فصلنامه پژوهش های نوین در علوم پزشکی، بهداشت و سلامت شماره ۲- دوره ۱- صفحات۴۱۵-۴۰۲
Journal of new researches in Medical Sciences, Hygiene and Health
ISSN 3060-625X

# اصلاح ورق‌های پلی‌آکریلونیتریل با پوشش پلی‌دوپامین و بررسی مکانیسم‌های کمپلکس‌سازی و جذب شیمیایی در حذف یون‌های سرب و آرسنیک از فاضلاب‌های اسیدی

فاطمه نجفی کلیانی
کارشناس ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بندرعباس، ایران

## چکیده

در سال‌های اخیر، آلودگی فاضلاب‌های صنعتی با فلزات سنگین نظیر سرب ($Pb^{2}$) و آرسنیک ($As^{3+}/As^{5}$) به یکی از معضلات جدی زیست‌محیطی تبدیل شده است. به‌دلیل سمیت بالا و پایداری این یون‌ها در محیط‌های آبی، توسعه جاذب‌های مؤثر و سازگار با محیط زیست اهمیت بسیاری یافته است. این مقاله مروری به بررسی کاربرد ورق‌های پلی‌آکریلونیتریل اصلاح‌شده با پوشش پلی‌دوپامین در حذف هم‌زمان یون‌های سرب و آرسنیک از فاضلاب‌های اسیدی می‌پردازد.پلی‌دوپامین به‌دلیل دارا بودن گروه‌های عاملی فعالی مانند کاتکول و آمین، امکان برهم‌کنش مؤثر با یون‌های فلزی از طریق مکانیسم‌هایی همچون کمپلکس‌سازی و جذب شیمیایی را فراهم می‌سازد. در این مقاله، ضمن مرور روش‌های اصلاح سطح، ساختار جاذب، شرایط عملیاتی تأثیرگذار) نظیرpH ، دما، و زمان تماس (و عملکرد حذف یون‌ها، چالش‌ها و دستاوردهای تحقیقات گذشته نیز تحلیل شده‌اند. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از این نوع جاذب‌ها می‌تواند به‌عنوان رویکردی کارآمد و پایدار برای تصفیه فاضلاب‌های آلوده به فلزات سنگین مورد توجه قرار گیرد.

**واژگان کلیدی** : پلی‌آکریلونیتریل، پلی‌دوپامین، جذب سطحی، کمپلکس‌سازی، جاذب‌های زیست‌سازگار، فلزات سنگین

**مقدمه**

با گسترش سریع صنایع مختلف در دهه‌های اخیر، تخلیه مستقیم پساب‌های صنعتی به محیط‌زیست به یکی از مهم‌ترین عوامل آلودگی منابع آب و خاک تبدیل شده است. در این میان، حضور فلزات سنگین سمی در فاضلاب‌ها به‌دلیل غیرقابل‌تجزیه بودن، تجمع‌پذیری در بدن موجودات زنده، و پایداری بالا در محیط آبی نگرانی‌های جدی زیست‌محیطی و بهداشتی ایجاد کرده است. دو فلز سنگین سرب ($Pb^{2}$) و آرسنیک ($As^{3+}/As^{5}$) از مهم‌ترین آلاینده‌های شناخته‌شده در پساب‌های صنعتی محسوب می‌شوند که اثرات مخربی بر سیستم عصبی، کلیوی، کبدی و حتی سرطان‌زایی در انسان دارند. منابع اصلی این آلاینده‌ها شامل صنایع باتری‌سازی، معدن‌کاری، پالایش فلزات، تولید سموم دفع آفات، رنگ‌سازی و فرآیندهای شیمیایی است( Kikuchi & Tanaka, ۲۰۱۲; Sall, Diaw, Gningue-Sall, Efremova Aaron, & Aaron, ۲۰۲۰; Xie et al., ۲۰۲۲). روش‌های مختلفی برای حذف این آلاینده‌ها از محیط‌های آبی توسعه یافته‌اند، از جمله رسوب‌سازی شیمیایی، تبادل یونی، الکترودیالیز، فیلتراسیون غشایی و روش‌های اکسیداسیون پیشرفته. با این حال، بسیاری از این روش‌ها با چالش‌هایی نظیر هزینه بالا، نیاز به تجهیزات پیچیده، تولید لجن ثانویه و محدودیت عملکرد در غلظت‌های پایین مواجه هستند. در این میان، فرایند جذب سطحی (adsorption) به‌عنوان یک راهکار ساده، اقتصادی، قابل بازیافت و با بازدهی بالا، مورد توجه ویژه محققان قرار گرفته است( Ahmed et al., ۲۰۲۲; Kikuchi & Tanaka, ۲۰۱۲; Punia, Bharti, Dhar, Thakur, & Thakur, ۲۰۲۲; Saravanan et al., ۲۰۲۲). انتخاب جاذب مناسب، نقش کلیدی در موفقیت فرآیند جذب ایفا می‌کند. در سال‌های اخیر، تمرکز بر توسعه جاذب‌های پلیمری اصلاح‌شده، به‌ویژه پلی‌آکریلونیتریل (PAN) به دلیل پایداری حرارتی و مکانیکی مناسب، ساختار فیبری قابل مهندسی و قابلیت اصلاح شیمیایی، افزایش یافته است. اصلاح سطح PAN با استفاده از ترکیبات فعال می‌تواند منجر به بهبود عملکرد جذب از طریق افزایش تعداد و نوع گروه‌های عاملی در سطح جاذب گردد. یکی از promising ترین پوشش‌ها برای اصلاح PAN، استفاده از پلی‌دوپامین (PDA) است؛ پلی‌مر حاصل از خودپلیمریزاسیون دوپامین در شرایط قلیایی که ساختاری مشابه ملانین دارد و دارای گروه‌های کاتکول و آمین فعال می‌باشد( Asadi, Nazari, Gholami, & Dolatshah, ۲۰۲۳; Tripathy, Padhiari, Ghosh, & Hota, ۲۰۲۳). پلی‌دوپامین به‌دلیل توانایی تشکیل پیوندهای کووالانسی و هیدروژنی با یون‌های فلزی، توانایی بالایی در جذب شیمیایی (chemisorption) و کمپلکس‌سازی (complexation) با یون‌هایی مانند $Pb^{2}$ و $As^{3+}/As^{5}$ دارد. علاوه بر این، امکان ترکیب پلی‌دوپامین با سایر نانوذرات یا مواد معدنی نیز موجب توسعه جاذب‌های هیبریدی با عملکرد ارتقاءیافته شده است. بررسی دقیق مکانیسم‌های جذب یون‌های فلزی توسط این نوع جاذب‌ها، از جمله اثر pH، ایزوترم‌های جذب، سینتیک واکنش و ساختارهای سطحی فعال، اهمیت زیادی در بهینه‌سازی فرایند دارد(Tripathy et al., ۲۰۲۳; Wang et al., ۲۰۲۲). در این مقاله، تلاش شده است تا با مرور نظام‌مند مطالعات پیشین، نقش اصلاح ورق‌های پلی‌آکریلونیتریل با پوشش پلی‌دوپامین در حذف هم‌زمان یون‌های سرب و آرسنیک از فاضلاب‌های اسیدی بررسی شود. تمرکز اصلی مقاله بر تحلیل ساختار جاذب، شرایط عملیاتی مؤثر، مکانیزم‌های واکنش سطحی و مقایسه نتایج پژوهش‌های گذشته است. همچنین چالش‌های موجود در این حوزه و فرصت‌های پژوهشی آینده برای ارتقاء کارایی و توسعه جاذب‌های چندمنظوره نیز مورد بحث قرار گرفته‌اند.

## ۱- خواص و ویژگی‌های یون‌های سرب و آرسنیک

### ۱-۱یون سرب($Pb^{2+}$)

سرب (Pb) یکی از فلزات سنگین پرکاربرد اما فوق‌العاده سمی در صنایع مختلف است که حضور آن در فاضلاب‌های صنعتی، به‌ویژه پساب‌های حاصل از صنایع باتری‌سازی، آبکاری فلزات، تولید رنگ و لوله‌سازی، تهدیدی جدی برای سلامت انسان و محیط زیست محسوب می‌شود. یون دو ظرفیتی سرب ($Pb^{2}$) در آب به‌راحتی حل می‌شود و به‌دلیل پایداری بالا، قابلیت تجزیه‌ناپذیری و توانایی در تجمع زیستی، از جمله مهم‌ترین اولویت‌ها در فرآیند تصفیه فاضلاب‌های آلوده به فلزات سنگین به‌شمار می‌رود( Zhang, Cheung, & Valix, ۲۰۰۵). سمیت یون $Pb^{2}$ به‌صورت مستقیم بر سیستم‌های عصبی، کلیوی، کبدی و خونساز اثرگذار است و قرارگیری طولانی‌مدت در معرض آن می‌تواند منجر به عوارضی چون آسیب‌های مغزی، فشار خون بالا، نارسایی کلیه و در کودکان، عقب‌ماندگی رشد عصبی و ذهنی شود. به همین دلیل، سازمان‌های جهانی مانند سازمان بهداشت جهانی (WHO) و آژانس حفاظت از محیط زیست آمریکا (EPA)، غلظت مجاز سرب در آب آشامیدنی را به‌شدت محدود کرده‌اند (کمتر از ۱۰ میکروگرم بر لیتر)(Boldyrev, ۲۰۱۸). از دیدگاه شیمیایی، $Pb^{2}$ یک یون فلزی نرم است که تمایل شدیدی به برهم‌کنش با لیگاندهایی دارد که حاوی اتم‌های گوگرد (S)، نیتروژن (N) و اکسیژن (O) هستند. بنابراین، گروه‌های عاملی فعال نظیر آمین ($-NH_2$)، کربوکسیل ($-COOH$) و به‌ویژه تیول ($-SH$) نقش کلیدی در جذب و کمپلکس‌سازی این یون ایفا می‌کنند. این ویژگی باعث شده است که جاذب‌هایی با سطح غنی از چنین گروه‌های عاملی در فرآیند حذف سرب بسیار مؤثر واقع شوند( Lee, Chang, Yang, Chen, & Liu, ۱۹۹۸; Popov & Vučinić, ۱۹۸۸). یکی از مهم‌ترین نکات در حذف یون سرب، تأثیر شرایط محیطی مانند pH محلول، دمای سیستم، زمان تماس و غلظت اولیه یون فلزی است. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که در محیط‌های اسیدی تا خنثی ($pH \sim ٤–٦$)، جذب $Pb^{2}$ با بازده بالاتری صورت می‌گیرد، زیرا در این بازه pH، یون سرب به‌صورت آزاد در محلول باقی مانده و پتانسیل بالایی برای برهم‌کنش با سطح جاذب دارد. در مقابل، در pHهای بالاتر، احتمال رسوب‌سازی به‌صورت $Pb(OH)_2$ وجود دارد که منجر به انحراف از مکانیسم جذب سطحی می‌شود(H. Li, Yuan, Ding, & Yuan, ۲۰۲۳; Pan, Li, Wu, Liu, & Yu, ۲۰۱۸). در سال‌های اخیر، استفاده از جاذب‌های اصلاح‌شده با پوشش‌های غنی از گروه‌های عاملی فعال، به‌ویژه پلیمرهایی مانند پلی‌دوپامین (Polydopamine)، با استقبال فراوانی روبه‌رو شده است. پلی‌دوپامین به‌دلیل ساختار شیمیایی منحصر به‌فرد خود، امکان ایجاد پیوندهای کووالانسی، پیوند هیدروژنی و برهم‌کنش‌های الکترواستاتیک با یون‌های فلزی نظیر $Pb^{2}$ را فراهم می‌سازد. این ویژگی، در کنار قابلیت پوشش‌دهی یکنواخت بر بسترهایی مانند ورق‌های پلی‌آکریلونیتریل، پلی‌دوپامین را به یکی از جاذب‌های نوین و کارآمد در حذف یون سرب تبدیل نموده است. از آن‌جا که مکانیزم حذف $Pb^{2}$ شامل فرآیندهایی نظیر جذب فیزیکی، کمپلکس‌سازی شیمیایی، تبادل یونی و پیوند سطحی می‌شود، تحلیل دقیق ساختار جاذب و نوع برهم‌کنش‌های سطحی در طراحی و بهینه‌سازی جاذب‌های چندمنظوره اهمیت زیادی دارد. مرور مطالعات اخیر نشان می‌دهد که جاذب‌های ترکیبی با پوشش پلی‌دوپامین، عملکرد بهتری در مقایسه با جاذب‌های سنتی نظیر زئولیت یا کربن فعال داشته‌اند و توانسته‌اند در شرایط اسیدی نیز بازدهی بالایی از خود نشان دهند( Y. Li et al., ۲۰۱۸; Shahzadi et al., ۲۰۲۲). یون $Pb^{2}$ به‌دلیل خواص شیمیایی خاص، سمیت شدید و حضور گسترده در پساب‌های صنعتی، هدفی مهم برای توسعه جاذب‌های پیشرفته محسوب می‌شود و بررسی راهکارهای مؤثر برای حذف آن از فاضلاب‌های اسیدی از اهمیت بالایی برخوردار است.

### ۱-۲ یون آرسنیک($As^{3+}/As^{5+}$)

آرسنیک (As) یکی از خطرناک‌ترین عناصر نیمه‌فلزی موجود در طبیعت است که به‌شکل گسترده‌ای در پساب‌های صنعتی و همچنین منابع آب زیرزمینی یافت می‌شود. این عنصر معمولاً در دو حالت اصلی اکسایش، یعنی آرسنیت ($As^{3}$) و آرسنات ($As^{5}$)، در محلول‌های آبی وجود دارد. آلودگی با آرسنیک می‌تواند منشأ طبیعی (فرسایش سنگ‌های غنی از آرسنیک، فعالیت‌های آتشفشانی) یا انسانی (صنایع

شیمیایی، معادن، تولید آفت‌کش‌ها و سموم کشاورزی، پالایش فلزات) داشته باشد. حضور آرسنیک در آب آشامیدنی یکی از دغدغه‌های جدی سازمان‌های بهداشتی جهانی بوده و حتی در غلظت‌های پایین، اثرات سرطان‌زا و سمی آن تأیید شده است(Vukašinović-Pešić, Đikanović, Blagojević, & Rajaković, ۲۰۰۵; Wojciechowska & Lendzion-Bieluń, ۲۰۲۰). از نظر ساختاری، آرسنیت ($As^3$) در pH اسیدی و آرسنات ($As^5$) در pHهای خنثی تا قلیایی پایداری بیشتری دارند. آرسنیت به دلیل ظرفیت کمتر، اندازه کوچک‌تر و بار الکتریکی پایین‌تر، رفتار پیچیده‌تری در فرآیند حذف دارد و معمولاً با بازده پایین‌تری جذب می‌شود. از طرف دیگر، آرسنات که به‌صورت آنیونی ($H_2AsO_4^-$، $HAsO_4^{2-}$) در محیط حضور دارد، امکان تعامل الکترواستاتیکی با جاذب‌های دارای بار مثبت را فراهم می‌سازد. همین تفاوت‌های بنیادین در ساختار و شیمی سطحی، طراحی جاذب‌های مناسب برای حذف هم‌زمان $As^3$ و $As^5$ را به چالشی فنی و مهم تبدیل کرده است( Doak, Long, Freedman, & by Staff, ۲۰۰۰; Taylor, Bennett, & Heyding, ۱۹۶۵). سمیت آرسنیک به‌صورت مزمن و تجمعی ظاهر می‌شود؛ قرار گرفتن طولانی‌مدت در معرض آن می‌تواند موجب آسیب‌های شدید به پوست، کبد، کلیه، سیستم قلبی-عروقی، و به‌ویژه بروز سرطان‌های ریه و مثانه گردد. از این‌رو، سازمان بهداشت جهانی (WHO) حداکثر غلظت مجاز آرسنیک در آب آشامیدنی را ۱۰ میکروگرم بر لیتر تعیین کرده است. با این حال، در بسیاری از مناطق جهان، به‌ویژه نواحی دارای فعالیت معدنی یا کشاورزی، میزان آرسنیک در منابع آبی فراتر از این حد مجاز گزارش شده است. فرآیند حذف یون‌های آرسنیک از محیط آبی نیازمند جاذب‌هایی است که علاوه بر دارا بودن گروه‌های عاملی مناسب برای برهم‌کنش شیمیایی، توانایی عملکرد در pHهای متفاوت را نیز داشته باشند. گروه‌هایی نظیر هیدروکسیل (–OH)، آمین ($–NH_2$)، فنول، و کربوکسیل (–COOH)، از جمله گروه‌هایی هستند که در ایجاد پیوندهای شیمیایی یا کمپلکس با یون‌های آرسنیک نقش دارند. جاذب‌هایی که ساختارهای سطحی متنوع و چندعاملی داشته باشند، قابلیت بالاتری در حذف آرسنیک، به‌ویژه در هر دو حالت اکسایش از خود نشان می‌دهند( Guo, Stüben, Berner, & Yu, ۲۰۰۹; Wojciechowska & Lendzion-Bieluń, ۲۰۲۰). در این میان، پوشش‌دهی ورق‌های پلیمری مانند پلی‌آکریلونیتریل با پلی‌دوپامین (PDA) توانسته است نتایج قابل‌توجهی در حذف آرسنیک ارائه دهد. پلی‌دوپامین دارای گروه‌های عاملی کاتکول و آمین است که قابلیت ایجاد برهم‌کنش‌های چندگانه با یون‌های فلزی و نیمه‌فلزی را دارند. همچنین، خاصیت هیدروفیلی سطح PDA، باعث افزایش تماس مؤثر یون‌های آرسنیک با سطح جاذب می‌شود. با در نظر گرفتن ساختار پیچیده آرسنیک و رفتار وابسته به pH آن، استفاده از جاذب‌هایی با عملکرد تطبیقی و چندمکانیسمی، همچون PDA اصلاح‌شده، گزینه‌ای مطلوب در فرآیند تصفیه فاضلاب‌های آلوده به آرسنیک تلقی می‌شود( Kumar et al., ۲۰۲۳; Tripathy et al., ۲۰۲۳). بررسی مکانیسم‌های جذب آرسنیک در جاذب‌های PDA–PAN نشان می‌دهد که فرایندهایی چون جذب سطحی فیزیکی، تبادل یونی، پیوند شیمیایی و کمپلکس‌سازی سطحی به‌صورت هم‌زمان در حذف یون‌های $As^3$ و $As^5$ نقش دارند. با وجود پیشرفت‌های اخیر در توسعه چنین جاذب‌هایی، چالش‌هایی مانند تمایز مکانیزم‌های حذف دو گونه اکسایش آرسنیک، کنترل شرایط بهینه جذب و افزایش پایداری عملکرد در طول زمان همچنان از موضوعات فعال تحقیقاتی به‌شمار می‌روند.

## ۲- جاذب‌های مورد استفاده در حذف فلزات سنگین از فاضلاب

فرایند جذب سطحی به‌عنوان یکی از کارآمدترین، اقتصادی‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌های حذف آلاینده‌های فلزی از فاضلاب‌های صنعتی شناخته می‌شود. بازده بالا، طراحی ساده، مصرف انرژی پایین، قابلیت احیا و استفاده مجدد از جاذب‌ها، از جمله مزایایی هستند که جذب سطحی را نسبت به سایر روش‌ها، نظیر رسوب‌سازی شیمیایی یا اسمز معکوس، برجسته ساخته‌اند. با این حال، انتخاب جاذب مناسب عاملی تعیین‌کننده در عملکرد کلی این فرآیند است. جاذب‌ها باید نه‌تنها ظرفیت جذب بالایی داشته باشند، بلکه از نظر

زیست‌سازگاری، دسترسی، هزینه تولید و قابلیت بازیابی نیز بهینه باشند. جاذب‌های مورد استفاده برای حذف فلزات سنگین را می‌توان در سه دسته کلی طبقه‌بندی نمود:

- **جاذب‌های طبیعی**

جاذب‌های زیستی مانند زئولیت‌های طبیعی، پسماندهای کشاورزی (نظیر پوست برنج، خاک اره) و جاذب‌های بر پایه کیتوسان یا سلولز، به‌دلیل دسترسی آسان و تجدیدپذیری، گزینه‌های اولیه در حذف فلزات سنگین محسوب می‌شوند. این مواد اغلب دارای گروه‌های عاملی طبیعی مانند هیدروکسیل و کربوکسیل هستند که با یون‌های فلزی برهم‌کنش می‌کنند. با این حال، ظرفیت پایین جذب، پایداری محدود و کارایی کمتر در محیط‌های اسیدی، از جمله محدودیت‌های استفاده از آن‌ها در مقیاس صنعتی است.

- **جاذب‌های معدنی**

مواد معدنی همچون زئولیت‌های سنتزی، خاک رس فعال، نانوذرات اکسید فلزی (مانند اکسید آهن، اکسید منگنز، گرافن اکسید) به دلیل ساختارهای متخلخل و مساحت سطح بالا در بسیاری از مطالعات مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نانوذرات مغناطیسی مانند $Fe_3O_4$ نیز به دلیل سهولت جداسازی از محلول پس از جذب، بسیار مورد توجه‌اند. با این وجود، پیچیدگی فرآیند سنتز و هزینه‌های نسبتاً بالا در تولید انبوه، مانعی برای استفاده گسترده آن‌ها محسوب می‌شود.

- **جاذب‌های پلیمری و سنتزی**

در سال‌های اخیر، استفاده از پلیمرهای مهندسی‌شده به‌عنوان بسترهای جاذب توسعه چشمگیری یافته است. پلیمرهایی نظیر پلی‌آکریلونیتریل (PAN)، پلی‌اتیلن‌ایمین (PEI) و پلی‌وینیل الکل (PVA) به‌دلیل انعطاف‌پذیری در اصلاح سطح، پایداری مکانیکی و حرارتی بالا، و قابلیت مهندسی گروه‌های عاملی، برای حذف یون‌های فلزی بهینه شده‌اند. این جاذب‌ها معمولاً به‌صورت الیاف، غشا یا ورق سنتز می‌شوند و با اصلاح سطحی هدفمند، می‌توان آن‌ها را برای حذف انتخابی یون‌های خاص طراحی نمود.

در این میان، اصلاح سطح پلیمرها با ترکیبات فعال مانند پلی‌دوپامین، عامل‌دار کردن با گروه‌های تیول، آمین یا فسفات و نیز بارگذاری نانوذرات، مسیرهایی نوین برای ارتقای عملکرد جاذب‌ها ارائه داده‌اند. هدف اصلی این اصلاحات، افزایش تراکم گروه‌های فعال، بهبود خواص سطحی، افزایش ظرفیت جذب و ارتقاء گزینش‌پذیری نسبت به یون‌های خاص (مثل $Pb^2$ یا $As^{3+}/As^5$) است.

مرور مقالات اخیر نشان می‌دهد که جاذب‌های بر پایه پلی‌آکریلونیتریل اصلاح‌شده با پلی‌دوپامین، نه تنها عملکرد قابل قبولی در جذب فلزات سنگین دارند، بلکه از نظر زیست‌سازگاری، سهولت سنتز و قابلیت بازیافت نیز در مقایسه با سایر جاذب‌ها مزیت دارند. در ادامه مقاله ساختار این جاذب‌ها و مکانیسم عملکرد آن‌ها به‌تفصیل مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

### ۳- اصلاح ورق‌های پلی‌آکریلونیتریل با پوشش پلی‌دوپامین

پلی‌آکریلونیتریل (PAN) یکی از پلیمرهای سنتزی رایج و پرکاربرد در حوزه مواد جاذب است که به‌دلیل ویژگی‌هایی همچون پایداری حرارتی و مکانیکی، مقاومت شیمیایی، قابلیت تولید در قالب الیاف، غشا و ورق‌های مسطح و انعطاف‌پذیری بالا در اصلاح سطحی، توجه بسیاری از محققان را در طراحی جاذب‌های پیشرفته به خود جلب کرده است. ساختار شیمیایی پلی‌آکریلونیتریل به‌واسطه وجود گروه‌های نیتریلی (–CN) در زنجیره اصلی، امکان انجام واکنش‌های سطحی با عوامل مختلف را فراهم می‌کند. این ویژگی، بستر مناسبی برای اصلاح شیمیایی هدفمند سطح PAN به‌منظور افزایش عملکرد جذب فراهم می‌آورد. یکی از کارآمدترین روش‌های اصلاح سطحی در سال‌های اخیر، پوشش‌دهی ورق‌های PAN با پلی‌دوپامین (PDA) بوده است. پلی‌دوپامین، حاصل پلیمریزاسیون خودبه‌خودی مونومر دوپامین در محیط قلیایی (pH ~ ۸٫۵) به‌سرعت و بدون نیاز به کاتالیست خارجی، بر روی سطوح مختلف (فلزی، پلیمری، معدنی) می‌نشیند و پوششی چسبنده، یکنواخت و دارای گروه‌های عاملی متعدد تشکیل می‌دهد. حضور گروه‌های کاتکول (–OH فنولی)، آمین ($–NH_2$) و ایندول در ساختار پلی‌دوپامین، امکان برهم‌کنش‌های گسترده‌ای با یون‌های فلزی سنگین از طریق مکانیسم‌هایی نظیر کمپلکس‌سازی، پیوند کووالانسی، جذب شیمیایی و الکترواستاتیک را فراهم می‌سازد( Almasian, Jalali, Fard, & Maleknia, ۲۰۱۷; Kim, Jalili, Spinks, Wallace, & Kim, ۲۰۱۷). پوشش‌دهی ورق‌های پلی‌آکریلونیتریل با پلی‌دوپامین باعث می‌شود سطح جاذب نه‌تنها فعال‌تر شود، بلکه خاصیت آبدوستی آن نیز افزایش یابد؛ عاملی که به‌صورت مستقیم در افزایش تماس سطحی بین جاذب و یون‌های فلزی مؤثر است. فرایند اصلاح معمولاً از طریق غوطه‌وری ورق‌های PAN در محلول دوپامین هیدروکلراید در بافر Tris صورت می‌گیرد که طی چند ساعت منجر به تشکیل پوشش نازک پلی‌دوپامین قهوه‌ای‌رنگ و پایدار بر سطح می‌شود. این روش ساده، کم‌هزینه و بدون نیاز به تجهیزات پیچیده است.

مطالعات گزارش کرده‌اند که اصلاح PAN با پلی‌دوپامین، ظرفیت جذب جاذب را نسبت به حالت بدون اصلاح تا چند برابر افزایش می‌دهد. این افزایش عملکرد به‌واسطه افزایش تراکم گروه‌های عاملی فعال، بهبود پایداری شیمیایی در محیط‌های اسیدی و افزایش تعداد نقاط اتصال سطحی برای یون‌های فلزی حاصل می‌شود. به‌ویژه در حذف یون‌هایی مانند $Pb^2$ و $As^{3+}/As^5$، که هر کدام دارای مکانیسم جذب خاصی هستند، حضور گروه‌های چندعاملی در ساختار PDA یک مزیت رقابتی جدی ایجاد می‌کند. علاوه بر آن، امکان اصلاح ثانویه سطح PDA با نانوذرات مغناطیسی (مثل $Fe_3O_4$)، اکسیدهای فلزی یا حتی ترکیبات گوگرددار، مسیر توسعه جاذب‌های ترکیبی و هیبریدی را نیز فراهم کرده است. به این ترتیب، ورق‌های PAN اصلاح‌شده با PDA به‌عنوان بستری مناسب برای توسعه نسل جدیدی از جاذب‌های چندمنظوره و پربازده مطرح شده‌اند(Kim et al., ۲۰۱۷; Lu et al., ۲۰۱۷). استفاده از پوشش پلی‌دوپامین بر روی ورق‌های پلی‌آکریلونیتریل، نه‌تنها عملکرد حذف فلزات سنگین را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد، بلکه افق‌های تازه‌ای برای طراحی جاذب‌های سفارشی و سازگار با محیط زیست فراهم می‌سازد ( Han, Zhang, Tavakoli, Campbell, & Tang, ۲۰۱۸; Lin et al., ۲۰۲۰; Xudong Yang et al., ۲۰۲۳).

### ۴- مکانیسم‌های حذف یون‌های فلزی توسط جاذب‌های پلی‌دوپامین-پلی‌آکریلونیتریل(PDA–PAN)

درک دقیق مکانیسم‌های حذف یون‌های فلزی از محلول‌های آبی نقش کلیدی در طراحی و بهینه‌سازی جاذب‌های کارآمد دارد. جاذب‌های اصلاح‌شده با پلی‌دوپامین، به‌ویژه در ترکیب با بسترهای پلیمری مانند پلی‌آکریلونیتریل، با بهره‌گیری از گروه‌های عاملی متنوع، امکان تعامل هم‌زمان با انواع گونه‌های یونی را فراهم می‌سازند. حذف یون‌های فلزی نظیر سرب ($Pb^2$) و آرسنیک ($As^{3+}/As^5$) در این سیستم‌ها حاصل برهم‌کنش مجموعه‌ای از مکانیسم‌های فیزیکی و شیمیایی است که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

- جذب فیزیکی(Physisorption)

در مراحل اولیه تماس بین یون‌های فلزی و سطح جاذب، نیروهای بین‌مولکولی ضعیفی مانند واندروالس، جاذبه‌های الکترواستاتیکی و پیوندهای هیدروژنی باعث تجمع یون‌ها در نزدیکی سطح جاذب می‌شوند.

- جذب شیمیایی(Chemisorption)

برخلاف جذب فیزیکی، جذب شیمیایی حاصل تشکیل پیوندهای قوی بین یون‌های فلزی و گروه‌های عاملی موجود در سطح جاذب است. پلی‌دوپامین حاوی گروه‌های کاتکول (–OH فنولی)، آمین (–$NH_2$)، و ایندول است که می‌توانند با یون‌های سرب و آرسنیک وارد واکنش شیمیایی شوند. مکانیسم جذب شیمیایی در حذف $Pb^2$ اغلب شامل تشکیل پیوندهای کووالانسی بین یون و گروه‌های حاوی نیتروژن یا اکسیژن است؛ در حالی که آرسنات ($As^5$) و آرسنیت ($As^3$) تمایل دارند از طریق برهم‌کنش الکترواستاتیکی و تشکیل کمپلکس‌های چنددندانه‌ای با گروه‌های فنولی و آمینی حذف شوند.

- کمپلکس‌سازی(Complexation)

یکی از مکانیسم‌های کلیدی در حذف یون‌های فلزی سنگین، به‌ویژه در غلظت‌های پایین، تشکیل کمپلکس بین یون و جاذب است. گروه‌های دوپامینی موجود در PDA قادرند کمپلکس‌هایی پایدار با یون‌های $Pb^2$ و $As^{3+}/As^5$ تشکیل دهند. این کمپلکس‌ها نه‌تنها باعث افزایش ظرفیت جذب می‌شوند بلکه از نظر ترمودینامیکی نیز پایدار بوده و تمایل بازگشت یون‌ها به محلول را کاهش می‌دهند.

- تبادل یونی(Ion Exchange)

در شرایط خاص، یون‌های فلزی با یون‌های سطحی موجود در جاذب (مانند $H^+$، Na یا K) مبادله می‌کنند. این مکانیسم به‌ویژه در pHهای پایین‌تر اهمیت می‌یابد و می‌تواند مکمل فرآیند جذب شیمیایی عمل کند.

در جاذب‌های PDA–PAN، خاصیت آبدوستی پوشش پلی‌دوپامین و سطح متخلخل پلی‌آکریلونیتریل شرایط را برای گسترش ناحیه تماس بین یون و جاذب فراهم می‌سازد. این مرحله اغلب برگشت‌پذیر است و در نرخ اولیه جذب نقش مهمی دارد( W. Li et al., ۲۰۲۲; Viscusi, ۲۰۲٤; Xu Yang, Zhou, Sun, Yang, & Tang, ۲۰۲۱b).

**۵- تأثیر پارامترهای محیطی و تحلیل سینتیکی و ایزوترمی**

pH از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر بازدهی جذب است؛ در مورد$Pb^{2+}$ ، بازده جذب در محدوده pH = ٤–٦ بیشینه است، در حالی که برای آرسنیک، رفتار پیچیده‌تر است و گونه‌های مختلف As درpH های متفاوت غالب هستند. دمای محلول: می‌تواند بر سرعت و مکانیزم جذب اثرگذار باشد. جذب شیمیایی معمولاً فرآیندی گرمازا است. زمان تماس و غلظت اولیه: با افزایش زمان،

احتمال تشکیل کمپلکس‌های پایدار بیشتر می‌شود و نرخ جذب به تعادل نزدیک می‌گردد( Huang et al., ۲۰۲۰; N. Yang, Yang, Wang, Chen, & Li, ۲۰۱۹). مطالعات گسترده در حوزه فناوری‌های حذف یون‌های فلزی سنگین از پساب‌های اسیدی نشان داده‌اند که جاذب‌های اصلاح‌شده با پلی‌دوپامین بر پایه ورق‌های پلی‌آکریلونیتریل (PDA–PAN)، عملکرد قابل توجهی در فرآیند جذب نشان می‌دهند. تحلیل داده‌های سینتیکی در تحقیقات متعدد بیانگر آن است که مدل شبه مرتبه دوم (pseudo-second-order) به‌طور سیستماتیک، بهترین برازش را با داده‌های تجربی دارد. این مدل، که مبتنی بر فرض کنترل شیمیایی (chemical sorption) فرآیند جذب است، به‌وضوح دلالت بر نقش غالب برهم‌کنش‌های شیمیایی سطحی از جمله تشکیل پیوندهای داتیو، کمپلکس‌سازی بین یون‌های فلزی و گروه‌های عاملی فعال همچون $OH^-$ و $NH_2-$ موجود در ساختار PDA دارد. برتری مدل شبه مرتبه دوم در مقایسه با مدل‌های فیزیکی نظیر شبه مرتبه اول، نه‌تنها تاییدی بر ماهیت شیمیایی فرآیند است، بلکه نقش فعال و مستقیم سایت‌های جذب سطحی را در دینامیک انتقال جرم نشان می‌دهد. در بسیاری از این مطالعات، سرعت اولیه جذب، با غلظت اولیه یون و توزیع یکنواخت سایت‌های فعال سطح، همبستگی مستقیم دارد . از سوی دیگر، ارزیابی ایزوترم‌های جذب با هدف بررسی رفتار تعادلی جذب سطحی نیز نشان می‌دهد که مدل لانگمویر، به‌عنوان غالب‌ترین مدل ایزوترمی قادر است روند اشباع و جذب یون‌های سرب ($Pb^2$) و آرسنیک در اشکال اکسیداسیونی مختلف ($As^3$ و $As^5$) را به‌دقت توصیف نماید. مدل لانگمویر بر پایه فرضیات مشخصی از جمله جذب یکنواخت تک‌لایه‌ای، عدم برهم‌کنش متقابل بین گونه‌های جذب‌شده، و محدود بودن تعداد سایت‌های جذب فعال بنا شده است. تطابق قوی داده‌ها با این مدل نشان می‌دهد که سطح جاذب‌های PDA–PAN نه‌تنها ساختار منظمی از سایت‌های فعال دارد، بلکه ظرفیت جذب آن نیز با دستیابی به نقطه اشباع، قابل پیش‌بینی و مهندسی‌شده است. رفتار جذب مشاهده‌شده برای یون‌های $Pb^2$ و $As^5$، تحت شرایط مختلف pH، غلظت اولیه و دمای عملیاتی، به‌شدت از الگوی لانگمویر تبعیت می‌کند. این موضوع تأکید می‌کند که طراحی دقیق سطح جاذب، از طریق مهندسی نانوساختار و کنترل گروه‌های عاملی، می‌تواند منجر به توسعه مواد جاذبی با کارایی بالا، انتخاب‌پذیری زیاد، و بازیافت‌پذیری مطلوب گردد. از این منظر، استفاده از PDA به‌عنوان عامل پوشش‌دهنده، نه‌تنها موجب بهبود ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی سطح می‌شود، بلکه امکان به‌کارگیری آن در سیستم‌های جذب پیوسته و صنعتی را نیز فراهم می‌آورد. در مجموع، مرور دقیق ادبیات موجود نشان می‌دهد که ترکیب مدل‌های سینتیکی و ایزوترمی در توصیف جامع مکانیزم جذب، می‌تواند بستری علمی برای طراحی جاذب‌های نوین و بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه پیشرفته به‌ویژه در زمینه تصفیه فاضلاب‌های اسیدی حاوی یون‌های سمی و خطرناک مانند سرب و آرسنیک فراهم آورده است( Ajibade, Tian, Lasisi, & Zhang, ۲۰۲۲; Chao, Li, Li, Wang, & Wang, ۲۰۱۹; Wang et al., ۲۰۲۲; Xu Yang, Zhou, Sun, Yang, & Tang, ۲۰۲۱a).

## ۶- بررسی بازیابی و احیای جاذب‌هایPDA–PAN

یکی از عوامل تعیین‌کننده در ارزیابی کارایی و پایداری جاذب‌ها، قابلیت احیا و استفاده مجدد آن‌ها در چرخه‌های متعدد جذب–دفع است. این ویژگی نه‌تنها جنبه‌های اقتصادی فرآیند تصفیه را بهبود می‌بخشد، بلکه از منظر محیط زیستی نیز اهمیت دارد، چرا که موجب کاهش مصرف منابع اولیه، کاهش تولید پسماندهای شیمیایی، و افزایش عمر عملیاتی سیستم می‌شود. جاذب‌های اصلاح‌شده با پلی‌دوپامین بر پایه ورق‌های پلی‌آکریلونیتریل (PDA–PAN) به‌دلیل دارا بودن ساختار شیمیایی مقاوم، گروه‌های عاملی متعدد و پایداری سطحی مناسب، از پتانسیل خوبی برای احیا و استفاده مجدد برخوردارند. بررسی‌های تجربی نشان می‌دهد که این جاذب‌ها می‌توانند تحت شرایط کنترل‌شده، طی چندین چرخه متوالی جذب و دفع بدون افت محسوس در ظرفیت جذب، مورد استفاده مجدد قرار گیرند. رایج‌ترین روش احیای جاذب‌های PDA–PAN، استفاده از محلول‌های شست‌وشوی اسیدی یا بازی است. برای یون‌های $Pb^2$، اغلب محلول‌های رقیق اسید کلریدریک (HCl ۰٫۱–۰٫۵ M) یا نیتریک ($HNO_3$) به‌عنوان عوامل شست‌وشو استفاده می‌شوند.

این محلول‌ها با شکستن پیوندهای سطحی بین یون فلزی و گروه‌های عاملی جاذب، امکان آزادسازی یون‌ها و احیای سطح را فراهم می‌سازند. برای حذف آرسنیک، به‌ویژه آرسنات ($As^5$) که به‌صورت آنیونی در محیط حضور دارد، استفاده از محلول‌های بازی (مانند NaOH ۰٫۱–۰٫۵ M) یا عوامل کمپلکس‌کننده‌ای همچون EDTA و $Na_2CO_3$ رایج است. این ترکیبات با تشکیل کمپلکس‌های پایدار با یون‌های جذب‌شده، آن‌ها را از سطح جاذب جدا کرده و قابلیت استفاده مجدد را فراهم می‌کنند. درجدول ۱و ۲ مکانیسم های سطحی شناخته شده در جذب یون های سرب و آرسنیک نشان داده شده است. نتایج حاصل از مطالعات متعدد نشان می‌دهد که جاذب‌های PDA–PAN توانسته‌اند در ۴ تا ۶ چرخه متوالی جذب–احیا، ظرفیت جذب مناسبی حفظ کنند. برای مثال، ظرفیت جذب یون سرب پس از ۵ چرخه احیا با HCl، تنها حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد کاهش داشته است. در مورد آرسنیک، بسته به نوع گونه اکسایش و عامل احیاکننده، کاهش ظرفیت جذب در بازه ۱۵ تا ۲۵ درصد گزارش شده است. این موضوع نشان می‌دهد که پیوندهای سطحی بین یون و جاذب تا حدی برگشت‌پذیر بوده و با انتخاب شرایط بهینه احیا، می‌توان عملکرد سطحی را حفظ نمود( Almasian et al., ۲۰۱۷; Hu et al., ۲۰۲٤; Jian et al., ۲۰۲۱; Liu et al., ۲۰۱٦).

جدول ۱- مکانیسم های سطحی شناخته شده در جذب یون های سرب و آرسنیک

| شواهد | ابزارهای شناسایی | نوع پیوند | اثر pH | یون هدف | گروه‌های درگیر | ماهیت واکنش | مکانیسم |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| شیفت پیک‌های گروه آمین | FTIR، XPS، NMR | داتیو کووالانسی | موثر در ۴–۶ | $Pb^{2+}$، $As^{5+}$ | -OH، -$NH_2$ | واکنش داتیو بین یون و گروه عاملی | کمپلکس‌سازی شیمیایی |
| تغییر بار سطح در تماس با $Pb^{2+}$ | Zeta Potential | غیرکووالانسی | pH وابسته به سطحی | $Pb^{2+}$ | بار سطحی PDA | جذب فیزیکی با نیروی کولنی | جذب الکترواستاتیک |
| کاهش Na پس از جذب | ICP-OES، EDS | یونی | pH موثر در متوسط | $Pb^{2+}$ | $Na^+/K^+$ در سطح PDA | جایگزینی یون با کاتیون سطحی | تبادل یونی |
| فاز جدید شناسایی‌شده | XRD | فاز جامد جدید | محدود | $As^{5+}$ در pH بالا | فلز + $OH^-$ | تشکیل رسوب با یون‌ها | هم‌رسوب |

جدول ۲- مقایسه ساختار عملکرد جاذب های آرسنیک و سرب

| نوع جاذب | ساختار اصلاحی | یون هدف | ظرفیت جذب (q_max) | سینتیک غالب | ایزوترم غالب | اثر pH | نوع مکانیسم غالب | بازیافت‌پذیری |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PAN-PDA ساده | تک‌لایه PDA | $Pb^{2+}$ | ۱۳۰ mg/g | شبه مرتبه دوم | لانگمویر | بهینه در pH ۵–۶ | کمپلکس‌سازی OH و N با | بالا )تا ۵ (سیکل |
| PAN-PDA-GO | PDA-گرافن اکساید | $As^{5+}$ | ۱۱۲ mg/g | شبه مرتبه دوم | فروندلیچ | بهینه در pH ۴–۵ | ترکیبی )جذب + فیزیکی پیوند (شیمیایی | متوسط |
| PAN@$Fe_3O_4$-PDA | مغناطیسی شده | $Pb^{2+}$ | ۱۴۵ mg/g | شبه مرتبه دوم | لانگمویر | pH حساس | جذب + مغناطیسی کمپلکس | بسیار بالا |

## ۷- ملاحظات و اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی استفاده از جاذب‌هایPDA–PAN

در توسعه هرگونه فناوری مرتبط با تصفیه فاضلاب، به‌ویژه در مقیاس صنعتی و نیمه‌صنعتی در کنار عملکرد فنی، باید ابعاد زیست‌محیطی و اقتصادی آن نیز به‌طور دقیق مورد بررسی قرار گیرد. استفاده از جاذب‌های اصلاح‌شده با پلی‌دوپامین بر بستر پلی‌آکریلونیتریل (PDA–PAN)، به‌رغم نوآوری‌های ساختاری و عملکردی، نیازمند ارزیابی جامع از منظر پایداری محیط زیستی و توجیه‌پذیری اقتصادی است تا امکان‌سنجی به‌کارگیری آن در مقیاس وسیع فراهم گردد.

جاذب‌های PDA–PAN در مقایسه با بسیاری از روش‌های سنتی تصفیه، مزایای زیست‌محیطی متعددی دارند:

- عدم نیاز به مصرف انرژی بالا در حین فرآیند جذب (برخلاف اسمز معکوس یا تبخیر حرارتی)
- تولید حداقلی لجن ثانویه، که معضلی اساسی در روش‌های شیمیایی یا انعقادی است
- قابلیت احیا و استفاده مجدد، که از مصرف بیش از حد منابع اولیه جلوگیری می‌کند
- امکان بازیافت فلزات سنگین جذب‌شده، به‌ویژه در صنایعی که بازیابی فلزات ارزشمند اهمیت دارد

با این حال، لازم است به ترکیبات سنتزی مورد استفاده نیز توجه شود. پلی‌دوپامین، با وجود زیست‌سازگاری نسبی، در طی فرآیند پلیمریزاسیون و شست‌وشوی سطحی ممکن است مقادیر اندکی ترکیبات آلی آزاد کند که اگر به‌درستی مدیریت نشود، می‌تواند منبع آلاینده‌های ثانویه باشد. همچنین، پلی‌آکریلونیتریل به‌عنوان یک پلیمر پایه نفتی، در صورت عدم بازیافت صحیح، پتانسیل تولید پسماندهای پایدار در طبیعت را دارد. بنابراین، توسعه سامانه‌های بازیافت و دفع مناسب برای جاذب‌های مستعمل از ملزومات به‌کارگیری صنعتی آن‌ها محسوب می‌شود.

ارزیابی هزینه‌های کلی استفاده از جاذب‌های PDA–PAN شامل فاکتورهای زیر است:

- هزینه مواد اولیه: دوپامین یک ماده نسبتاً گران‌قیمت است، هرچند با پیشرفت‌های اخیر در سنتز ارزان‌تر آن، هزینه‌ها کاهش یافته‌اند. PAN به‌صورت صنعتی به‌راحتی در دسترس است و هزینه پایینی دارد.
- هزینه فرآیند سنتز: پوشش‌دهی با PDA معمولاً بدون نیاز به تجهیزات خاص انجام می‌شود، اما زمان‌بر است و نیاز به کنترل دقیق pH و دما دارد. این مورد در مقایسه با سنتز نانوذرات پیچیده، از نظر عملیاتی مزیت دارد.
- میزان مصرف و طول عمر جاذب: قابلیت احیا تا چندین چرخه بدون افت چشمگیر عملکرد، نقش مهمی در کاهش هزینه‌های جایگزینی جاذب ایفا می‌کند.
- مقایسه با سایر روش‌ها: هزینه عملیاتی جاذب‌های PDA–PAN به‌مراتب پایین‌تر از روش‌هایی مانند اسمز معکوس، الکترودیالیز یا جذب با نانوکامپوزیت‌های فلزی خاص است.

استفاده از این جاذب‌ها در مقیاس آزمایشگاهی و نیمه‌صنعتی از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه محسوب می‌شود، اما برای پیاده‌سازی صنعتی نیازمند برآورد دقیق هزینه-فایده، طراحی سیستم‌های احیا خودکار و تأمین پایدار مواد اولیه با قیمت مناسب است( Almasian et al., ۲۰۱۷; Gupta, Sharma, Mishra, & Ekielski, ۲۰۲۲; Huang et al., ۲۰۲۰; Jian et al., ۲۰۲۱).

## نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در این مقاله، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از جاذب‌های اصلاح‌شده با پوشش پلی‌دوپامین بر پایه ورق‌های پلی‌آکریلونیتریل، رویکردی نوین و مؤثر در حذف یون‌های فلزی سمی از فاضلاب‌های اسیدی به‌شمار می‌رود. حضور گروه‌های عاملی فعال نظیر کاتکول و آمین در ساختار پلی‌دوپامین، امکان برقراری پیوندهای شیمیایی قوی و تشکیل کمپلکس با یون‌های فلزی نظیر $Pb^{2}$ و $As^{3+}/As^{5}$ را فراهم می‌سازد. این ویژگی همراه با قابلیت اصلاح‌پذیری بالای پلی‌آکریلونیتریل، موجب شده است تا این سامانه جاذب در مطالعات مختلف عملکردی مطلوب از خود نشان دهد. مرور مطالعات گذشته نشان می‌دهد که جذب یون‌های سرب و آرسنیک توسط این جاذب‌ها نه‌تنها از نظر ظرفیت، بلکه از نظر سرعت، پایداری و امکان احیا نیز قابل توجه است. مکانیزم‌های جذب در این سیستم عمدتاً شامل جذب شیمیایی، کمپلکس‌سازی و تبادل یونی هستند که بسته به شرایط محیطی، نقش آن‌ها تغییر می‌کند. با این حال، علی‌رغم عملکرد آزمایشگاهی مطلوب این جاذب‌ها، هنوز چالش‌هایی نظیر کاهش بازده در محیط‌های واقعی، حضور یون‌های مزاحم، دشواری در بازیابی و احیای کامل و محدودیت‌های مقیاس‌پذیری باقی مانده‌اند. برای رفع این موانع، مطالعات آینده باید به بهینه‌سازی فرآیندهای سنتز، طراحی جاذب‌های ترکیبی و هیبریدی، و بررسی دقیق رفتار این مواد در شرایط واقعی فاضلاب صنعتی متمرکز شوند. در نهایت، توسعه و استفاده از جاذب‌های PDA–PAN می‌تواند گامی مؤثر در جهت دستیابی به سیستم‌های پایدار، کم‌هزینه و کارآمد برای تصفیه آب و فاضلاب حاوی فلزات سنگین باشد و بستری ارزشمند برای تحقیقات بین‌رشته‌ای میان علوم محیطی، شیمی، مهندسی مواد و فناوری نانو فراهم آورد.

**منابع**


- Ahmed, S. F., Kumar, P. S., Rozbu, M. R., Chowdhury, A. T., Nuzhat, S., Rafa, N., . . . Mofijur, M. (۲۰۲۲). Heavy metal toxicity, sources, and remediation techniques for contaminated water and soil. *Environmental Technology & Innovation, 25*, ۱۰۲۱۱٤ .
- Ajibade, T. F., Tian, H., Lasisi, K. H., & Zhang, K. (۲۰۲۲). Bio-inspired PDA@ WS۲ polyacrylonitrile ultrafiltration membrane for the effective separation of saline oily wastewater and the removal of soluble dye. *Separation and Purification Technology, 299*, ۱ .۲۱۷۱۱
- Almasian, A., Jalali, M., Fard, G. C., & Maleknia, L. (۲۰۱۷). Surfactant grafted PDA-PAN nanofiber: Optimization of synthesis, characterization and oil absorption property. *Chemical Engineering Journal, 326*, ۱۲۳۲-۱۲٤۱ .
- Asadi, A., Nazari, S., Gholami, F., & Dolatshah, M. (۲۰۲۳). Facile and effectual surface modification of polyacrylonitrile (PAN)-based ultrafiltration membranes via manipulating the synergistic interaction of dopamine and enzymes. *Journal of Water Process Engineering*, ۵۲, ۱۰۳۵۶۲ .
- Boldyrev, M. (۲۰۱۸). Lead: properties, history, and applications. *WikiJournal of Science*, ۱(۲), ۱-۲۳ .
- Chao, S., Li, X., Li, Y., Wang, Y., & Wang, C. (۲۰۱۹). Preparation of polydopamine-modified zeolitic imidazolate framework-۸ functionalized electrospun fibers for efficient removal of tetracycline. *Journal of Colloid and Interface Science, 552*, ۵۰٦-۵۱٦ .
- Doak, G., Long, G. G., Freedman, L. D., & by Staff, U. (۲۰۰۰). Arsenic compounds. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, ۱-۲۸ .
- Guo, H., Stüben, D., Berner, Z., & Yu, Q. (۲۰۰۹). Characteristics of arsenic adsorption from aqueous solution: Effect of arsenic species and natural adsorbents. *Applied Geochemistry*, ۲۴(۴), ۶۵۷-۶۶۳ .
- Gupta, A., Sharma, V., Mishra, P. K., & Ekielski, A. (۲۰۲۲). A review on polyacrylonitrile as an effective and economic constituent of adsorbents for wastewater treatment. *Molecules*, ۲۷(۲۴), ۸۶۸۹ .
- Han, W., Zhang, H.-P., Tavakoli, J., Campbell, J., & Tang, Y. (۲۰۱۸). Polydopamine as sizing on carbon fiber surfaces for enhancement of epoxy laminated composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 107*, ٦۲٦-٦۳۲ .
- Hu, Q., Chu, L., Dai, Y., Zhang, L., Kang, X., & Wang, X. (۲۰۲٤). Preparation of Polydopamine-Based Electrospun Nanofibers as an Efficient Adsorbent for Solid-Phase Extraction of Trace Mycotoxins Followed by HPLC. *ACS Applied Polymer Materials, 6*(۱۸), ۱۱۱۹۳-۱۱۲۰۴ .
- Huang, Q., Chen, J., Liu, M., Huang, H., Zhang, X., & Wei, Y. (۲۰۲۰). Polydopamine-based functional materials and their applications in energy, environmental, and catalytic fields: State-of-the-art review. *Chemical Engineering Journal, 387*, ۱۲٤۰۱۹ .
- Jian, N., Dai, Y., Wang, Y., Qi, F., Li, S., & Wu, Y. (۲۰۲۱). Preparation of polydopamine nanofibers mat as a recyclable and efficient adsorbent for simultaneous adsorption of multiple tetracyclines in water. *Journal of Cleaner Production, 320*, ۱۲۸۸۷۵ .

- Kikuchi, T., & Tanaka, S. (۲۰۱۲). Biological removal and recovery of toxic heavy metals in water environment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 42*(۱۰), ۱۰۰۷-۱۰۵۷ .
- Kim, H., Jalili, R., Spinks, G. M., Wallace, G. G., & Kim, S. J. (۲۰۱۷). High-strength graphene and polyacrylonitrile composite fiber enhanced by surface coating with polydopamine. *Composites science and technology, 149*, ۲۸۰-۲۸۵ .
- Kumar, M., Isloor, A. M., Nayak, M., Todeti, S. R., Padaki, M., & Ismail, A. F. (۲۰۲۳). Hydrophilic polydopamine/polyvinylpyrrolidone blended polyphenylsulfone hollow fiber membranes for the removal of arsenic-V from water. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 11*(۵), ۱۱۰۳۵۸ .
- Lee, S.-Z., Chang, L., Yang, H.-H., Chen, C.-M., & Liu, M.-C. (۱۹۹۸). Adsorption characteristics of lead onto soils. *Journal of Hazardous Materials, 63*(۱), ۳۷-۴۹ .
- Li, H., Yuan, Z., Ding, S., & Yuan, J .(۲۰۲۳) .Adsorption of lead ions by magnetic carbon: Comparison of magnetic carbon properties and modification methods. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 11*(۳), ۱۱۰۱۳۶ .
- Li, W., Chao, S., Li, Y., Bai, F., Teng, Y., Li, X., . . . Wang, C. (۲۰ .(۲۲Dual-layered composite nanofiber membrane with Cu-BTC-modified electrospun nanofibers and biopolymeric nanofibers for the removal of uremic toxins and its application in hemodialysis. *Journal of Membrane Science, 642*, ۱۱۹۹۶٤ .
- Li, Y., Zhao, R., Chao ,S., Sun, B., Wang, C., & Li, X. (۲۰۱۸). Polydopamine coating assisted synthesis of MnO۲ loaded inorganic/organic composite electrospun fiber adsorbent for efficient removal of Pb۲+ from water. *Chemical Engineering Journal, 344*, ۲۷۷-۲۸۹ .
- Lin, C.-f., Chung, L.-h., Lin, G.-y., Chang, M.-C., Lee, C.-Y., & Tai, N.-H. (۲۰۲۰). Enhancing the efficiency of a forward osmosis membrane with a polydopamine/graphene oxide layer prepared via the modified molecular layer-by-layer method. *ACS omega, 5*(۳۰), ۱۸۷۳۸-۱۸۷۴۵ .
- Liu, S., Pan, J., Cao, J., Dai, X., Meng, M., Wu, R., . . . Yan, Y. (۲۰۱٦). Simultaneous removal of Pb (II) and ۲, ٤, ٦-trichlorophenol by a hierarchical porous PU@ PDA@ MSNs sponge with reversible "shape memory" effect. *Chemical Engineering Journal, 284* .۲۰-۱۰ ,
- Lu, S., Yu, J., Cheng, Y., Wang, Q., Barras, A., Xu, W., . . . Boukherroub, R. (۲۰۱۷). Preparation of silver nanoparticles/polydopamine functionalized polyacrylonitrile fiber paper and its catalytic activity for the reduction ٤-nitrophenol. *Applied Surface Science, 411*, ۱۶۳-۱۶۹ .
- Pan, D. a., Li, L., Wu, Y., Liu, T., & Yu, H. (۲۰۱۸). Characteristics and properties of glass-ceramics using lead fuming slag. *Journal of Cleaner Production, 175*, ۲۵۱-۲۵٦ .
- Popov, S. R., & Vučinić, D. (۱۹۸۸). Influence of lead ions on the adsorption characteristics of galena in flotation. *Colloids and surfaces, 30*(۲), ۳۸۷-٤۰۰ .
- Punia, P., Bharti, M. K., Dhar, R., Thakur, P., & Thakur, A. (۲۰۲۲). Recent advances in detection and removal of heavy metals from contaminated water. *ChemBioEng reviews, 9*(٤), ۳۵۱-۳۶۹ .
- Sall, M. L., Diaw, A. K. D., Gningue-Sall, D., Efremova Aaron, S., & Aaron, J.-J. (۲۰۲۰). Toxic heavy metals: impact on the environment and human health, and treatment with conducting organic polymers, a review .*Environmental Science and Pollution Research, 27*, ۲۹۹۲۷-۲۹۹۴۲ .

- Saravanan, A., Kumar, P. S., Hemavathy, R., Jeevanantham, S., Harikumar, P., Priyanka, G., & Devakirubai, D. R. A. (۲۰۲۲). A comprehensive review on sources, analysis and toxicity of environmental pollutants and its removal methods from water environment. *Science of The Total Environment, 812*, ۱۵۲٤٥٦ .
- Shahzadi, I., Khan, Z. H., Akram, W., Khan, W. U., Ahmad, A., Yasin, N. A., & Yujie, L. (۲۰۲۲). Heavy metal and organic pollutants removal from water using bilayered polydopamine composite of sandwiched graphene Nanosheets: One solution for two obstacles. *Separation and Purification Technology, 280*, ۱۱۹۷۱۱ .
- Taylor, J., Bennett, S., & Heyding, A. (۱۹٦٥). Physical properties of α and γ arsenic .*Journal of Physics and Chemistry of Solids, 26*(۱), ٦۹-۷٤ .
- Tripathy, M., Padhiari, S., Ghosh, A., & Hota, G. (۲۰۲۳). Polyacrylonitrile support impregnated with amine-functionalized graphitic carbon nitride/magnetite composite nanofibers towards enhanced arsenic remediation: a mechanistic approach. *Journal of Colloid and Interface Science, 640*, ۸۹۰-۹۰۷ .
- Viscusi, G. (۲۰۲٤). applications of nanofibers and their composites. *Polymeric Nanofibers and their Composites: Recent Advances and Applications*, ۱۸٥ .
- Vukašinović-Pešić, V. L., Đikanović, M., Blagojević, N. Z., & Rajaković, L. V. (۲۰۰٥). The source, characteristics and distribution of arsenic in the environment. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly, 11*(۱), ٤٤-٤۸ .
- Wang, H., Han, Z., Liu, Y ,Zheng, M., Liu, Z., Wang, W., . . . Niu, L. (۲۰۲۲). Recyclable composite membrane of polydopamine and graphene oxide-modified polyacrylonitrile for organic dye molecule and heavy metal ion removal. *Membranes, 12*(۱۰), ۹۳۸ .
- Wojciechowska, A., & Lendzion-Bieluń, Z. (۲۰۲۰). Synthesis and characterization of magnetic nanomaterials with adsorptive properties of arsenic ions. *Molecules, 25*(۱۸), ٤۱۱۷ .
- Xie, P., Zahoor, F., Iqbal, S. S., Ullah, S., Noman, M., Din, Z. U., & Yang, W. (۲۰۲۲). Elimination of toxic heavy metals from industrial polluted water by using hydrophytes. *Journal of Cleaner Production, 352*, ۱۳۱۳٥۸ .
- Yang, N., Yang, T., Wang, W., Chen, H., & Li, W. (۲۰۱۹). Polydopamine modified polyaniline-graphene oxide composite for enhancement of corrosion resistance. *Journal of Hazardous Materials, 377*, ۱٤۲-۱٥۱ .
- Yang, X., Pan, Y., Ding, L., Wu, B., Wang, J., & Ren, H. (۲۰۲۳). Polydopamine/graphite sheet electrode for highly efficient electrocatalytic hydrogen peroxide generation and bisphenol A removal .*Chemical Engineering Journal, 454*, ۱٤۰۰۲٦ .
- Yang, X., Zhou, Y., Sun, Z., Yang, C., & Tang, D. (۲۰۲۱a). Polydopamine assists the continuous growth of zeolitic imidazolate framework-۸ on electrospun polyacrylonitrile fibers as efficient adsorbents for the improved removal of Cr (VI). *New Journal of Chemistry*, ۴٥(۳۴), ۱٥٥۰۳-۱٥٥۱۳ .
- Yang, X., Zhou, Y., Sun, Z., Yang, C., & Tang, D. (۲۰۲۱b). Synthesis and Cr adsorption of a super-hydrophilic polydopamine-functionalized electrospun polyacrylonitrile. *Environmental Chemistry Letters, 19*, ۷٤۳-۷٤۹ .
- Zhang, K., Cheung, W., & Valix, M. (۲۰۰٥). Roles of physical and chemical properties of activated carbon in the adsorption of lead ions. *Chemosphere, 60*(۸), ۱۱۲۹-۱۱٤۰ .