نانو و صنعت

مجموعه گزارش‌های صنعتی فناوری نانو • گزارش شماره ۲۷۰ حوزه آب، پساب و محیط زیست

حل مشکل پساب‌های صنعتی در آبکاری کروم با استفاده از فناوری نانو

INDnano.ir

ستاد توسعه فناوری‌های نانو و میکرو • www.nano.ir

شناسنامه

ستاد توسعه فناوری‌های نانو و میکرو
گروه رصد و تولید محتوای بخش ترویج صنعتی

طراحی و اجرا: توسعه فناوری مهرویژن
نظارت: داود قرایلو
صندوق پستی: ۳۴۴-۱۴۵۶۵
پست الکترونیک: IND@nano.ir
سال انتشار: ۱۴۰۳
نویسنده: شرکت پیشگامان فناوری دریچه

تلفن: ۰۲۱-۶۳۱۰۰
نمابر: ۰۲۱-۶۳۱۰۶۳۱۰
پایگاه اینترنتی: www.nano.ir
www.INDnano.ir
اینستاگرام نانو و صنعت: @INDnano.ir

محتواهای صنعتی و فناورانهٔ خود را از طریق پست الکترونیک و پایگاه اینترنتی نانو و صنعت (INDnano.ir) ارسال نمایید.

فهرست مطالب

آبکاری ۳
آبکاری کروم ۳
پساب آبکاری ۴
تصفیه پساب آبکاری ۵
تصفیه پساب آبکاری کروم ۷
فناوری نانو در تصفیه پساب آبکاری کروم ۹
نانوکاتالیست‌ها ۱۰
نانوجاذب‌ها ۱۱
نانوغشاها ۱۲
بازیافت نانومواد از پساب آبکاری ۱۳
پی‌نوشت‌ها ۱۵
منابع ۱۵

آبکاری

مواد ساخته شده از فلزات، آلیاژها و سایر ترکیبات همواره در معرض خوردگی، اکسیداسیون، ضربه، فشار، سایش و سایر شرایط دشوار فیزیکی قرار دارند، بسیاری از این مواد از مقاومت مناسب در برابر این شرایط برخوردار نیستند. یکی از راه‌های متداولی که برای بهبود این خواص صورت می‌گیرد، آبکاری است (شکل ۱). آبکاری، فرآیند اندود کردن یک فلز بر روی فلز دیگر به کمک هیدرولیز است. به این منظور عموماً لایه‌ای از فلز و یا آلیاژی که دارای خواص و مقاومت بهتری در برابر این شرایط است بر روی محصول موردنظر نشانده می‌شود. از این فرآیند در لوازم تزئینی یا جلوگیری از خوردگی فلزات استفاده می‌شود. این روش به کارخانه‌های سازنده کمک می‌کند تا از فلزات ارزان‌قیمت همچون روی و استیل در بیشتر محصولات خود استفاده کنند و برای زیبایی، حفاظت و دیگر خواص موردنظر، روکشی از فلزات دیگر بر آن‌ها قرار دهند. سطوحی که روکش فلزات بر روی آن‌ها قرار می‌گیرد حتی می‌توانند از جنس پلاستیک نیز باشند. معمولاً آبکاری با فلزاتی نظیر نیکل، کروم، مس، روی، کادمیوم، قلع، نقره، طلا و دیگر فلزات انجام می‌شود [۱].

شکل ۱- فرآیند آبکاری شیمیایی

آبکاری کروم

آبکاری کروم یک فرآیند لایه‌نشانی بسیار پرکاربرد است که فهرست بلندی در رابطه با مزایای آن وجود دارد. آبکاری کروم بسیار پرجلوه بوده و با خواص پوششی مقاومت بالایی در مقابل خوردگی و سایش ارائه می‌دهد. سختی و مقاومت این آبکاری در برابر اکسیدکننده‌ها در صنایع مختلف بسیار حائز اهمیت است. کروم یک فلز و یکی از عناصر شیمیایی طبیعی است که استفاده از آن به فرم جامد کاربردی نیست اما ارزش آن وقتی مشخص می‌شود که به صورت یک لایه روی سایر فلزات مانند آلومینیوم، فولاد ضدزنگ، برنج، مس یا پلاستیک قرار می‌گیرد.

آبکاری با کروم به طور کلی به آبکاری سخت و آبکاری تزئینی طبقه‌بندی می‌شود. آبکاری سخت و ضخیم را روی مواد اولیه با چسبندگی ثابت اعمال می‌کند و به آن آبکاری صنعتی کروم یا کروم کاری نیز می‌گویند.

کروم کاری تقریباً برای پردازش انواع فلز از جمله فولاد، مس، آلیاژ فولاد، آلیاژ آلومینیوم، آلیاژ روی، تنگستن و... کاربرد دارد. در آبکاری تزئینی کروم، مس یا نیکل به‌عنوان یک لایه میانی که روی آن آبکاری نازک کروم انجام می‌شود، مورداستفاده قرار می‌گیرد. لایه میانی (آبکاری مس یا نیکل)، با مقاومت کمتر در برابر سایش چسبندگی کمتری نسبت به آبکاری با کروم دارد و به‌سرعت از بین می‌رود.

آبکاری بدین ترتیب انجام می‌شود که یون‌های محلول کروم به صورت لایه‌ای نازک بر روی جسم فلزی دیگر رسوب می‌دهند. این کار در یک محلول الکترولیت حاوی اسید کرومیک و اسید سولفوریک انجام می‌شود بدین ترتیب که جسم موردنظر را به کاتد یا قطب منفی وصل کرده و فلز کروم را در آند یا قطب مثبت قرار می‌دهند. پس از شروع واکنش فلز کروم در آند خورده شده و به صورت لایه نازک روی فلز کاتد رسوب می‌کند. آبکاری با کروم برای بسیاری از وسایل خانگی و قسمت‌های براق اتومبیل، برخی از ابزارها و وسایل الکتریکی، چرخ‌دنده‌ها، ماشین‌های بسته‌بندی و بسیاری از وسایل دیگر صورت می‌گیرد تا علاوه بر براق شدن، زیبایی و افزایش استحکام به جلوگیری از زنگ زدن آن‌ها در مقابل رطوبت کمک کند [۲].

اگرچه آبکاری کروم معمولاً با استفاده از کروم شش ظرفیتی انجام می‌شود ولی به‌تازگی از کروم سه ظرفیتی نیز در این فرآیند بهره برده می‌شود. فرآیندهای کروم سه ظرفیتی نسبت به کروم شش ظرفیتی بخار کمتری تولید می‌کند، بنابراین نیازی به دستگاه تصفیه گازی نیست. همچنین تولید پساب در این فرآیند دَه برابر کاهش می‌یابد چون غلظت کروم سه ظرفیتی یک دهم غلظت آن در فرآیندهای شش ظرفیتی است. علاوه بر این محلول سریع‌تر نفوذ کرده و در نتیجه محلول کمتری همراه قطعات خارج می‌شود. درنهایت اینکه کروم موجود در پساب آبکشی به صورت سه ظرفیتی است و سمیت کمتری دارد، بنابراین عملیات گران مراحل احیاسازی کروم شش ظرفیتی حذف می‌شود. برخی فرآیندهای کروم سه ظرفیتی حدود سه برابر سریع‌تر از فرآیندهای کروم شش ظرفیتی است. این امر راندمان کاری را افزایش می‌دهد. بالا بودن قدرت پرتابی و پوشش‌دهی، سوختگی کم، تحمل قطع و وصل شدن و همین‌طور ریپل جریان تولید ضایعات را کاهش و بازده را افزایش می‌دهد [۳].

پساب آبکاری

در کنار تمام مزایایی که فرآیند آبکاری به همراه دارد، پساب تولید شده در این روش بسته به نوع فرآیند عموماً حاوی مقادیر زیادی از عناصر سنگین همچون کروم، نیکل، روی و... هستند که اگر بدون خنثی‌سازی و حذف این فلزات در محیط زیست رها شود، سبب خطرات محیط زیستی به‌ویژه برای آب‌های زیرزمینی می‌شود. این مشکل تا حدی جدی است که تعدادی از کشورهای اروپایی و پیشرفته مجوز انجام این فرآیند صنعتی را در کشور خود ارائه نمی‌کنند. همچنین بر طبق آمار سازمان جهانی بهداشت، سالیانه دو میلیون مرگ به علت آلودگی آب‌های زیرزمینی در کشورهای درحال‌توسعه اتفاق می‌افتد [۴ و ۵].

در ایران این فرآیند با توجه به نیازی که در صنایع مختلف به آن است بسیار زیاد انجام می‌گیرد. شهرک‌های صنعتی در کلان شهرها و همچنین کارگاه‌های کوچک و بزرگ حتی در بافت شهری وجود دارند که علاوه بر تولید میزان زیادی پساب، متأسفانه در موارد بسیار این پساب‌ها در سفره‌های زیرزمینی رها می‌شوند. بر طبق آمار انجمن آبکاران ایران حدود ۴۰۰۰ کارگاه آبکاری در شهر تهران فعال هستند. با بررسی‌هایی که انجام شده حدود ۲ هزار واحد متخلف آبکاری زیرزمینی در این شهر وجود دارند. کارشناسان می‌گویند یک لیتر پساب آغشته به سه فلز

سنگین و سمی این کارگاه‌ها می‌تواند تا ۳۰۰ سال آب زیرزمینی را در آن نقطه آلوده کند. در این زمینه بیشترین نگرانی مربوط به ۵۰۰ حلقه آب شربی است که در نقاط مختلف تهران پراکنده شده‌اند [۶]. همچنین وجود کروم در پساب‌های صنعتی به یک مشکل بزرگ در سراسر جهان تبدیل شده است زیرا کروم شش ظرفیتی (VI) به دلیل توانایی آن در تولید گونه‌های اکسیژن فعال در سلول‌ها برای حیوانات بسیار سمی است. هنگامی که پساب آبکاری کروم به آب‌های جاری یا زیرزمینی نفوذ می‌کند، کروم شش ظرفیتی وارد زنجیره غذایی می‌شود و در نتیجه در یک زنجیره تکثیر شده به انسان می‌رسد. این ماده باعث بیماری‌هایی همچون درماتیت، سرطان ریه، آسیب به کلیه و معده، تحریک دستگاه تنفسی و چشم می‌شود [۷].

■ تصفیه پساب آبکاری

پساب‌های تولید شده از عملیات آبکاری که فاقد سیانید و کروم شش ظرفیتی هستند معمولاً حاوی مواد قلیایی ناشی از مرحله چربی‌گیری، مواد اسیدی ناشی از مرحله اکسیدزدایی و انواع یون‌های فلزی مانند آهن و مس ناشی از مرحله اکسیدزدایی، انواع فلزات سنگین مانند روی ناشی از مرحله آبکاری و کروم سه ظرفیتی ناشی از مرحله کروماته هستند. در پساب‌های حاوی سیانید و کروم شش ظرفیتی یک مرحله مقدماتی به این سیستم نیز اضافه می‌شود. به‌طور کلی روش‌های معمول استفاده در تصفیه فاضلاب صنایع آبکاری شامل روش‌های ترسیب شیمیایی، تبادل یونی، الکترودیالیز و فیلتراسیون هستند [۷].

□ ترسیب شیمیایی

متداول‌ترین روش در تصفیه فاضلاب صنایع آبکاری روش ترسیب شیمیایی است. در این روش ابتدا با تنظیم pH به‌وسیله اسید یا باز در محدوده مناسب و همچنین در صورت لزوم اضافه نمودن مواد منعقدکننده و کمک منعقدکننده، فلزات سنگین مانند روی، کروم، آهن و مس رسوب نموده و پس از انجام یک مرحله ته‌نشینی و یا عبور از یک سیستم فیلتراسیون فاضلاب تصفیه شده در حد استاندار محیط‌زیست قابل تخلیه به محیط خواهد بود. البته در پساب‌های حاوی سیانید و کروم شش ظرفیتی یک مرحله مقدماتی به این سیستم اضافه می‌شود. در صورتی که ترسیب با اضافه نمودن مواد شیمیایی انجام شود به آن ترسیب شیمیایی گفته می‌شود و اگر به وسیله الکترود انجام شود به آن روش ترسیب الکتروشیمیایی می‌گوییم.

این روش به دلیل وجود عوامل رسوب‌دهنده (آهک و سنگ آهک) در اکثر کشورها نسبت به دیگر روش‌ها، بیشتر انجام می‌شود. رسوبات فلزی تشکیل شده با استفاده از فرآیند جداسازی جامد مانند انعقاد، ته‌نشینی یا فیلتراسیون بازیابی می‌شوند. از مزایای این روش می‌توان به بهره‌برداری ساده و هزینه سرمایه پایین به دلیل در دسترس بودن عوامل رسوب‌دهنده اشاره کرد، در حالی که از معایب آن می‌توان به تولید مقدار بیش از حد لجن که نیاز به تصفیه بیشتر برای بازیابی فلزات، سرعت رسوب آهسته فلزات و ته‌نشینی ضعیف مواد اشاره کرد. تجمع رسوبات فلزی و اثرات محیط‌زیستی بعدی این روش و نیاز به دفع لجن نیز در این فرآیند اتفاق می‌افتد [۸ و ۹].

□ تبادل یونی

فرآیندی که در آن یون‌های موجود در فاضلاب توسط یک بستر رزینی از آن جدا می‌شوند و یون‌های دیگری

جایگزین می‌شوند. تصفیه پساب به روش تبادل یونی یک فرایند جذب است. یون‌هایی که از درون محلول به سمت سطح رزین می‌آیند، دارای تمایل بیشتری به واکنش با عوامل سطحی رزین بوده و به آن‌ها متصل می‌شوند. این روش نیاز به پیش‌تصفیه دارد که جامدات معلق و مواد مختل‌کننده رزین حذف شوند. همچنین برای جلوگیری از اختلالات ناشی از مواد آلی روی عملکرد رزین، بایستی فاضلاب قبل از ورود به ستون رزین از بستر کربن فعال عبور داده شود تا مواد آلی موجود در آن حذف شود [۸].

الکترودیالیز

در این روش ترکیبات یونی موجود در فاضلاب با استفاده از غشاهای نیمه‌تراوا انتخابی به کمک پتانسیل الکتریکی از فاضلاب جدا می‌شود. الکترودیالیز[1] یک فرایند تصفیه غشایی است که در آن یون‌ها تحت تأثیر پتانسیل الکتریکی از یک غشای نیمه‌تراوا عبور می‌کنند. این غشاها در دو نوع کاتیونی و آنیونی هستند و این بدین معناست که یون‌های مثبت و منفی به ترتیب از آن‌ها عبور می‌کنند. این ممبران‌ها اجازه عبور هر دو نوع یون را نمی‌دهند. جداسازی یون‌ها در سیستم الکترودیالیز وابسته به بار ذرات است نه اندازه آن‌ها و از این فرایند می‌توان برای جداسازی مولکول‌هایی با بارهای مختلف و اندازه یکسان استفاده کرد. ممبران های کاتیونی پلی الکترولیت‌هایی با بار منفی هستند. به همین دلیل یون‌های با بار منفی را دفع می‌کنند و به یون‌های مثبت اجازه می‌دهند که از آن‌ها عبور کنند؛ ممبران‌های آنیونی نیز دارای بار مثبت هستند و به یون‌های منفی اجازه عبور می‌دهند. لازم به ذکر است که ممبران‌های کاتیونی از جنس پلی‌استایرن سولفونات و ممبران‌های آنیونی از جنس پلی‌استایرن با آمونیوم کواترنری هستند. از فرایند الکترودیالیز تنها برای حذف یون‌ها می‌توان استفاده کرد و ذرات معلق که بار ندارند توسط سیستم الکترودیالیز حذف نمی‌شوند. بنابراین قبل از ورود آب به سیستم الکترود دیالیز باید برخی فرایندهای پیش‌تصفیه انجام گیرند. ذرات معلق با قطر بیش از ۱۰ میکرومتر نیز باید پیش از الکترودیالیز حذف شوند در غیر این صورت به حفرات ممبران می‌چسبند. همچنین برخی مواد مانند آنیون‌های بزرگ آلی، کلوییدها، اکسیدهای آهن و اکسیدهای مکتر می‌توانند باعث خنثی‌سازی سطح ممبران شوند و خاصیت انتخابی غشاهای کاتیونی و آنیونی را دچار مشکل کنند. از فرآیندهای پیش‌تصفیه که از بروز چنین مواردی جلوگیری می‌کنند می‌توان به فیلتراسیون کربن فعال برای مواد آلی لخته‌کننده‌ها برای کلوییدها و تکنیک‌های فیلتراسیون اشاره کرد [۸ و ۹].

فیلتراسیون و اسمز معکوس

در این روش فاضلاب با استفاده از تئوری اسمز معکوس[2] و با به‌کارگیری غشا نیمه‌تراوا تصفیه می‌شود. در فرآیند اسمز معکوس پساب با فشار زیادی به ممبران وارد می‌شود. فیلتر ممبران در واقع نوعی غشای انتخاب‌گر محسوب می‌شود که برحسب ساختار منافذ خود اجازه عبور مواد مشخص را داده و از عبور سایر مواد جلوگیری می‌کند. در این فرآیند منافذ ریز ممبران غشایی فقط به مولکول‌های آب اجازه عبور می‌دهد، ذرات بزرگ‌تر از آب از سطح غشا دفع شده و وارد جریان پساب خواهند شد. سیستم‌های اسمز معکوس علاوه بر غشای نیمه‌تراوا دارای یک فیلتر الیافی نیز هستند که ممبران را در برابر ذرات رسوب بزرگ محافظت می‌کنند. در نهایت فیلتر کربنی نیز هرگونه آلاینده‌ای که ممکن است وارد ممبران شود را حذف می‌کند (شکل ۲). از مزایای این روش می‌توان به این

نکته اشاره کرد که فیلترهای تصفیه اسمز معکوس غالباً می‌توانند تا ۹۹٪ TDS [۳] (کل مواد جامد محلول) را حذف کنند. نمونه‌هایی از آلاینده‌های حذف شده توسط سیستم اسمز معکوس عبارت است از فلوراید، نیترات‌ها، سولفات‌ها، آرسنیک، باکتری‌ها و سایر ناخالصی‌های مضر در زمینه سلامت بدن. از معایب این سیستم نیز نیاز به تعویض کارتریج‌ها، فیلترهای کربنی، فیلترهای پیش‌تصفیه رسوب‌گیر، فیلترهای پس تصفیه و همچنین ممبران اسمز معکوس است که باید هر چند وقت یک بار جایگزین شوند. استفاده از فناوری غشایی به تنهایی نمی‌تواند مشکل آلودگی را حل کند. روش جداسازی غشایی باید با فناوری‌های دیگر ترکیب شود تا بهترین نتایج حاصل شود [۸ و ۹].

شکل ۲- دستگاه تصفیه به روش اسمز معکوس

تصفیه پساب آبکاری کروم

در تصفیه این نوع پساب تمرکز اصلی بر روی حذف کروم شش ظرفیتی و خنثی کردن آن است که سبب شده است بسیاری از فرآیندهای مرسوم در حال حاضر برای حذف کروم (VI) از پساب‌های صنعتی استفاده شوند.

روش ترسیب و کاهش

این فرآیندها عمدتاً شامل رسوب دادن کروم (VI) و یا کاهش کروم سمی (VI) به کروم (III) است زیرا حالت سه ظرفیتی کروم به طور قابل‌توجهی سمیت کمتری دارد و همچنین به‌عنوان یک ماده کاربردی در صنایع شناخته می‌شود. روش کاهش را می‌توان از نظر شیمیایی با استفاده از انواع ترکیبات گوگرد یا آهن مانند آهن دو ظرفیتی، سولفید آهن آمورف، پلی‌سولفید کلسیم، تیوسولفات سدیم و... به دست آورد. مشکل اصلی احیای شیمیایی تولید مقدار زیادی لجن سمی است. برخی از روش‌های دیگر حذف کروم (VI) شامل فیلتراسیون غشایی، استخراج با حلال، شستشو و روش‌های الکتروکینتیک است. این روش‌ها اگرچه معمولاً مورداستفاده قرار می‌گیرند ولی محدودیت‌های خاصی دارند. مشکل اصلی روش‌های تصفیه مرسوم، هزینه بالاست که بسیاری از صنایع را از اتخاذ این روش‌ها در قبال پساب تولیدی خود منصرف می‌کند [۱۰].

روش جذب

یکی دیگر از روش‌های رایج مورداستفاده، جذب کروم (VI) روی سطوح مختلف مانند دی‌اکسید تیتانیوم، کربن فعال، زئولیت‌ها و بسیاری موارد دیگر است. همچنین این روش در برخی موارد ممکن است کاهش به کروم (III) را نیز به دنبال داشته باشد. جذب مؤثرترین و مقرون‌به‌صرفه‌ترین راه‌حل برای اصلاح کروم (VI) است، به‌خصوص اگر با بازیافت مناسب جاذب همراه باشد. در ادامه به جاذب‌های مهم در روش جذب پرداخته می‌شود:

کربن فعال: کربن فعال یکی از این جاذب‌های بسیار مؤثر است که شبیه زغال دانه‌ای یا پودری است و دارای تخلخل، سطح داخلی و استحکام مکانیکی بالایی است. کربن فعال به‌ویژه در غلظت‌های پایین پساب بسیار خوب عمل می‌کند به طوری که بر طبق گزارش‌ها کربن فعال بهبودیافته با کلرید روی، ۹۹ درصد کارایی را در حذف کروم (VI) از فاضلاب نشان داده است. با این حال در استفاده از این ماده به دلیل قیمت بالا محدودیت‌هایی وجود دارد.

سیلیس: از روش‌های جذب، استفاده از جاذب‌های مبتنی بر سیلیس است که هم قابلیت کاهش و هم جذب در یک جامد را دارد. این جاذب‌ها که عمدتاً توسط فرآیند سل-ژل تهیه می‌شوند، از یک پایه سیلیسی و گروه‌های آلی متصل هستند که قادر به کمپلکس شدن با یون فلزی مربوطه هستند. وجود گروه‌های هیدروکسیل در سیلیکاژل امکان اصلاح آسان برای عملکرد مؤثر را فراهم می‌کند. این جاذب‌ها به دلیل داشتن هندسه منافذ مشخص، مساحت سطح بزرگ، تخلخل بالا، استحکام مکانیکی خوب، مقاومت حرارتی بالا، پایداری در محدوده وسیعی از pH و نامحلول در آب، از نظر محیط زیستی بی‌خطر و ارزان‌قیمت هستند که این ویژگی‌ها آن را به ماده‌ای سودمند در تصفیه این نوع پساب تبدیل کرده است. گزارش شده است که جاذب سیلیس عامل‌دار شده با اسید سولفونیک، کروم را با سرعت ۷۲٫۸ میلی‌گرم بر گرم در pH=۳ حذف می‌کند.

داربست فلزی ـ آلی: مدل پیشرفته‌تر نسبت به رزین‌های تبادل یونی که به‌طورمعمول مورداستفاده قرار می‌گیرند، استفاده از داربست‌های فلزی-آلی (MOFs)[۲] است، که اساساً خوشه‌هایی از کاتیون‌های فلزی هستند که به طور هماهنگ به پیوندهای آلی پلی‌توپیکی (چند شکلی) متصل شده‌اند. یک MOF مبتنی بر مس تحت شرایط بهینه می‌تواند ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر کروم (VI) را در ۱۵ دقیقه در حضور فرمیک اسید (HCOOH) کاهش دهد و تا چهار چرخه متوالی استفاده شود.

زئولیت: زئولیت‌ها که به‌عنوان غربال‌های مولکولی نیز نامیده می‌شوند، مواد آلومینوسیلیکات هیدراته هستند که دارای چارچوب‌های سه‌بعدی از SiO_4 و AlO_4 چهار وجهی هستند که ساختار قفس مانند یا کانالی به آن می‌دهد. شبکه دارای بار منفی خالص به دلیل جایگزینی هم شکل Si^{4+} با Al^{3+} است و این توسط یک کاتیون قابل تعویض (سدیم، پتاسیم یا کلسیم) متعادل می‌شود. زئولیت ها تمایل زیادی به کروم (VI) یا کروم (III) ندارند زیرا به صورت آنیون در فاز آبی وجود دارند. با این حال، این را می‌توان با اصلاح مناسب شبکه زئولیت تغییر داد. زئولیت طبیعی را می‌توان توسط سورفکتانت‌های کاتیونی اصلاح کرد. ترکیب کردن مواد احیاکننده مانند آهن دوظرفیتی به زئولیت‌های طبیعی امکان جذب و کاهش متعاقب کروم (VI) را فراهم می‌کند. چنین سیستمی نرخ ۹۰ درصدی حذف کروم شش ظرفیتی را دارد اما نیاز به مراحل گستردهٔ شستشوی آهن دارد. زئولیت طبیعی همچنین می‌تواند با بیوفیلم‌ها برای حذف کروم (VI) پوشش داده شود. به‌عنوان مثال، زئولیت NaY پوشش داده شده با یک بیوفیلم، نرخ جذب کروم شش ظرفیتی را به میزان ۳ میلی‌گرم در گرم زئولیت نشان داده است. بیوفیلم

قادر است کروم (VI) را به کروم (III) کاهش دهد که با تبادل یونی در زئولیت حفظ می‌شود.

مواد زیستی: در جذب زیستی، باکتری‌هایی مانند سودوموناس، باسیلوس، انتروباکتر، دینوکوکوس، شوانلا، آگروباکتر، اشریشیا، ترموس[5] نسبت به کروم شش ظرفیتی مقاوم هستند و می‌توانند برای اصلاح کروم (VI) استفاده شوند. با این حال، باکتری‌ها به شکل سلول‌های پلانکتون در اصلاح کروم (VI) بی‌اثر هستند زیرا غلظت بالای کروم (VI) می‌تواند سلول‌ها را از بین ببرد. از سوی دیگر، باکتری‌ها به شکل بیوفیلم تحمل بیشتری نسبت به کروم (VI) و جذب بهتر نشان می‌دهند. در غلظت‌های بالا جذب زیستی یک روش سودمند است زیرا هزینه کمتری دارد، بسیار مؤثر است، هیچ‌گونه عوارض جانبی سمی ندارد، جاذب زیستی را می‌توان بازسازی کرد و فلز جذب شده را می‌توان برای استفاده بعدی بازیابی کرد. البته در مواردی هم لازم است تا تحقیقات بیشتری بر روی تثبیت کروم (III) به دست آمده پس از کاهش کروم (VI) توسط بیوفیلم‌ها متمرکز انجام شود زیرا کروم (III) نامحلول می‌تواند کمپلکس‌های ارگانو-کروم سه ظرفیتی را تشکیل دهد که برای سلول‌ها سمی است.

هزینه اولیه اکثر جاذب‌ها بالاست، به خصوص اگر نیاز به تصفیه اولیه داشته باشند. با این حال، در درازمدت، این تکنیک‌ها مقرون‌به‌صرفه هستند. همچنین استفاده از تکنیک‌های سبز مانند زیست‌توده، هزینه اولیه مواد شیمیایی را تا حد زیادی کاهش می‌دهد.

مشکل عمده جاذب‌های بالک، بازده پایین به دلیل سطح در دسترس کم آن‌هاست. بنابراین استفاده از جاذب‌های با ویژگی‌های نانو امکان دسترسی بیشتر پساب صنعتی به جاذب را فراهم می‌کند که منجر به راندمان بالاتر می‌شود. با این حال، اطلاعات کمی در مورد پتانسیل استفاده از نانوذرات به‌عنوان جاذب برای حذف کروم شش ظرفیتی از پساب‌های صنعتی وجود دارد [۱۰-۱۲].

فناوری نانو در تصفیه پساب آبکاری کروم

حالت شش ظرفیتی کروم که عمدتاً به‌عنوان یون کرومات چهار وجهی در محلول آبی (CrO_4^{2-}) وجود دارد، قادر به نفوذ به غشای سلولی است و این نفوذ غشا ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر بیشتر از شکل سه ظرفیتی آن رخ می‌دهد. هنگامی که در داخل سلول قرار می‌گیرد، کروم (VI) به صورت آنزیمی و یا غیرآنزیمی به واسطه‌های واکنشی کروم (V)، کروم (IV) و کروم (III) کاهش می‌یابد که قادر به تولید گونه‌های اکسیژن فعال هستند. در شرایط فیزیولوژیکی، تولید بیش از حد اکسیژن فعال باعث آسیب به پروتئین‌های سلولی، لیپیدها و DNA می‌شود.

با بررسی‌هایی که در روش‌های مرسوم ذکر شده در بخش‌های قبل انجام شد، مشاهده شد که این فرآیندها علاوه بر مزایا و برتری‌هایی که هر روش به همراه دارد، با خود مشکلاتی همچون هزینه بالای سرمایه و عملیات، مشکلات تولید/دفع لجن، تعویض فیلترها، بازده پایین، قیمت مواد بالا و... را دارد که همه آن‌ها سبب شده است تا استفاده از این روش‌های مرسوم ناکارآمد به نظر برسند و کارگاه‌های آبکاری تمایلی به تصفیه پساب خود نداشته باشند. از طرفی مشکلات و خطرات این پساب‌ها باعث شده است که نتوان به راحتی از این موضوع گذر کرد. بنابراین ضروری به نظر می‌رسد تا فناوری‌های روز و پیشرفته دنیا برای حل این مشکل به کارگرفته شوند. فناوری نانو یکی از این فناوری‌هایی است که به تازگی در این عرصه ورود پیدا کرده است. روش نانوپالایی (نانوفیلتراسیون) مؤثرتر از روش‌های مرسوم تصفیه است و در درازمدت برای صنعت مقرون‌به‌صرفه است. امروزه فناوری نانو در زمینه‌های مختلف به یکی از کارآمدترین فناوری‌های قرن بیست‌ویکم تبدیل شده است. نانومواد با داشتن خواص بی‌نظیری همچون نسبت سطح به حجم زیاد، اندازه کوچک، ساختار منظم، کارایی در فیلتراسیون سبب شده است که با

داشتن این ویژگی‌ها به حذف فلزات سنگین از پساب آلوده کمک کند. تاکنون در زمینه تصفیه پساب این فناوری در سه دسته نانوکاتالیست‌ها، نانوجاذب‌ها و نانوغشاها به کار گرفته شده است [۱۳ و ۱۴].

نانوکاتالیست‌ها

مواد مورداستفاده در نانوکاتالیست‌ها معمولاً مواد معدنی مانند اکسیدهای فلزی و نیمه‌رساناها هستند. برخی از مواد مانند آهن صفر ظرفیتی در مقیاس نانو به دلیل فعالیت کاتالیزوری بالا، قادر به کاهش کروم (VI) به کروم (III) هستند. علاوه بر این، استفاده از آهن صفر ظرفیتی در مقیاس نانو، محصولات جانبی واسطه‌ای تولید نمی‌کند که معمولاً در هنگام استفاده از پودرهای آهن مقیاس بالاتر مشاهده می‌شود.

نانوذرات آهن صفر ظرفیتی به یکی از پرکاربردترین نانوذرات فلزی برای تصفیه محیطی کروم (VI) تبدیل شده‌اند. از آنجایی که پتانسیل ردوکس کروم بسیار مثبت‌تر از Fe^0 است، این ماده شکل شش ظرفیتی کروم را به شکل سه ظرفیتی آن کاهش می‌دهد (خود به Fe^{3+} اکسید می‌شود)، که سپس همراه با Fe^{3+}روی سطح نانوذرات رسوب می‌کند.

رزین‌های تبادل یونی را می‌توان به‌عنوان ماده پشتیبان برای این نانوذرات استفاده کرد. در حالی که رزین‌های مرسوم تبادل یونی می‌توانند فقط یک کاتیون یا یک آنیون را حذف کنند، نانوذرات آهن صفر ظرفیتی با ترکیب شدن با یک رزین می‌توانند هر دو شکل را حذف کنند. گزارش شده است که این نانومواد به همراه رزین، کروم (VI) را با راندمان ۸۴٫۴ درصد در شرایط بهینه حذف می‌کند. همچنین با استفاده از کربوکسی متیل سلولز به‌عنوان تثبیت‌کننده برای نانوذرات آهن صفر ظرفیتی، ۱۰۰٪ کروم (VI) از محلولی حاوی ۱۰ میلی‌گرم کروم (VI) در لیتر به کروم (III) کاهش یافته است.

مشکل اصلی استفاده از این نانوذرات، تشکیل یک لایه Fe(III)-Cr(III) اکسید یا هیدروکسید روی سطح نانوذرات است که سطح را غیرفعال می‌کند، زیرا اجازه نمی‌دهد ذرات Fe0 در هسته با ذرات کروم (VI) روی سطح واکنش دهد. این مشکل معمولاً با وارد کردن فلز دوم (ترجیحاً بی‌اثر، مانند Co، Pd، Ni، Cu، Ag) بر روی سطح فلز واسطه برطرف می‌شود، بنابراین از تشکیل فیلم خود بازدارنده جلوگیری می‌شود. فلز دوم به‌عنوان یک شاتل الکترونی بین دو سیستم فلزی عمل می‌کند و در نتیجه یک کاتالیزور را تشکیل می‌دهد. همچنین از سطح نانوذرات در برابر خوردگی محافظت می‌کند. یکی دیگر از اشکالات استفاده از این نانوذرات این است که حذف آن‌ها از آب تصفیه شده خسته‌کننده است. این مشکل را نیز می‌توان با استفاده از نانوذرات مغناطیسی شده، یعنی نانوذرات آهن صفر ظرفیتی پوشیده شده با نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4 که به راحتی با کمک یک میدان مغناطیسی خارجی حذف می‌شوند، حل کرد. چنین نانوکامپوزیت‌هایی یک سیستم فنتون مانند ناهمگن را تشکیل می‌دهند که افزایش راندمان حذف کروم (VI) را از ۴۸٫۸٪ به ۹۶٫۴٪ نشان داده است.

این فرآیند تصفیه فعالیت‌های فتوکاتالیستی را نیز در برمی‌گیرد که شامل برهمکنش انرژی نور با نانوذرات فلزی است. فعالیت‌های فتوکاتالیستی، میکروارگانیسم‌ها (باکتری‌ها) و مواد آلی را از طریق واکنش با رادیکال‌های هیدروکسیل از بین می‌برد. اسید فرمیک یک عامل کاهنده آلی و غیرسمی است که کروم (VI) را به کروم (III) کاهش می‌دهد، در حالی که خود به CO_2 و H_2 تبدیل می‌شود که می‌تواند برای اهداف صنعتی بازیافت شود. این واکنش در حضور کاتالیزورهای ناهمگن فلزی، یعنی نانوذرات نیکل ترکیب با اکسید گرافن، نانوذرات Pd ترکیب

با TiO_2، نانوذرات پالادیم که بر روی SiO_2 دارای عامل آمین ترکیب می‌شوند، رخ می‌دهد. اخیراً، پالادیوم مونوفلزی سه‌بعدی به‌عنوان یک نانوکاتالیزور برای فرآیند سم‌زدایی پساب‌های صنعتی آلوده به کروم (VI) با استفاده از اسید فرمیک استفاده شده است. مشخص شده است که سرعت فرآیند سم‌زدایی را می‌توان با قرارگرفتن در معرض نور با شدت مناسب افزایش داد. علاوه بر این، این نانوکاتالیست حتی پس از شش چرخه واکنش، فعالیت کاتالیزوری پایداری از خود نشان داده است [۱۲ و ۱۳].

■ نانوجاذب‌ها

این روش تصفیه از نانومواد آلی یا معدنی که میل ترکیبی زیادی نسبت به مواد جاذب دارند، استفاده می‌کند. این جاذب‌های سطحی قادرند به خوبی بسیاری از آلاینده‌ها را از بین ببرند. جاذب ایده‌آل کوچک، دارای مساحت سطح وسیع، پتانسیل کاتالیستی عالی و واکنش‌پذیری زیاد است. علاوه بر این، به دلیل اندازه بسیار کوچک آن‌ها، می‌توان آن‌ها را به سادگی با حرکت براونی، بدون کمک هیچ نیروی خارجی، از طریق یک مایع حمل کرد. در نتیجه، نانوذرات به مدت طولانی‌تری معلق می‌مانند تا یک منطقه اصلاح شده در محل ایجاد شود. این نانوذرات را می‌توان با فرآیندهای مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی سنتز کرد که ظرفیت جذب ذرات بر اساس روش تولید متفاوت است. نانوجاذب‌ها براساس فرآیند جذب خود به نانوذرات فلزی، نانوذرات مغناطیسی، اکسیدهای مختلط نانوساختار و نانوذرات اکسید فلزی طبقه‌بندی می‌شوند [۱۴].

تاکنون چندین نانوذرات اکسید فلز برای اصلاح فلزات سنگین، به ویژه کروم (VI) استفاده شده است. علاوه بر استفاده به‌عنوان نانوکامپوزیت همان‌طور که در بالا توضیح داده شد، نانوذرات مگنتیت (Fe_3O_4) همچنین می‌توانند به صورت جداگانه برای حذف کروم (VI) از فاضلاب استفاده شوند. ماگمیت (γ-Fe_2O_3) پوشیده شده با پلی دوپامین (یک کاتکولامین) بازده حذف کروم (VI) را ۹۷٪ در pH=۳ نشان داده است. نانوذرات اکسید روی به‌عنوان فوتوکاتالیست برای کاهش کروم (VI) به کروم (III) در حضور تابش خورشیدی استفاده شده است. چنین آزمایش‌های کاهش فوتوکاتالیستی نیز روی TiO_2 و WO_3 انجام شده است. مکانیسم فوتوکاتالیز بر اساس اصل کاتالیز جامد نیمه‌هادی است که در آن الکترون‌ها با تحریک نور با طول‌موج مناسب از باند ظرفیتی به نوار رسانش حرکت می‌کنند. حامل‌های بار روی سطح کاتالیزورها (مانند O_2) الکترون ارتقا یافته به نوار رسانش را می‌گیرند و O^{-2} که در نتیجه این واکنش تشکیل می‌شود در واکنش‌های ردوکس با آلاینده‌های جذب شده شرکت می‌کند. کمبود الکترونی حاصل در باند ظرفیت توسط H_2O برآورده می‌شود. نانوذرات اکسید سریم تثبیت شده با هگزامتیلن ترامین توانستند کروم (VI) را با راندمان ۹۶٫۵ درصد حذف کنند و پس از فرآیند تصفیه، نانوذرات را می‌توان از آب سانتریفیوژ کرد، در حالی که کروم را می‌توان با استفاده از هیدروکسید سدیم واجذب کرد.

در حالی که سولفید آهن بالک (FeS) به‌عنوان یک احیاکننده شیمیایی در اصلاح کروم (VI) استفاده شده است، نانوذرات FeS به دلیل مساحت سطح بزرگ‌تر، واکنش‌پذیری بالاتری از خود نشان می‌دهند. این نانوذرات را می‌توان با استفاده از کربوکسی متیل سلولز تثبیت کرد و از مواد کمکی نیز می‌توان به‌عنوان یک تکیه‌گاه مکانیکی برای پراکندگی نانوذرات استفاده کرد. چنین جاذب کامپوزیتی ظرفیت جذب کروم شش ظرفیتی به میزان ۱۳۰٫۵ mg/g در pH=۵٫۵ نشان داده است.

در این زمینه، نانوذرات به‌عنوان جاذب کروم (VI) اهمیت پیدا کرده‌اند. در حین انتخاب نانومواد مناسب برای

اصلاح محیطی، مشخصه‌هایی که معمولاً موردبررسی قرار می‌گیرند اندازه، حلالیت، مساحت سطح، بار سطحی و ترکیب شیمیایی سطح هستند. نانوذرات با دارا بودن سطح وسیع و پایداری بسیار، خود جاذب‌های بسیار خوبی برای اصلاح محیط‌زیست هستند [۱۰-۱۳].

نانوغشاها

در این روش تصفیه، نانوغشاها می‌توانند آلاینده‌ها را از پساب جدا کنند. این مواد به طور گسترده برای حذف فلزات سنگین، رنگ‌ها و سایر آلاینده‌ها استفاده می‌شوند. نانولوله‌ها، نانونوارها[۶] و نانوالیاف به طور معمول در نانوغشاها مورداستفاده قرار می‌گیرند. نانوذرات هم می‌توانند بر روی غشاهای مورداستفاده برای افزایش حذف یون کروم از محلول آبی اعمال شوند. به‌عنوان مثال، غشای پلی سولفون به طور گسترده برای این منظور استفاده می‌شود. برای افزایش آب‌دوستی غشاها، آن را با نانوذرات SiO_2 جفت می‌کنند.

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، TiO_2 یک کاندید خوب برای کاهش فتوکاتالیستی کروم (VI) است. افزودن نانولوله‌های کربنی به مواد فوتوکاتالیستی ظرفیت جذب و توانایی رسانایی الکترون آن را افزایش می‌دهد. مواد کامپوزیتی مبتنی بر پلیمر (ادغام نانوذرات نیمه‌رسانا در نانوالیاف پلیمری) برای بهبود بازیابی پودر فوتوکاتالیستی از محلول‌های پساب پس از تکمیل واکنش به کار برده می‌شوند. پلی‌اکریلونیتریل (PAN) به طور گسترده برای تولید نانوالیاف پلیمری استفاده می‌شود. در یک مطالعه اخیراً نانوالیاف کامپوزیت PAN و نانولوله‌های کربنی چند دیواره سنتز و توسط نانوذرات TiO_2 اصلاح شده با آمینو پیوند متقابل شده‌اند. هنگامی که نور مرئی به آن تابانده شده است، این سیستم پس از ۳۰ دقیقه کاهش نور کامل کروم (VI) را نشان داده است. این سیستم قبل از اینکه راندمان کاهش نوری آن به میزان ۳ درصد کاهش یابد، موفق به گذراندن پنج چرخه جذب - دفع شده است.

در یک رویکرد جدید، نانوکامپوزیت‌های مغناطیسی نانولوله‌های کربنی چند جداره اکسید منگنز / اکسید آهن / اسید برای حذف کروم (VI) از فاضلاب استفاده شده است. علاوه بر کارایی بالا در این منظور، کروم (VI) را می‌توان واجذب کرد و جاذب را می‌توان با استفاده از یک قلیایی بازسازی کرد. با این حال، راندمان جذب کروم (VI) پس از پنج دوره استفاده مجدد از این نانولوله‌ها به ۸۵ درصد کاهش می‌یابد.

نانوذرات اصلاح‌شده یونی نیز برای کاربرد در زمینه نانوپالایش مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4 توسط فسفونیوم سیلان اصلاح شدند که ظرفیت جذب کروم (VI) آن‌ها را در pH بهینه افزایش داد. با این حال، دفع کروم از این نانوذرات اصلاح شده با استفاده از هیدروکسید سدیم ضعیف بود.

در این زمینه نیز می‌توان به نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم عامل‌دار آمینوسیلیکاتی اصلاح‌شده با نانوذرات طلا اشاره کرد که به‌طور فتوکاتالیستی کروم (VI) را به کروم (III) (با استفاده از اسید اگزالیک به‌عنوان دهنده الکترون) با بازده ۷۷ درصد کاهش می‌دهند. نور باعث انتقال بار سطحی از این نانولوله‌ها به کروم (VI) از طریق نانوذرات طلا می‌شود که به‌عنوان منبعی برای الکترون‌های فوتومولد عمل می‌کنند.

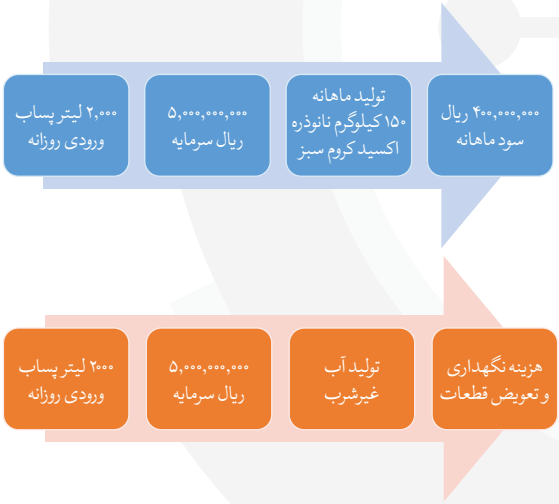
برای غلبه بر مشکل مقاومت انتقال جرم در مورد جاذب‌های بالک، می‌توان نانوذرات را در مواد بالک جاسازی کرد، بنابراین تماس آلاینده‌ها به سطح وسیع را تسهیل می‌کند و انتقال جرم داخلی را تقویت می‌کند. این امر با سنتز یک کامپوزیت زئولیت/پلی پیرول مغناطیسی که از زئولیت مغناطیسی (جاسازی شده با نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4) ترکیب شده با پلی‌پیرول پلیمری آلی تشکیل شده بود، به دست می‌آید. این جاذب راندمان

حـذف ۹۹٫۹۹٪ را هنگامـی کـه pH = ۲ و غلظت اولیه کروم شـش ظرفیتی ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر باشـد، نشـان داده است. فرآیند مشابهی با استفاده از کیتوزان به‌عنوان پلیمر به جای پلی‌پیرول انجام شده و راندمان حذف ۹۸٪ در pH = ۲و غلظت اولیه کروم شش ظرفیتی ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر گزارش شده است [۱۳ و ۱۴].

بازیافت نانومواد از پساب آبکاری

بـا ورود فنـاوری نانو به عرصه تصفیه پسـاب آبکاری بسیاری از مشـکلات روش‌های مرسـوم همچـون بازده پایین، پیچیدگی فرآیند و زمان‌بر بودن فرآیندها حل شده است اما مشکل اساسی یعنی هزینه بالا که در واقع عمده‌ترین دلیل کارگاه‌های آبکاری برای سرباز زدن از امر تصفیه است، هنوز پا برجا باقی مانده است. اگرچه روش‌های نانویی بالا با خود بهبود فرآیندهای مرسوم تصفیه را به همراه داشته‌اند ولی گران بودن نانوذرات و نانوساختارها خود سبب به بار آوردن هزینه بیشـتر برای کارگاه آبکاری می‌شـود. در سـال‌های اخیر به کمک فناوری نانو و ارزشـی که مواد با توجـه بـه خواص در مقیـاس نانو به خود می‌گیرند، بازیافت مواد به صورت نانوذرات از این پسـاب‌ها که در ترکیب خود مواد ارزشـمندی همچون طلا، نیکل، کروم، روی، مس و... را دارند، مورد توجه قرار گرفته اسـت. این دیدگاه و عملی شدن این روش باعث شده است تا پساب‌های آبکاری که تا قبل از این به‌عنوان یک ماده خطرناک و سمی شناخته شده است، اکنون به یک ماده ارزشمند تبدیل شود.

تحقیقات زیادی در دنیا در حال انجام است که با توجیه‌دار کردن روش‌ها از لحاظ اقتصادی، یون‌های موجود در پسـاب در قالب نانوذرات ارزشـمند، بازیافت شـود. یکی از این فعالیت‌ها، پروژه سـنتز نانوذرات اکسید کروم سبز از پسـاب آبکاری کروم اسـت که در ایران و توسـط محققان شـرکت دانش‌بنیان دُرنیکا سبز پژوه انجام شده است. محققان این شرکت با استفاده از روشی نوین و با شناسایی خطرات این پساب‌ها و آگاهی از مشکلات کارگاه‌های آبکاری در این زمینه، از سـال ۱۴۰۰ فعالیت خود را با تمرکز بر روی کارگاه‌های آبکاری کروم به دلیل عمومیت آن و میزان بیشتر پساب تولیدی به نسبت دیگر روش‌های آبکاری شروع کرده‌اند. تاکنون این شرکت برای این پروژه موفق به کسب تأییدیه نانومقیاس از ستاد نانو و ثبت اختراع در اداره مالکیت معنوی ایران شده است. این روش با هزینه پایین و بدون هیچ‌گونه تولید پسـاب ثانویه خطرناکی انجام می‌شـود و قابلیت پیاده‌سـازی در کارگاه‌های آبکاری یا در یک مجموعه متمرکز را دارد. در این روش با تبدیل اکسید کروم شش ظرفیتی موجود در ترکیب پساب به نوع سه ظرفیتی آن، نانوذرات اکسید کروم سبز با خلوص بالا از پساب آبکاری کروم به دست می‌آید. به‌عنوان مثال برای یک کارگاه آبکاری که روزانه ۲۰۰۰ لیتر پساب تولید می‌کند با یک سرمایه‌گذاری حدود ۵,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰ ریالی می‌تواند ماهانه ۱۵۰ کیلوگرم نانوذرات اکسید کروم سبز تولید کند که با توجه به قیمت این نانوذره که در بازارهای داخلی و خارجی بالاتر از کیلویی ۱,۰۰۰,۰۰۰ تومان به فروش می‌رسد به سودی ماهانه بالاتر از ۴۰۰,۰۰۰,۰۰۰ ریال دست خواهد یافت. این بدین معنی اسـت که در یک بازه یک سـاله به نقطه سربه‌سـر سرمایه‌گذاری می‌رسد و سپس سوددهی به مبلغ ذکر شـده از پسـاب تولیدی خواهد داشـت. این در حالی اسـت که همین کارگاه با ظرفیت پسـاب تعیین شده اگر از دیگر روش‌های تصفیه استفاده کند مبلغی حدود همان سرمایه‌گذاری در این طرح را باید هزینه خرید سیسـتم تصفیه کند در حالی که این سیسـتم‌ها اسـاساً تنها بازدهی که دارند آب غیرشـرب اسـت. همچنین این سیستم‌ها نیاز به هزینه نگهداری و تعمیرات دارند که همگی هزینه‌ای به کارگاه مربوطه وارد می‌کند. در شکل ۳، مقایسه‌ای از این روش با روش فیلتراسیون نمایش داده شده است.



شکل ۳- مقایسه مالی روش تولید نانوذره اکسید کروم سبز از پساب آبکاری کروم (بالا) و روش فیلتراسیون (پایین)

در شکل ۴ نانوذرات سنتز شده با این روش به تصویر کشیده شده است. این نانوذرات کاربرد بسیاری در صنایع مختلف به‌ویژه در صنعت پیگمنت دارند. با توجه به روش ساده و کم‌هزینه در مقایسه با دیگر روش‌های موجود و همچنین خواص ویژه نانوذرات اکسید کروم سبز و جایگاه ویژه این محصول در صنعت، پیش‌بینی می‌شود این روش به‌زودی در بیشتر کارگاه‌های آبکاری به کار گرفته شود و تغییرات اساسی در این صنعت در جهت حل مشکل پساب‌های تولیدی داشته باشد.

شکل ۴- نانوذرات اکسید کروم سبز سنتز شده از پساب آبکاری کروم

پی‌نوشت‌ها

۱ Electro Dialysis = ED

۲ Reverse Osmosis= RO

۳ Total dissolved solids (TDS)

۴ metal–organic frameworks

۵ Pseudomonas, Bacillus, Enterobacter, Deinococcus, Shewanella, Agrobacter, Escherichia, Thermus

۶ nanoribbons

منابع

۱ Christoph Raub, The history of electroplating, Metal Plating and Patination, Cultural Technical and Historical Developments, 1993, Pages 284-290.

۲ V. S. Protsenko & F. I. Danilov, Chromium electroplating from trivalent chromium baths as an environmentally friendly alternative to hazardous hexavalent chromium baths: comparative study on advantages and disadvantages, Clean Technologies and Environmental Policy, Volume 16, pages 1201–1206, (2014).

۳ Advantages and Disadvantages of Trivalent Chromium Plating, www.utelectrode.com, 2021.

۴ A. Baral, R. Engelken, W. Stephens, J. Farris & R. Hannigan, Evaluation of Aquatic Toxicities of Chromium and Chromium-Containing Effluents in Reference to Chromium Electroplating Industries, Archives of Environmental Contamination and Toxicology, Volume 50, pages 496–502, (2006).

۵ https://www.who.int/data/global-health-estimates.

۶ https://human.doe.ir/portal/home/?news/674713/1006186/1168488.

۷ Sonal Rajoria, Manish Vashishtha & Vikas K. Sangal, Treatment of electroplating industry wastewater: a review on the various techniques, Environmental Science and Pollution Research, Volume 29, pages 72196–72246, (2022).

۸ Khandakar M. Nahiun, Bijoyee Sarker,Kamrun N. Keya, Fatin I. Mahir, Shahirin Shahida,Ruhul A. Khan, A Review on the Methods of Industrial Waste Water Treatment, Scientific Review, Vol. 7, Issue. 3, pp: 20-31, 2021.

۹ Vivek V. Ranade, Vinay M Bhandari, Industrial Wastewater Treatment, Recycling and Reuse, Elsevier Science, 2014.

۱۰ Sayak Mitra, Avipsha Sarkar, Shampa Sen, Removal of chromium from industrial effluents using nanotechnology: a review, Springer International Publishing, 2017.

۱۱ Zhu F, Li L, Ma S, Shang Z, Effect factors, kinetics and thermodynamics of remediation in the chromium contaminated soils by nanoscale zero valent Fe/Cu bimetallic particles. Chem Eng, 2016.

۱۲ Pandikumar A, Ramaraj R, Photocatalytic reduction of hexavalent chromium at gold nanoparticles modified titania nanotubes. Mater Chem Phys 141:629–635, 2013.

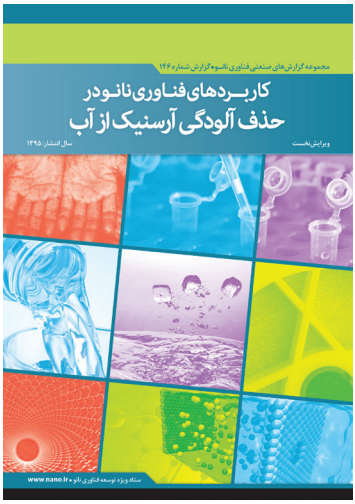
۱۳ Nithya R, Gomathi T, Sudha PN, Venkatesan J, Anil S, Kim SK, Removal of Cr(VI) from aqueous solution using chitosan-g-poly(butyl acrylate)/silica gel nanocomposite. Int J Biol Macromol 87:545–554, 2016.

۱۴ Roy, Arup, Bhattacharya, Jayanta, Nanotechnology in Industrial Wastewater Treatment, IWA Publishing, 2015.

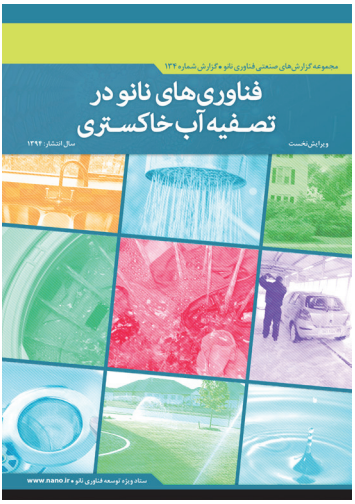
از مجموعه گزارش‌های صنعتی فناوری نانو در صنعت حوزه آب، پساب و محیط‌زیست منتشر شده است:

■ کاربرد فناوری نانو در صنعت ساخت حسگرهای آلودگی هوا

■ استفاده از فناوری نانوحباب در تصفیه آب، پساب‌های خانگی و فاضلاب‌های صنعتی



■ کاربردهای فناوری نانو در حذف آلودگی آرسنیک از آب



■ فناوری‌های نانو در تصفیه آب خاکستری