

کاربرد نانوالیاف پلیمری در حذف مواد رنگزا از محیط آبی

فاطمه خسروی محمدسلطان^۱، محمود حاجیانی^۲، امین الدین حاجی^{۳*}

۱- کارشناس ارشد آلودگی محیطزیست، گروه محیطزیست، دانشکده منابع طبیعی و محیطزیست، پردیس امیرآباد، دانشگاه بیرجند،

بیرجند، ایران، صندوق پستی: ۹۷۱۷۵-۶۱۵

۲- استادیار، گروه محیطزیست، دانشکده منابع طبیعی و محیطزیست، پردیس امیرآباد، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، صندوق پستی:

۹۷۱۷۵-۶۱۵

۳- استادیار، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، صندوق پستی: ۸۹۱۹۵-۷۴۱

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۰/۲۹ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۷/۱۲/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۲/۲۶ در دسترس بصورت الکترونیک: ۹۸/۰۲/۲۲

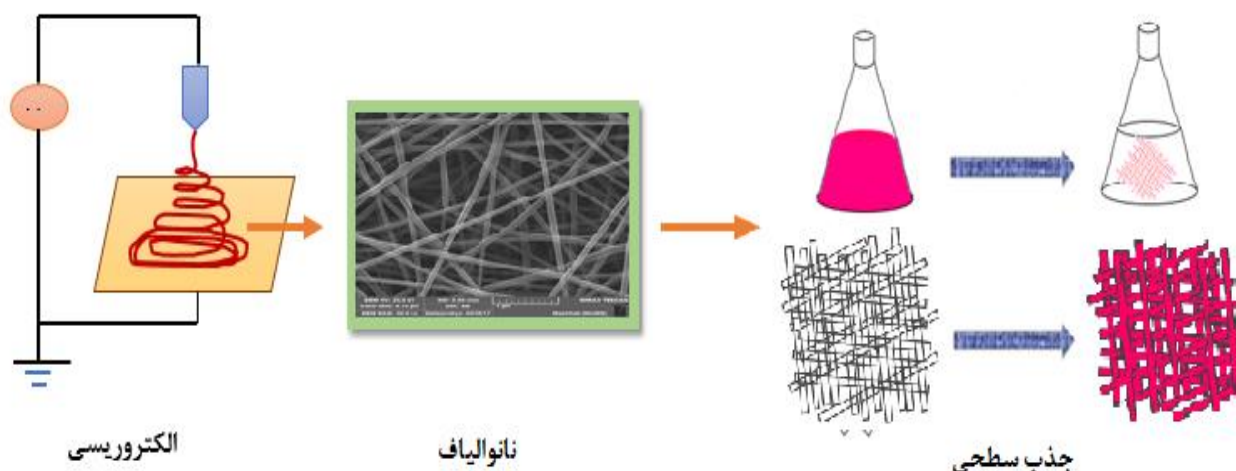
چکیده

توسعه زندگی اجتماعی و صنعتی شدن کشورها منجر به آلودگی‌های زیست‌محیطی فراوانی شده است. از میان آلاینده‌های صنعتی که به جریان‌های آبی ورود پیدا می‌کنند، مواد رنگزا به دلیل پایداری و مقاومت شیمیایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. با توجه به پیچیدگی آلاینده‌های ورودی به منابع آبی، استفاده از روشی با کارایی بالا در حذف مواد رنگزا، امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. از میان جاذب‌های مختلف، نانوالیاف پلیمری، به دلیل وزن کم، سطح مخصوص زیاد، ساختار متخلخل پیوسته و قابلیت عامل‌دار شدن، به عنوان مواد غشایی موثر، در زمینه پالایش‌های زیست‌محیطی بکارگرفته می‌شوند. علاوه بر این، جاذب‌های نانولیفی اصلاح شده، عملکرد جذب را به‌طور موثری بهبود می‌بخشند. در این مقاله، تحقیقات مختلف انجام شده در زمینه کاربرد نانوالیاف پلیمری مختلف در جداسازی مواد رنگزا از آب، مرور و نتایج تحقیقات انجام شده در هر مورد بررسی و مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی

مواد رنگزای مصنوعی، جذب سطحی، نانوالیاف، الکتروریسی.

چکیده تصویری



Application of Polymeric Nanofibers for Removal of Dyes

Fatemeh Khosravi Mohammad Soltan¹, Mahmood Hajiani¹, Aminoddin Haji^{*2}

1- Environmental Engineering Department, Faculty of Natural Resources and Environmental Engineering, University of Birjand, P. O. Box: 97175-615, Birjand, Iran

2- Department of Textile Engineering, Yazd University, P. O. Box: 89195-741, Yazd, Iran

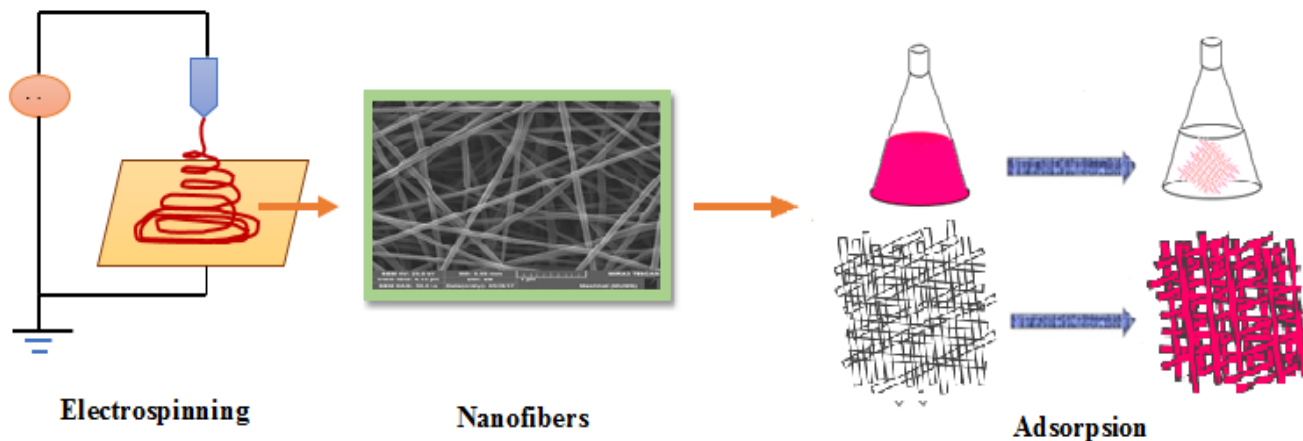
Abstract

The development of social life and the industrialization of countries have led to increased environmental pollution. Among the industrial pollutants entering the water flow, synthetic dyes are of particular importance due to their chemical stability and resistance to biodegradation. Due to the complexity of contaminants found in the water resources, the use of high-performance adsorbents in dye removal is unavoidable. Among the various adsorbents, polymer-based electrospun nanofibres can be used as effective membrane materials for environmental refinement due to light weight, high surface area and continuous porous structure and functionality. In addition, modified nanofiber adsorbents improve the absorption performance effectively. In this study, several investigations reported on the field of the application of polymeric nanofibers in dyes separation from aqueous media have been reviewed and the results of the reported literature in each case, have been studied and compared.

Keywords

Synthetic dye, Adsorption, Nanofiber, Electrospinning.

Graphical abstract



۱- مقدمه

به اثرات سمی مواد رنگزا، نظیر جهش، سرطان، اختلال‌های کروموزومی و مشکلات تنفسی استفاده از این مواد شیمیایی نگرانی‌هایی زیادی را ایجاد کرده است. بنابراین توجه بسیاری بر روی روش‌های حذف مواد رنگزا از جریان‌های آبی صورت گرفته است [۱۷-۱۵].

چندین روش فیزیکی- شیمیایی، شامل انعقاد و لخته‌شدن، جداسازی غشایی، تبادل یونی، اکسایش شیمیایی، جذب سطحی و کاتالیزور نوری برای حذف مواد رنگزا موردبررسی قرار گرفته‌اند، که برخی از این روش‌ها مؤثر هستند اما توجیه اقتصادی ندارند [۱۶]. تصفیه زیستی را می‌توان اقتصادی‌ترین روش عنوان کرد، اما به دلیل تجزیه‌پذیری اندک مواد رنگزا، گزینه مناسبی برای حذف آن‌ها نیستند. در مقایسه با سایر روش‌ها جذب سطحی به دلیل بهره‌برداری ساده، بازده بالا در تصفیه، مقرون‌به‌صرفه بودن، قابلیت احیا و مصرف مجدد جاذب به‌عنوان راه‌حل امیدوارکننده به‌منظور حذف مواد رنگزا در نظر گرفته می‌شود. یک عامل مهم در رابطه با فرآیند جذب، یافتن جاذب مناسب می‌باشد [۱۷، ۹]. بنابراین انتخاب یک جاذب با کارایی بالا در حذف ماده رنگزا امری ضروری تلقی می‌شود. در این راستا جاذب‌های پلیمری توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند. نانو الیاف پلیمری ساخته‌شده به‌وسیله روش الکتروریسی، به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد و اصلاح سطح آن‌ها به‌عنوان جاذب مؤثر در فرآیند خالص‌سازی آب، بسیار موردتوجه قرار گرفته‌اند. در راستای افزایش کارایی نانو الیاف در فرآیند خالص‌سازی آب و همچنین افزایش پایداری مکانیکی و تخلخل غشا نانو الیاف، می‌توان سطح آن را با استفاده از ترکیبات مختلفی مانند نانو ذرات، پلیمرها، مولکول‌های آلی مختلف و غیره اصلاح نمود [۱۸]. علم و فناوری نقش بسیار مهمی در توسعه روش‌های نوین، ابزار و روش‌هایی برای حل مشکلات کمی و کیفی آب ایفا می‌کند. با ورود مواد آلی و غیرآلی، فلزات سنگین و آلاینده‌های نوظهور به منابع آبی، روش‌های متداول، جوابگوی تصفیه این قبیل از آلاینده‌ها نخواهند بود. اخیراً با ورود فناوری‌های نوین از قبیل زیست‌فناوری و نانو فناوری، راهکارهای جدید و نویدبخشی جهت تصفیه آب و فاضلاب معرفی شده‌اند. از جمله فناوری‌های مبتنی بر نانو در زمینه تصفیه آب می‌توان به نانوفیلتراسیون، نانوکاتالیزورنوری، نانو حسگرها و غیره اشاره کرد [۱۹].

۲- روش‌های رایج برای حذف مواد رنگزا از محیط آبی

تاکنون روش‌های مختلفی برای حذف مواد رنگزا از پساب‌های حاوی آن‌ها بکار گرفته‌شده است. متداول‌ترین روش برای حذف مواد رنگزا شامل روش‌های فیزیکی- شیمیایی نظیر انعقاد و لخته‌سازی [۲۰]، اولترافیلتراسیون [۲۱]، اسمز معکوس، از ن زنی، جذب سطحی [۲۲]، اکسایش [۲۳] و استفاده از فیلترهای غشایی [۲۴] است. هرکدام از روش‌های نام‌برده دارای مزایا و معایبی در حذف ماده رنگزا از فاضلاب‌ها هستند. در جدول ۱، مزایا و معایب روش‌های حذف مواد رنگزا به‌اختصار بیان شده است. به‌طور کلی روش‌های بکار گرفته‌شده در حذف مواد رنگزا را می‌توان در سه بخش تصفیه فیزیکی، شیمیایی و زیستی تقسیم‌بندی نمود [۲۵، ۲].

یکی از بحث‌برانگیزترین چالش‌های زیست‌محیطی دهه‌های اخیر مسائل مربوط به کیفیت و کمیت منابع آبی می‌باشد [۲، ۱]. افزایش جمعیت جهان، صنعتی شدن کشورها، تغییرات آب و هوایی، بی‌کیفیت شدن و کاهش منابع آب، نگرانی‌هایی در خصوص تأمین آب آشامیدنی به وجود آورده است [۳]. از سویی رهاسازی غیراصولی پساب‌های صنعتی نظیر صنایع تولید رنگ و محصولات شیمیایی، که حاوی فلزات سنگین و ترکیبات شیمیایی مختلفی هستند، منابع آبی را در معرض انواع آلاینده‌های مزمین قرار داده است که اگر موردتوجه قرار نگیرند معضلات فراوانی برای محیط‌زیست و سلامتی انسان ایجاد می‌کنند [۴]. استفاده گسترده از مواد رنگزا در صنایع نساجی، چاپ، مواد غذایی، آرایشی و دارویی تولید حجم زیادی از فاضلاب‌های حاوی مواد رنگزا را سبب می‌شوند [۵، ۶]. از این میان فاضلاب کارخانجات نساجی و چرم‌سازی به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده‌های مواد رنگزا، جزء آلوده‌کننده‌ترین پساب‌ها شناخته می‌شوند [۷]. مواد رنگزای نساجی با گستره‌ای در حدود ۱۰۰۰۰۰ نوع ماده رنگزای مختلف از عمده‌ترین مواد شیمیایی مصرفی این صنعت به شمار می‌آیند [۸، ۹]. در حین فرآیندهای رنگرزی انواع مختلفی از مواد رنگزا به فاضلاب ورود پیدا می‌کنند که عمده‌ترین و مهم‌ترین عامل آلودگی پساب صنایع نساجی محسوب می‌شوند. مهم‌ترین مواد رنگزای مصرفی در این صنعت شامل ماده رنگزای اسیدی، بازی، آزو، گوگردی و رنگدانه‌ها هستند. مصرف سالیانه مواد رنگزا در صنعت نساجی در سطح جهان بالغ بر ۳۶۰۰۰ تن است که حدود ۱۵ درصد آن در حین فرآیند رنگرزی و تکمیل هدر می‌رود و به‌صورت پساب به محیط ورود پیدا می‌کند [۱۰، ۸]. در واقع اطلاعات دقیقی از میزان ورود مواد رنگزا به محیط‌زیست در دست نیست. باین‌حال ورود مواد رنگزای مصنوعی به محیط، دانشمندان زیست‌محیطی را با چالش مواجه نموده است. تخلیه پساب‌های حاوی مواد رنگزا بر جلوه زیباشناختی محیط اثراتی سوء وارد می‌کند و از طرفی از طریق واکنش‌های شیمیایی مانند اکسایش و آبکافت منشأ محصولات جانبی خطرناکی می‌شود [۱۱].

ورود مواد رنگزا به پیکره‌های آبی به دلیل اثر آن بر کاهش نفوذ نور به ایجاد اختلال در عمل فتوسنتز منجر خواهد شد و از سویی سبب کاهش انتقال اکسیژن و سایر گازها به آب می‌شود [۱۲، ۵]. مواد رنگزای اسیدی از جمله مواد رنگزای آنیونی هستند که به‌طور گسترده در صنایع نساجی استفاده می‌شوند. با توجه به اثرات سو این آلاینده بر سلامتی انسان (از جمله سوزش چشم، اختلالات گوارشی، حالت تهوع، مشکلات تنفسی و لخته‌شدن خون)، و پایداری آن‌ها در مقابل تجزیه زیستی، تصفیه فاضلاب صنایع نساجی یک مسئله ضروری در حفاظت از محیط‌زیست محسوب می‌شود [۱۳]. مواد رنگزای بازی دارای شدت رنگ بالایی هستند؛ بطوریکه حتی در غلظت‌های کم نیز قابل‌مشاهده هستند. علاوه‌براین، برخی مواد رنگزا سرطان‌زا بوده و سبب جهش و آسیب‌های ژنتیکی شده و سیستم زیستی و تنوع ژنتیکی ماهی‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۱۴]. مواد رنگزا همچنین باعث اختلال در عملکرد کلیه‌ها، سیستم تولیدمثل، کبد و سیستم عصبی مرکزی انسان می‌شود. با توجه

جدول ۱- فرآیندهای اصلی مرسوم و نو ظهور برای حذف ماده رنگزا [۱۰].

مغایب	مزایا	فناوری	
تولید حجم بالای لجن، مشکلات حمل و نقل و دفع لجن فرآیند آهسته، نیاز به ایجاد محیط مناسب، نگهداری و احتیاجات تغذیه بی اثر در برابر مواد رنگزای راکتیو و خمی، بازیابی آن هزینه بر است فشار بالای کار، بسیار پر هزینه، نامناسب برای حجم های بالا محدودیت اقتصادی، غیر موثر برای مواد رنگزای دیسپرس هزینه انرژی بالا، نیاز به مواد شیمیایی	ساده، اقتصادی اقتصادی، تصفیه قابل قبول موثرترین جاذب، دارای پتانسیل بالا در تصفیه پساب حذف گستره وسیعی از مواد رنگزا، تولید پساب تصفیه شده با کیفیت بالا روشی موثر، بازدهی بالا، بدون از دست دادن جاذب در فرآیند بازیابی فرآیند سریع و موثر	انعقاد و لخته سازی تجزیه زیستی جذب بروی کربن فعال جداسازی غشایی تبادل یونی اکسایش	روش های تصفیه مرسوم
تولید محصولات جانبی، محدودیت فنی، اقتصادی نبودن نیاز به اصلاح شیمیایی، تجزیه غیر موثر مواد رنگزا روند فرآیند آهسته، عملکرد فرآیند وابسته به برخی عوامل خارجی (نمک، pH)	عدم تولید لجن، عدم مصرف یا مصرف کم مواد شیمیایی، موثر برای مواد رنگزای بسیار مقاوم مقرون به صرفه، عدم نیاز به احیا جاذب هزینه عملیاتی کم، کارایی موثر و انتخابی، عدم تاثیر سمی بر میکرو ارگانیسم ها	فرآیند اکسایش پیشرفته زیست جاذب های انتخابی زیست توده	فرآیندهای حذف نو ظهور

۱-۲- تصفیه فیزیکی

تأثیرگذار در تخریب مواد آلاینده بر مبنای ایجاد اکسیدکننده های بسیار قوی مانند رادیکال های هیدروکسیل شناخته می شود. با وجود اینکه این روش به عنوان یک روش مؤثر و مناسب در تصفیه آب های آلوده محسوب می شود، بسیار گران بوده و مقرون به صرفه نیست. همچنین از دیگر مغایب این روش می توان به تشکیل محصولات جانبی، آزادسازی آمین های آروماتیک و تولید لجن اشاره کرد [۱۵].

۲-۳- تصفیه زیستی

تصفیه زیستی نیز به معنی استفاده از میکرو ارگانیسم هایی مانند باکتری، مخمر، جلبک و قارچ ها که قادر به تجمع و سپس تجزیه آلاینده ها مختلف هستند می باشد [۲۸]. این روش در مقایسه با روش های تصفیه فیزیکی و شیمیایی اقتصادی به نظر می رسد اما به دلیل محدودیت های فنی و نیاز به فضای گسترده، کاربرد آن محدود است. از طرفی بسیاری از مولکول های آلی به دلیل ساختار شیمیایی پیچیده و منشا آلی مصنوعی در برابر تجزیه زیستی مقاوم هستند. بنابراین کارایی زیادی در تصفیه پساب های حاوی مواد رنگزا ندارد و سرعت تجزیه زیستی مواد رنگزا بسیار آهسته است [۲۹].

به طور کلی روش های شیمیایی نسبت به روش های فیزیکی پیچیده تر هستند که این امر موجب مشکلاتی در استفاده از روش های شیمیایی می شود. به همین منظور در سیستم های تصفیه کمتر از روش های شیمیایی استفاده می گردد. با توجه به محدودیت ها و مشکلات مربوط به روش های فیزیکی-شیمیایی نظیر هزینه بالا و عدم کارایی در غلظت های

از جمله روش های تصفیه فیزیکی می توان به فرآیندهای غشایی (نانوفیلتراسیون، اسمز معکوس، الکترو دیالیز و غیره) و فرآیند جذب سطحی اشاره کرد. از مغایب اصلی فرآیند غشایی می توان به کم بودن طول عمر مفید غشاها و هزینه جایگزینی متناوب آن ها اشاره کرد. اسمز معکوس یک روش جداسازی با یک غشا نیمه تراواست. خالص سازی آب با این روش از کارایی بالایی برخوردار است اما این روش هزینه بر بوده و به فشار بالایی برای جداسازی نیاز دارد. الکترو دیالیز نیز فرآیندی هزینه بر و نیازمند تجهیزات گران قیمت می باشد، لذا این عوامل باعث محدودیت استفاده از این روش در مقیاس گسترده شده است. جذب سطحی از جمله روش های قابل قبول به منظور کاهش غلظت مواد رنگزا از محلول های آبی می باشد. چراکه این روش در مقایسه با دیگر روش های جداسازی، به دلیل سادگی در بهره برداری، مقرون به صرفه بودن و عملکرد بالا در تصفیه پساب مورد توجه فراوان قرار گرفته است [۲۶، ۲۷]. در حال حاضر استفاده از جاذب هایی که علاوه بر قیمت ارزان، از ظرفیت جذب بالایی برخوردار باشند در حال توسعه است.

۲-۲- تصفیه شیمیایی

روش های تصفیه شیمیایی اغلب گران بوده و با تولید لجن همراه هستند. علاوه بر این، به دلیل استفاده فراوان از مواد شیمیایی با آلودگی ثانویه همراه هستند. فرآیند اکسایش پیشرفته یکی از فناوری های بسیار

است. در جذب شیمیایی به دلیل تشکیل پیوندهای قوی، انرژی جذب بالاتر است و به همین دلیل این نوع جذب در دماهای بالاتر بهتر انجام می‌شود. چراکه اغلب واکنش‌های شیمیایی در دماهای بالاتر با پیشرفت بیشتری همراه هستند [۱۵].

فناوری‌های جذب با استفاده از جاذب‌های جامد برای حذف گروه ویژه‌ای از آلاینده‌ها به‌خصوص آلاینده‌هایی که اساساً توسط روش‌های زیستی قابل حذف نیستند، به‌طور مؤثری بکار می‌روند. ظرفیت جذب عمدتاً بر اساس خصوصیات ساختاری و ترکیب خلل و فرج آن‌هاست که سطح تماس بسیار گسترده‌ای در اختیار این مواد قرار می‌دهد. همچنین طبیعت شیمیایی آن‌ها را به‌منظور افزایش خواص جذب، می‌توان به‌راحتی توسط عملیات شیمیایی اصلاح نمود [۳۱]. جاذب‌های بسیاری مانند، آلومینا فعال، کربن فعال، اکسید آهن، نانولوله‌های کربنی، رزین، کیتوسان، الیاف طبیعی، جاذب‌های زیستی، ضایعات کشاورزی و مواد اصلاح یافته برای حذف فلزات سنگین، مواد آلی، مواد رنگزا و داروها از محلول‌های آبی موردبررسی قرار گرفته‌اند. با این حال نیاز به جاذب‌هایی ارزان قیمت، قابل بازیافت، دارای جذب و انتخاب‌پذیری بالا، موجب شده است تا تحقیقات زیادی در زمینه تولید جاذب‌های جدید همچنان انجام شود [۳۲].

۴- انواع جاذب مورد استفاده برای حذف مواد رنگزا از محیط آبی

۴-۱- کربن فعال

کربن فعال به‌عنوان یکی از مهم‌ترین جاذب‌ها، برای حذف آلاینده‌ها از محلول‌های آبی شناخته می‌شود. به‌طور خاص، بازده حذف بالا کربن فعال در جذب انواع مختلفی از مواد رنگزا، آن را به جایگزین مناسبی برای سایر روش‌های تصفیه که توجیه اقتصادی ندارند تبدیل کرده است. با این وجود کاربرد کربن فعال به دلیل معایبی نظیر گران بودن، غیرقابل بازیابی، غیرانتخابی و بی‌اثر بودن نسبت به مواد رنگزای پراکنده و خمی محدود شده است. بنابراین کاربرد آن در بسیاری از برنامه‌های کنترل آلودگی قابل توجیه نیست. از این رو، تلاش‌های فراوانی به‌منظور یافتن جاذبی مؤثر و مقرون‌به‌صرفه صورت گرفته است [۳۳، ۶]. در تحقیقی، کارایی کربن فعال حاصل از پوست سویا خوراکی در حذف مواد رنگزای قرمز اسیدی^۶ و قرمز اسیدی^۷ ۱۸ بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که کربن فعال حاصل از پوست سویا، به‌عنوان جاذبی ارزان و با ظرفیت جذب نسبتاً زیاد، می‌تواند جایگزین مناسبی در حذف مواد رنگزا باشد. در تحقیق دیگری، کارایی کربن فعال حاصل از هسته زیتون در حذف ماده رنگزا متیلن آبی^۸ بررسی شده است. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد، کربن فعال حاصل از هسته زیتون، می‌تواند به‌عنوان جاذب ارزان، جایگزین مناسبی برای کربن فعال تجاری در حذف آلاینده‌های آلی باشد [۳۴].

پایین، استفاده از روش‌های زیستی می‌تواند برخی از این مسائل را برطرف و به‌عنوان راهکاری مؤثر و اقتصادی مطرح گردد. از طرفی برخی از مواد رنگزا در برابر تجزیه زیستی مقاوم بوده و کاربرد آن در تصفیه پساب‌های حاوی مواد رنگزا محدود می‌شود. تصفیه فیزیکی شامل طیف گسترده‌ای از فناوری‌های جداسازی است که در این میان، روش جذب سطحی به دلیل کاربرد آسان، مصرف انرژی کم، نگهداری ساده، عدم تأثیر مواد شیمیایی سمی در فرآیند هزینه عملیاتی پایین، کارایی بالا و ظرفیت جذب زیاد جهت تصفیه آب و فاضلاب مورد استفاده قرار گرفته است.

۳- مروری بر فرآیند جذب سطحی

جذب سطحی^۱ یک فرآیند فیزیکی-شیمیایی، و به معنی انباشت جذب‌شونده بر روی جاذب است [۱۷]. فرآیند جذب به‌طور کلی در فاز مایع-جامد رخ می‌دهد [۹]. ماده‌ای که از فاز مایع حذف می‌شود به‌عنوان ماده جذب‌شونده^۲ و ماده جامدی که عمل جذب را سبب می‌شود جاذب^۳ نامیده می‌شود [۳۰]. در طول فرآیند جذب سطحی، مولکول‌های حل‌شونده از محلول خارج شده و توسط جاذب جذب می‌شوند. بخش اعظم مولکول‌های مواد جذب‌شونده بر روی سطح بزرگی از تخلخل‌های جاذب و به مقدار کمتری بر روی سطح بیرونی جذب می‌شوند. فرآیند جذب سطحی تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که غلظت ماده جذب‌شونده باقی‌مانده در محلول با مقدار ماده جذب‌شونده موجود بر روی جاذب در حال تعادل باشد. انتقال جذب‌شونده با برقراری تعادل متوقف می‌شود [۱۵].

۳-۱- انواع جذب سطحی

فرآیند جذب سطحی شامل دو حالت جذب شیمیایی و فیزیکی است. الف) جذب سطحی فیزیکی^۴: جذب فیزیکی یا جذب سطحی واندروالس، از طریق ایجاد پیوندهای ضعیف واندروالسی بین مولکول‌های ماده جذب‌شونده و سطح جسم جاذب رخ می‌دهد، بنابراین در اغلب موارد فرآیند قابل برگشت است. در فرآیند جذب سطحی فیزیکی، لایه جدید مولکول‌های جذب‌شده، بر روی لایه‌های جذب‌شده قبلی جذب می‌گردند. به همین علت محققان این نوع از جذب را چندلایه می‌دانند. تجربه نشان داده است که این جذب در دماهای پایین‌تر بهتر انجام می‌شود، زیرا حرارت باعث افزایش انرژی جنبشی و حرکت مولکول‌ها می‌شود. ب) جذب سطحی شیمیایی^۵: هرگاه بین جزء جذب‌شونده با جسم جاذب یک واکنش شیمیایی صورت گیرد، جذب سطحی از نوع شیمیایی خواهد بود. به‌عبارت‌دیگر جذب شیمیایی با تشکیل پیوندهای شیمیایی قوی بین مولکول‌ها یا یون‌های سطح جاذب و ماده جذب‌شونده به دلیل تبادل الکترون رخ می‌دهد. بنابراین جذب شیمیایی به‌طور کلی غیرقابل برگشت

¹ Adsorption

² Adsorbate

³ Adsorbent

⁴ Physisorption

⁵ Chemisorption

⁶ Acid Red 14

⁷ Acid Red 18

⁸ Methylene blue

مقاله

به‌طور کلی این جاذب‌ها توانایی حذف مؤثر بسیاری از آلاینده‌ها مانند ترکیبات فنولی، اسیدهای آلی، مواد رنگزا و فلزات سنگین از محلول‌های آبی را دارا می‌باشند [۳۹]. جاذب‌های پلیمری برای اولین بار در سال ۱۹۶۰ توسعه یافتند. خواص فیزیکی فوق‌العاده این مواد سبب کاربردهای وسیع آن‌ها در فرآیندهای جذب و فیلتراسیون شده است. این جاذب‌ها سطح مخصوص زیاد و استحکام ساختمانی بالایی را ارائه می‌کنند. علاوه بر این، خواص فیزیکی - شیمیایی آن‌ها از قبیل سطح مخصوص و توزیع اندازه حفرات با تغییر شرایط پلیمریزاسیون قابل تنظیم است [۴۰]. به‌منظور بهبود عملکرد جذب توسط جاذب‌های پلیمری باهدف جذب مواد شیمیایی انحلال‌پذیر در آب و همچنین حذف مؤثرتر فلزات سنگین، اصلاح سطح به‌عنوان یک راهکار مؤثر مطرح می‌باشد. اصلاح شیمیایی سطح جاذب‌های پلیمری به‌منظور حذف بسیاری از ترکیبات، مخصوصاً ترکیباتی که به دلیل حل‌شوندگی شدیدشان در آب توسط جاذب‌های پلیمری معمولی قادر به حذف نیستند، یک روش مؤثر به‌منظور افزایش کارایی جاذب‌های پلیمری در حذف آلاینده‌ها محسوب می‌شود. در واقع با عامل دار نمودن سطح جاذب‌های پلیمری، گروه‌های عاملی مانند پلی، ارتباط بین جاذب و ماده جذب‌شونده را سبب می‌شود و از این طریق کارایی جذب افزایش می‌یابد [۴۱].

۴-۳-۱- انواع الیاف

الیاف دسته‌ای از مواد هستند که به‌صورت رشته‌های طولانی بوده و نسبت طول به قطر بسیار بالا از ویژگی‌های اصلی آن‌ها می‌باشد. به‌طور کلی الیاف در سه طبقه الیاف معمولی، میکرونی و نانو الیاف^۷ قرار می‌گیرند. الیاف میکرونی به‌صورت الیافی که در آن‌ها رشته‌ها کمتر از یک دنیبر است تعریف می‌شوند. دنیبر واحد اندازه‌گیری چگالی جرمی الیاف است که به‌صورت جرم در واحد گرم بر ۹۰۰۰ متر تعریف می‌شود. اصطلاح نانو الیاف، به‌طور کلی به الیافی با ضخامت کمتر از یک میکرومتر اطلاق می‌شود، باین‌وجود بنیاد ملی علوم، نانو الیاف را به‌عنوان الیافی با ضخامت ۱۰۰ نانومتر یا کمتر تعریف می‌کند. از پیشرفت‌های اخیر در زمینه حذف فلزات سنگین و مواد رنگزا از محیط‌های آبی، استفاده از الیاف پلیمری به‌عنوان جاذب می‌باشد. الیاف پلیمری، به دلیل نسبت سطح بالا، سینتیک جذب بالا و قیمت ارزان مورد توجه قرار گرفته‌اند [۴۲]. روش‌های مختلفی از قبیل آماده‌سازی با آنزیم‌ها، استفاده از امواج فراصوت، عملیات قلبیایی، عملیات پلاسما و اصلاح شیمیایی به‌وسیله ترکیبات متنوع برای بهبود جذب مواد رنگزا به الیاف نساجی بررسی شده‌اند. فناوری پلاسما، بدون اثر بر ساختار و خواص داخلی الیاف، می‌تواند خواص سطحی آن را تغییر بدهد. این روش در مقایسه با سایر روش‌های متداول در نساجی، کم‌هزینه‌تر، پاک‌تر و سریع‌تر است. با استفاده از این روش می‌توان خاصیت جذب مواد رنگزا توسط الیاف را بهبود بخشید [۴۳]. در یکی از تحقیقات انجام‌شده، الیاف پلیمری پلی(اتیلن تری فتالات)^۸ اصلاح‌شده با متاکریلیک اسید^۱ جذب مؤثر مواد

۴-۲- جاذب‌های کم هزینه برای حذف مواد رنگزا

توسعه جاذب‌های مقرون‌به‌صرفه وابسته به عوامل مختلفی نظیر در دسترس بودن، ارزان بودن و زیست سازگار بودن است. در سال‌های اخیر توجه زیادی به مواد جامد مختلف که قادر به حذف آلاینده‌ها از آب‌های آلوده هستند، معطوف شده است که هزینه این مواد در مقایسه با سایر عوامل ذکر شده مهم‌ترین عامل در انتخاب این جاذب‌ها به شمار می‌رود. به‌طور کلی جاذبی که نیاز به پردازش کمی داشته و به فراوانی در طبیعت یافت شود و یا ضایعات صنایع دیگر باشد که ارزش اقتصادی خود را از دست داده و به‌عنوان مواد زائد آن صنعت شناخته می‌شود؛ تحت عنوان جاذب‌های کم‌هزینه معرفی می‌شوند. جاذب‌های ارزان را می‌توان بر اساس موجود بودن (الف- مواد طبیعی مانند، زغال سنگ نارس، زغال سنگ، چوب، ب- پسماندهای خانگی، کشاورزی، صنعتی و یا محصولات جانبی مانند خاکستر، لجن، گل قرمز، پسماند نیشکر) و ماهیت آنها (آلی و غیرآلی) طبقه‌بندی کرد [۱۱].

در زمینه حذف مواد رنگزا با استفاده از ضایعات کشاورزی و صنعتی تحقیقات بسیاری انجام شده است. در تحقیقی، ماده رنگزای Neutral Red (رنگ کاتیونی) با استفاده از پوست پنبه‌دانه (پسماند زراعی) از محلول‌های آبی حذف شده است [۳۵]. در تحقیقی دیگر، پوست نارگیل در حذف مواد رنگزای نساجی رمازل آر ۱۶۰ آبی^۱، رابی اس ۲ جی^۲، رمازل ۵ آر قرمز^۳، رمازل ۵ آر بنفش^۴، سبز زیتونی ایندنترن^۵ به کاررفته است [۳۶]. کارایی برگ سدر در جذب ماده رنگزای متیلن آبی از محلول‌های آبی مطالعه و نتایج نشان داده که، جذب ماده رنگزا به دلیل وجود گروه‌های کربونیل و کربوکسیل بر روی سطح برگ رخ داده است [۳۷]. در تحقیقی دیگر نیز، رنگ بازیک سافرانین^۶ را با استفاده از هسته زیتون حذف نمودند. همچنین، کارایی لجن فاضلاب در حذف ماده رنگزای متیلن آبی مورد بررسی قرار گرفته است. داده‌های ایزوترم و سینتیک جذب، حذف مؤثر ماده رنگزا توسط لجن فاضلاب شهری را تأیید کرده است [۳۸]. جاذب‌های ارزان بسیاری، مانند ضایعات حاصل از فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی، مواد طبیعی و جاذب‌های زیستی برای حذف مواد رنگزا بکار گرفته شده‌اند. تصفیه پساب با جاذب‌های کم‌هزینه، علاوه بر تصفیه آب به مدیریت مواد زائد نیز کمک شایانی می‌کند که این خود یکی دیگر از مزیت‌های به‌کارگیری این روش به شمار می‌آید [۱۵].

۴-۳- جاذب‌های مبتنی بر مواد پلیمری

در دهه اخیر جاذب‌های پلیمری به دلیل سطح فعال زیاد، استحکام مکانیکی بالا، قابلیت اصلاح شیمیایی سطح، توزیع اندازه حفرات و قابلیت بازیافت به‌عنوان یک جایگزین نویدبخش برای کربن فعال معرفی شده‌اند.

^۱ Blue Remazol R160

^۲ Rubi S2G

^۳ Red Remazol 5R

^۴ Violet Remazol 5R

^۵ Indanthrene Olive Green

^۶ safranine

^۷ nanofiber

^۸ poly(ethylene terephthalate)

میکروسکوپ الکترون روبشی حاصل از نانو الیاف (پلی‌اکریلونیتریل / پلی‌آمیدوآمین)^۵ نشان داده شده است [۴۹].

۴-۳-۲- روش‌های تولید نانو الیاف

برای ساخت نانو الیاف پلیمری زیرمیکرون، شماری از فناوری‌های پردازش همچون الکتروسی^۶، جدایش فازی^۷، تولید از قالب^۸، خودآرایی^۹ و کشش استفاده شده‌اند. در روش کشش، یک میکروپیپت با قطری حدود چند میکرون، توسط یک میکروپازوی مکانیکی به صورت شیب‌دار در نزدیکی خط تماس وارد قطره می‌شود. سپس میکروپیپت از محلول بیرون کشیده می‌شود و محصل این فرآیند تولید نانو الیاف است. روش ساخت قالب به معنی استفاده از یک قالب یا الگو جهت دستیابی به ساختار موردنظر است. قالب متشکل از یک لایه اکسید فلزی است که در میان آن روزهایی در ابعاد نانو ایجاد گشته است. در روش جدایش فازی سازوکار اصلی تولید نانو الیاف، تفکیک و جداسازی فازها به سبب ناسازگاری فیزیکی می‌باشد. خودآرایی نیز به معنی به کار بردن مولکول‌های کوچک‌تر به عنوان واحدهای ساختمانی پایه جهت ساخت الیافی در مقیاس نانو است [۵۰، ۱]. اثربخشی این روش‌ها، با در نظر گرفتن پلیمرهای مناسب و کارآمد، قابلیت تولید الیاف، میزان تولید و هزینه‌های تولید، تعیین می‌شود. در میان این روش‌ها، الکتروسی فرآیندی فوق‌العاده تطبیق‌پذیر است که با استفاده از آن می‌توان از طیف وسیعی از مواد پلیمری، نانو الیاف تولید کرد. کارایی فرآیند الکتروسی، با پیشرفت‌های اخیر با تولید در مقیاس انبوه، توسعه چشمگیری یافته و بدین طریق به میزان تولید بیشتر و کاهش هزینه‌ها منجر شده است [۱]. الکتروسی فرآیند تولید نانو الیاف پلیمری با استفاده از نیروی الکتریکی است. اولین ثبت اختراع از فرآیند الکتروسی، مربوط به سال ۱۹۳۴ است [۵۱].

مواد رنگزا و فلزات سنگین را نشان داده است [۴۲]. در تحقیقی دیگر، الیاف اصلاح یافته پنبه با استفاده از عملیات پلاسما و دندریمر، کارایی مؤثری در جذب مواد رنگزا نشان داده است [۴۴].

در تحقیق دیگری، کارایی الیاف پلی‌اکریلونیتریل اصلاح یافته در حذف فلزات سنگین بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که اصلاح الیاف موجب بهبود جذب فلزات سنگین شده است [۴۵].

در تحقیقی دیگر، کارایی میکرو الیاف و نانو الیاف اصلاح شده پلی‌اکریلونیتریل با استفاده از دی‌اتیلن‌تری‌آمین^۲ در حذف فلزات سنگین از محیط آبی گزارش شده است. نانو الیاف اصلاح شده در مقایسه با میکرو الیاف، به دلیل کاهش در قطر و افزایش مکان‌های فعال جذب، کارایی مؤثری در حذف فلزات سنگین نشان داده است [۴۶]. نتایج مشابهی از کاربرد نانو الیاف اصلاح یافته پلی‌اکریلونیتریل در حذف فلزات سنگین به دست آمده است. نتایج حاکی از کارایی جذب بالای نانو الیاف در مقایسه با میکرو الیاف بوده است [۴۷].

در تحقیق دیگری، نانولیف پلی پروپیلن^۳ اصلاح شده با آکرلیک اسید^۴، به عنوان جاذبی ارزان با ظرفیت جذب بالا، کارایی مؤثری در حذف مواد رنگزای کاتیونی از محیط آبی نشان داده است [۳۹].

تولید نانو الیاف از پلیمرها یکی از مهم‌ترین حیطه‌های نانو فناوری محسوب می‌شود. نانو الیاف دارای قطری حدود هزار بار کمتر نسبت به الیاف میکرو هستند و بدین ترتیب ظرفیت بالای نانو الیاف، سبب می‌شود تا لیف حاصل دارای سطح مخصوص بسیار بالایی باشد. مقیاس نانومتری این مواد خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی مواد در مقیاس میکرو را به طور مؤثری بهبود بخشیده است. با تغییر قطر نانو الیاف پلیمری از مقیاس میکرومتر به نانومتر، خواص جالب‌توجهی از قبیل سطح مخصوص بالا، انعطاف‌پذیری بالا و خواص مکانیکی منحصر به فرد حاصل می‌شود. اصطلاح نانو الیاف، به طور کلی به الیافی با ضخامت کمتر از یک میکرومتر اطلاق می‌شود، با این وجود بنیاد ملی علوم، نانو الیاف را به عنوان الیافی با ضخامت ۱۰۰ نانومتر یا کمتر تعریف می‌کند [۴۸، ۱]. در شکل ۱، تصویر

⁵ Polyacrylonitrile/ polyamidoamine

⁶ Electrospinning

⁷ Phase separation

⁸ Template synthesis

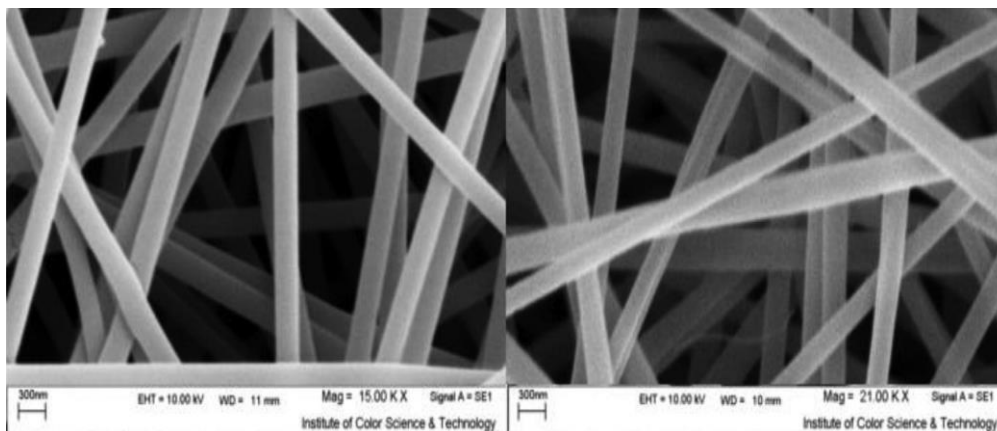
⁹ Self assembly

¹ Methacrylic acid

² Diethylenetriamine

³ Polypropylene

⁴ Acrylic acid



شکل ۱- تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی نانو الیاف پلی‌اکریلونیتریل/پلی‌آمیدوآمین [۴۹].

مقاله

شود. ناپایداری در جت موجب حرکت‌های ضربه‌ای شدید می‌شود که به‌تبع آن جت باریک و طولیل شده، فرصت تبخیر حلال فراهم می‌شود و نهایتاً نانو الیاف به شکل رشته‌های بسیار نازک، بر روی صفحه جمع‌کننده جمع می‌شود [۵۳].

۵- انواع نانوالیاف مورد مصرف در حذف آلاینده از آب

نانو الیاف با مشخصه نسبت سطح به حجم زیاد، به‌عنوان طبقه جدیدی از مواد مفید و سودمند در زمینه‌های مختلف مانند ذخیره انرژی، بهداشت و درمان، مهندسی محیط‌زیست، زیست‌فناوری و فناوری اطلاعات مورد توجه قرار گرفته است [۱]. نانو الیاف حاصل از فرآیند الکتروریسی، خواص قابل توجهی از جمله نسبت سطح به حجم بالا، وجود منافذی در محدوده نانو، وزن پایه و ضخامت کم، اتصال درونی منافذ را ارائه می‌دهد [۴۷]. علاوه بر این، این لایه‌ها به دلیل تخلخل بسیار بالا و منافذ به‌هم‌پیوسته و قابلیت عامل دار نمودن آن‌ها، به‌طور گسترده در تصفیه هوا و مایعات استفاده می‌شوند [۵۴].

۵-۱- نانو الیاف مبتنی بر پلیمر طبیعی کیتوسان

مواد جاذب مختلفی در مطالعات متعدد به‌منظور حذف مواد رنگزا از فاضلاب بررسی شده است. در این میان، زیست پلیمر طبیعی کیتوسان^۴، مورد توجه فراوان قرار گرفته است. کیتوسان از کیتین که یکی از فراوان‌ترین پلی‌ساکاریدهای طبیعی است ساخته می‌شوند. کیتوسان به دلیل ویژگی‌هایی نظیر، غیرسمی بودن، زیست سازگار بودن و قابل تجزیه زیستی، خواص ضدباکتریایی، ماهیت آب‌دوستی، مقرون‌به‌صرفه بودن و جذب سریع به‌عنوان یک ماده سالم شناخته می‌شود که سبب افزایش کاربرد این زیست پلیمر در فرآیند جذب شده است. گروه‌های آمین و هیدروکسیل موجود در کیتوسان می‌توانند به‌عنوان مکان‌های واکنشی مناسب برای جذب گروه‌های مختلفی از آلاینده‌ها عمل کنند [۵۵] و از این حیث توانایی جذب آلاینده را دارا می‌باشد و می‌توان آن را به‌منظور تصفیه هوا و خالص‌سازی آب بکار برد. این ویژگی‌ها به‌واسطه گروه‌های پروتونه NH_2 بر روی ساختمان کیتوسان ناشی می‌شود. اخیراً نانو الیاف بر پایه کیتوسان به‌طور وسیعی بررسی شده‌اند.

باین‌حال، این فرآیند تا اوایل دهه ۱۹۹۰ میلادی مورد توجه قرار نگرفت، تا زمانی که گروه رنکر^۱ [۱] در دانشگاه آکرون^۲، اظهار کردند که الیاف زیرمیکرون را می‌توان از طیف وسیعی از مواد پلیمری، با استفاده از فرآیند الکتروریسی به دست آورد. در دو دهه گذشته، پلیمرهای طبیعی و مصنوعی مختلف به نانو الیاف فوق‌العاده ظریف، با ضخامت کمتر از چند نانومتر رسیده شده‌اند. علاوه بر این، سطح نانو الیاف را می‌توان با استفاده از مولکول‌های زیست فعال، داروها، نیمه‌هادی‌ها، نانو ذرات کاتالیزور اصلاح نمود و برای اهداف ترجیحی بکاربرد. فرآیند الکتروریسی به‌واسطه قابلیت رسیدن محدوده گسترده‌تری از الیاف از جنس‌های مختلف شامل پلیمر، سرامیک و فلز امکان تولید الیاف با ساختار مناسب و ویژگی‌های جالب توجه را فراهم می‌کند. استفاده از پلیمرها به دلیل حوزه کاربردی وسیع‌تر، متداول‌تر است. بدون شک، کاربرد نانو الیاف پلیمری، در حوزه سلامتی، انرژی و زیست‌محیطی با استقبال فراوانی مواجه خواهد شد [۱].

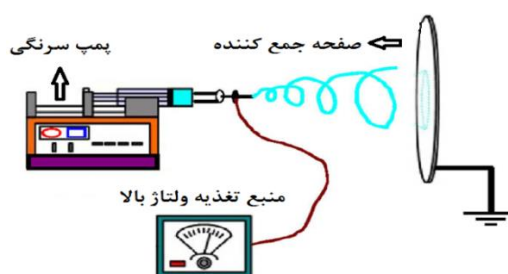
الکتروریسی را می‌توان در یک دسته‌بندی کلی به دو شیوه الکتروریسی محلول و مذاب تقسیم نمود. الکتروریسی محلول، خود به دو طریق الکتروریسی محلول با نازل و بدون نازل دسته‌بندی می‌شود. فرآیند الکتروریسی محلول، شامل خروج محلول پلیمری از نازل به سمت جمع‌کننده و خروج حلال در این مسیر است [۵۱]. دستگاه الکتروریسی شامل منبع تغذیه با ولتاژ بالا، پمپ تزریق و صفحه جمع‌کننده که در فاصله مشخصی از نازل تعبیه می‌شود، می‌باشد. در شکل ۲، طرح شمایی از فرآیند الکتروریسی نشان داده شده است [۵۲]. در این فرآیند محلول پلیمری به‌وسیله پمپ سرنگی به نازل منتقل می‌شود و محلول به‌واسطه کشش سطحی خود در انتهای نازل نگاهداشته می‌شود. با اعمال ولتاژ با قطبیت مخالف به نازل و صفحه جمع‌کننده، میدان الکتریکی بین نازل و صفحه جمع‌کننده شکل می‌گیرد. با افزایش میدان الکتریکی و غلبه بر کشش سطحی محلول پلیمری، قطره‌ای در نوک نازل تشکیل می‌شود، بارهای هم نام بر روی سطح قطره تجمع کرده و با دفع یکدیگر قطره کشیده شده و به شکل مخروطی موسوم به مخروط تیلور^۳ تبدیل می‌شود. میدان الکترواستاتیک قوی شکل گرفته در فضای بین صفحه جمع‌کننده و نازل باعث می‌شود تا یک جریان پیوسته و شتاب‌دار از محلول موسوم به جت، از مخروط تیلور خارج شده و به سمت صفحه جمع‌کننده پرتاب

⁴ Chitosan

¹ Reneker

² Akron

³ Taylor cone

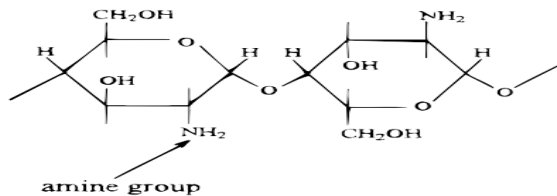


شکل ۲- طرح شماتیک از فرآیند الکتروریسی [۵۲].

است. تحت شرایط بهینه درصد جذب به ترتیب برای مواد رنگزای سولوفنیل بی ال قرمز و پلار یلو جی ان، ۹۶ و ۹۵ درصد به دست آمده است [۵۷]. در تحقیقی دیگر، نانو الیاف کیتوسان پیوند زده شده با بتا-سیکلودکسترین^۸ به همراه پلی وینیل الکل با استفاده از روش الکتروریسی آماده و کارایی آن در حذف ماده رنگزا بررسی شده است. نانو الیاف حاصل، کارایی مؤثری در حذف مولکول‌های آلی نشان داده است [۵۸] (جدول ۲).

۵-۲- پلی‌اکریلونیتریل

پلی‌اکریلونیتریل (PAN^۹)، پلیمری رایج و ارزان است که به راحتی به نانو الیاف رسیده می‌شود. PAN به دلیل دارا بودن پیوندهای هیدروژنی در ساختار مولکولی خود، از استحکام مکانیکی بالایی برخوردار است [۶۲]. همچنین دارای مقاومت شیمیایی بالا، مقاوم در برابر نور خورشید و حساسیت کم نسبت به رطوبت است. در نتیجه، طی ۱۰ سال گذشته توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده و به طور گسترده‌ای در تهیه غشاهای اولترافیلتراسیون، میکروفیلتراسیون، و الیاف توخالی بکار گرفته شده است [۶۳].



شکل ۳- ساختار شیمیایی کیتوسان [۴۹].

تولیدات نانو الیاف کیتوسان به وسیله روش الکتروریسی قابلیت کاربرد در حوزه‌های مختلف را دارند [۴]. شکل ۳، تصویری از ساختار کیتوسان را نشان می‌دهد [۵۶]. در یکی از تحقیقات انجام شده، نانو الیاف کیتوسان-پلی(وینیل الکل) با روش الکتروریسی تهیه و قابلیت این نانو جاذب در حذف مواد رنگزا بررسی شده است. مواد رنگزای قرمز مستقیم ۸۰، قرمز مستقیم ۸۱ و قرمز راکتیو ۱۸۰ به عنوان مواد رنگزای مدل استفاده و تأثیر عواملی همچون؛ pH، زمان تماس، مقدار جاذب و غلظت اولیه ماده رنگزا بررسی شده است. نتایج مطالعه نشان داده است که با کاهش pH ظرفیت جذب افزایش می‌یابد. به طوری که بیشترین جذب ماده رنگزا در pH= ۲/۱ رخ داده است. در این pH، یک جذب الکترواستاتیک قوی بین بارهای مثبت ترکیب نانو الیاف با توجه به یونیزاسیون گروه‌های واکنشی و مولکول‌های ماده رنگزای آنیونی اتفاق می‌افتد. همچنین تعداد مکان‌های بار مثبت در جاذب در pH های بالا کاهش پیدا می‌کند. درصد جذب با افزایش مقدار جاذب تا حد معینی افزایش می‌یابد و سپس به یک مقدار ثابت می‌رسد. افزایش در مقدار جاذب را می‌توان از طریق افزایش سطح جاذب و افزایش محل‌های جذب توصیف نمود. با افزایش مقدار نانو الیاف، شمار مولکول‌های جاذب توزیع شده در لیف نانو الیاف افزایش می‌یابد، بنابراین تعداد مکان‌های واکنشی NH₂ در سطح نانو الیاف افزایش می‌یابد و سبب بهبود در جذب ماده رنگزا می‌شود [۴].

در تحقیق دیگری، حذف مواد رنگزای سولوفنیل بی ال قرمز^۵ و پلار یلو جی ان^۶ با استفاده از فیلتر غشایی نانو الیاف کیتوسان/پلی‌آمید-۶ گزارش شده

- 1 Poly(vinyl alcohol)
- 2 Direct Red 80
- 3 Direct Red 81
- 4 Reactive Red 180
- 5 Solophenyl Red 3BL
- 6 Polar Yellow GN
- 7 Polyamide-6

- 8 β-cyclodextrin
- 9 Polyacrylonitrile

جدول ۲- کاربرد کیتوسان در حذف مواد رنگزا.

مرجع	درصد جذب (%)	کارایی جذب (میلی‌گرم/گرم)	ماده جذب‌شونده	ساختار	جاذب
[۵۹]	-	۴۳	قرمز مستقیم ۲۳	پودر	کیتوسان
[۶۰]	-	۳۴	سبز اسیدی ۲۵	کامپوزیت	کیتوسان/اکسید گرافیت
[۴]	-	۱۵۱	راکتیو سیاه ۵	نانو الیاف	کیتوسان-پلی وینیل الکل
[۶۱]	۹۶/۹۸	۹۵	قرمز مستقیم ۸۰	نانو الیاف	کیتوسان
	۹۷/۶۰	۱۱۴	قرمز مستقیم ۸۱	نانو الیاف	کیتوسان
	۹۸/۶۷	-	قرمز راکتیو ۱۸۰	نانو الیاف	کیتوسان-پلی پروپیلن‌ایمین
	۹۹/۷۷	-	راکتیو سیاه ۵	نانو الیاف	کیتوسان
[۵۷]	۹۶/۳۳	-	راکتیو قرمز ۱۹۸	نانو الیاف	کیتوسان-پلی آمید ۶
	۹/۸۲	-	سولوفنیل قرمز ۳ بی ال	نانو الیاف	کیتوسان-پلی آمید ۶
			پلار یلو جی ان	نانو الیاف	کیتوسان-پلی آمید ۶

¹⁰ Acid Green 25

¹¹ Reactive red 198

مقاله

در این راستا، قابلیت نانو الیاف پلی‌اکریلونیتریل-پلی‌آمیدوآمین^۶ را در حذف مواد رنگزای قرمز مستقیم ۲۳ و ۸۰ تحقیق شده است. نتایج نشان داده است که فرآیند جذب در ۵ دقیقه اول سریع است و سپس سرعت آن کاهش می‌یابد و به تعادل می‌رسد. سرعت بالای جذب در دقایق اولیه را می‌توان با حضور فراوان مکان‌های جذب در سطح جاذب که هنوز به‌طور کامل اشغال نشده‌اند توجیه نمود. کاهش در مقدار جذب به دلیل اشباع شدن مکان‌های جذب و تجمع مولکول‌های ماده رنگزا در سطح جاذب است. درصد جذب ماده رنگزا با افزایش مقدار جاذب تا یک مقدار معین افزایش می‌یابد و سپس به یک مقدار ثابت می‌رسد. افزایش جذب ماده رنگزا در نتیجه افزایش مقدار جاذب را می‌توان با افزایش حضور مکان‌های جذب در سطح جاذب توصیف نمود. با کاهش pH ظرفیت جذب افزایش پیدا می‌کند. بیشترین جذب مواد رنگزای قرمز مستقیم ۲۳ و ۸۰ در pH=۲/۱ رخ می‌دهد. در این pH یک جاذبه الکترواستاتیک قوی بین بار مثبت ترکیبات با توجه به تجزیه یونی گروه‌های واکنشی و مولکول‌های ماده رنگزا رخ می‌دهد. تعداد محل‌های بار مثبت در ترکیبات با افزایش pH کاهش پیدا می‌کند [۴۹].

در تحقیق دیگری، ترکیب نانو الیاف پلی‌اکریلونیتریل-پلی‌آمیدوآمین با استفاده از روش الکترورسی آماده و قابلیت آن را در جذب ماده رنگزا متیل نارنجی^۷ بررسی شده است. بر اساس نتایج این تحقیق، نانو الیاف پلی‌اکریلونیتریل خالص جذب ماده رنگزا بسیار پایینی را نشان داده است. درحالی‌که ترکیب نانو الیاف پلی‌اکریلونیتریل- پلی‌آمیدوآمین جذب مؤثر ماده رنگزا را نشان داده است، که این موضوع باید به برهمکنش قوی بین مولکول‌های ماده رنگزا و پلی‌آمیدوآمین و همچنین ساختار کروی و درختان پلی‌آمیدوآمین مربوط باشد. علاوه بر این، فضای داخلی کروی پلی‌آمیدوآمین می‌تواند نقاط جذب اضافی را فراهم کند [۷۰] (جدول ۳).

علاوه بر این زنجیره‌های مولکولی PAN دارای یک گروه سیانو هستند که می‌تواند به کمک عوامل شیمیایی مختلف اصلاح شود. از جمله ویژگی‌های منحصر به فرد آن می‌توان به ظرفیت جذب بالا، سرعت جذب سریع و عملکرد پویای خوب اشاره کرد. این مواد به‌منظور تصفیه پساب‌های حاوی مواد رنگزا و فلزات سنگین بسیار مناسب هستند [۵۴]. تلاش زیادی جهت اصلاح سطح PAN در شکل‌های مختلف نانو ذرات، غشا و نانو الیاف صورت می‌گیرد. در این زمینه ترکیبات آمینی، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۶۴].

در یکی از تحقیقات انجام شده، نانو الیاف PAN با استفاده از روش الکترورسی آماده و سپس سطح نانو الیاف تولید شده با استفاده از سه منبع مختلف از ترکیبات آمینی از جمله دی اتیل آمین^۱، دی اتیلن تری آمین^۲ و تری‌اتیلن‌تترامین^۳ اصلاح و قابلیت حذف مواد رنگزای قرمز مستقیم ۲۳^۴ و قرمز مستقیم ۸۰ بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که واکنش‌های شیمیایی بین گروه‌های نیتریل نانو الیاف PAN و گروه‌های آمین موجود در دی اتیل آمین، دی‌اتیلن‌تری‌آمین و تری‌اتیلن‌تترامین بر روی خصوصیات شیمیایی نانو الیاف حاصل تأثیر گذار است [۶۵].

دندریمرها^۵ نانو ساختارهای منظم و متقارن هستند که از تکرار واحدهای منومری بر روی یک هسته مرکزی تشکیل می‌شوند و دارای ساختار مشخصی هستند که شامل یک هسته مرکزی، شاخه‌های اتصال‌دهنده درونی و گروه‌های انتهایی می‌باشند [۶۶، ۶۷]. از ویژگی‌های منحصر به فرد ساختارهای دندریمری می‌توان به ساختار منظم و پرشاخه، دارا بودن تعداد زیاد گروه‌های فعال انتهایی، حفره‌های داخلی و فضاهای خالی که قابلیت پذیرش و کپسوله کردن مولکول‌های مهمان را فراهم می‌کنند، اشاره کرد [۶۸، ۶۹].

¹ Diethylamine

² Diethylenetriamine

³ Triethylenetetramine

⁴ Direct red 23

⁵ Dendrimer

⁶ Polyamidoamine (PAMAM)

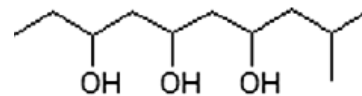
⁷ Methyl Orange

جدول ۳- کاربرد پلی (اکریلونیتریل) در حذف مواد رنگزا.

مرجع	کارایی جذب (میلی‌گرم/گرم)	ماده جذب‌شونده	ساختار	جاذب
[۶۵]	۲۷۷/۷۷	قرمز مستقیم ۸۰	نانو الیاف	نانو الیاف پلی‌اکریلونیتریل/دی‌اتیل‌آمین
	۱۶۳/۹۳	قرمز مستقیم ۲۳		نانو الیاف پلی‌اکریلونیتریل/دی‌اتیلن‌تری‌آمین
	۲۵۰۰	قرمز مستقیم ۸۰		نانو الیاف پلی‌اکریلونیتریل/دی‌اتیلن‌تترامین
	۱۲۵۰	قرمز مستقیم ۲۳		
	۵۰۰۰	قرمز مستقیم ۸۰		
[۷۱]	۹۹/۱۵	متیل نارنجی	نانو الیاف	پلی‌اکریلونیتریل/اتیلن‌دی‌آمین تترا
	۱۱۰	قرمز راکتیو		استیک‌اسید/اتیلن‌دی‌آمین
[۴۹]	۱۶۶۶/۶۶	قرمز مستقیم ۸۰	نانو الیاف	پلی‌اکریلونیتریل-پلی‌آمیدوآمین
	۲۰۰۰	قرمز مستقیم ۲۳		
[۷۰]	۱۲۰/۷۷	متیل نارنجی	نانو الیاف	پلی‌اکریلونیتریل-پلی‌آمیدوآمین

۵-۳- پلی وینیل الکل

پلی وینیل الکل (PVA) یک ترکیب پلیمری زیست‌سازگار، غیرسمی و زیست تخریب پذیر است که به طور گسترده در حوزه‌های زیست‌شیمیایی و زیست پزشکی استفاده می‌شود. از حدود سال ۱۹۵۰ میلادی به صورت تجاری وارد بازار و در صنعت نساجی به عنوان جایگزین نخ ابریشم بکار گرفته شد. پلی وینیل الکل یک نوع منحصر به فرد از الیاف است که به راحتی به شکل الیاف ریسیده می‌شود و به شدت آب دوست است. شکل ۴، تصویری از ساختار پلی (وینیل الکل) را نشان می‌دهد [۴، ۷۲، ۷۳]. در تحقیقی، به منظور حذف مواد رنگزا آبیونی از محلول‌های آبی نانو الیاف پلی (وینیل الکل) / تری اتیلن اتر آمین را تهیه و با استفاده از گلو تار آلدهید^۱ اتصال عرضی نمودند. قابلیت نانو الیاف اصلاح شده در حذف مواد رنگزا قرمز مستقیم ۸۰، قرمز مستقیم ۸۱، قرمز راکتیو ۱۸۰ از فاضلاب‌های حاوی مواد رنگزا مورد بررسی قرار گرفته است. مشخص شده است، با کاهش pH قابلیت جذب افزایش پیدا می‌کند. به طوری که در pH برابر با ۲/۱ بیشترین بازده جذب ماده رنگزا به دست آمده است [۷۳]. در تحقیق دیگری، نانو الیاف پلی وینیل الکل را به وسیله دی اتیلن تری آمین^۲ و اتیلن دی آمین^۳ در حضور گلو تار آلدهید اصلاح، سپس قابلیت نانو الیاف اصلاح شده را به عنوان یک نانو جاذب در حذف مواد رنگزا قرمز مستقیم ۲۳ و آبی مستقیم ۷۸ مورد بررسی قرار دادند. بدین صورت که نانو الیاف پلی وینیل الکل / گلو تار آلدهید و نانو الیاف پلی وینیل الکل / دی اتیلن تری آمین / اتیلن دی آمین / گلو تار آلدهید تهیه و قابلیت حذف مواد رنگزا آن بررسی و با یکدیگر مقایسه شده است. بر اساس نتایج حاصل از شکل ۵، نانو الیاف پلی وینیل الکل / دی اتیلن تری آمین / اتیلن دی آمین / گلو تار آلدهید در مقایسه با نانو الیاف پلی وینیل الکل / گلو تار آلدهید کارایی بالاتری در جذب ماده رنگزا نشان داده است.



شکل ۴- ساختار شیمیایی پلی (وینیل الکل) [۷۳].

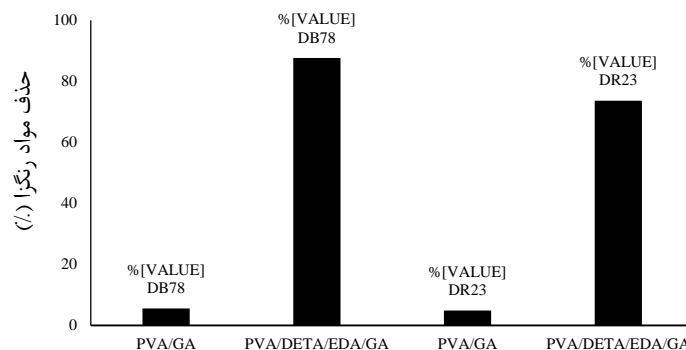
بیشترین ظرفیت جذب مواد رنگزا توسط نانو الیاف اصلاح یافته برای مواد رنگزای قرمز مستقیم ۲۳ و آبی مستقیم ۷۸ به ترتیب ۳۷۰ و ۴۰۰ میلی گرم بر گرم به دست آمده است [۶۷].

در تحقیق دیگری، غشا پلی (وینیل الکل) / پلی (اکریلیک اسید)^۵ پوشش داده شده با پلی دوپامین^۶ بر اساس ترکیبی از الکتروسی و خود-پلیمریزاسیون^۷ دوپامین تهیه شده است. با توجه به ساختار متخلخل و خاصیت چسبندگی حاصل از لایه پلی دوپامین، غشا حاصل توانست بیش از ۹۳ درصد از متیلن آبی را از محلول در مدت ۳۰ دقیقه جذب کند، که نشان دهنده قابلیت آن در جذب مؤثر ماده رنگزا است. برخورداری از سطح مخصوص بسیار بالای غشاهای ریسیده شده و گروه‌های واکنشی پلی دوپامین، عملکرد جذب عالی را نسبت به آبی متیلن تا رسیدن به بیشینه ظرفیت جذب ۱۱۴۷/۶ میلی گرم بر گرم نشان داده است. همچنین کاربرد عمومی آن در حذف مواد رنگزا مختلف قابل توجه است. بنابراین انتظار می‌رود غشا پلی (وینیل الکل) / پلی (اکریلیک اسید) - پلی دوپامین جاذب امیدبخشی برای تصفیه فاضلاب‌های حاوی ماده رنگزا باشد [۷۴] (جدول ۴).

۵-۴- پلی آنیلین

به تازگی برخی از محققان تحقیقات خود را بر کاربرد پلی آنیلین^۸ و ترکیبات آن در زمینه پالایش‌های زیست محیطی معطوف نموده‌اند. این خاصیت به گروه‌های الکترون دهنده (آمین و گروه‌های آمین ثانویه) در پلیمر پلی آنیلین نسبت داده می‌شود [۵۵]. پلی آنیلین، به طور گسترده برای حذف فلزات سنگین، مواد رنگزا و رنگدانه‌ها از محلول‌های آبی مورد استفاده قرار گرفته است. پلی آنیلین، یکی از جاذب‌های کم هزینه با ظرفیت جذب بسیار بالا و انتخابی نسبت به فلزات سنگین و مواد رنگزا می‌باشد [۷۵]. با وجود مزایای بالا، استفاده از پودر پلی آنیلین مانند پودر کربن فعال نیاز به فرآیند جداسازی ثانویه دارد.

- 1 Glutaraldehyde
- 2 Diethylenetriamine
- 3 Ethylenediamine
- 4 Direct Blue 78

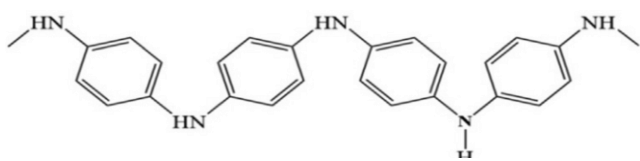


شکل ۵- نمودار مقایسه درصد حذف مواد رنگزا توسط نانو الیاف PVA/GA و PVA/DETA/EDA/GA [۶۷].

- 5 Poly(acrylic acid)
- 6 Polydopamine
- 7 Self-polymerization
- 8 polyaniline

جدول ۴- کاربرد پلی (وینیل الکل) در حذف مواد رنگزا.

مرجع	درصد جذب (%)	کارایی جذب (میلی گرم/گرم)	ماده جذب شونده	ساختار	جاذب
[۷۳]	-	۱۱۸ ۱۷۷ ۱۸۱	قرمز مستقیم ۸۰ قرمز مستقیم ۸۱ قرمز راکتیو ۱۸۰	نانو الیاف	پلی وینیل الکل/ تری اتیلن اتر آمین/ گلو تارالدئید
[۷۴]	۹۳	۱۱۴۷/۶	متیلن آبی	نانو الیاف	پلی (وینیل الکل) / پلی (اکریلیک اسید) / پلی دوپامین
[۶۷]	۷۳/۶۷ ۸۷/۶۷ ۴/۸۴ ۵/۵۶	۳۷۰ ۴۰۰	قرمز مستقیم ۲۳ آبی مستقیم ۷۸ قرمز مستقیم ۲۳ آبی مستقیم ۷۸	نانو الیاف	پلی وینیل الکل/ دی اتیلن تری آمین/ اتیلن دی آمین/ گلو تارالدئید نانو الیاف پلی وینیل الکل/ گلو تارالدئید



شکل ۶- ساختار شیمیایی پلی آنیلین [۷۶].

مشاهده شده است که با افزایش دما ظرفیت جذب افزایش یافته، به طوری که در دمای ۰، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی گراد به ترتیب ظرفیت جذب ۴۸/۸، ۵۸/۷ و ۸۱/۹ میلی گرم بر گرم به دست آمده است. بازده جذب بالا و قابلیت بازیابی جاذب، سبب شده تا این لیف کامپوزیتی به عنوان جاذب مؤثری در حذف مواد رنگزای آبی از پساب بکار گرفته شود. علاوه بر این می توان آن را در ساخت سایر جاذب های مبتنی بر پلیمر بکاربرد [۱۸].

در تحقیق دیگری، کارایی کامپوزیت پلیمر/زیست پلیمر (پلی آنیلین /کتوسان) سازگار با محیط زیست به منظور حذف مواد رنگزای قرمز کنگو^۲، کوماسی بریلینت آبی^۳، رمازل بریلینت آبی^۴ و متیلن آبی از محلول های محلول های آبی بررسی شده است. آزمایش ها، به صورت تابعی از زمان تماس، غلظت اولیه محلول رنگی (۱۰۰ میلی گرم بر لیتر)، pH برابر با ۳، و مقدار جاذب ۰/۱ گرم انجام شد و بیشینه درصد جذب ۹۵/۴ درصد برای ماده رنگزا قرمز کنگو، ۹۸/۲ درصد برای ماده رنگزا کوماسی بریلینت آبی، و ۹۹/۸ درصد برای ماده رنگزا رمازل بریلینت آبی آر، به دست آمده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که بستر پلیمری را می توان به عنوان جاذبی مؤثر در حذف مواد رنگزای دارای گروه اسید سولفونیک^۵ به کار برد [۵۵].

در یکی از تحقیقات انجام شده، نانو الیاف پلی آنیلین با ضخامت ۵۰ تا ۸۰ نانومتر با استفاده از کلرید آهن تهیه و جذب ماده رنگزا آزویی راکتیو سیاه^۶ از محلول های آبی بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان

روش های مختلفی به منظور رفع این مشکلات به عنوان مثال استفاده از پلی آنیلین به شکل کامپوزیت و یا آماده سازی مشتقات پلی آنیلین مورد توجه قرار گرفته است. به دلیل ویژگی های مکانیکی، حرارتی و شیمیایی خوب و همچنین هم بستگی بسیار زیاد پلی آنیلین و نایلون-۶ به دلیل تشکیل پیوند هیدروژنی بین گروه های آمین و گروه های فعال ایمین به ترتیب در بین این پلیمرها، نایلون-۶ به طور موفقیت آمیزی به عنوان بستری برای پلی آنیلین بکار گرفته می شود. شکل ۶، ساختار شیمیایی پلی آنیلین را نشان می دهد [۷۶].

در تحقیقی، نانو الیاف نایلون-۶ پوشش داده شده با پلی آنیلین، به عنوان جاذبی مؤثر برای حذف مواد رنگزا به کار گرفته شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که نانو کامپوزیت نایلون-۶/پلی آنیلین به طور موفقیت آمیزی جذب بیش از ۳۷۰ میلی گرم بر گرم از ماده رنگزا متیل نارنجی را به عنوان یکی از مواد رنگزای آنیونی، سبب شده است. نانو الیاف نایلون به صورت زیر لایه ای با سطح مخصوص زیاد، پیوستگی بالایی با زنجیرهای پلی آنیلین فراهم می کند، که به اتصال پلی آنیلین بر روی نانو الیاف نایلون منجر می شود.

نانو الیاف نایلون به صورت زیر لایه ای با سطح مخصوص زیاد، پیوستگی بالایی با زنجیرهای پلی آنیلین فراهم می کند، که به اتصال پلی آنیلین بر روی نانو الیاف نایلون منجر می شود. نانو کامپوزیت نایلون-۶/پلی آنیلین در شرایط بسیار اسیدی pH=۱ نقش برجسته ای برای رسیدن به جاذبی با کارایی بسیار بالا در حذف ماده رنگزا دارد. بازیابی نانو کامپوزیت نایلون-۶/پلی آنیلین پس از جذب ماده رنگزا تنها با کاهش ۱۰ درصد در بازده جذب ماده رنگزا، قابل استفاده بودن جاذب معرفی شده را ثابت کرد [۷۶].

در تحقیق دیگری، لیف کامپوزیتی هسته-پوسته نایلون-۶/پلی آنیلین را از طریق پلیمریزاسیون اکسیداتیو درجا^۱ تهیه و کارایی آن در حذف ماده رنگزای متیل نارنجی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

² Congo Red

³ Coomassie Brilliant Blue

⁴ Remazol Brilliant Blue R

⁵ Sulfonated

⁶ Reactive Black 5

¹ In situ oxidation polymerization

در طول زنجیره اصلی خود می‌باشد [۸۳] و به‌عنوان یکی از مهم‌ترین الیاف‌های مصنوعی، کاربرد فراوانی در حوزه‌های مختلف پیدا کرده است [۸۴]. ویژگی‌هایی نظیر کارایی مکانیکی خوب، مقاومت بالا در برابر حرارت، سایش و عوامل شیمیایی، سبب کاربرد گسترده این پلیمر در حوزه‌های مختلف هوافضا، کشتی‌سازی، خودروسازی، نساجی، پزشکی، الکترونیک و غیره شده است. نایلون-۶ در صورتی که در حلال بسیار قطبی مانند اسیدفرمیک حل شود، می‌تواند به‌صورت نانو الیاف ریسیده شود [۸۵]. اولین گزارش از الکتروریسی نایلون-۶ مربوط به سال ۱۹۹۹ است [۸۶]. از آن پس مطالعات فراوانی مبنی بر الکتروریسی نایلون-۶ و کامپوزیت‌های آن و بررسی ویژگی‌های مختلف نانو الیاف نایلون-۶ صورت گرفته است. ساختار شیمیایی نایلون-۶ در شکل ۷ نشان داده شده است [۷۶].

در یکی از تحقیقات انجام شده، برای اولین بار کارایی نانو الیاف بسیار کارآمد و اقتصادی نایلون-۶ خالص، برای حذف سریع و انتخابی مواد رنگزای آنیونی آبی اسیدی^۱، ۱۱۷^۱، بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که نانو الیاف نایلون-۶ عملکرد بسیار بالایی در حذف ماده رنگزای آبی اسیدی دارد. درحالی‌که، گرانول نایلون-۶، به دلیل وجود پیوندهای هیدروژنی در بین زنجیره‌های پلیمری، بسیار متراکم هستند، و بسیاری از مکان‌های جذب به‌صورت پنهان باقی می‌ماند. در نتیجه کارایی ضعیفی در حذف ماده رنگزای نشان داد. نایلون-۶ در فرم نانو الیاف خود، به علت دارا بودن تعداد بسیاری از مکان‌های جذب و افزایش نسبت سطح به حجم، کارایی مؤثری در جذب ماده رنگزای نشان داده است [۸۷].

در تحقیق دیگری، کارایی نانو الیاف کیتوسان/ پلی آمید در حذف ماده رنگزای از محلول‌های آبی مطالعه شده است. نانو الیاف حاصل یک نانو جاذب سازگار با محیط زیست بوده که علاوه بر کمک به مدیریت مواد زائد جامد (کیتوسان به‌دست آمده از ضایعات میگو)، در پالایش پساب‌های رنگی بکار گرفته شد. نتایج این تحقیق نشان داده است که جذب مواد رنگزای راکتیو سیاه ۵ و پونسو ۴^۲ بر روی نانو الیاف در pH=۱ مطلوب بوده است. با کاهش pH از ۱۰ به ۱، ظرفیت جذب مواد رنگزای راکتیو سیاه از ۵ تا ۱۱۰ میلی‌گرم بر گرم و پونسو ۴ آر، از ۲۰ تا ۱۶۰ میلی‌گرم بر گرم افزایش یافته است. این وابستگی شدید به pH را می‌توان به گروه‌های NH₂ کیتوسان و NH⁺ پروتونه می‌شوند. این گروه‌های پروتونه شده باعث یک اثر مطلوب برای جذب می‌شوند. به‌عنوان مثال، دافعه بین گروه‌های باردار مثبت زنجیره‌های پلیمری، انتقال مایع رنگی به درون نانو الیاف و جذب مولکول‌های رنگی با بار منفی را تسهیل می‌کند. بیشترین ظرفیت جذب ۴۵۶/۹ میلی‌گرم بر گرم برای مواد رنگزای راکتیو سیاه ۵ و ۵۰۲/۴ میلی‌گرم بر گرم برای ماده رنگزای پونسو ۴ آر، گزارش شده است. نانو الیاف تولید شده می‌تواند به‌عنوانی جذبی مؤثر و با کارایی بالا برای حذف مواد رنگزای آنیونی از حوزه‌های آبی استفاده شود [۸۸] (جدول ۶).

داده است که pH محلول بر روی شیمی محلول، بار سطحی جاذب و درجه یونیزاسیون مواد موجود در محلول تأثیرگذار است. بیشینه بازده جذب راکتیو سیاه ۵، در pH=۶ در دماهای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۳۱۲/۵، ۳۸۹/۱ و ۴۳۴/۷ میلی‌گرم بر گرم به‌دست آمده است. تأثیر مقدار جاذب در حذف ماده رنگزای در محدوده ۰/۰۱-۱ گرم در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بررسی شد. مشاهده شد که با افزایش مقدار جاذب بازده جذب افزایش می‌یابد. این موضوع به دلیل افزایش سطح مخصوص نانو الیاف پلی‌آنیلین و افزایش مکان‌های جذب قابل دسترس بیشتر، در نتیجه افزایش مقدار نانو الیاف پلی‌آنیلین ناشی می‌شود [۷۷].

نانو مواد مبتنی بر پلیمرهای هادی به‌منظور حذف آلاینده‌های آلی و غیرآلی از آب بسیار امیدبخش هستند. پلیمرهای هادی مانند پلی‌پیرول و پلی‌آنیلین علاوه بر کاربرد گسترده در الکترودهای باتری سبک‌وزن، حسگرها و دستگاه‌های محافظ مغناطیسی، همچنین در برنامه‌های زیست‌محیطی نیز توجه بسیاری را به خود جلب نموده‌اند [۷۸]. ویژگی‌های ذاتی، عدم سمیت، پایداری زیست‌محیطی خوب و وجود اتم‌های نیتروژن مثبت بر روی ساختمان پلیمری آن‌ها، چشم‌انداز کاربرد امیدوارکننده این پلیمرها را در جذب آلاینده‌ها از آب فراهم نموده است [۷۹]. با این وجود، به دلیل پراکندگی ضعیف آن‌ها در آب و تمایل به تجمع در ریخت‌های نامنظم، که گاهی اوقات سطح مخصوص آن‌ها را کاهش می‌دهد، پژوهشگران متعددی بر روی ساخت نانو ساختارهای پلی‌پیرول و پلی‌آنیلین و یا نانو کامپوزیت‌های مبتنی بر پلی‌پیرول/پلی‌آنیلین با سطح مخصوص بسیار به‌منظور حذف مؤثر آلاینده‌ها از آب متمرکز شده‌اند [۸۰]. بدین منظور در تحقیقی، بائومیک و همکارانش حذف مواد رنگزای قرمز کنگو را بر روی نانو الیاف پلی‌پیرول/پلی‌آنیلین مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داده است که فرآیند جذب به‌شدت به pH محلول وابسته است، به‌طوری‌که بیشترین جذب ماده رنگزای در pH برابر با ۴ مشاهده شده است. در این pH کارایی جذب ۹۸ درصد برای نانو الیاف پلی‌پیرول/پلی‌آنیلین حاصل شده است، درحالی‌که نانو الیاف پلی‌پیرول و پلی‌آنیلین به ترتیب کارایی جذب ۸۵/۱۴ و ۸۰/۴۵ درصد را نشان دادند [۸۱].

در تحقیقی، نانو الیاف پلی‌پیرول، به‌عنوان یک جاذب برای جذب یک نوع ماده رنگزای آنیونی متیل اورانژ بکار گرفته شده است. همچنین اثر عواملی همچون زمان تماس، غلظت اولیه ماده رنگزای، دما و pH اولیه محلول در جذب ماده رنگزای بر روی نانو الیاف پلی‌پیرول مطالعه شده است. بر اساس نتایج این تحقیق، نانو الیاف تهیه شده ظرفیت جذب بالایی در حذف ماده رنگزای متیل نارنجی نشان داده است. میزان جذب ماده رنگزای متیل نارنجی بر روی جاذب با افزایش دما، به علت حرکت و واکنش بیشتر مولکول‌های ماده رنگزای با مکان‌های فعال جذب، افزایش یافته است. با افزایش pH محلول از ۲ به ۷ میزان جذب ماده رنگزای از ۱۳۰/۱۱ به ۱۴۷/۲۴ میلی‌گرم بر گرم افزایش یافته، درحالی‌که با افزایش pH در مقادیر بیشتر از ۱۰ کارایی جذب روند کاهش داشته است [۸۲] (جدول ۵).

۵-۵- نایلون-۶

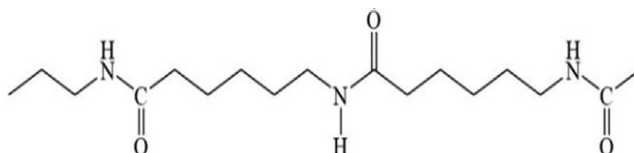
نایلون-۶ یک پلیمر نیمه‌بلوری است که حاوی گروه‌های تکرارشونده آمیدی

¹ Acid Blue 117

² Ponceau 4R

جدول ۵- کاربرد پلی آنیلین در حذف مواد رنگزا.

مرجع	درصد جذب (%)	کارایی جذب (میلی گرم/گرم)	ماده جذب شونده	ساختار	جاذب
[۱۸]	-	۸۱/۹۰	متیل نارنجی	الیاف کامپوزیتی هسته-پوسته	پلی آنیلین/پلی آمید ۶
[۵۵]	۹۵/۴	۲۸۸	قرمز کنگو	کامپوزیتی	پلی آنیلین/کیتوسان
	۹۸/۲	۲۹۵	کوماسی بریلینت آبی		
	۹۹/۸	۲۹۷	رمازل بریلینت آبی آر		
[۸۱]	-	۲۷۰/۲۷	قرمز کنگو	نانو الیاف	پلی پیرول/ پلی آنیلین
[۷۶]	-	۳۷۰	متیل نارنجی	نانو الیاف	نانو کامپوزیت پلی آنیلین/نایلون ۶
[۷۷]	-	۴۳۴/۷	راکتیو سیاه ۵	نانو الیاف	پلی آنیلین



شکل ۷- ساختار شیمیایی نایلون ۶ [۷۶].

جدول ۶- کاربرد نایلون ۶ در حذف مواد رنگزا.

مرجع	کارایی جذب (میلی گرم/گرم)	ماده جذب شونده	ساختار	جاذب
[۸۷]	۵۸/۸	آبی اسیدی ۱۱۷	نانو الیاف	نایلون ۶
[۸۸]	۴۶۵/۹	راکتیو سیاه ۵	نانو الیاف	نایلون ۶/کیتوسان
	۵۰۲/۴	پونسو ۴آر		

آلاینده را دارا می‌باشد. علاوه بر این زنجیرهای مولکولی PAN دارای یک گروه سیانو هستند که می‌تواند به کمک عوامل شیمیایی مختلف اصلاح شود و منجر به افزایش در ظرفیت جذب آن شود. همچنین، نانو الیاف PVA پس از اصلاح با ترکیبات آمینی و پلی‌دوپامین، از سطح مخصوص بسیار بالایی برخوردار شده و جاذب امیدبخشی برای تصفیه فاضلاب‌های حاوی مواد رنگزا می‌باشد. پلی آنیلین، نیز یکی از جاذب‌های کم‌هزینه با ظرفیت جذب بسیار بالا و انتخابی نسبت به فلزات سنگین و مواد رنگزا می‌باشد. همچنین، نایلون-۶ در فرم نانو الیاف خود، در مقایسه با شکل گرانول مانند خود، از مکان‌های جذب و نسبت سطح به حجم بیشتری برخوردار بوده و به افزایش در کارایی جذب ماده رنگزا منجر شده است. از عمده‌ترین کاربرد نانو الیاف اصلاح‌شده، می‌توان به حذف آلودگی‌های میکروبی، حذف یون‌های فلزات سنگین، مواد آلی و غیرآلی محلول، افزایش بازده جذب سطحی و حذف برخی از مواد رنگزا اشاره نمود.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق، کاربرد نانو الیاف پلیمری مختلف در حذف مواد رنگزا از محیط آبی مورد بررسی قرار گرفت. نانو الیاف پلیمری، به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد و اصلاح سطح آن‌ها به‌عنوان جاذب مؤثر در فرآیند خالص‌سازی آب، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. خواص منحصربه‌فردی همچون نسبت سطح به حجم بالا، خواص مکانیکی مناسب هنگامی که قطر الیاف پلیمری از مقیاس میکرون به نانو کاهش می‌یابد، ایجاد می‌شود. در راستای افزایش کارایی نانو الیاف در فرآیند خالص‌سازی آب و همچنین افزایش پایداری مکانیکی و تخلخل غشا نانو الیاف، سطح آن با استفاده از ترکیبات مختلفی مانند نانو ذرات، پلیمرها، مولکول‌های آلی مختلف و غیره اصلاح‌شده است.

نتایج تحقیقات نشان می‌دهد، گروه‌های پروتونه NH_2 بر روی ساختمان کیتوسان می‌تواند به‌عنوان مکان‌های واکنشی مناسب برای جذب گروه‌های مختلفی از آلاینده‌ها عمل کنند و از این حیث توانایی جذب

۷- مراجع

1. X. Wang, B. S. Hsiao, "Electrospun nanofiber membranes", Curr. Opin. Chem. Eng. 12, 62-81, 2016.
2. S. Sadighian, M. Abbasi, S. A. Arjmandi, H. Karami, "Dye removal from water by zinc ferrite-graphene oxide nanocomposite", Prog. Color Colorants Coat. 11, 85-92, 2018.

3. X. Qu, P. J. Alvarez, Q. Li, "Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment", *Water Res.* 47, 3931-3946, **2013**.
4. N. M. Mahmoodi, Z. Mokhtari-Shourjeh, "Preparation of pva-chitosan blend nanofiber and its dye removal ability from colored wastewater", *Fibers Polym.* 16, 1861-1869, **2015**.
5. Y. Wang, J. Wiener, G. Zhu, "Langmuir isotherm models applied to the sorption of acid dyes from effluent onto polyamide nanofibers", *Autex Res. J.* 13, 95-98, **2013**.
۶. ر. انصاری، م. فلاح معافی، ن. نعمتی منجیلی، ع. فلاح دلاور، "سنتر نانو ذرات آهن (iii) اکسید و نانو کامپوزیت آن برای رنگبری"، نشریه علمی-پژوهشی علوم و فناوری رنگ، ۹، ۲۷۳-۲۸۶، **۱۳۹۴**.
7. I. Cretescu, T. Lupascu, I. Buciscanu, T. Balau-Mindru, G. Soreanu, "Low-cost sorbents for the removal of acid dyes from aqueous solutions", *Process Saf. Environ. Prot.* 108, 57-66, **2017**.
۸. خ. دیده بان، س. ا. میرشکرایی، غ. رجبی، ج. عظیم وند، "حذف ماده رنگ‌های کاتیونی بازیک بنفش ۱۶ (bv16) از محلول‌های آبی با استفاده از دندریمر پلی‌آمییدوآمین نسل ۲ (pamam-g2)"، نشریه علمی-پژوهشی علوم و فناوری رنگ، ۱۱، ۱۸۵-۱۷۳، **۱۳۹۶**.
9. R. Salehi, F. Dadashian, E. Ekrami, "Acid dyes removal from textile wastewater using waste cotton activated carbon: Kinetic, isotherm, and thermodynamic studies", *Prog. Color, Colorant Coat.* 11, 9-20, **2018**.
10. G. Crini, "Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review", *Bioresour. Technol.* 97, 1061-1085, **2006**.
11. V. Gupta, "Application of low-cost adsorbents for dye removal—a review", *J. Environ. Manage.* 90, 2313-2342, **2009**.
12. S. S. Abkenar, R. M. A. Malek, F. Mazaheri, "Dye adsorption of cotton fabric grafted with ppi dendrimers: Isotherm and kinetic studies", *J. Environ. Manage.* 163, 53-61, **2015**.
13. A. Ghasempour, E. Pajootan, H. Bahrami, M. Arami, "Introduction of amine terminated dendritic structure to graphene oxide using poly(propylene imine) dendrimer to evaluate its organic contaminant removal", *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 71, 285-297, **2017**.
۱۴. ش. روحانی، ا. پیرکریمی، "مروری بر روش‌های تجزیه‌ای مواد رنگ‌های آزو در صنعت مواد خوراکی"، نشریه علمی-ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، ۷، ۱۹-۳۶، **۱۳۹۶**.
15. M. T. Yagub, T. K. Sen, S. Afroze, H. M. Ang, "Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review", *Adv. Colloid Interface Sci.* 209, 172-184, **2014**.
۱۶. ا. سهولی، ف. شه‌دوست فرد، ف. نظریان، "ارزیابی کارایی مهم‌ترین روش‌های حذف مواد رنگزا"، نشریه علمی-ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، ۸، ۹۳-۷۷، **۱۳۹۷**.
۱۷. ف. آریانسب، ش. مظفری، س. ف. هادی، "رنگبری مواد رنگ‌های آنیونی از محلول‌های آبی با استفاده از نانو ذرات مغناطیسی پوشش‌داده‌شده با نشاسته عامل‌دارشده با دی‌تیوکاربامات"، نشریه علمی-پژوهشی علوم و فناوری رنگ، ۱۲، ۵۷-۷۲، **۱۳۹۷**.
18. Y. Xia, T. Li, J. Chen, C. Cai, "Polyaniline (skin)/polyamide 6 (core) composite fiber: Preparation, characterization and application as a dye adsorbent", *Synth. Met.* 175, 163-169, **2013**.
19. A. S. Adeleye, J. R. Conway, K. Garner, Y. Huang, Y. Su, A. A. Keller, "Engineered nanomaterials for water treatment and remediation: Costs, benefits, and applicability", *Chem. Eng. J.* 286, 640-662, **2016**.
20. J. W. Lee, S. P. Choi, R. Thiruvengkatachari, W. G. Shim, H. Moon, "Submerged microfiltration membrane coupled with alum coagulation/powdered activated carbon adsorption for complete decolorization of reactive dyes", *Water Res.* 40, 435-444, **2006**.
21. K. Majewska-Nowak, T. Winnicki, J. Wiśniewski, "Effect of flow conditions on ultrafiltration efficiency of dye solutions and textile effluents", *Desalin.* 71, 127-135, **1989**.
22. I. Tan, A. Ahmad and B. Hameed, "Adsorption of basic dye using activated carbon prepared from oil palm shell: Batch and fixed bed studies", *Desalin.* 225, 13-28, **2008**.
23. T. H. Kim, C. Park, J. Yang, S. Kim, "Comparison of disperse and reactive dye removals by chemical coagulation and fenton oxidation", *J. Hazard. Mater.* 112, 95-103, **2004**.
24. M. Amini, M. Arami, N. M. Mahmoodi, A. Akbari, "Dye removal from colored textile wastewater using acrylic grafted nanomembrane", *Desalin.* 267, 107-113, **2011**.
25. T. Robinson, G. McMullan, R. Marchant, P. Nigam, "Remediation of dyes in textile effluent: A critical review on current treatment technologies with a proposed alternative", *Bioresour. Technol.* 77, 247-255, **2001**.
26. A. Jain, V. Gupta, A. Bhatnagar, "Utilization of industrial waste products as adsorbents for the removal of dyes", *J. Hazard. Mater.* 101, 31-42, **2003**.
27. N. K. Amin, "Removal of direct blue-106 dye from aqueous solution using new activated carbons developed from pomegranate peel: Adsorption equilibrium and kinetics", *J. Hazard. Mater.* 165, 52-62, **2009**.
28. G. McMullan, C. Meehan, A. Conneely, N. Kirby, T. Robinson, P. Nigam, I. Banat, R. Marchant, W. Smyth, "Microbial decolourisation and degradation of textile dyes", *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 56, 81-87, **2001**.
29. J. M. Chern and C. Y. Wu, "Desorption of dye from activated carbon beds: Effects of temperature, ph, and alcohol", *Water Res.* 35, 4159-4165, **2001**.
30. A. Dąbrowski, "Adsorption—from theory to practice", *Adv. Colloid Interface Sci.* 93, 135-224, **2001**.
31. S. Babel, T. A. Kurniawan, "Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: A review", *J. Hazard. Mater.* 97, 219-243, **2003**.
32. A. Dąbrowski, "Adsorption—from theory to practice", *Adv. Colloid Interface Sci.* 93, 135-224, **2001**.
33. S. Babel, T. A. Kurniawan, "Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: A review", *J. Hazard. Mater.* 97, 219-243, **2003**.
34. M. Berrios, M. Á. Martín, A. Martín, "Treatment of pollutants in wastewater: Adsorption of methylene blue onto olive-based activated carbon", *J. Ind. Eng. Chem.* 18, 780-784, **2012**.
35. Q. Zhou, W. Gong, C. Xie, D. Yang, X. Ling, X. Yuan, S. Chen, X. Liu, "Removal of neutral red from aqueous solution by adsorption on spent cottonseed hull substrate", *J. Hazard. Mater.* 185, 502-506, **2011**.
36. A. P. Vieira, S. A. Santana, C. W. Bezerra, H. A. Silva, J. A. Chaves, J. C. Melo, E. C. Silva Filho, C. Airoidi, "Removal of textile dyes from aqueous solution by babassu coconut epicarp (*orbignya speciosa*)", *Chem. Eng. J.* 173, 334-340, **2011**.
37. X. Han, W. Wang, X. Ma, "Adsorption characteristics of methylene blue onto low cost biomass material lotus leaf", *Chem. Eng. J.* 171, 1-8, **2011**.
38. M. Otero, F. Rozada, L. Calvo, A. Garcia, A. Moran, "Kinetic and equilibrium modelling of the methylene blue removal from solution by adsorbent materials produced from sewage sludges", *Biochem. Eng. J.* 15, 59-68, **2003**.
39. A. Haji, A. Mousavi Shoushtari, M. Abdouss, "Plasma activation and acrylic acid grafting on polypropylene nonwoven surface for the removal of cationic dye from aqueous media", *Desalin. Water Treat.* 53, 3632-3640, **2015**.
40. B. Pan, B. Pan, W. Zhang, L. Lv, Q. Zhang, S. Zheng, "Development of polymeric and polymer-based hybrid adsorbents for pollutants removal from waters", *Che Chem. Eng. J.* 151, 19-29, **2009**.

41. K. Zheng, B. Pan, Q. Zhang, W. Zhang, B. Pan, Y. Han, Q. Zhang, D. Wei, Z. Xu, Q. Zhang, "Enhanced adsorption of p-nitroaniline from water by a carboxylated polymeric adsorbent", *Sep. Purif. Technol.* 57, 250-256, **2007**.
42. M. Abdouss, A. M. Shoushtari, N. Shamloo, A. Haji, "Modified pet fibres for metal ion and dye removal from aqueous media", *Polym. Polym. Compos.* 21, 251, **2013**.
43. A. Haji, "Improved natural dyeing of cotton by plasma treatment and chitosan coating. Optimization by response surface methodology", *Cellul Chem Technol.* 51, 975-982, **2017**.
44. T. Sajed, A. Haji, M. K. Mehrizi, M. N. Boroumand, "Modification of wool protein fiber with plasma and dendrimer: Effects on dyeing with cochineal", *Biol. Macromol.* 107, 642-653, **2018**.
45. M. Abdouss, A. Mousavi Shoushtari, A. Majidi Simakani, S. Akbari, A. Haji, "Citric acid-modified acrylic micro and nanofibers for removal of heavy metal ions from aqueous media", *Desalin. Water Treat.* 52, 7133-7142, **2014**.
46. M. Abdouss, M. A. Shoushtari, A. Haji and B. Moshref, "Fabrication of chelating diethylenetriaminated pan micro-and nano-fibers for heavy metal removal", *Chem. Ind. Chem. Eng.* 18, 27-34, **2012**.
47. M. Abdouss, S. A. H. Najafabadi, A. M. Shoushtari and A. Haji, "Preparation of ethanolamine modified micro and new nano acrylic fibers for ion adsorption", *Ind. Textila*, 64, 129-135, **2013**.
48. Z. M. Huang, Y.-Z. Zhang, M. Kotaki, S. Ramakrishna, "A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites", *Compos. Sci. Technol.* 63, 2223-2253, **2003**.
49. A. Almasian, M. E. Olya, N. M. Mahmoodi, "Synthesis of polyacrylonitrile/polyamidoamine composite nanofibers using electrospinning technique and their dye removal capacity", *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 49, 119-128, **2015**.
50. I. S. Chronakis, "Novel nanocomposites and nanoceramics based on polymer nanofibers using electrospinning process—a review", *J. Mater. Process. Technol.* 167, 283-293, **2005**.
51. G. C. Rutledge, S. V. Fridrikh, "Formation of fibers by electrospinning", *Adv. Drug Delivery Rev.* 59, 1384-1391, **2007**.
52. S. Zhang, W. S. Shim, J. Kim, "Design of ultra-fine nonwovens via electrospinning of nylon 6: Spinning parameters and filtration efficiency", *Mater. Des.* 30, 3659-3666, **2009**.
53. G. C. Rutledge, S. V. Fridrikh, "Formation of fibers by electrospinning", *Adv. Drug Delivery Rev.* 59, 1384-1391, **2007**.
54. M. C. Yang and W. C. Lin, "Surface modification and blood compatibility of polyacrylonitrile membrane with immobilized chitosan-heparin conjugate", *J. Polym. Res.* 9, 201-206, **2002**.
55. V. Janaki, B. T. Oh, K. Shanthi, K. J. Lee, A. Ramasamy, S. Kamala-Kannan, "Polyaniline/chitosan composite: An eco-friendly polymer for enhanced removal of dyes from aqueous solution", *Synth. Met.* 162, 974-980, **2012**.
56. R. S. Juang, R. L. Tseng, F. C. Wu, S. H. Lee, "Adsorption behavior of reactive dyes from aqueous solutions on chitosan", *J. Chem. Technol. Biotechnol.: International Research in Process, Clean Technol. Envir.* 70, 391-399, **1997**.
58. M. Ghani, A. A. Gharehaghaji, M. Arami, N. Takhtkuse, B. Rezaei, "Fabrication of electrospun polyamide-6/chitosan nanofibrous membrane toward anionic dyes removal", *J. Nanotechnol.* DOI: 10.1155/2014/278418, **2014**.
58. V. Janaki, B. T. Oh, K. Shanthi, K. J. Lee, A. Ramasamy and S. Kamala-Kannan, "Polyaniline/chitosan composite: An eco-friendly polymer for enhanced removal of dyes from aqueous solution", *Synth. Met.* 16, 974-80, **2012**.
59. N. M. Mahmoodi, R. Salehi, M. Arami, H. Bahrami, "Dye removal from colored textile wastewater using chitosan in binary systems", *Desalin.* 267, 64-72, **2011**.
60. N. A. Travlou, G. Z. Kyzas, N. K. Lazaridis and E. A. Deliyanni, "Graphite oxide/chitosan composite for reactive dye removal", *Chem. Eng. J.* 217, 256-265, **2013**.
61. M. Sadeghi-Kiakhani, M. Arami, K. Gharanjig, "Dye removal from colored-textile wastewater using chitosan-ppi dendrimer hybrid as a biopolymer: optimization, kinetic, and isotherm studies", *J. Appl. Polym. Sci.* 127, 2607-2619, **2013**.
62. P. Heikkilä, A. Harlin, "Electrospinning of polyacrylonitrile (pan) solution: Effect of conductive additive and filler on the process", *Express Polym. Lett.* 3, 437-445, **2009**.
63. K. Yoon, K. Kim, X. Wang, D. Fang, B. S. Hsiao, B. Chu, "High flux ultrafiltration membranes based on electrospun nanofibrous pan scaffolds and chitosan coating", *Polym.* 47, 2434-2441, **2006**.
64. Z. Chen, X. Feng, D. Han, L. Wang, W. Cao, L. Shao, "Preparation of aminated polyacrylonitrile porous fiber mat and its application for cr (vi) ion removal", *Fibers Polym.* 15, 1364-1368, **2014**.
65. A. Almasian, G. Chizari Fard, M. Parvinzadeh Gashti, M. Mirjalili, Z. Mokhtari Shourijeh, "Surface modification of electrospun pan nanofibers by amine compounds for adsorption of anionic dyes", *Desalin. Water Treat.* 57, 10333-10348, **2016**.
66. E. Johal, M. Saini, M. Jha, "Development of novel nanocomposite membrane for water purification", *Artif. Cells, Nanomed. Biotechnol.* 41, 359-362, **2013**.
67. N. M. Mahmoodi, Z. Mokhtari-Shourijeh, A. Ghane-Karade, "Synthesis of the modified nanofiber as a nanoadsorbent and its dye removal ability from water: isotherm, kinetic and thermodynamic", *Water Sci. Technol.* 75, 2475-2487, **2017**.
68. A. Almasian, G. Chizari Fard, M. Parvinzadeh Gashti, M. Mirjalili, Z. Mokhtari Shourijeh, "Surface modification of electrospun pan nanofibers by amine compounds for adsorption of anionic dyes", *Desalin. Water Treat.* 57, 10333-10348, **2016**.
69. M. Dodangeh, K. Gharanjig, M. Hosseinnazhad, "The synthesis of poly(amidoamine) dendrimer: Dyeing and fluorescence properties", *Prog. Color Colorant Coat.* 11, 173-178, **2018**.
70. C. Hou, H. Yang, Z. L. Xu, Y. Wei, "Preparation of pan/pamam blend nanofiber mats as efficient adsorbent for dye removal", *Fibers Polym.* 16, 1917-1924, **2015**.
71. E. F. C. Chauque, L. N. Dlamini, A. A. Adelodun, C. J. Greyling, J. C. Ngila, "Electrospun polyacrylonitrile nanofibers functionalized with edta for adsorption of ionic dyes", *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C.* 100, 201-211, **2017**.
72. R. Sharma, N. Singh, A. Gupta, S. Tiwari, S. K. Tiwari, S. R. Dhakate, "Electrospun chitosan-polyvinyl alcohol composite nanofibers loaded with cerium for efficient removal of arsenic from contaminated water", *J. Mater. Chem.* 2, 16669-16677, **2014**.
73. N. M. Mahmoodi, Z. Mokhtari-Shourijeh, "Modified poly (vinyl alcohol)-triethylenetetramine nanofiber by glutaraldehyde: Preparation and dye removal ability from wastewater", *Desalin. Water Treat.* 57, 20076-20083, **2016**.
74. J. Yan, Y. Huang, Y. E. Miao, W. W. Tjiu, T. Liu, "Polydopamine-coated electrospun poly (vinyl alcohol)/poly (acrylic acid) membranes as efficient dye adsorbent with good recyclability", *J. Hazard. Mater.* 283, 730-739, **2015**.
75. F. A. Rafiqi, K. Majid, "Removal of copper from aqueous solution using polyaniline and polyaniline/ferricyanide composite", *J. Environ. Chem. Eng.* 3, 2492-2501, **2015**.
76. K. Zarrini, A. A. Rahimi, F. Alihosseini, H. Fashandi, "Highly efficient dye adsorbent based on polyaniline-coated nylon-6 nanofibers", *J. Cleaner Prod.* 142, 3645-3654, **2017**.
77. M. Bhaumik, R. I. McCrindle, A. Maity, S. Agarwal, V. K. Gupta, "Polyaniline nanofibers as highly effective re-usable adsorbent for removal of reactive black 5 from aqueous solutions", *J. Colloid Interface Sci.* 466, 442-451, **2016**.
78. J. D. Stenger-Smith, "Intrinsically electrically conducting polymers. Synthesis, characterization, and their applications", *Prog. Polym. Sci.* 23, 57-79, **1998**.

79. X. Zhang, R. Bai, "Surface electric properties of polypyrrole in aqueous solutions", *Langmuir*. 19, 10703-10709, **2003**.
80. T. Yao, T. Cui, J. Wu, Q. Chen, S. Lu, K. Sun, "Preparation of hierarchical porous polypyrrole nanoclusters and their application for removal of Cr (VI) ions in aqueous solution", *Polym. Chem.* 2, 2893-2899, **2011**.
81. M. Bhaumik, R. McCrindle, A. Maity, "Efficient removal of Congo red from aqueous solutions by adsorption onto interconnected polypyrrole-polyaniline nanofibres", *Chem. Eng. J.* 228, 506-515, **2013**.
82. Q. Xin, J. Fu, Z. Chen, S. Liu, Y. Yan, J. Zhang, Q. Xu, "Polypyrrole nanofibers as a high-efficient adsorbent for the removal of methyl orange from aqueous solution", *J. Environ. Chem. Eng.* 3, 1637-1647, **2015**.
83. H. Zhang, S. Li, C. J. B. White, X. Ning, H. Nie, L. Zhu, "Studies on electrospun nylon-6/chitosan complex nanofiber interactions", *Electrochim. Acta.* 54, 5739-5745, **2009**.
84. R. S. Rahbar, A. Haji, "Use of d-optimal design to model and the analysis of the effect of the draw ratio on some physical properties of hot multistage drawn nylon 6 fibers", *J. Appl. Polym. Sci.* 130, 1337-1344, **2013**.
85. D. Zhang, D. Liu, Q. Ren, Y. Chen, C. Yin, "Fabrication of polyamide-6 fiber of high SO₃H content surface through electrospinning", *Polym.* 98, 11-19, **2016**.
86. R. Faridi-Majidi, H. Ziyadi, N. Naderi, A. Amani, "Use of artificial neural networks to determine parameters controlling the nanofibers diameter in electrospinning of nylon-6, 6", *J. Appl. Polym. Sci.* 124, 1589-1597, **2012**.
87. U. A. Qureshi, Z. Khatri, F. Ahmed, A. S. Ibupoto, M. Khatri, F. K. Mahar, R. Z. Brohi, I. S. Kim, "Highly efficient and robust electrospun nanofibers for selective removal of acid dye", *J. Mol. Liq.* 244, 478-488, **2017**.
88. G. Dotto, J. Santos, E. Tanabe, D. Bertuol, E. Foletto, E. Lima, F. Pavan, "Chitosan/polyamide nanofibers prepared by forspinning® technology: A new adsorbent to remove anionic dyes from aqueous solutions", *J. Cleaner Prod.* 144, 120-129, **2017**.