانوذرات انفجارسیم، در فرآیند کاهش استراتژیک و اقتصادی مخاطرات زیست محیطی، با تولید نانوجاذب‌های آلاینده در حذف فلز سنگین مس از محلول‌های آبی، مورد ارزیابی قرار گیرد. سپس، تیمارهای موردنظر نانوالیاف تحت شرایط مختلف همچون غلظت پلیمر، ولتاژ اعمالی، فاصله بین جمع‌کننده و نوک سوزن، و نیز آهنگ تغذیه، و هم‌چنین تیمارهای روش انفجارسیم قرار گرفتند و سرانجام نتایج و عملکرد به‌کارگیری نانوجاذب مدنظر در روند حذف فلز سمی مس ارزیابی شدند.

## مواد و روش‌ها

### معرفی پلیمر و حلال مورد استفاده

در محلول‌های موردنظر جهت تولید نانوالیاف در هر یک از تیمارها، ترکیبی از پلیمر پلی‌متیل متاکریلات (PMMA) با وزن مولکولی Mw=۱۲۰۰۰۰ ساخت شرکت Evonik آلمان و حلال دی متیل فرمامید (DMF) ۹۸٪ ساخت شرکت Fluka به منظور حذف آلاینده‌های موجود در آب انتخاب گردید. در ادامه نیز از دستگاه همزن مغناطیسی Falc F80 به منظور یکنواخت‌سازی محلول ریسندگی نانوالیاف‌ها استفاده شد. بعد از تهیه مواد لازم جهت آزمایشها، دستگاه الکتروریسی برای تهیه شبکه‌های نانوالیاف به‌کار گرفته شد. در پژوهش حاضر نانوالیاف PMMA به روش الکتروریسی براساس روش ارایه شده در مراجع تهیه و به عنوان جاذب برای

در ادامه، نانوذرات کربن تحت تیمارهای ترکیبی مختلف، در قالب تیمارهای غلظت (الف) ۱۵، (ب) ۳۰ و (پ) ۴۵ گرم در لیتر، پس از تست‌های متعدد (جدول ۲)، جهت تولید نانوذرات بهینه هر یک از تیمارها تولید شدند که در قالب نمونه‌ای از تیمارهای پژوهش حاضر و در مورد یکی از پارامترهای متغیر آزمایش‌ها (شدت جریان) ارائه شده است.

میکروسکوپ بادقت نانومتر می‌باشد. از دستگاه نانوفوکوس جهت مطالعه و بررسی مورفولوژی سطح الیاف استفاده و هریک از تیمارها مشاهده گردید که بطور نمونه تعدادی از آن‌ها، در ادامه تحت تجزیه و تحلیل‌های نهایی قرار گرفتند. در نهایت نیز، میزان حذف آلاینده‌ها از تیمارهای مختلف تعریف شده در مجموعه آزمایشها تحقیق حاضر، با استفاده از دستگاه جذب اتمی تست آلاینده اندازه‌گیری گردید.

جدول ۱- تیمارهای متغیر آزمایشها تحت شرایط C<sub>2</sub>

تیمارها	غلظت محلول (wt%)	ولتاژ (Kv)	فاصله جمع‌کننده و سوزن (cm)	نرخ تغذیه (mL/h)
f1	۲۰	۳۰	۱۵	۲
f2	۲۵	۳۰	۱۵	۲
f3	۳۰	۳۰	۱۵	۲
f4	۲۵	۱۰	۱۵	۲
f5	۲۵	۲۰	۱۵	۲
f6	۲۵	۳۰	۱۵	۲
f7	۲۵	۳۰	۵	۲
f8	۲۵	۳۰	۱۰	۲
f9	۲۵	۳۰	۱۵	۲
f10	۲۵	۳۰	۱۵	۰/۵
f11	۲۵	۳۰	۱۵	۱
f12	۲۵	۳۰	۱۵	۲

شد. نانوالیاف (جهت یک تیمار نمونه)، تصاویر میکروسکوپی، تصاویر سه‌بعدی و وضعیت ابعاد نانوالیاف آماده شده تحت شرایط ذکر شده، در قالب شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. در شکل ۲ می‌توان مشاهده نمود که در مناطقی به شکل دانه دانه (بید) در قسمت‌های غلظت پائین (Low Concentration: Lc) هر یک از آن‌ها وجود دارد که در اثر قطع شدن جریان پلیمر و عدم قابلیت ریسندگی در غلظت‌های پایین ایجاد شده‌اند. در ادامه هرچه غلظت PMMA در محلول افزایش یابد، قابلیت ریسندگی آن بهتر و شکل الیاف حاصله منظم و پیوسته می‌باشد که این امر را می‌توان در تصاویر میکروسکوپی به‌وضوح مشاهده نمود. Haider *et al.* (۲۰۱۳) و Pillay *et al.* (۲۰۱۳) نیز گزارش نموده‌اند که وقتی غلظت محلول پلیمری اندک باشد، میدان الکتریکی و تنش سطحی موجب می‌شود که زنجیره‌های پلیمری درهم تنیده شده، قبل از رسیدن به صفحه جمع‌کننده به تکه‌های کوچک‌تر (Fragments) گسسته شوند. این بخش‌های کوچک موجب تشکیل بید (Beads) یا نانوالیاف حاوی بید می‌شوند. افزایش غلظت محلول پلیمری منجر به افزایش ویسکوزیته محلول خواهد شد، در نتیجه آن، درهم تنیدگی زنجیره‌های پلیمری افزایش می‌یابد. این درهم تنیدگی بر تنش سطحی غلبه کرده و موجب می‌شود تا نانوالیافی یکنواخت و بدون بید شکل گیرد. البته،

## نتایج و بحث

### بهینه‌سازی فرآیند الکترورسی

در مراحل تولید نانوالیاف پارامترهایی نظیر غلظت پلیمر، مقدار ولتاژ، فاصله نازل تا صفحه جمع‌کننده و آهنگ تغذیه تأثیرگذار می‌باشند. در این راستا و در جهت جستجوی بهترین تیمارهای آزمایشها، هر یک از فاکتورهای موثر به‌طور جداگانه بررسی شدند. در پایان هر مرحله از فرآیند ریسندگی و جهت اطلاع از وضعیت مورفولوژیکی نانوالیاف، تصاویر میکروسکوپی نانوفوکوس از سطح الیاف تهیه شده و بهترین توزیع و یکنواختی توده الیاف به‌عنوان شرایط بهینه انتخاب گردید.

### غلظت پلیمر

جهت تحلیل اثر غلظت بر تشکیل نانوالیاف حاصل از محلول پلیمر PMMA با حلال DMF (C<sub>2</sub>)، محلول‌هایی از آن با غلظت‌های مختلف ۲۰، ۲۵ و ۳۰ تهیه و توسط دستگاه الکترورسی به‌شکل توده نانولیفی ریسیده شد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، به منظور بررسی یکنواختی ریسندگی الیاف از تکنیک تصویربرداری نانوفوکوس استفاده شد و بر اساس تصاویر به دست آمده از سطح توده نانوالیاف، غلظت بهینه مشخص

غلظت ۲۵ wt% (M) به‌عنوان غلظت بهینه PMMA به منظور تهیه فیلتر نانولیفی در مراحل بعدی استفاده خواهد شد که به‌طور کلی با نتایج Tafafhi Yazdi et al. (۲۰۱۸) مطابقت دارد.

افزایش غلظت پلیمر فراتر از مقدار بحرانی، موجب می‌شود ویسکوزیته به حدی افزایش یابد که از جریان یافتن محلول از میان سوزن سرنگ ریسندگی جلوگیری نماید (Haider et al. 2013). بر این اساس

جدول ۲- بخشی از تیمارهای ترکیبی نمونه (الف)، (ب) و (پ) در انفجار سیم

تیمارها	قطر گرافیت (mm)	شدت جریان (A)	نیروی آرک (N)
۱	۰/۲	۳۰	۱۰
۲	۰/۲	۳۰	۵۰
۳	۰/۲	۳۰	۱۰۰
۴	۰/۲	۱۰۰	۱۰
۵	۰/۲	۲۴۰	۱۰
۶	۰/۲	۱۰۰	۵۰
۷	۰/۲	۲۴۰	۵۰
۸	۰/۲	۱۰۰	۱۰۰
۹	۰/۲	۲۴۰	۱۰۰
۱۰	۰/۵	۳۰	۱۰
۱۱	۰/۵	۳۰	۵۰
۱۲	۰/۵	۳۰	۱۰۰
۱۳	۰/۵	۱۰۰	۱۰
۱۴	۰/۵	۲۴۰	۱۰
۱۵	۰/۵	۱۰۰	۵۰
۱۶	۰/۵	۲۴۰	۵۰
۱۷	۰/۵	۱۰۰	۱۰۰
۱۸	۰/۵	۲۴۰	۱۰۰
۱۹	۱	۳۰	۱۰
۲۰	۱	۳۰	۵۰
۲۱	۱	۳۰	۱۰۰
۲۲	۱	۱۰۰	۱۰
۲۳	۱	۲۴۰	۱۰
۲۴	۱	۱۰۰	۵۰
۲۵	۱	۲۴۰	۵۰
۲۶	۱	۱۰۰	۱۰۰
۲۷	۱	۲۴۰	۱۰۰



شکل ۱- تیمارهای نمونه از نانوالیاف تولید شده



C<sub>2</sub>Hc



C<sub>2</sub>Mc

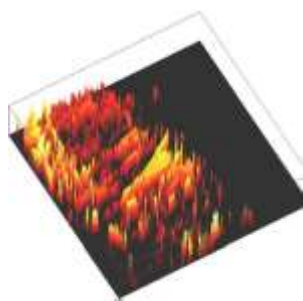


C<sub>2</sub>Lc

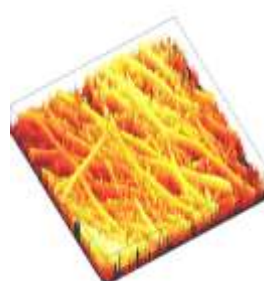
شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی نانوفکوس از سطح توده الیاف الکتروریسی شده پلیمر PMMA با حلال DMF (C2) در غلظت‌های مختلف wt% ۳۰ (High) و ۲۵ (Moderate)، ۲۰ (Low)

همانطور که در تصاویر ذیل نیز مشخص است تراکم و یکنواختی پوشش سطح بستر جمع‌آوری الیاف در حالت غلظت متوسط پهنه و بهتر می‌باشد.

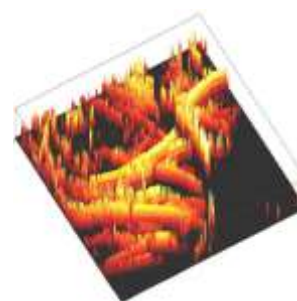
همچنین تصویر سه‌بعدی خروجی از دستگاه نانوفکوس جهت مشخص شدن بهتر وضعیت توده الیاف تحت درصدهای با غلظت پائین، متوسط و بالا در شکل ۳ آمده است. با توجه به مطالب بالا و



High%

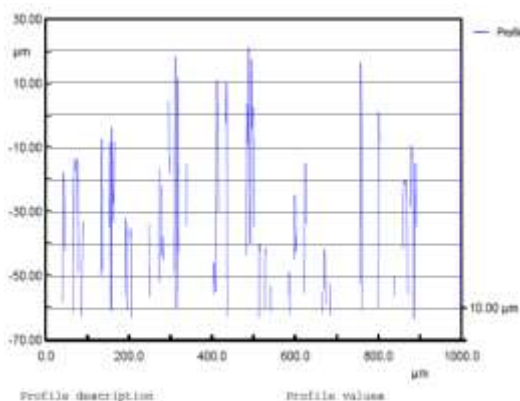
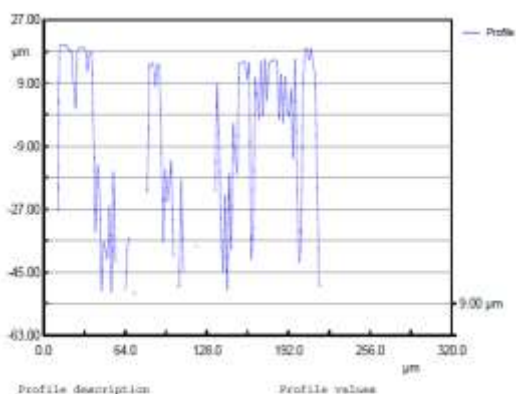


Moderate%



Low%

شکل ۳- تصاویر سه‌بعدی از نانوالیاف تهیه شده



شکل ۴- مقادیر تغییرات قطر و ضخامت الیاف تیمار منتخب (M) در دو جهت قطری

#### اثر ولتاژ دستگاه الکتروریسی

به منظور بررسی اثر ولتاژ دستگاه الکتروریسی بر تشکیل یکنواخت نانوالیاف، ولتاژهای اعمالی مختلف (۱۰، ۲۰ و ۳۰ کیلوولت) مورد بررسی قرار گرفتند. در این مرحله با توجه به مشاهده شکل ظاهری و یکنواخت بودن نانوالیاف از روی تصاویر ثبت شده از توده

در ادامه در شکل ۴ نوسانات قطر نانولیف و نیز نانوالیاف تیمار منتخب (M) و وضعیت پیوستگی الیاف در این بخش در دو جهت قطری نمایش داده شده است. همچنین محدوده ارتفاع (ضخامت) کل نانوالیاف بین ۸۴/۸۶۵ و ۷۲/۶۳ میکرومتر متغیر می‌باشد.

جهت مشخص شدن روند کلی تغییرات مورفولوژی سطح توده الیاف نمونه در ولتاژهای متفاوت پایین، متوسط و بالا به صورت شکل ۷ است.

همچنین در شکل ۸ نوسانات قطر نانولیف یا نانوالیاف تیمار منتخب (Hv) در دو جهت قطری نمایش داده شده است. محدوده ارتفاع (ضخامت) کل نانوالیاف نیز بین ۳۶/۲۷۹ و ۶۱/۰۶۵ میکرومتر متغیر است.

#### اثر فاصله روزنه سوزن تزریق از صفحه جمع کننده

در این مرحله اثر فواصل متفاوت ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی متری بین روزنه و صفحه جمع کننده بر نحوه تشکیل نانوالیاف و در نتیجه مشخصات نهایی آن بررسی شده است (شکل ۹).

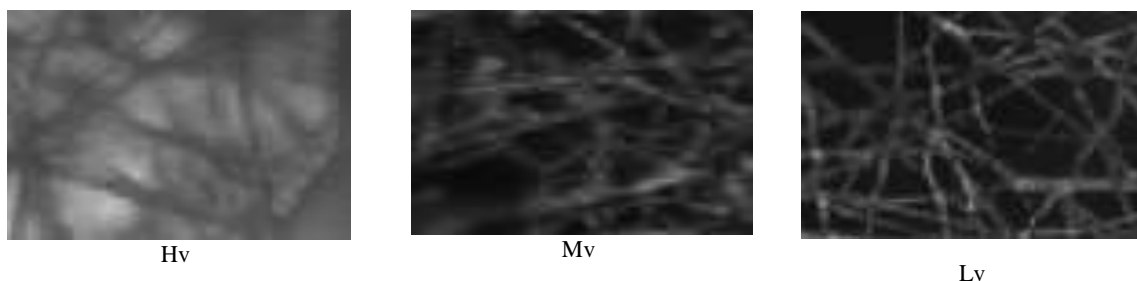
در این بخش، شکل ظاهری و یکنواختی الیاف با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نانوفوکوس مورد بررسی قرار گرفتند. نانوالیاف تیماری نمونه، تصاویر میکروسکوپی، تصاویر سه بعدی و وضعیت ابعاد نانوالیاف آماده شده تحت شرایط ذکر شده، در قالب شکل های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. در این تصاویر می توان مشاهده نمود که در فاصله ۵ cm (Low Distance: Ld) نسبت به فاصله ۱۰ سانتی متر (Moderate Distance: Md)، الیافی با قطری بزرگ تر تشکیل شده است. همچنین با افزایش این فاصله تا ۱۵ cm (High Distance: Hd) قطر الیاف کاهش یافته است.

الیاف، می توان به شرایط بهینه دست یافت. نانوالیاف جهت یک تیمار نمونه (Cf)، تصاویر نانوفوکوس از سطح توده الیاف الکترورسی شده، تصاویر سه بعدی و وضعیت ابعاد نانوالیاف آماده شده تحت شرایط مذکور در شرایط تغییر ولتاژ اعمالی در شکل های ۵ و ۶ ارایه شده اند. در تصاویر مدنظر می توان مشاهده نمود که با افزایش ولتاژ اعمالی به محلول و افزایش اختلاف پتانسیل ایجاد شده بین محلول و صفحه جمع کننده، نانوالیاف بیشتر کشش یافته و الیاف ظریف تری ایجاد می شود. سیگموند و لادنس لاگر (2012) گزارش داده اند که شدت جریان اعمال شده از سوی یک منبع تغذیه به محلول در حال جریان در یک سوزن فلزی، موجب تغییر شکل قطره های کروی در ناحیه مخروط تیلور شده و در نتیجه، نانوالیاف تشکیل می شود. هرچه ولتاژ اعمالی بیشتر باشد، نانوالیافی با قطر کمتر شکل خواهد گرفت. این امر، به دلیل کش یافتن محلول پلیمری در اثر دافعه بارهای هم نام در رشته پلیمری خارج شده از نوک سرنگ می باشد. همچنین افزایش ولتاژ اعمالی فراتر از مقدار بحرانی، منجر به افزایش قطر جت پلیمری، تشکیل بیدها یا نانوالیاف دارای بید خواهد شد. این موضوع در آهنگ های تغذیه مشابه، مرتبط با کاهش اندازه مخروط تیلور و افزایش سرعت جت می باشد (Sill and Von Recum, 2008). از اینرو ولتاژ (High Voltage: Hv) ۳۰ kV به عنوان ولتاژ بهینه در مراحل بعدی استفاده خواهد شد و به طور کلی با نتایج تفاحی یزدی و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد.

علاوه بر این، تصویر سه بعدی خروجی از دستگاه نانوفوکوس



شکل ۵- تیمارهای نانوالیاف نمونه



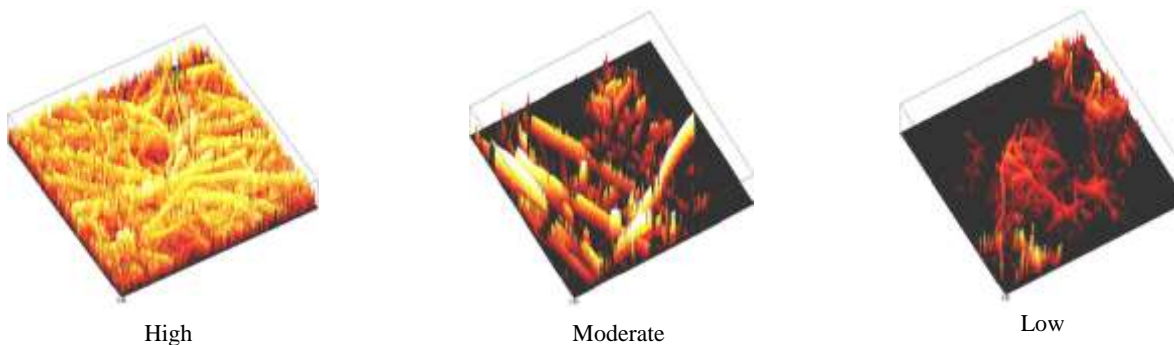
Hv

Mv

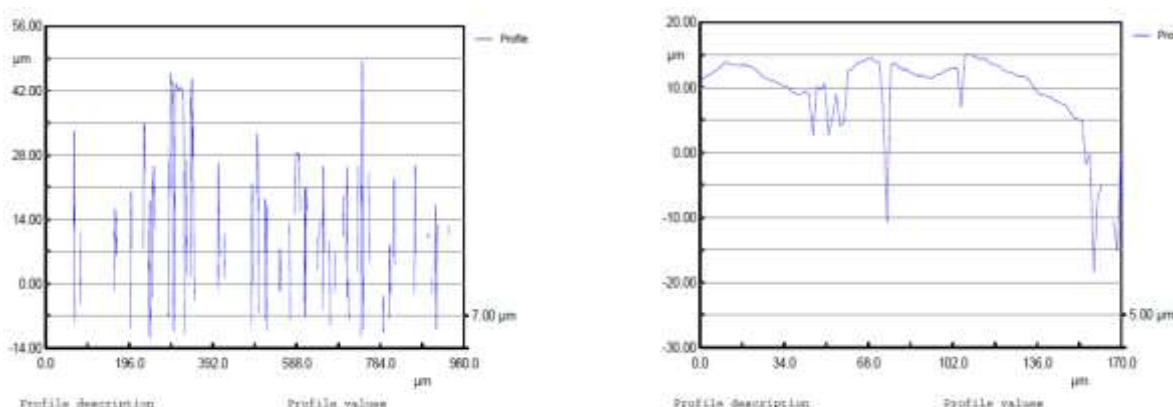
Lv

شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی نانوفوکوس از سطح توده الیاف الکترورسی شده پلیمر PMMA با حلال DMF (C2) ( ) دستگاه الکترورسی DC تحت ولتاژهای متفاوت (Low) ۱۰، (Moderate) ۲۰ و (High) ۳۰ ولت منبع تغذیه





شکل ۷- تصاویر سه‌بعدی از نانوالیاف تهیه شده



شکل ۸- مقادیر تغییرات قطر و ضخامت الیاف در دو جهت قطری از تیمار منتخب (Hv)



شکل ۹- ارزیابی تأثیر تغییر فاصله روزنه از صفحه جمع‌کننده در دستگاه الکتروریسی DC (سمت راست) و AC (سمت چپ)

کم، متوسط و زیاد به صورت شکل ۱۲ آورده شده است. در ادامه نوسانات قطر نانولیف یا نانوالیاف تیمار منتخب Hd در دو جهت قطری در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. همچنین محدوده ارتفاع (ضخامت) کل نانوالیاف بین ۴۲/۷۷۸ و ۵۱/۵۸۳ میکرومتر متغیر می‌باشد (شکل ۱۳).

#### اثر آهنگ تغذیه محلول ریسندگی

در آخرین مرحله بهینه‌سازی شرایط الکتروریسی فیلترهای نانولیفی PMMA، اثر آهنگ تغذیه محلول ریسندگی از نوک سوزن دستگاه الکتروریسی در دو شرایط مورد بررسی قرار گرفت و همچنین سطح توده الیاف با میکروسکوپ نانوفکوس به منظور بررسی اثر آهنگ تغذیه مشاهده گردید.

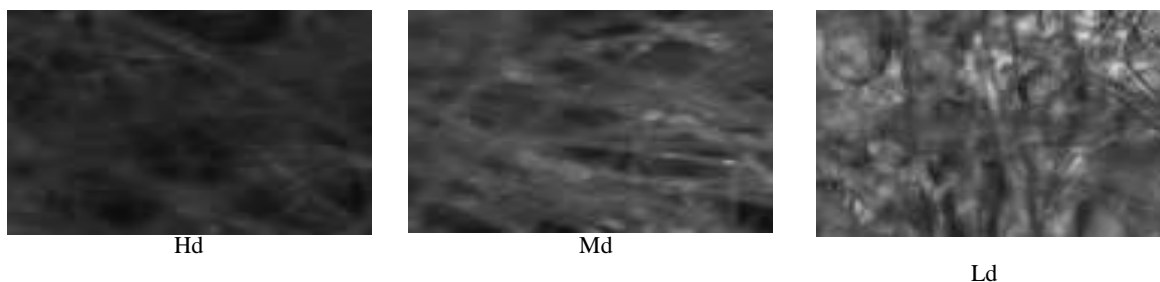
در نتیجه می‌توان گفت که با افزایش فاصله بین روزنه و صفحه جمع‌کننده، قطر الیاف کاهش می‌یابد. این امر را می‌توان به این صورت تفسیر نمود که با افزایش فاصله بین نوک سوزن و صفحه جمع‌کننده، میدان ایجاد شده در اثر اختلاف پتانسیل اعمالی بیشتر شده و الیافها بیشتر تحت کشش قرار می‌گیرند. در نتیجه الیاف ظریف‌تری ایجاد خواهند شد (Laudenslager and Sigmund, 2012). در ادامه با بررسی تصاویر و میانگین قطر الیاف الکتروریسی شده، فاصله بهینه بین روزنه و صفحه جمع‌کننده برابر ۱۵ cm به دست آمد و می‌توان گفت با نتایج نتایج تفاحی یزدی و همکاران (2018) مطابقت دارد.

همچنین تصویر سه بعدی خروجی از دستگاه نانوفکوس جهت مشخص شدن روند کلی برای توده الیاف نمونه تحت فواصل مختلف

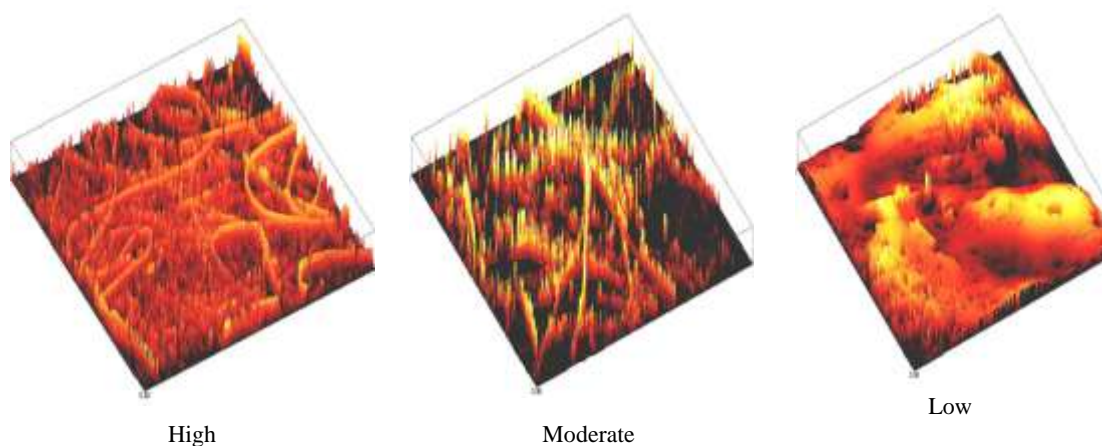




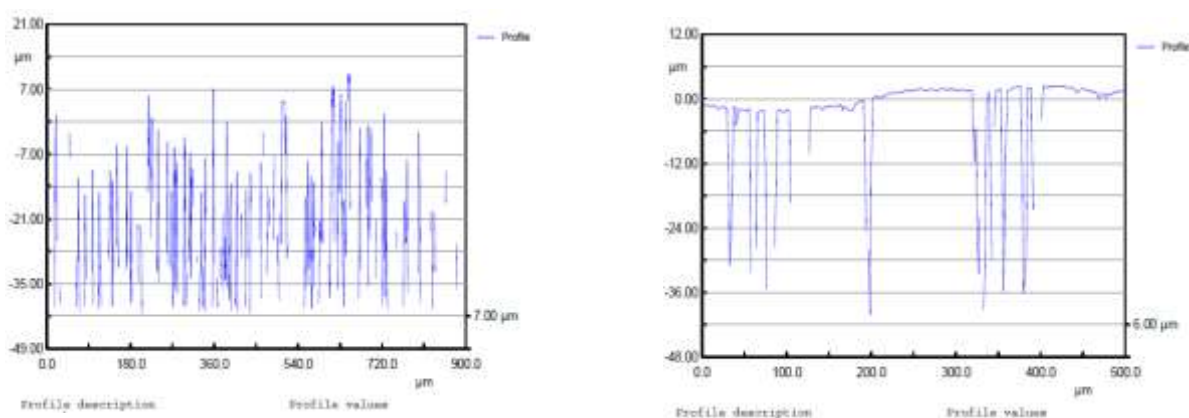
شکل ۱۰- تیمارهای نانوالیاف نمونه تهیه شده



شکل ۱۱- تصاویر میکروسکوپی نانوفکوس از سطح توده الیاف الکتروریسی شده پلیمر PMMA با حلال DMF (C2) تحت فواصل مختلف cm (Low) ۵، (Moderate) ۱۰ و (High) ۱۵ سوزن از جمع کننده



شکل ۱۲- تصاویر سه بعدی از نانوالیاف تهیه شده



شکل ۱۳- مقادیر تغییرات قطر و ضخامت نانوالیاف تیمار منتخب Hd در دو جهت قطری

در هر دو پژوهش با یکدیگر تطابق داشته است. همچنین تصویر سه بعدی خروجی از دستگاه نانوفکوس جهت مشخص شدن وضعیت کلی برای توده الیاف از تیمار نمونه مطابق تحت شرایط شدت تغذیه‌های متفاوت، به صورت شکل ۱۶ است. همچنین نوسانات قطر نانولیف یا نانوالیاف تیمار منتخب Hr این بخش در دو جهت قطری در شکل ۱۷ به نمایش در آمده است. همچنین مطابق با شکل مربوطه، محدوده ارتفاع و یا ضخامت کل نانوالیاف بین ۷۴/۹۴۷ و ۴۴/۳۹۱ میکرومتر متغیر می‌باشد.

#### تولید نانوذرات جهت عامل‌دار نمودن نانوالیاف

در ادامه نانوذرات کربن در قالب تیمار منتخب، پس از آزمایش‌های متعدد، به منظور تولید نانوذرات بهینه تهیه شدند. در نهایت، کوچکترین و موثرترین نانوذرات در قالب تیمار شدت جریان ۲۴۰ آمپر، قطر گرافیت ۰/۲، نیروی آرک ۱۰۰ و غلظت ۴۵ گرم بر لیتر تولید شد. تیمارهای نانوذره کربن تولید شده (در حین تست نانوذره بودن با دستگاه لیزر)، تست لیزر تابش یافته به درون محلول نانوذرات و آب، به عنوان معرف از وجود و انحلال نانوذرات در آب مقطر قبل از آزمایش مطرح می‌باشد.

همچنین پس از آنالیز نانوذرات با دستگاه نانوفکوس و با بررسی تصاویر سه بعدی، نوسانات قطر نانوذرات تیمار منتخب در دو جهت قطری بررسی شده و نانو بودن ذرات تایید گردید. همچنین محدوده ارتفاع (ضخامت) کل نانوذرات (تفاوت بین ارتفاع ذرات یا مجموعه ذرات بزرگ و کوچک) بین ۴۹/۹۹۳ میکرومتر متغیر بدست آمد (شکل ۱۸).

در شکل‌های ۱۴ و ۱۵، تصاویر سطح توده الیاف الکترورسی شده با آهنگ تغذیه ۰/۵ ml/h (Low Recharge: Lr)، ۱ ml/h (Moderate Recharge: Mr) و ۲ ml/h (High Recharge: Hr) ارایه شده است. میانگین قطر الیاف در حالت تغذیه با آهنگ تغذیه ۰/۵ ml/h نسبت به دو حالت دیگر بیشتر است. همچنین می‌توان در این تصویر نقاط غیریکنواختی را مشاهده نمود که ممکن است در راندمان فیلتراسیون تأثیر بگذارد. لازم به ذکر است که در شرایط استفاده از آهنگ تغذیه ۰/۵ ml/h ریسندگی به کندی انجام شده و بایستی زمان زیادی برای تهیه توده نانوالیاف صرف نمود. در قسمت Mr از شکل‌ها نیز تصویر مربوط به توده نانوالیاف PMMA الکترورسی شده با آهنگ تغذیه ۱ ml/h نشان داده شده است. همچنین در مقایسه با آهنگ تغذیه ۰/۵ ml/h الیاف تیمار مذکور یکنواخت تر بوده و نقاط دانه‌ای (بید) کمی مشاهده می‌شود. آهنگ تغذیه محلول ریسندگی نیز یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر تشکیل نانوالیاف و قطر آن‌ها می‌باشد، به گونه‌ای که اگر آهنگ تغذیه پایین باشد، محلول پلیمری خارج شونده از سوزن یکنواخت و پیوسته نبوده و جت پایدار محلول و مخروط تیلور تشکیل نمی‌شود (Megelski et al., 2002; Zeleny, 1935) و در نتیجه، الیافی با قطرهای متغیر شکل خواهد گرفت (Shamim et al., 2012). در برخی موارد نیز بید و الیافی نواری شکل ایجاد می‌گردد (Megelski et al., 2002). این عیوب به دلیل عدم تبخیر حلال و کشش پایین محلول در فضای میان سوزن و صفحه جمع کننده ایجاد شده‌اند (Li et al., 2013). بر این اساس آهنگ تغذیه ۲ ml/h به عنوان شرایط بهینه در مراحل بعدی استفاده خواهد شد. پس نهایتاً با مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج تفاحی یزدی و همکاران (۲۰۱۸) می‌توان نتیجه‌گیری نمود که روند و منطق مذکور



شکل ۱۴ - تیمارهای تهیه شده از نانوالیاف نمونه

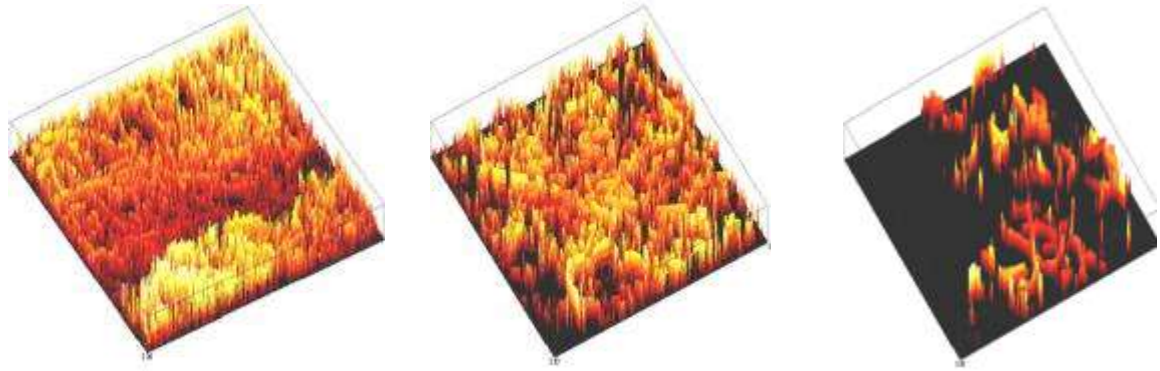


Hr

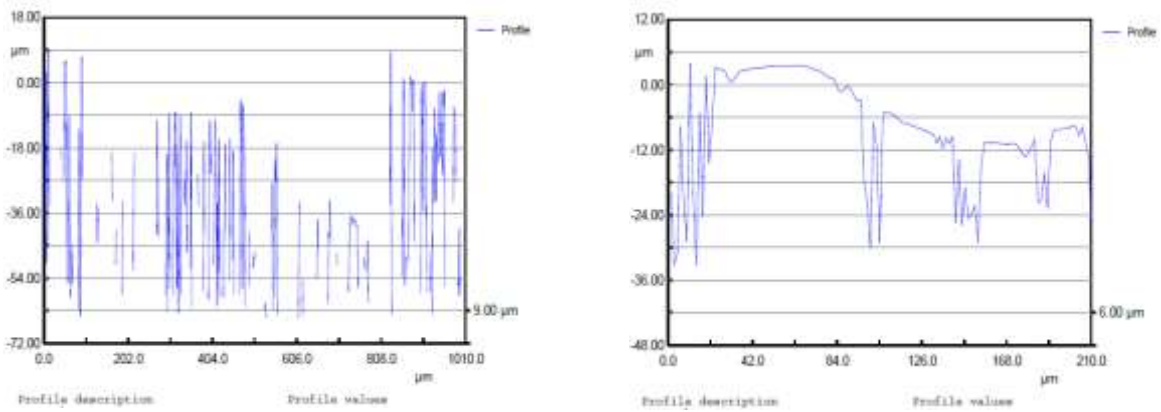
Mr

Lr

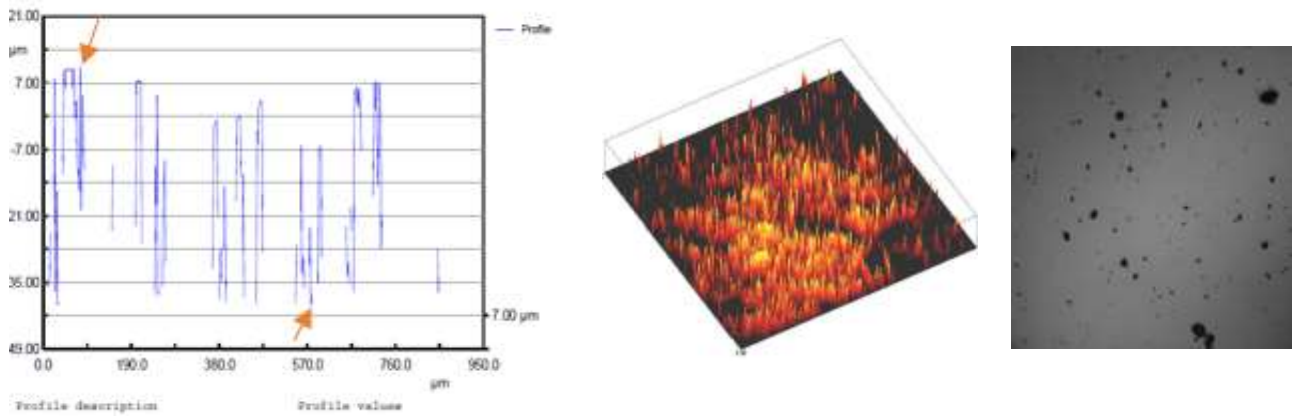
شکل ۱۵ - تصاویر میکروسکوپی نانوفکوس از سطح توده الیاف الکترورسی شده پلیمر PMMA با حلال DMF (C2) با دستگاه الکترورسی DC تحت شدت تغذیه‌های مختلف ۰/۵ (Low) ml/h، ۱ (Moderate) ml/h و ۲ (High) ml/h



شکل ۱۶- تصاویر سه بعدی از نانوالیاف تیمار نمونه تولید شده



شکل ۱۷- مقادیر تغییرات قطر و ضخامت الیاف تیمار منتخب Hr در دو جهت قطری



شکل ۱۸- اثبات نانو بودن اندازه ذرات گرافن استفاده شده در آزمایشها



شکل ۱۹- نانوذرات کربنی (گرافن) تولید شده منتخب جهت لایه نشانی بعد از آزمایش

$$R = \frac{C_1 - C_f}{C_1} \times 100$$

R - درصد حذف فلز سمی مس  
 $C_1$  و  $C_f$  - بترتیب غلظت اولیه و نهائی مس در محلول (mg/l)

### تست تصفیه آب با تعدادی از نانوالیاف و نانوذرات نمونه

در نهایت، با انجام تست‌های مشخص با دستگاه جذب اتمی بر روی تیمار منتخب در دو حالت (الف) بدون لایه نشانی ذرات کربن و (ب) لایه نشانی شده با ذرات کربنی گرافن، مقدار حذف آلاینده (فلز سنگین مس) با استفاده از رابطه ۱ معین گردید (جدول ۳).

جدول ۳- انجام عمل فیلتراسیون آب آلوده (فلز مس)، با غشاهای نانوپلیمری (الف) لایه نشانی شده (ب) لایه نشانی نشده، با نانوذرات

فیلتر	فیلتر منتخب	غشای لایه‌نشانی شده با نانوذرات	غلظت تقریبی اولیه (باخطا) (mg/L)	غلظت تقریبی بعد از عبور از غشا (باخطا)	R درصد حذف باخطا (%)
۱	تیمار ۱۲	*	۳۱۸	۱۱۰/۳	۶۵/۳
۲	(PMMA+DMF)		۳۱۸	۱۴۹/۵	۵۳

مثبت نانوالیافها بوده است.

### منابع

حسینی، س.، رستگار، س.، و رضایی، ح. ۱۳۹۷. بررسی کارایی جاذب نانولیف لیگنوسولوزی در حذف مس از محلول‌های آبی، مجله محیط زیست و مهندسی آب، ۲۴: ۱۱۵-۱۲۲.

شاه‌ولی، م.، و عابدی سروستانی، احمد. ۱۳۸۵. بررسی و بهینه‌سازی سازه‌های بومی جمع‌آوری آب در مراتع خشک و نیمه خشک جغرافیایی استان فارس. نشریه تحقیقات جغرافیایی، ۲۱: ۷۴-۱۰۱.

پی نبر، ف.، سبحان اردکانی، س.، و ریاحی خرم، م. بررسی کارایی تالاب مصنوعی سطحی حاوی گیاه نی در حذف برخی پیراسنجه‌های شیمیایی فاضلاب شهرک صنعتی بوعلی. فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۵: ۸-۱.

قدمی، س.م.، قهرمان، ب.، شریفی، م.، و رجبی مشهدی، ح. ۱۳۸۸. بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی منابع آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک. مجله تحقیقات منابع آب ایران، ۲: ۱۵-۱.

عینالی، ج.، کاظمی، ن.، چراغی، م.، و رابط، ع. ۱۳۹۵. تحلیلی بر آگاهی و عملکرد زیستی کشاورزان در نواحی روستایی (مطالعه موردی: شهرستان ارومیه). فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲: ۴۰۵-۳۹۵.

ملکوتیان، م.، گلپایگانی، ع.، و رجبی زاده، ا. ۱۳۹۴. بررسی کارایی فرایند نانوفیلتراسیون در حذف فلزات سنگین سرب، کادمیم، کروم شش ظرفیتی و مس از آبهای حاوی سولفات. مجله آب و فاضلاب، ۲۵: ۲۰-۱۳.

نتایج بدست آمده نشان داد که استفاده از فیلترهای حاصل از فیبرهای الکتروریسی و نانوذرات موجب کاهش محسوس و قابل توجه آلودگی‌های بسیار مضر هم‌چون فلز سنگین مس گردید. همچنین بیشترین مقدار حذف در تیمار منتخب ۱۲ PMMA+DMF تحت شرایط غلظت محلول ۲۵٪، ولتاژ ۳۰ ولت، فاصله جمع‌کننده تا سرسوزن ۱۵ سانتی‌متر و آهنگ تغذیه ۲ میلی‌لیتر بر ساعت) با وضعیت لایه‌نشانی شده با نانوذرات به‌میزان بیش از ۵۰ درصد حاصل گردید.

### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، ضمن تولید نانوالیاف با هدف استفاده در تصفیه ناخالصی‌های آب، به معرفی فعالیت‌هایی که تاکنون با استفاده از فناوری نانو در زمینه تصفیه پساب صورت گرفته است، پرداخته شد. نانوساختارها محدوده بسیار وسیعی از ظرفیت جذب را در شرایط مختلف از خود نشان داده‌اند. دو پارامتر بسیار تأثیرگذار در بازدهی بالای آن‌ها، روش آسان و ارزان سنتز و روش دیگر، قابلیت جمع‌آوری از محیط و بازیافت آن‌هاست. نانوالیاف پلیمری از نانوذرات منحصر به فرد هستند و دارای سطح بسیار بالا و در نتیجه جذب بالاتر می‌باشند. در نهایت، در پژوهش حاضر و در این راستا، ترکیب تیمار پلیمر پلی‌متیل متاکریلات و حلال دی‌متیل فرمامید با شرایط مختلف مورد بررسی، شرایط غلظت حلال مدنظر در ۲۵wt%، ولتاژ اعمال شده ۳۰ kV، فاصله بین نوک سوزن و صفحه جمع‌کننده ۱۵ cm و آهنگ تغذیه ۲ ml/h بهترین نتیجه را به همراه داشته است. همچنین با استفاده از نانوذرات-نانو الیاف و کاربرد مواد ارزان قیمت، در مقایسه با روشهای گرانبه‌تر تصفیه آب با فیلتر-غشاهای، در تمامی نمونه‌های آزمایشی بیش از ۵۰ درصد فلز سمی مس حذف گردید. بعلاوه تفاوت کم میزان حذف آلاینده‌ها در تیمارهای حاوی نانوذرات کربنی در مقایسه با تیمارهای بدون لایه‌نشانی نانوذرات، حاکی از اثرگذاری

- Lee, A., Elam, J.W., and Darling, S.B. 2016. Membrane materials for water purification: design, development and application, *Environ. Sci. Water Res. Technol.*, 2: 17-42.
- Megelski, S.S., J.S., Chase, D.B., and Rabolt, J.F. 2002. Micro- and nanostructured surface morphology on electrospun polymer fibers. *Macromolecules*. 35: 8456-8466.
- Mohamed, N. 2019. Heavy metals assessment (Fe, Zn, Mn) in vegetables planted at different topographical area: a review. Student Project. Faculty of Plantation and Agrotechnology, Jasin, Melaka.
- Monteagudo, M., Monteagudo, J. and Ortiz, M. 2000. Removal of inorganic mercury from mine waste water by ion exchange. *Journal of Chemical Technology*, 75: 767-772.
- Nemerow N.L. and Dasgupta A. 1991. Industrial and hazardous waste treatment. New York.
- Pamukoglu M.Y. and Kargi F. 2006. Batch kinetics and isotherms for biosorption of copper (II) ions onto pretreated powdered waste sludge (PWS). *Hazard. Mater.*, 138,3: 479-484.
- Pillay V., Dott C., Choonara Y. E., Tyagi C., Tomar L., Kumar P., du Toit L.C. and Ndesendo V.M.K. 2013. A review of the effect of processing variables on the fabrication of electrospun nanofibers for drug delivery applications. *J. Nanomater.*: 22-35.
- Saleh T.A. and Gupta V.K. 2012. Column with CNT/magnesium oxide composite for lead (II) removal from water. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 19,4: 1224-1228.
- Schiewer, S. and Balaria, A. 2009. Biosorption of Pb<sup>2+</sup> by original and protonated citrus peels: Equilibrium, kinetics, and mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 146: 211-219.
- Shamim Z., Saeed B., Amir T., Abo Saied R. and Rogheih, D. 2012. The effect of flow rate on morphology and deposition area of electrospun nylon 6 nanofiber. *J. Eng. Fabrics Fibers*, 7,4: 42-48.
- Shin, C., and Chase, G.G. 2004. Water-in-oil coalescence in micro-fiber composite filters, *AIChE J.*, 50: 343-350.
- Sonune A. and Ghate R. 2004. Developments in wastewater treatment methods. *Desal.* 167, 55-63.
- Tafari Yazdi M.R., Shirgholami M.A., Jafari S. and Dehghani M. 2018. Study on removal of reactive blue 19 using PVA electrospun nanofibers. *J. Environ. Water Eng.*, 4,1: 23 - 34.
- Turek, A., Wieczorek, K., and Wolf, W.M. 2019. Digestion Procedure and Determination of Heavy Metals in Sewage Sludge—an Analytical Problem. *Sustainability*, 11,6: 1-10.
- Urgun-Demirtas, M., Benda, P.L., Gillenwater, P.S., Ali, I., and Aboul-Enein, H.Y. 2005. Chiral pollutants: distribution, toxicity and analysis by chromatography and capillary electrophoresis. John Wiley & Sons.
- Burger, C., Hsiao, B. S., and Chu, B. 2006. Nanofibrous materials and their applications. *Annu. Rev. Mater. Res.*, 36, 333-368.
- Anton, F. 1934. U.S. Patent No. 1,975,504. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Forutan R., Ehsandoost E., Hadipour S., Mobaraki Z., Saleki M. and Mohebbi G. 2016. Kinetic and equilibrium studies on the adsorption of lead by the chitin of pink shrimp (*Solenocera melantho*). *Entomol. Appl. Sci. Lett.*, 3, 20-26.
- Gopal, R., Kaur, S., Feng, C.Y., Chan, C., Ramakrishna, S., Tabe, S., and Matsuura, T. 2007. Electrospun nanofibrous polysulfone membranes as pre-filters: Particulate removal. *Journal of membrane science*, 289(1-2): 210-219.
- Habibi S. and Hashemi S. H. 2013. Nanotechnology in Textile, Amirkabir University, 140 pp.
- Hamissa, A.M., Lodi, M., Seffen, E., Finocchio, R. and Botter, A. 2010. Conventi, Sorption of Cd (II) and Pb (II) from aqueous solutions onto Agave Americana fibers. *Chemical Engineering Journal*, 159: 67-74.
- Haider, S., Al-Zeghayer, Y., Ali, F.A.A., Haider, A., Mahmood, A., Al-Masry, W.A., and Aijaz, M.O. 2013. Highly aligned narrow diameter chitosan electrospun nanofibers. *Journal of Polymer Research*, 20(4), 1-11.
- Henneberry, Y.K., Kraus, T.E.C., Fleck, J.A., Krabbenhoft, D.P., Bachand, P.M. and Horwath, W.R. 2011. Removal of inorganic mercury and methylmercury from surface waters following coagulation of dissolved organic matter with metal-based salts. *Science of the Total Environment*, 409: 631-637.
- Hutchison, A., Atwood, D., and Santilliann-Jiminez, Q.E. 2008. The removal of mercury from water by open chain ligands containing multiple sulfurs. *Journal of Hazardous Materials*, 156: 458-465.
- Kiani, S., Mousavi, S.M., Shahtahmassebi, N., and Saljoughi, E. 2015. Hydrophilicity improvement in polyphenylsulfone nanofibrous filtration membranes through addition of polyethylene glycol. *J. Appli. Sur. Sci.*, 359, 252-258.
- Laudenslager, M.J. and Sigmund, W.M. 2012. Electrospinning: Encyclopedia of Nanotechnology. Springer Publishers. 769-775.
- Li, R., Liu, L. and Yang, F. 2013. Preparation of polyaniline/reduced graphene oxide nanocomposite and its application in adsorption of aqueous Hg(II). *Chemical Engineering Journal*, 229: 460-468.

Yu, X., Luo, T., Zhang, Y., Jia, Y., Zhu, B., Fu, X., Liu, J. & Huang, X. 2011. Adsorption of lead (II) on O<sub>2</sub>-plasma-oxidized multiwalled carbon nanotubes: Thermodynamics, kinetics, and desorption. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 3: 2585–2593.

Zeleny, J. 1935. The role of surface instability in electrical discharges from drops of alcohol and water in air at atmospheric pressure. *J. Franklin Inst.*, 219,6: 659-675.

Negri, M.C., Xiong, H. and Snyder, S.W. 2012. Achieving very low mercury levels in refinery wastewater by membrane filtration. *Journal of Hazardous Materials*, 216: 98–107.

Wiatrowski, H.A., Das, S., Kukkadapu, R., Ilton, E.S., Barkay, T., and Yee, N. 2009. Reduction of Hg (II) to Hg (0) by magnetite. *Environmental science & technology*, 43(14), 5307-5313.

## Environmental and Peaceful Application of Nanoparticles-Nanofibers in Treatment of Contaminated Irrigation Waters and Toxic Drainage Effluents (Case Study of Toxic Copper Ion)

S.H. Abtahi<sup>1</sup>, M.T. Ahmadi<sup>2</sup>, M. Mahmoudian<sup>3</sup>, M. Shokri<sup>4\*</sup>

Received: Sep.17, 2019

Accepted: Feb.04, 2020

### Abstract

Today, the application of science and advanced technologies, the management of quality risks imposed on environmental resources, has particular importance. Considering the toxicity of wastewater agricultural, industrial, and domestic effluents on the environment, a thorough and separate study of the toxic wastewater treatment and contaminated water, in general, seems necessary to complete the non-destructive development process. In this regard, to recover compounds containing heavy metals and pollutants such as copper, in wastewater containing harmful fertilizers and pesticides, the production of nanofibers (polymer nanoparticles) in the form of electrospray (under four treatments of solute concentration, applied voltage, Injection Needle and Injection rate), using electrospinning machine and selected polymeric Polyacrylamide Methacrylate and Dimethylmethyl Formamide solvent with using the low-cost raw materials approach for the selected hazardous pollutants. The nanoparticle production technology was used in the form of wire blasting (under four concentrations of nanoparticle solution concentration, the diameter of carbon wires used, flow and arc force), also. Finally, by extracting the results in each phase, their analysis was carried out and the results showed that the combination of the polymer treatment with dimethylformamide solvent at 25 wt%, applied voltage kV. 30, the distance between the tip of the needle and the plate 15 cm and the feeding rate of 2 ml / h worked best. Thus, with the preparation of nanofibers and the use of relatively inexpensive laboratory materials, compared to the costly methods of water treatment, significant results were observed in the process of removal of toxic copper > 50% in all selected samples indicated a positive and high effect of the nanoparticles-nanofibers.

**Keywords:** Copper ion, Environmental protection, Electrospinning, Nanoparticles-nanofibers, Water treatment, Wire explosion

1- Ph.D. of Water Sciences & Engineering, Urban Human Ecology Research Group of Kargosha

2- Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Urmia University, Urmia

3- Assistant Professor, Department of Nanotechnology, Faculty of Science, Urmia University, Urmia

4- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Bu-Ali Sina University, Kabodarahang Engineering Faculty, Hamedan, Iran

(\*- Corresponding Author Email: msh.shokri@gmail.com)