

## بررسی و ارزیابی اقتصادی روش‌های نوین تصفیه پساب‌های صنعتی حاوی فلزات سنگین در صنایع آبکاری گرم

نگار آزادی<sup>۱،۲\*</sup>، سبحان حیدریان<sup>۳</sup>، قربانعلی دزواره<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی ارشد مهندسی HSE، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه مهربور

[azadi.mnegar3456@gmail.com](mailto:azadi.mnegar3456@gmail.com)

۲. شرکت دانش‌بنیان پویا نیرو، تهران، ایران

۳. فارغ التحصیل ارشد مهندسی مدیریت ساخت، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه مهربور

[sobhanheidarian@gmail.com](mailto:sobhanheidarian@gmail.com)

۴. استادیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه مهربور

[gh.dezvareh@mehralborz.ac.ir](mailto:gh.dezvareh@mehralborz.ac.ir)

### خلاصه

در این پژوهش به بررسی و ارزیابی اقتصادی روش‌های نوین تصفیه پساب‌های صنعتی حاوی فلزات سنگین در صنایع آبکاری گرم پرداخته شده است. صنایع آبکاری به دلیل استفاده گسترده از فلزاتی نظیر کروم، نیکل، روی، کادمیوم و مس، از مهم‌ترین منابع تولید پساب‌های آلوده به فلزات سنگین محسوب می‌شوند. تخلیه این پساب‌ها بدون تصفیه مناسب، منجر به آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی و بروز مخاطرات زیست‌محیطی و بهداشتی جدی می‌گردد. در این تحقیق، ضمن معرفی روش‌های متداول تصفیه نظیر رسوب‌دهی شیمیایی، روش‌های نوین شامل غشاهای نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس، تبادل یونی پیشرفته، جذب سطحی با نانوکامپوزیت‌ها، الکتروکواگولاسیون و فناوری‌های زیستی مورد بررسی فنی و اقتصادی قرار گرفته‌اند. شاخص‌های اقتصادی شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (CAPEX)، هزینه‌های بهره‌برداری (OPEX)، ارزش فعلی خالص (NPV)، نرخ بازگشت سرمایه (IRR) و دوره بازگشت سرمایه محاسبه و مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد اگرچه روش‌های نوین دارای هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالاتری هستند، اما به دلیل راندمان حذف بالاتر، امکان بازیابی فلزات و کاهش هزینه‌های دفع لجن، در بلندمدت از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر می‌باشند. در پایان، پیشنهاداتی جهت بهینه‌سازی انتخاب فناوری و سیاست‌های حمایتی ارائه شده است.

**کلمات کلیدی:** آبکاری گرم، فلزات سنگین، پساب صنعتی، پساب اسیدی، ارزیابی اقتصادی، نانوفیلتراسیون، تبادل یونی، الکتروکواگولاسیون

## ۱. مقدمه

صنایع آبکاری گرم یکی از بخش‌های مهم و استراتژیک صنایع فلزی محسوب می‌شوند که نقش اساسی در ارتقای مقاومت به خوردگی، بهبود خواص سطحی و افزایش دوام قطعات صنعتی دارند. این فرآیندها معمولاً شامل حمام‌های شیمیایی حاوی یون‌های فلزی از جمله کروم‌شش‌ظرفیتی، نیکل، روی و کادمیوم هستند و در طی مراحل شستشو و تخلیه، بخشی از این ترکیبات وارد جریان پساب می‌شود. تجمع زیستی، پایداری شیمیایی و سمیت بالای این فلزات موجب شده است که پساب آبکاری به‌عنوان یکی از آلاینده‌های پرخطر صنعتی شناخته شود و مدیریت آن اهمیت ویژه‌ای پیدا کند [1,2].

در دهه‌های اخیر، افزایش ظرفیت تولید در واحدهای آبکاری و استفاده از مواد شیمیایی پیچیده‌تر باعث شده است تا ترکیب پساب‌ها تنوع بیشتری پیدا کند و بار آلودگی آن‌ها افزایش یابد. این امر ضرورت انتخاب و توسعه فناوری‌هایی را برجسته کرده است که علاوه بر حذف مؤثر آلاینده‌ها، توانایی کنترل تغییرات ترکیب پساب و پاسخ‌گویی به نیازهای عملیاتی صنایع را داشته باشند. از سوی دیگر، افزایش هزینه‌های دفع لجن، الزامات قانونی سخت‌گیرانه و اثرات زیست‌محیطی گسترده سبب شده است که روش‌های سنتی تصفیه دیگر پاسخ‌گوی نیازهای واحدهای صنعتی نباشند [2,3].

هم‌زمان با این تحولات، رویکرد جهانی مدیریت آب و پساب به سمت اقتصاد چرخشی حرکت کرده است؛ رویکردی که در آن هدف فقط حذف آلاینده نیست، بلکه ارزش‌آفرینی از جریان پساب از طریق بازیابی فلزات باارزش، کاهش مصرف آب خام و بازچرخانی آب تصفیه‌شده نیز دنبال می‌شود. این تغییر نگرش، فناوری‌های نوینی مانند تبادل یونی پیشرفته، الکتروکواگولاسیون، غشاهای نانویی و فرآیندهای جذب تخصصی را به گزینه‌هایی جذاب برای واحدهای آبکاری تبدیل کرده است [3,4].

پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که رفتار فلزات سنگین در سامانه‌های آبکاری تحت تأثیر عواملی مانند pH، حضور عوامل کمپلکس‌کننده، دما و نوع عملیات سطحی قرار دارد. این عوامل نه تنها بر قابلیت انحلال و تحرک یون‌های فلزی در پساب تأثیر می‌گذارند، بلکه انتخاب فناوری تصفیه مناسب را نیز پیچیده‌تر می‌کنند. حضور کمپلکس‌های پایدار کروم و نیکل، عملکرد روش‌های سنتی همچون رسوب‌دهی شیمیایی را با چالش مواجه کرده و لزوم بهره‌گیری از فرآیندهای پیشرفته‌تر را افزایش داده است [1,3].

در چنین بستری، ارزیابی اقتصادی فناوری‌های تصفیه اهمیت دوچندان می‌یابد. انتخاب یک تکنولوژی مناسب تنها بر اساس راندمان حذف قابل تصمیم‌گیری نیست، بلکه باید مجموعه‌ای از شاخص‌های اقتصادی شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های بهره‌برداری، مصرف انرژی، هزینه تولید لجن، هزینه مواد شیمیایی و ظرفیت بازیابی فلزات نیز تحلیل شوند. این ارزیابی‌ها برای مدیران صنعتی که به دنبال کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش بهره‌وری هستند، تصمیم‌ساز و راهبردی است [5,6].

از سوی دیگر، مطالعات متعدد نشان داده‌اند که برخی فناوری‌های نوین، علی‌رغم سرمایه‌گذاری اولیه نسبتاً بیشتر، در بلندمدت به واسطه کاهش OPEX، مدیریت آسان‌تر پسماند و امکان تولید درآمد از بازیابی فلزات، عملکرد اقتصادی بهتری نسبت به روش‌های متداول دارند. بنابراین، تحلیل هم‌زمان ویژگی‌های فنی و اقتصادی فناوری‌ها، پیش‌نیاز انتخاب یک سیستم تصفیه مطمئن و پایدار در واحدهای آبکاری است [5.1].

بر این اساس، این پژوهش با هدف بررسی و ارزیابی اقتصادی روش‌های نوین تصفیه پساب‌های صنعتی حاوی فلزات سنگین در صنایع آبکاری گرم انجام شده است. در این مطالعه علاوه بر مرور جامع فناوری‌های موجود، شاخص‌های کلیدی اقتصادی تحلیل شده و یک مطالعه موردی صنعتی به عنوان نمونه واقعی اجرا و ارزیابی شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری برای صنایع، مشاوران مهندسی و سیاست‌گذاران حوزه محیط‌زیست باشد.

هدف از این تحقیق، ارائه یک تحلیل جامع فنی-اقتصادی از روش‌های نوین تصفیه پساب آبکاری است تا با مقایسه آن‌ها بر اساس شاخص‌های اقتصادی رایج، راهنمایی عملی برای صنایع و سیاست‌گذاران این حوزه فراهم آورد.

## ۲. کلیات تحقیق

### ۲-۱ ضرورت انجام تحقیق

افزایش سختگیری استانداردهای زیست‌محیطی در سطح ملی و بین‌المللی، رشد قابل توجه هزینه‌های دفع اصولی پسماندهای خطرناک (از جمله لجن حاصل از تصفیه)، افزایش بحران کمبود منابع آب شیرین و نیاز به بازیابی و استفاده مجدد از آب، و نیز ارزش اقتصادی قابل توجه فلزات سنگین بازیافتی، ضرورت بازنگری جدی در سیستم‌های سنتی تصفیه پساب صنایع آبکاری را دوچندان کرده است. بسیاری از واحدهای صنعتی کوچک و متوسط (SMEs) به دلیل محدودیت منابع مالی، دانش فنی و عدم آگاهی از تکنولوژی‌های جدید، همچنان از فناوری‌های قدیمی و کم‌بازده استفاده می‌کنند که پاسخگوی الزامات جدید زیست‌محیطی و اقتصادی نیست. این امر آن‌ها را در معرض جریمه‌های سنگین قانونی، تعطیلی واحد و آسیب به شهرت برند قرار می‌دهد.

از سوی دیگر، رویکرد اقتصاد چرخشی (Circular Economy) بر بازیابی منابع از جریان پسماند تأکید دارد. فلزات گران‌بهایی مانند نیکل، مس و حتی کروم می‌توانند از پساب استحصال و به چرخه تولید بازگردند که این امر نه تنها بار آلودگی را کاهش می‌دهد، بلکه می‌تواند منبع درآمدی برای واحد صنعتی باشد. بنابراین، ارزیابی اقتصادی روش‌های نوین که قابلیت بازیابی دارند، در مقایسه با روش‌های دفع محور سنتی، از اهمیت بالایی برخوردار است. این تحقیق با پر کردن شکاف اطلاعاتی بین قابلیت‌های فنی و واقعیت‌های اقتصادی، به انتخاب منطقی و پایدار فناوری تصفیه کمک می‌کند.

### ۲-۲ تاریخچه

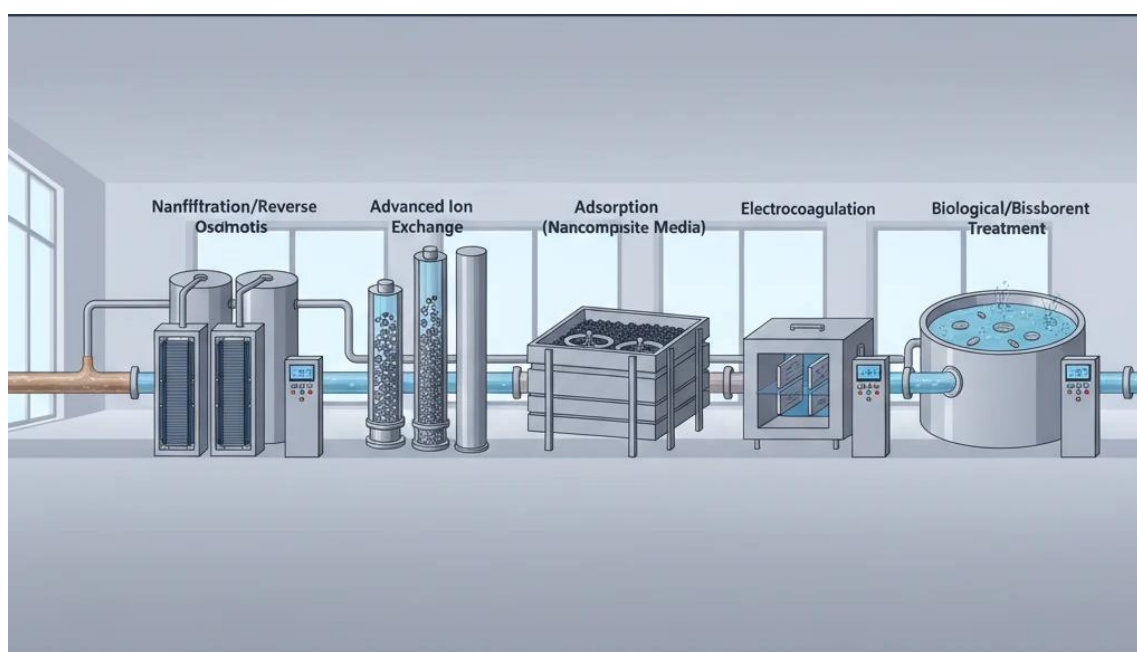
در دهه‌های گذشته، رسوب‌دهی شیمیایی به کمک مواد منعقدکننده مانند آهنک یا هیدروکسید سدیم به عنوان روش غالب در تصفیه پساب آبکاری استفاده شده است. سادگی نسبی و هزینه اولیه پایین، دلایل اصلی این گسترده‌گی بود. اما از دهه ۱۹۹۰ به بعد، با آشکار شدن معایب این روش از جمله حجم زیاد لجن تولیدی و مشکل دفع آن، تحقیقات به سمت روش‌های جایگزین سوق پیدا کرد [4].

از دهه ۲۰۰۰ به بعد، با پیشرفت‌های چشمگیر در فناوری نانو و علم مواد، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه غشاهای پلیمری با انتخاب‌پذیری بالا، نانوجاذب‌ها با سطح ویژه بسیار زیاد، چارچوب‌های فلزی-آلی (MOFs) و سیستم‌های الکتروشیمیایی پیشرفته انجام شده است. مطالعات نشان می‌دهد راندمان حذف فلزات سنگین در فناوری‌های غشایی مانند نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس می‌تواند به بیش از ۹۵ درصد برسد، اما چالش‌هایی مانند هزینه تعویض غشا، گرفتگی سطحی (Fouling) و مصرف انرژی بالا در سیستم‌های تحت فشار وجود دارد [5].

در زمینه جذب سطحی، توسعه جاذب‌های نانوکامپوزیتی بر پایه کربن فعال، اکسیدهای فلزی یا پلیمرها، ظرفیت جذب و سرعت جذب را به طور قابل توجهی افزایش داده است. در حوزه الکتروشیمی، روش الکتروکواگولاسیون به عنوان یک روش امیدوارکننده با نیاز کمتر به مواد شیمیایی مطرح شده است. همچنین، فناوری‌های زیستی با استفاده از جاذب‌های زیستی (بیوسوربنت) مانند پسماندهای کشاورزی یا ریزجلبک‌ها، به دلیل هزینه پایین و سازگاری زیست‌محیطی مورد توجه قرار گرفته‌اند [6].

در پژوهش‌های اخیر، تمرکز بر روی ترکیب روش‌ها (Hybrid Systems) به عنوان راهکاری برای افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه کل مطرح شده است. برای مثال، استفاده از پیش‌تصفیه شیمیایی یا الکتروشیمیایی قبل از یک سیستم غشایی می‌تواند عمر غشا را افزایش و هزینه عملیاتی را کاهش دهد. مرور ادبیات نشان می‌دهد اگرچه مطالعات فنی فراوانی بر روی هر یک از روش‌های نوین وجود دارد، اما مطالعات تطبیقی و جامع که این روش‌ها را از منظر اقتصادی و در شرایط عملیاتی یک واحد صنعتی واقعی مقایسه کند، کمتر یافت می‌شود. این تحقیق قصد دارد تا این خلأ را پر نماید [7].

شکل ۱ شامل نانوفیلتراسیون/اسمز معکوس، تبادل یونی پیشرفته، جذب سطحی با نانوکامپوزیت، الکتروکواگولاسیون و تیمار زیستی/بیوسوربنت. این مراحل به صورت زنجیره‌ای جهت حذف انتخابی فلزات، کاهش بار آلی و دستیابی به آب خروجی با کیفیت بالا به کار می‌روند.



شکل ۱: نمای شماتیک فرآیندهای نوین تصفیه پساب صنعتی حاوی فلزات سنگین

## ۲-۳ بررسی مطالعات پیشین

مطالعات متعددی در زمینه حذف فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی انجام شده است که هر یک به بررسی فناوری‌های مختلف و ارزیابی کارایی آن‌ها پرداخته‌اند. مرور این پژوهش‌ها می‌تواند دیدگاه مناسبی درباره پیشرفت‌های موجود و محدودیت‌های فناوری‌های مختلف ارائه دهد.

اجرای فرآیندهای غشایی به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین راهکارهای تصفیه با چالش‌های عملیاتی متعددی همراه است که باید به دقت سنجیده شوند. کیودایز و موسا (۲۰۰۴) در مطالعه‌ای مقایسه‌ای عملکرد فرآیندهای غشایی در حذف فلزات سنگین از پساب را بررسی کردند. در این تحقیق روش‌هایی مانند اولترافیلتراسیون، نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس از نظر راندمان حذف، انتخاب‌پذیری و شرایط عملیاتی مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که فرآیندهای غشایی به ویژه اسمز معکوس و نانوفیلتراسیون قادرند راندمان بالایی در حذف یون‌های فلزی داشته باشند، هرچند هزینه سرمایه‌گذاری و مسائل مربوط به گرفتگی غشا از محدودیت‌های مهم این فناوری‌ها محسوب می‌شود [5].

ارزیابی دقیق فرآیندهای الکتروشیمیایی می‌تواند زمینه‌ساز بهبود کاربرد آن‌ها در پساب‌های صنعتی گردد. محمدی و همکاران (۲۰۰۵) در پژوهشی به بررسی و مدل‌سازی حذف یون‌های فلزی از پساب با استفاده از فرآیند الکترودیالیز پرداختند. در این مطالعه، انتقال جرم و کارایی جداسازی یون‌های فلزی در شرایط مختلف عملیاتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که فرآیند الکترودیالیز می‌تواند به عنوان یک فناوری غشایی-الکتروشیمیایی مؤثر برای جداسازی یون‌های فلزی از پساب‌های صنعتی مورد استفاده قرار گیرد و در شرایط مناسب، راندمان حذف قابل توجهی ارائه دهد [4].

روش‌های فیزیکوشیمیایی گرچه قدیمی‌ترند، اما هنوز هم در اکثر صنایع به دلیل سادگی و هزینه قابل قبول، کاربرد گسترده‌ای دارند. کورنیاوان و همکاران (۲۰۰۶) در مطالعه‌ای مروری به بررسی روش‌های فیزیکوشیمیایی برای تصفیه پساب‌های حاوی فلزات سنگین پرداختند. در این تحقیق فناوری‌هایی مانند رسوب‌دهی شیمیایی، انعقاد و لخته‌سازی، تبادل یونی و فرآیندهای غشایی از نظر کارایی، محدودیت‌های عملیاتی و هزینه‌های اجرایی مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد که روش‌های فیزیکوشیمیایی همچنان از متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده در صنعت هستند، اما تولید لجن و هزینه‌های مدیریت پسماند از مهم‌ترین چالش‌های این روش‌ها به شمار می‌رود [3].

با توجه به تعدد روش‌های حذف فلزات، انتخاب مناسب‌ترین فناوری مستلزم در نظر گرفتن شرایط ویژه هر پساب است. فو و وانگ (۲۰۱۱) در یک مطالعه مروری جامع به بررسی روش‌های مختلف حذف یون‌های فلزات سنگین از پساب‌ها پرداختند. در این پژوهش، فناوری‌هایی نظیر رسوب‌دهی شیمیایی، تبادل یونی، جذب سطحی، فرآیندهای غشایی و روش‌های الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که انتخاب روش مناسب به عواملی مانند نوع فلز، غلظت آلاینده، شرایط شیمیایی پساب و هزینه‌های عملیاتی وابسته است و هیچ روش واحدی به‌تنهایی برای تمامی شرایط کاربرد بهینه ندارد [1].

تحولات نوین در فناوری‌های حذف فلزات سنگین، مسیر جدیدی را برای بهبود کارایی و کاهش پسماندها گشوده‌اند. باراکات (۲۰۱۱) در پژوهشی با عنوان «روندهای نوین در حذف فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی» به بررسی فناوری‌های جدید در تصفیه پساب‌های آلوده به فلزات سنگین پرداخت. در این مطالعه، علاوه بر روش‌های متداول، فناوری‌های نوینی مانند نانومواد جاذب و فرآیندهای الکتروشیمیایی پیشرفته بررسی شدند. نتایج نشان داد که استفاده از فناوری‌های نوین می‌تواند علاوه بر افزایش راندمان حذف فلزات، امکان بازیابی منابع باارزش و کاهش تولید پسماند ثانویه را نیز فراهم کند [2].

ادغام فناوری‌های نوظهور با روش‌های سنتی می‌تواند نقاط قوت آن‌ها را ترکیب کرده و بهره‌وری بهتری را به همراه داشته باشد. عظیمی و همکاران (۲۰۱۷) در یک مطالعه مروری گسترده به بررسی فناوری‌های مختلف حذف فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی پرداختند. در این پژوهش روش‌هایی نظیر جذب سطحی، تبادل یونی، فرآیندهای غشایی، روش‌های

الکتروشیمیایی و فناوری‌های زیستی مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج این مطالعه نشان داد که ترکیب چند فناوری مختلف می‌تواند کارایی تصفیه را افزایش داده و در عین حال امکان بازیابی فلزات با ارزش و کاهش هزینه‌های عملیاتی را فراهم کند [6].

تولید لجن و بهبود کیفیت پساب خروجی شد که آن را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای صنعتی تبدیل می‌کند [7]. کارایی بالا و کم‌هزینه بودن روش‌های جدید الکتروکواگولاسیون آن‌ها را به گزینه‌ای جذاب در صنایع تبدیل کرده است. آلحاربی و همکاران (۲۰۲۲) عملکرد فرآیند الکتروکواگولاسیون را در تصفیه پساب صنایع آبکاری بررسی کردند. نتایج نشان داد که این روش قادر است در شرایط بهینه بیش از ۹۰ درصد فلزات سنگین نظیر مس، نیکل و روی را حذف کند. علاوه بر این، مصرف مواد شیمیایی در این فرآیند نسبت به روش‌های سنتی کمتر بوده و مدیریت لجن تولیدی نیز ساده‌تر است [8]. نانوذرات جذب با ظرفیت بالای جذب و قابلیت بازیابی، چشم‌انداز جدیدی در تصفیه پساب‌ها ایجاد کرده‌اند. لی و چین (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای به بررسی استفاده از نانوذرات جذب برای حذف فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی پرداختند. در این پژوهش از نانوجاذب‌های مبتنی بر اکسید آهن و کربن فعال اصلاح‌شده استفاده شد. نتایج نشان داد که این مواد به دلیل سطح ویژه بالا و ظرفیت جذب زیاد قادرند فلزات سنگینی مانند کروم و سرب را با راندمان بیش از ۹۵ درصد حذف کنند و در عین حال قابلیت بازیابی و استفاده مجدد نیز دارند [9].

مروری جامع بر فناوری‌های جدید نشان می‌دهد که رویکردهای ترکیبی نقش کلیدی در بهبود تصفیه دارند. رنو و همکاران (۲۰۲۳) در یک مطالعه مروری جامع فناوری‌های نوین حذف فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی را بررسی کردند. این پژوهش نشان داد که فناوری‌هایی مانند جذب زیستی، غشاهای پیشرفته و فرآیندهای الکتروشیمیایی از جمله مؤثرترین روش‌ها برای حذف فلزات سنگین محسوب می‌شوند. همچنین تأکید شد که استفاده از سیستم‌های ترکیبی می‌تواند عملکرد تصفیه را به طور قابل توجهی افزایش دهد [10].

مواد زیستی اصلاح‌شده، علاوه بر کارایی بالا، می‌توانند راهکاری اقتصادی و دوستدار محیط‌زیست باشند. سینگ و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی به بررسی استفاده از بیوچار اصلاح‌شده برای حذف فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که بیوچار تولید شده از ضایعات کشاورزی پس از اصلاح شیمیایی می‌تواند فلزاتی مانند مس و نیکل را با راندمان بیش از ۹۰ درصد جذب کند. این روش علاوه بر کارایی بالا، از نظر اقتصادی نیز به دلیل استفاده از مواد اولیه ارزان قیمت گزینه مناسبی برای کاربردهای صنعتی محسوب می‌شود [11].

تحلیل اقتصادی فناوری‌های ترکیبی جدید نشان می‌دهد که بازیابی منابع و کاهش مصرف انرژی، شرایط بهره‌برداری را بهبود می‌بخشد. کیم و همکاران (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای جدید به بررسی یک سیستم ترکیبی شامل نانوفیلتراسیون و الکترودیالیز برای تصفیه پساب‌های صنعتی حاوی فلزات سنگین پرداختند. نتایج نشان داد که این سیستم قادر است علاوه بر حذف بیش از ۹۷ درصد فلزات سنگین، امکان بازیابی یون‌های فلزی با ارزش را نیز فراهم کند. تحلیل اقتصادی این مطالعه نشان داد که با بازیابی فلزات و کاهش مصرف آب، دوره بازگشت سرمایه این فناوری کمتر از پنج سال خواهد بود [12].

با وجود مطالعات گسترده در زمینه حذف فلزات سنگین از پساب‌های صنعتی، بخش صنایع آبکاری گرم به عنوان یکی از منابع عمده آلاینده‌های فلزی، نیازمند تحقیق اختصاصی‌تر و جامع‌تری است. بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته تمرکز گسترده‌ای بر فناوری‌های نوین مانند فرآیندهای الکتروکواگولاسیون، نانوفیلتراسیون، نانوذرات جذب و سیستم‌های ترکیبی داشته‌اند، اما به طور محدود به شرایط ویژه پساب‌های آبکاری گرم و چالش‌های خاص آن توجه شده است. از این رو، پرداختن به فرآیندهای نوین متناسب با ماهیت شیمیایی و فیزیکی پساب‌های آبکاری گرم می‌تواند گامی مهم در جهت بهبود عملکرد حذف فلزات سنگین با راندمان بالا و کاهش اثرات جانبی زیست‌محیطی باشد. همچنین، با وجود تأکید فراوان در مطالعات قبلی بر کارایی فنی فناوری‌های نوین، ارزیابی جامع اقتصادی این روش‌ها در شرایط واقعی صنعتی به ویژه در صنایع آبکاری

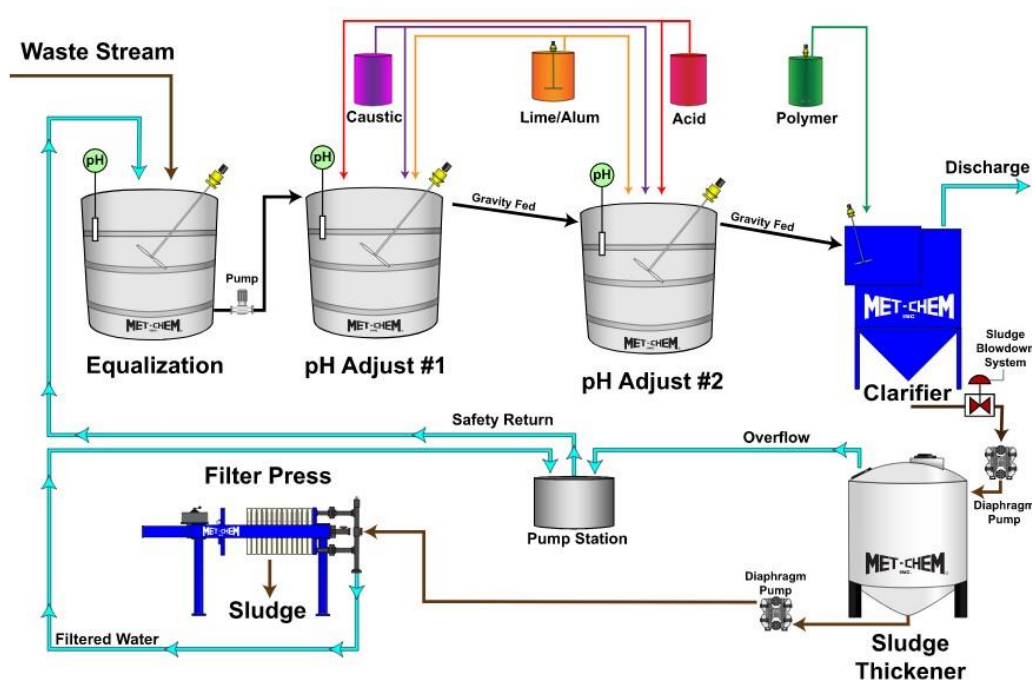
گرم به شکل قابل ملاحظه‌ای کمبود دارد. تصمیم‌گیری بهینه درباره انتخاب فناوری‌های تصفیه نه تنها باید بر اساس کارایی حذف آلاینده‌ها بلکه متکی بر تحلیل دقیق هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری، مدیریت پسماند و امکان بازیابی فلزات با ارزش باشد. پرداختن به این شکاف تحقیقاتی و ارائه تحلیل اقتصادی دقیق، ضمن تسهیل انتقال فناوری‌های نوین به مرحله بهره‌برداری صنعتی، باعث افزایش پذیرش و توسعه پایدار فناوری‌های تصفیه پساب در این صنعت پرچالش می‌شود.

### ۳. مبانی نظری و چارچوب مفهومی

#### ۳-۱ ماهیت شیمیایی پساب آبکاری

پساب حاصل از خطوط آبکاری گرم، ترکیبی پیچیده و متغیر است که عمدتاً حاوی یون‌های فلزی محلول مانند:  $(Cr^{6+}, Ni^{2+}, Zn^{2+}, Cu^{2+}, Cd^{2+})$ ، کمپلکس‌های فلزی پایدار (مثل کمپلکس‌های سیانیدی یا آمونیایی)، اسیدها و بازهای قوی مانند  $(H_2SO_4)$ ,  $(HCl)$ ,  $(NaOH)$  و مواد افزودنی آلی (مانند روشن‌کننده‌ها، ترکننده‌ها و ضدکف‌ها) می‌باشد. رفتار شیمیایی و سمیت این فلزات به شکل شیمیایی آن‌ها بستگی دارد. برای مثال، کروم شش ظرفیتی  $Cr(VI)$  بسیار سمی، سرطان‌زا و محلول است، در حالی که کروم سه ظرفیتی  $Cr(III)$  سمیت کمتری دارد و به راحتی هیدرولیز و رسوب می‌کند.

پارامترهای کلیدی مؤثر بر انتخاب روش تصفیه شامل pH، دما، قدرت یونی محلول، غلظت کل فلزات، حضور مواد آلی و کدورت است. به عنوان مثال، روش‌های جذب سطحی و تبادل یونی به شدت تحت تأثیر pH قرار دارند، زیرا pH بر بار سطحی جاذب و فرم یونی فلز تأثیر می‌گذارد. درک این مبانی شیمیایی برای طراحی یک سیستم تصفیه کارآمد و تفسیر نتایج ارزیابی اقتصادی ضروری است.



شکل ۲: شماتیک تصفیه فاضلاب فلزات سنگین

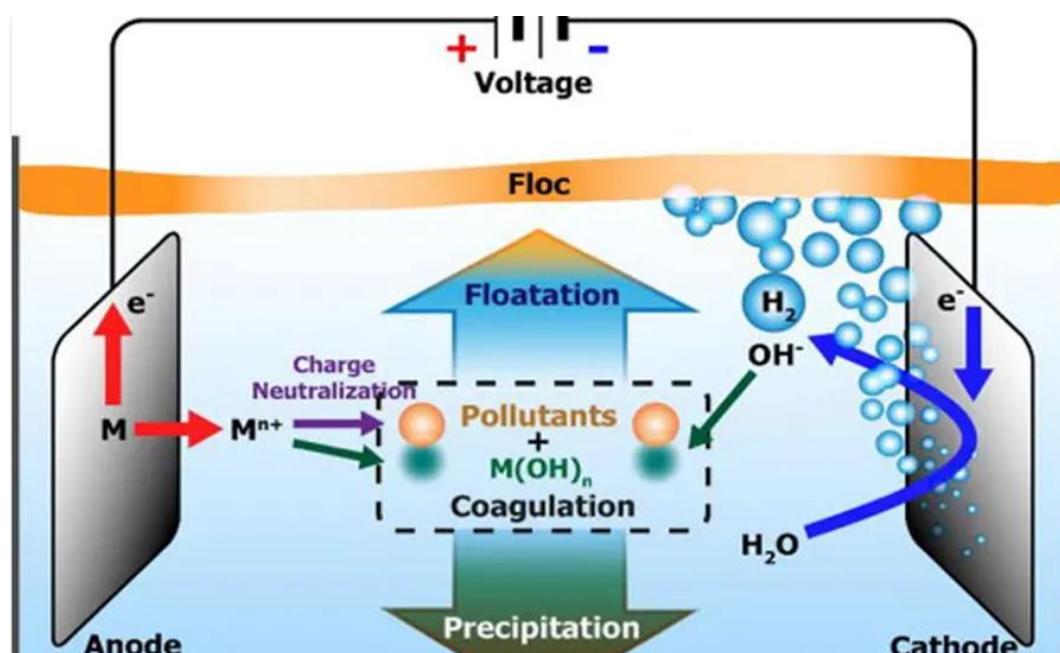
## ۲-۳ معرفی روش‌های نوین تصفیه

نانوفیلتراسیون (NF) و اسمز معکوس (RO): این روش‌های غشایی بر اساس اختلاف فشار، آب را از میان غشاهای نیمه‌تراوا عبور داده و یون‌های فلزی و دیگر آلاینده‌ها را جدا می‌کنند. اسمز معکوس قادر به حذف حتی یون‌های تک‌ظرفیتی است، در حالی که نانوفیلتراسیون برای جداسازی یون‌های دو و چندظرفیتی (مانند فلزات سنگین) مناسب‌تر است. مزیت اصلی، راندمان حذف بسیار بالا و امکان استفاده مجدد از آب تصفیه شده است. چالش اصلی، گرفتگی غشا و نیاز به پیش‌تصفیه دقیق است.

تبادل یونی پیشرفته با رزین‌های انتخاب‌پذیر: در این روش، یون‌های فلزی ناخواسته در پساب با یون‌های بی‌ضرر موجود در ساختار رزین تبادل می‌شوند. رزین‌های مدرن می‌توانند برای جذب انتخابی یک فلز خاص (مثل نیکل) طراحی شوند که امکان بازیابی با خلوص بالا را فراهم می‌کند. پس از اشباع، رزین با یک ماده شیمیایی (مانند اسید یا باز) احیا می‌شود. هزینه رزین و مواد احیاکننده از عوامل اقتصادی مهم هستند.

جذب سطحی با نانوکامپوزیت‌ها: نانوکامپوزیت‌هایی مانند نانولوله‌های کربنی عامل‌دار، نانوذرات اکسید آهن ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) پوشش‌دار یا کامپوزیت‌های پلیمری، به دلیل سطح ویژه فوق العاده بالا، ظرفیت جذب و سرعت جذب بالایی برای فلزات سنگین دارند. پس از اشباع، جذب می‌تواند احیا شده یا به عنوان یک پسماند غنی از فلز دفع شود. چالش، هزینه تولید جاذب‌های نانو و مسائل مربوط به جداسازی آن از آب پس از فرایند است.

الکتروکواگولاسیون (EC): در این روش الکتروشیمیایی، با عبور جریان مستقیم از الکترودهای فلزی (معمولاً آهن یا آلومینیوم)، کاتیون‌های فلزی در آند آزاد شده و با هیدروکسید حاصل از کاتد واکنش داده و تشکیل هیدروکسید فلزی نامحلول (فلوک) می‌دهند. این فلوک‌ها آلاینده‌ها را به دام انداخته و رسوب می‌کنند. مزیت آن کاهش مصرف مواد شیمیایی و تولید لجن فشرده‌تر است. هزینه برق و تعویض الکترودها عوامل اقتصادی کلیدی هستند.



شکل ۳: فرایند انعقاد الکتریکی

فناوری‌های زیستی و بیوسوربنت‌ها: در این روش از زیست‌توده مرده یا زنده (مانند باکتری‌ها، قارچ‌ها، جلبک‌ها یا پسماندهای کشاورزی مانند پوست گردو یا باگاس نیشکر) برای جذب فلزات سنگین استفاده می‌شود. مکانیسم شامل جذب سطحی، تبادل یونی یا انباشت درون سلولی است. این روش معمولاً کم‌هزینه و سازگار با محیط زیست است اما ممکن است سرعت پایین‌تر و ظرفیت محدودتری در مقایسه با جاذب‌های سنتزی داشته باشد.

### ۳-۳ شاخص‌های ارزیابی اقتصادی

برای مقایسه اقتصادی فناوری‌های مختلف، از شاخص‌های استاندارد مهندسی اقتصادی استفاده می‌شود: هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (CAPEX): شامل کلیه هزینه‌های خرید تجهیزات، نصب، راه‌اندازی و هزینه‌های مهندسی قبل از بهره‌برداری می‌شود. هزینه‌های عملیاتی سالیانه (OPEX): شامل هزینه‌های انرژی، مواد شیمیایی، نیروی انسانی، تعمیر و نگهداری، جایگزینی اجزا (مانند غشا یا رزین) و دفع پسماندها.

هزینه کل سالیانه (TAC): این شاخص هزینه‌های سرمایه‌ای را به صورت سالیانه تسهیل کرده و با هزینه عملیاتی سالیانه جمع می‌زند:

(۱)

$$TAC = \frac{CAPEX}{t} + OPEX$$

که در آن (t) دوره بازپرداخت در نظر گرفته شده است.

ارزش فعلی خالص (NPV): معیاری برای سودآوری پروژه که ارزش فعلی تمام جریان‌های نقدی ورودی (درآمدها، صرفه‌جویی‌ها) را منهای ارزش فعلی تمام جریان‌های نقدی خروجی (هزینه‌ها) در طول عمر پروژه محاسبه می‌کند. یک پروژه زمانی مقرون به صرفه است که (NPV > 0) باشد.

(۲)

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} - C_0$$

که در آن (Ct) خالص جریان نقدی در زمان (t)، (r) نرخ تنزیل، (n) عمر پروژه و (C0) سرمایه‌گذاری اولیه است.

نرخ بازده داخلی (IRR): نرخ تنزیلی که در آن ارزش فعلی خالص پروژه صفر می‌شود (NPV = 0) هرچه IRR بیشتر باشد، جذابیت سرمایه‌گذاری بالاتر است. معمولاً IRR باید از نرخ هزینه سرمایه (نرخ تنزیل) بیشتر باشد.

دوره بازگشت سرمایه (PBP): مدت زمانی که طول می کشد تا جریان نقدی انباشته حاصل از پروژه با سرمایه گذاری اولیه برابر شود. دوره بازگشت کوتاه تر، ریسک پروژه را کمتر می کند.

طراحی مفهومی و برآورد هزینه ها: برای هر فناوری، یک طراحی مفهومی اولیه شامل تجهیزات اصلی، ظرفیت و شرایط عملیاتی انجام شد. سپس هزینه ها به دو بخش تقسیم شدند:

CAPEX: با استناد به کاتالوگ سازندگان، برآوردهای مهندسی و داده های منتشر شده، هزینه خرید تجهیزات، لوله کشی، برق کشی، ساختمان و نصب برآورد گردید.

OPEX: هزینه های سالیانه انرژی (برق، سوخت)، مواد شیمیایی (اسید، باز، منعقدکننده، مواد احیاکننده رزین)، نیروی انسانی مورد نیاز برای بهره برداری، هزینه تعمیر و نگهداری (معادل درصدی از CAPEX)، هزینه جایگزینی غشا یا رزین (بر اساس عمر مفید)، و هزینه دفع لجن یا پسماندهای ثانویه محاسبه شد. همچنین، در صورت امکان بازیابی فلز (مخصوصاً در روش های IX) و غلظت دهی نهایی، درآمد حاصل از فروش آن به عنوان جریان نقدی مثبت در نظر گرفته شد.

تحلیل اقتصادی: افق زمانی تحلیل اقتصادی ۱۰ سال در نظر گرفته شد. با توجه به شرایط اقتصادی، نرخ تنزیل (r) ۱۸ درصد فرض گردید. برای هر فناوری، شاخص های NPV، IRR و PBP با استفاده از نرم افزار صفحه گسترده محاسبه شد. تمام محاسبات به قیمت های ثابت سال پایه انجام گرفت.

تحلیل حساسیت: برای درک تأثیر عدم قطعیت در پارامترهای کلیدی مانند نرخ تنزیل، هزینه انرژی و قیمت فلزات بازیافتی، تحلیل حساسیت بر روی شاخص NPV انجام شد.

#### ۴. روش تحقیق

##### ۴-۱ نوع و رویکرد پژوهش

این پژوهش از نوع کاربردی بوده و با رویکرد توصیفی-تحلیلی انجام شده است. هدف اصلی تحقیق، ارزیابی و مقایسه فنی-اقتصادی فناوری های نوین تصفیه پساب صنایع آبکاری حاوی فلزات سنگین است. در این راستا، با استفاده از داده های موجود در منابع علمی معتبر و مطالعات صنعتی، عملکرد فنی و شاخص های اقتصادی چند فناوری منتخب بررسی و مقایسه شده است. رویکرد تحقیق مبتنی بر تحلیل مهندسی اقتصادی و مقایسه شاخص های سرمایه گذاری و هزینه های بهره برداری در سیستم های مختلف تصفیه بوده است.

##### ۴-۲ جامعه آماری و محدوده مطالعه

جامعه مورد بررسی در این تحقیق شامل سیستم های تصفیه پساب در صنایع آبکاری فلزات است که پساب آن ها حاوی فلزات سنگین نظیر کروم، نیکل، روی، مس و کادمیوم می باشد. محدوده مطالعه بر فناوری های متداول و نوین مورد استفاده در تصفیه پساب های صنعتی تمرکز دارد و داده های مورد استفاده از مطالعات موردی صنعتی، گزارش های فنی و پژوهش های منتشر شده در مجلات علمی بین المللی استخراج شده اند.

##### ۴-۳ روش جمع آوری داده ها

در این پژوهش داده ها به روش مطالعات کتابخانه ای و بررسی منابع علمی جمع آوری شده است. منابع مورد استفاده شامل مقالات علمی منتشر شده در پایگاه های معتبر بین المللی، کتاب های تخصصی مهندسی محیط زیست، گزارش های صنعتی و استانداردهای مرتبط با مدیریت پساب های صنعتی بوده است. همچنین اطلاعات مربوط به عملکرد فناوری های تصفیه، هزینه های سرمایه گذاری و بهره برداری از مطالعات موردی منتشر شده در ادبیات علمی استخراج و تحلیل شده اند.

#### ۴-۴ مشخصات پساب و پارامترهای مورد بررسی

پساب حاصل از فرآیندهای آبکاری معمولاً ترکیبی پیچیده از یون‌های فلزی محلول، مواد شیمیایی و ترکیبات آلی است. در این پژوهش تمرکز اصلی بر فلزات سنگین متداول در پساب‌های آبکاری شامل کروم (Cr)، نیکل (Ni)، روی (Zn)، مس (Cu) و کادمیوم (Cd) بوده است. علاوه بر نوع و غلظت فلزات، پارامترهای مهمی مانند pH، دما، هدایت الکتریکی و حضور ترکیبات کمپلکس‌کننده نیز به عنوان عوامل مؤثر بر انتخاب و کارایی روش‌های تصفیه مورد توجه قرار گرفته‌اند.

#### ۴-۵ فناوری‌های مورد بررسی در تصفیه

در این تحقیق چند فناوری رایج و نوین تصفیه پساب برای مقایسه فنی و اقتصادی انتخاب شده‌اند. این فناوری‌ها شامل اسمز معکوس (RO)، تبادل یونی پیشرفته (IX)، الکتروکواگولاسیون (EC) و رسوبدهی شیمیایی (CP) هستند. هر یک از این روش‌ها دارای مکانیسم‌های حذف متفاوتی بوده و از نظر راندمان حذف فلزات، مصرف انرژی، تولید پسماند ثانویه و هزینه‌های عملیاتی با یکدیگر تفاوت دارند.

#### ۴-۶ شاخص‌های ارزیابی اقتصادی

برای ارزیابی اقتصادی فناوری‌های مورد بررسی، شاخص‌های متداول مهندسی اقتصادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این شاخص‌ها شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (CAPEX)، هزینه‌های عملیاتی و نگهداری سالیانه (OPEX)، هزینه کل سالیانه (TAC)، ارزش فعلی خالص (NPV)، نرخ بازده داخلی (IRR) و دوره بازگشت سرمایه (PBP) می‌باشند. استفاده از این شاخص‌ها امکان مقایسه جامع و واقع‌بینانه فناوری‌های مختلف از نظر اقتصادی را فراهم می‌کند.

#### ۴-۷ روش تحلیل داده‌ها و مدل ارزیابی اقتصادی

داده‌های جمع‌آوری شده با استفاده از روش تحلیل مهندسی اقتصادی مورد بررسی قرار گرفتند. ابتدا هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری هر فناوری بر اساس اطلاعات موجود در منابع علمی و مطالعات موردی برآورد شد. سپس شاخص‌های اقتصادی برای هر فناوری محاسبه و مقایسه گردید. در این تحلیل تلاش شد اثر عواملی مانند ظرفیت سیستم تصفیه، میزان حذف فلزات و امکان بازیابی منابع با ارزش بر عملکرد اقتصادی فناوری‌ها نیز مورد توجه قرار گیرد.

#### ۴-۸ سناریوهای مورد بررسی

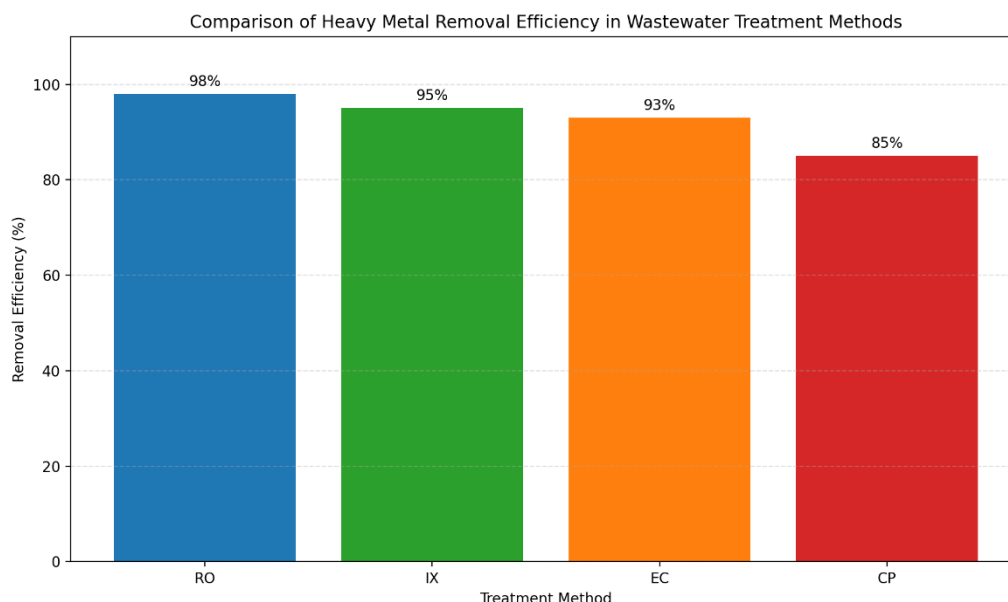
به منظور مقایسه دقیق‌تر فناوری‌های مختلف، چند سناریوی تحلیلی در نظر گرفته شد. این سناریوها شامل تغییر در غلظت فلزات سنگین در پساب ورودی، تفاوت در ظرفیت سیستم تصفیه و امکان بازیابی فلزات با ارزش از جریان‌های غلیظ بوده است. بررسی این سناریوها امکان تحلیل حساسیت و ارزیابی عملکرد اقتصادی فناوری‌ها در شرایط مختلف عملیاتی را فراهم می‌کند.

### ۵. بحث و یافته‌ها

#### ۵-۱ یافته‌های فنی

نتایج ارزیابی فنی نشان داد راندمان حذف کل فلزات سنگین در شرایط بهینه عملیاتی برای هر سیستم به شرح زیر است:

- سیستم اسمز معکوس (RO): بیش از ۹۸٪
- سیستم تبادل یونی پیشرفته (IX): حدود ۹۵٪
- سیستم الکتروکواگولاسیون (EC): حدود ۹۳٪
- سیستم رسوبدهی شیمیایی (CP): حدود ۸۵٪



شکل ۴: مقایسه ی راندمان حذف فلزات سنگین ۴ روش تصفیه فاضلاب صنعتی

سیستم RO به دلیل قدرت جداسازی مولکولی بالا، بهترین عملکرد را داشت. سیستم IX نیز با انتخاب رزین مناسب، عملکرد عالی و انتخابی پذیری نشان داد. سیستم EC راندمان مناسبی داشت اما وابسته به هدایت الکتریکی پساب بود. سیستم CP کمترین راندمان را داشت، به ویژه در غلظت‌های پایین فلزات [8].

از نظر تولید پسماند ثانویه، سیستم CP بیشترین حجم لجن (مرطوب) را تولید کرد. سیستم EC لجن فشرده‌تر و کم‌حجم‌تری تولید نمود. سیستم‌های RO و IX اساساً لجن شیمیایی تولید نمی‌کنند، اما پساب غلیظ (Concentrate) در RO و محلول احیا (Regenerant) در IX به عنوان جریان ثانویه غلیظ از فلزات نیازمند مدیریت هستند که می‌تواند به عنوان منبع بازیابی فلز در نظر گرفته شود [9].

### یافته‌های اقتصادی

برآورد هزینه‌ها برای واحد مطالعه موردی به شرح جدول زیر است (ارقام به میلیون ریال، تقریبی):

شاخص روش سنتی (CP) الکتروکواگولاسیون (EC) تبادل یونی (IX) اسمز معکوس  
CAPEX (RO) ۱۵۰۰۲۲۰۰۲۸۰۰۳۵۰۰ سالانه OPEX ۱۲۰۰۹۰۰۷۵۰۱۱۰۰ درآمد بازیابی

سالانه ۱۲۰۰۸۵۰۴۵۰۸۵۰ سالانه OPEX خالص ۰۵۰۳۰۰۲۵۰

نتایج محاسبات شاخص‌های اقتصادی در افق ۱۰ ساله با نرخ تنزیل ۱۸٪:

دوره بازگشت سرمایه (PBP):

روش IX: حدود ۳.۸ سال (کوتاه‌ترین)

روش EC: حدود ۵.۲ سال

روش RO: حدود ۶.۱ سال

روش CP: حدود ۴.۰ سال (اما با راندمان پایین و ریسک قانونی بالا)

ارزش فعلی خالص (NPV):

روش IX: ۲۸۰۰+ میلیون ریال (بهترین)

روش RO: ۹۵۰+ میلیون ریال

روش EC: ۵۰۰+ میلیون ریال

روش CP: ۱۵۰- میلیون ریال (منفی) [10.11].

نرخ بازده داخلی:

روش IX: ۳۲٪

روش EC: ۲۱٪

روش RO: ۲۴٪

روش CP: ۱۶٪ (کمتر از نرخ تنزیل)

### ۳-۵ بررسی پارامترهای کیفی پساب در مراحل مختلف فرآیند تصفیه

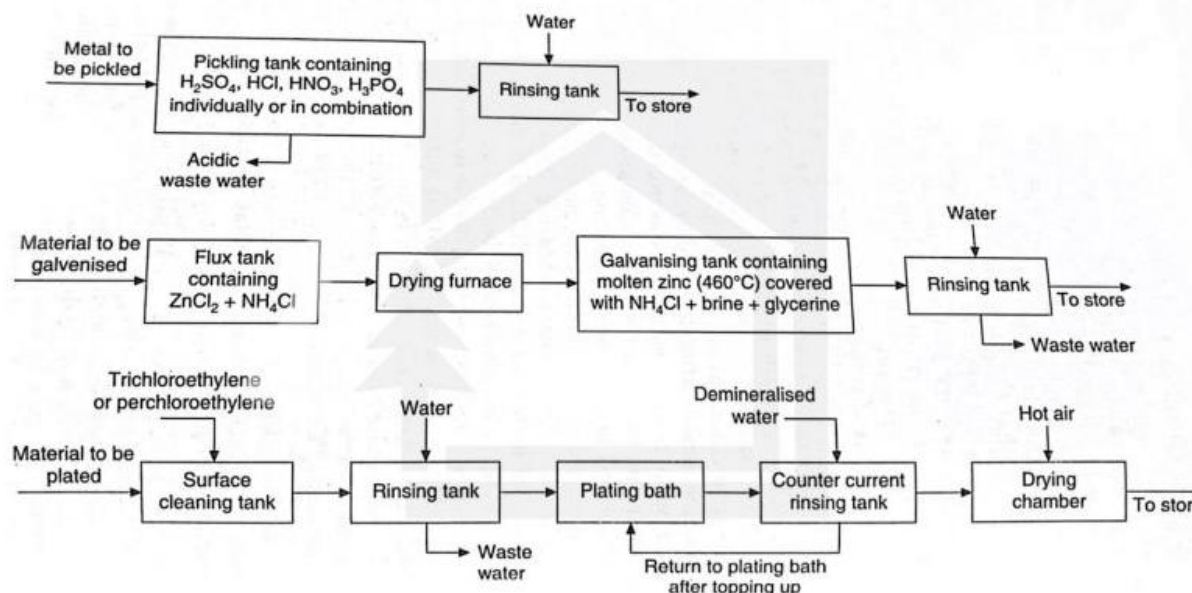
نتایج بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی پساب نشان می‌دهد که پارامترهایی مانند pH، هدایت الکتریکی (EC)، غلظت کل مواد محلول (TDS) و غلظت فلزات سنگین در تعیین نوع فناوری تصفیه نقش تعیین‌کننده‌ای دارند. در پساب خام صنایع آبکاری معمولاً pH در محدوده اسیدی قرار دارد که ناشی از حضور اسیدهای مورد استفاده در حمام‌های آبکاری است. هدایت الکتریکی و TDS نیز به دلیل حضور یون‌های فلزی محلول مقدار بالایی دارند. با اجرای فرآیندهای تصفیه، تغییرات محسوسی در این پارامترها مشاهده می‌شود و کاهش قابل توجهی در غلظت فلزات سنگین و مواد محلول رخ می‌دهد که نشان‌دهنده کارایی سیستم‌های تصفیه است.

جدول ۵: تغییرات برخی پارامترهای کیفی پساب در مراحل مختلف تصفیه

| پارامتر                                    | پساب خام | پس از پیش تصفیه | پساب خروجی |
|--------------------------------------------|----------|-----------------|------------|
| PH                                         | ۳.۵      | ۶.۸             | ۷.۲        |
| هدایت الکتریکی ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) | ۴۸۰۰     | ۳۱۰۰            | ۱۲۰۰       |
| TDS(mg/L)                                  | ۳۲۰۰     | ۲۱۰۰            | ۶۵۰        |

### ۴-۵ مطالعه موردی: ارزیابی اقتصادی تصفیه پساب واحد آبکاری شرکت دانش بنیان پویا نیرو

به منظور ارزیابی عملی کارایی روش‌های تصفیه و تحلیل اقتصادی آن‌ها، یک مطالعه موردی بر روی پساب تولیدی یک واحد صنعتی آبکاری گرم در شرکت دانش بنیان پویا نیرو انجام شد. ظرفیت تولید پساب در این واحد حدود ۳۰ مترمکعب در روز برآورد گردید و ترکیب پساب شامل فلزات سنگین رایج در فرآیندهای آبکاری نظیر نیکل، کروم و روی بود. بررسی اولیه ویژگی‌های پساب نشان داد که غلظت مجموع فلزات سنگین در پساب خام در محدوده ۱۰۰ تا ۵۰۰ میلی گرم بر لیتر قرار دارد که بیانگر بار آلودگی نسبتاً بالا و لزوم استفاده از یک سیستم تصفیه کارآمد برای کاهش اثرات زیست‌محیطی آن است.



شکل ۶: فلوچارت تصفیه پساب صنعتی صنایع آبکاری گرم حاوی فلزات سنگین

در این مطالعه، برای کاهش بار آلودگی اولیه پساب از فرآیند پیش تصفیه شامل تنظیم pH و رسوب دهی شیمیایی استفاده شد. این مرحله با هدف تبدیل یون های فلزی محلول به ترکیبات نامحلول و جداسازی آن ها به صورت لجن انجام گرفت. نتایج نشان داد که اجرای این مرحله قادر است بخش قابل توجهی از فلزات سنگین موجود در پساب را حذف کند و در نتیجه غلظت اولیه آلاینده ها به میزان قابل توجهی کاهش یابد. با این حال، به منظور دستیابی به کیفیت مناسب پساب خروجی، استفاده از یک مرحله تصفیه تکمیلی ضروری تشخیص داده شد.



شکل ۷: پروژه تصفیه پساب صنعتی در حال انجام مورد مطالعه شرکت دانش بنیان پویا نیرو

در مرحله دوم تصفیه، از فرآیند تبادل یونی برای حذف یون‌های فلزی باقی‌مانده در محلول استفاده شد. رزین‌های تبادل یونی به دلیل ظرفیت جذب بالا و انتخاب‌پذیری مناسب نسبت به برخی فلزات سنگین، توانستند غلظت یون‌های فلزی باقیمانده را به طور مؤثری کاهش دهند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که ترکیب این دو فرآیند می‌تواند راندمان حذف فلزات سنگین را به بیش از ۹۵ درصد برساند و کیفیت پساب خروجی را به محدوده قابل قبول برای تخلیه یا استفاده مجدد در فرآیندهای صنعتی نزدیک کند.

علاوه بر کارایی فنی، تحلیل اقتصادی سیستم نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحلیل نشان داد که استفاده از سیستم ترکیبی رسوب‌دهی شیمیایی و تبادل یونی نسبت به برخی فناوری‌های پیشرفته مانند اسمز معکوس از نظر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری اقتصادی‌تر است. به طور خاص، هزینه سالانه تصفیه در این سیستم حدود ۴۵ درصد کمتر از سیستم مبتنی بر اسمز معکوس برآورد شد که این موضوع می‌تواند برای بسیاری از واحدهای صنعتی کوچک و متوسط از نظر اقتصادی قابل توجه باشد.

در مجموع، نتایج این مطالعه موردی نشان می‌دهد که استفاده از یک سیستم تصفیه ترکیبی می‌تواند راهکاری مؤثر برای مدیریت پساب صنایع آبکاری باشد. این سیستم علاوه بر دستیابی به راندمان بالای حذف فلزات سنگین، امکان بازیابی برخی فلزات با ارزش مانند نیکل را نیز فراهم می‌کند و از این طریق می‌تواند به کاهش هزینه‌های عملیاتی و بهبود پایداری زیست‌محیطی صنایع کمک نماید. بنابراین، به‌کارگیری چنین رویکردهایی می‌تواند گامی مهم در جهت توسعه سیستم‌های تصفیه پایدار و اقتصادی در صنایع آبکاری محسوب شود.



شکل ۸: پروژه تصفیه پساب صنعتی تکمیل شده شرکت دانش بنیان پویا نیرو

#### ۵-۵ شناسایی فلزات سنگین غالب در پساب خام

بررسی ترکیب پساب خام نشان داد که فلزات سنگین اصلی موجود در پساب صنایع آبکاری شامل کروم، نیکل، روی و مس هستند. این فلزات به دلیل استفاده گسترده در حمام‌های آبکاری و فرآیندهای شست‌وشو وارد جریان پساب می‌شوند. نتایج آنالیز نشان داد که کروم و نیکل بیشترین سهم را در بار آلودگی فلزی دارند و غلظت آن‌ها در پساب خام به طور قابل توجهی بیشتر از سایر فلزات است. حضور این عناصر با غلظت بالا اهمیت استفاده از فناوری‌های کارآمد برای حذف یا بازیابی آن‌ها را نشان می‌دهد.

#### ۵-۶ مقایسه نتایج آنالیز آزمایشگاهی با حدود مجاز زیست‌محیطی

نتایج آنالیز آزمایشگاهی نمونه‌های پساب با استانداردهای سازمان حفاظت محیط زیست مقایسه شد. نتایج نشان داد که غلظت فلزات سنگین در پساب خام به طور قابل توجهی بالاتر از حدود مجاز تخلیه به محیط زیست است. با این حال، پس از اجرای فرآیندهای تصفیه پیشرفته، غلظت فلزات به محدوده قابل قبول نزدیک شده است. این موضوع بیانگر ضرورت استفاده از سیستم‌های تصفیه کارآمد برای جلوگیری از آلودگی منابع آب و خاک است.

جدول ۹: مقایسه غلظت فلزات سنگین با استاندارد محیط زیست

| فلز  | پساب خام | پس از تصفیه (mg/L) | حد مجاز (mg/L) |
|------|----------|--------------------|----------------|
| کرم  | ۱۸       | ۰.۸                | ۱              |
| نیکل | ۱۲       | ۰.۶                | ۱              |
| روی  | ۹        | ۰.۵                | ۲              |
| مس   | ۶        | ۰.۳                | ۱              |

## ۵-۷ ارزیابی کارایی روش‌های رایج تصفیه پساب آبکاری

روش‌های متداول تصفیه پساب در صنایع آبکاری شامل رسوب‌دهی شیمیایی، انعقاد-لخته‌سازی و تبادل یونی هستند. این روش‌ها به دلیل سادگی اجرا و هزینه سرمایه‌گذاری نسبتاً پایین، به طور گسترده در صنایع مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که این روش‌ها در غلظت‌های پایین فلزات کارایی محدودی دارند و در بسیاری از موارد حجم قابل توجهی لجن تولید می‌کنند که مدیریت آن هزینه‌بر است. بنابراین اگرچه این روش‌ها همچنان در مرحله پیش تصفیه کاربرد دارند، اما به تنهایی برای دستیابی به استانداردهای سختگیرانه زیست‌محیطی کافی نیستند.

## ۵-۸ تحلیل عملکرد روش‌های سنتی تصفیه

تحلیل فنی روش‌های سنتی نشان می‌دهد که رسوب‌دهی شیمیایی و انعقاد-لخته‌سازی قادرند بخش قابل توجهی از فلزات سنگین را حذف کنند، اما عملکرد آن‌ها به شدت وابسته به pH و نوع مواد شیمیایی مصرفی است. همچنین تولید لجن و نیاز به مدیریت پسماند از محدودیت‌های اصلی این روش‌ها محسوب می‌شود. تبادل یونی نیز از نظر راندمان حذف عملکرد مطلوبی دارد، اما هزینه رزین و حساسیت آن به ناخالصی‌ها از جمله چالش‌های این فناوری به شمار می‌رود.

جدول ۱۰: مقایسه عملکرد روش‌های سنتی تصفیه

| روش              | راندمان | مزایا               | محدودیت‌ها     |
|------------------|---------|---------------------|----------------|
| رسوب‌دهی شیمیایی | ۸۰-۸۵٪  | ساده و ارزان        | تولید لجن زیاد |
| انعقاد-لخته‌سازی | ۷۵-۸۲٪  | کاربرد صنعتی گسترده | وابستگی به PH  |
| تبادل یونی       | ۹۰-۹۵٪  | انتخاب‌پذیری بالا   | هزینه رزین     |

## ۵-۹ بررسی فناوری‌های نوین تصفیه پساب حاوی فلزات سنگین

در سال‌های اخیر فناوری‌های نوین متعددی برای تصفیه پساب‌های صنعتی توسعه یافته‌اند. از جمله این فناوری‌ها می‌توان به غشاهای نانوساختار، فرآیندهای جذب سطحی پیشرفته، زیستی جذب و فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته اشاره کرد. این

فناوری‌ها به دلیل راندمان بالاتر حذف آلاینده‌ها، کاهش تولید پسماند ثانویه و امکان بازیابی فلزات ارزشمند مورد توجه پژوهشگران و صنایع قرار گرفته‌اند. استفاده از مواد نانوساختار و جاذب‌های پیشرفته نیز باعث افزایش سطح فعال و بهبود عملکرد فرآیند جذب شده است.

#### ۵-۱۰ مقایسه راندمان حذف آلاینده‌ها در فناوری‌های نوین

بررسی داده‌های تجربی نشان می‌دهد که فناوری‌های نوین در مقایسه با روش‌های سنتی راندمان بالاتری در حذف فلزات سنگین دارند. به ویژه فرآیندهای غشایی و تبادل یونی پیشرفته قادرند بیش از ۹۵ درصد فلزات را از جریان پساب حذف کنند. این موضوع نشان می‌دهد که استفاده از این فناوری‌ها می‌تواند نقش مهمی در دستیابی به استانداردهای زیست‌محیطی سختگیرانه ایفا کند.

جدول ۱۱: مقایسه راندمان حذف فلزات در فناوری‌های نوین

| فناوری             | راندمان حذف فلزات |
|--------------------|-------------------|
| اسمز معکوس (RO)    | ٪۹۸               |
| تبادل یونی پیشرفته | ٪۹۵               |
| الکتروکواگولاسیون  | ٪۹۳               |
| جذب نانوساختار     | ۹۰-۹۴٪            |

#### ۵-۱۱ تحلیل انرژی، مواد و هزینه‌های عملیاتی در سیستم‌های نوین

تحلیل اقتصادی نشان می‌دهد که اگرچه فناوری‌های نوین معمولاً دارای هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بیشتری هستند، اما در بلندمدت به دلیل کاهش مصرف مواد شیمیایی، کاهش تولید لجن و امکان بازیابی فلزات ارزشمند می‌توانند مقرون به صرفه‌تر باشند. همچنین مصرف انرژی در برخی فناوری‌ها مانند اسمز معکوس نسبتاً بالا است، در حالی که روش‌هایی مانند جذب سطحی یا زیستی جذب هزینه عملیاتی پایین‌تری دارند.

#### ۵-۱۲ ارزیابی اقتصادی و تحلیل هزینه-فایده فناوری‌های نوین

نتایج تحلیل اقتصادی نشان می‌دهد که استفاده از فناوری‌های نوین می‌تواند علاوه بر کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی، منجر به ایجاد ارزش افزوده از طریق بازیابی فلزات شود. در بسیاری از موارد فلزاتی مانند نیکل، مس و کروم که از جریان‌های غلیظ بازیابی می‌شوند قابلیت استفاده مجدد در فرآیندهای صنعتی را دارند. محاسبات اقتصادی نشان داد که در برخی فناوری‌ها دوره بازگشت سرمایه کمتر از پنج سال بوده و نرخ بازده داخلی نیز در محدوده قابل قبول صنعتی قرار دارد.

#### ۵-۱۳ تأثیر فناوری‌های نوین بر شاخص‌های زیست‌محیطی و توسعه پایدار

اجرای فناوری‌های پیشرفته تصفیه پساب می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کاهش آلودگی محیط زیست داشته باشد. کاهش انتشار فلزات سنگین به منابع آب، کاهش تولید پسماند خطرناک و افزایش بازیافت منابع از جمله مزایای این فناوری‌ها محسوب می‌شود. این رویکرد با اصول توسعه پایدار و اقتصاد چرخشی همخوانی دارد و می‌تواند به کاهش فشار بر منابع طبیعی و افزایش بهره‌وری صنعتی کمک کند.

## ۵-۱۴ محدودیت‌ها و چالش‌های اجرای فناوری‌های نوین

با وجود مزایای متعدد فناوری‌های نوین، اجرای آن‌ها در صنایع با چالش‌هایی نیز همراه است. از جمله مهم‌ترین این چالش‌ها می‌توان به هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالا، نیاز به دانش فنی تخصصی، پیچیدگی بهره‌برداری و محدودیت‌های زیرساختی در برخی صنایع اشاره کرد. همچنین در برخی موارد نبود سیاست‌های حمایتی و آگاهی محدود مدیران صنعتی می‌تواند مانعی برای توسعه و اجرای گسترده این فناوری‌ها باشد.

## ۵-۱۵ ارائه مدل تلفیقی بهینه برای تصفیه و بازیافت فلزات

بر اساس نتایج تحلیل‌های فنی و اقتصادی، استفاده از یک مدل ترکیبی برای تصفیه پساب صنایع آبکاری می‌تواند کارایی سیستم را به طور قابل توجهی افزایش دهد. در این مدل پیشنهادی، ابتدا یک مرحله پیش تصفیه شامل انعقاد و رسوب‌دهی برای کاهش بار آلودگی اولیه اجرا می‌شود. سپس فرآیندهای پیشرفته مانند جذب سطحی یا نانوفیلتراسیون برای حذف باقی‌مانده فلزات به کار گرفته می‌شوند. در نهایت، استفاده از فرآیندهایی مانند تبادل یونی یا الکتروپالیز می‌تواند امکان بازیابی فلزات با ارزش را فراهم کند. این رویکرد چندمرحله‌ای علاوه بر افزایش راندمان حذف، از نظر اقتصادی نیز گزینه‌ای مناسب برای صنایع آبکاری محسوب می‌شود.

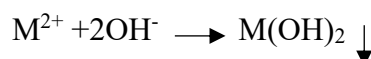
## ۵-۱۶ بررسی اقتصادی تصفیه پساب‌های شور در صنایع آبکاری

پساب صنایع آبکاری گرم معمولاً علاوه بر فلزات سنگین، مقادیر زیادی نمک‌های محلول مثل  $\text{NaCl}$  و  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  دارد که موجب افزایش شوری می‌شود. انتخاب روشی که بتواند فلزات سنگین را حذف کرده و اثرگذاری مناسبی روی شوری داشته باشد، اهمیت اقتصادی زیادی دارد [19].

## رسوب‌دهی شیمیایی + تبادل یونی: راهکار مقرون به صرفه

در مرحله اول، فلزات سنگین با اضافه کردن مواد قلیایی (آهک، سود، سولفید سدیم) به صورت رسوب هیدروکسید یا سولفید از جریان پساب حذف می‌شوند:

(۳):



که در آن M یک فلز سنگین (مانند Ni، Cr، Zn) است.

در مرحله دوم، استفاده از رزین‌های تبادل یونی باعث کاهش غلظت فلزات باقی‌مانده و امکان بازیابی فلزات با ارزش را فراهم می‌آورد. این ترکیب نسبت به روش‌های غشایی تنها، هزینه عملیاتی و سرمایه‌گذاری کمتری دارد [۲، ۲۰].

## الکترودیالیز برای پساب بسیار شور

در مواردی که هدف کاهش شوری آب است، ترکیب پیش تصفیه شیمیایی با فرآیند الکترودیالیز می تواند انتخاب مناسبی باشد، زیرا الکترودیالیز مخصوصاً برای TDS متوسط تا بالا هزینه انرژی کمتری نسبت به اسمز معکوس دارد [22].

جدول ۱۲: مقایسه اقتصادی روش های متداول تصفیه پساب شور

| روش تصفیه        | هزینه سرمایه گذاری | هزینه عملیاتی | راندمان حذف فلز | راندمان حذف نمک | قابلیت بازیابی | مناسب برای        |
|------------------|--------------------|---------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------|
| رسوب دهی شیمیایی | پایین              | پایین         | ۸۰-۹۰٪          | ندارد           | کم             | حذف اساسی فلزات   |
| تبادل یونی       | متوسط              | متوسط         | ۹۵-۹۹٪          | جزئی            | زیاد           | فلزات باقی مانده  |
| اسمز معکوس       | بالا               | بالا          | ۹۸٪             | بالا            | متوسط          | شوری زیاد و فلزات |
| الکترودیالیز     | متوسط              | متوسط         | متوسط           | بالا            | متوسط          | آب شور صنعتی      |

## جمع بندی

به طور کلی، استفاده از فرآیند ترکیبی (شیمیایی و تبادل یونی) برای تصفیه پساب های شور صنایع آبکاری، هم از نظر فنی و هم اقتصادی بهترین بازده را دارد. تنها در موارد پساب های بسیار شور یا با نیاز به آب با کیفیت بسیار بالا، افزودن واحد الکترودیالیز یا اسمز معکوس به عنوان مرحله نهایی توصیه می شود.

## ۶. تحلیل و بحث

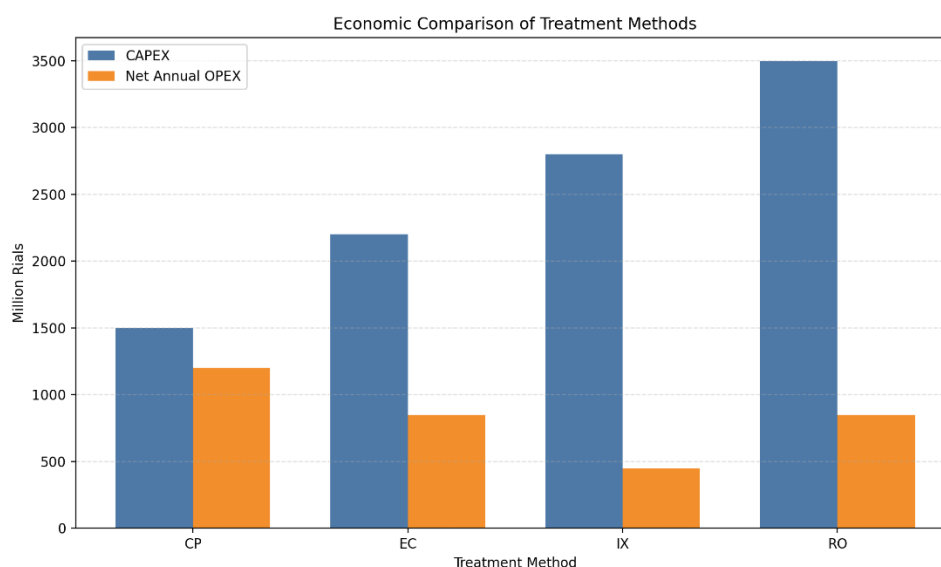
نتایج به وضوح نشان می دهد که اگرچه هزینه سرمایه گذاری اولیه (CAPEX) در روش های نوین مانند IX و RO به مراتب بیشتر از روش سنتی CP است، اما هزینه عملیاتی سالانه (OPEX) آن ها، به ویژه با لحاظ کردن درآمد احتمالی از بازیابی فلزات، بسیار پایین تر است. این امر منجر به NPV مثبت و IRR بالاتر در بلندمدت می شود [12.13].

در این مطالعه موردی، سیستم تبادل یونی (IX) به دلیل ترکیب مطلوب هزینه سرمایه گذاری متوسط، هزینه عملیاتی پایین (به ویژه پس از کسر درآمد بازیابی) و راندمان بالا، بهترین عملکرد اقتصادی را نشان داد. قابلیت بازیابی انتخابی فلزات با ارزشی مانند نیکل و مس، نقطه قوت اقتصادی این روش است [14].

سیستم اسمز معکوس (RO) با وجود بالاترین CAPEX و OPEX انرژی، به دلیل راندمان بی نظیر و امکان تولید آب با کیفیت بسیار بالا برای استفاده مجدد در فرآیند (که می تواند هزینه های تأمین آب خام را کاهش دهد)، در بلندمدت اقتصادی ارزیابی شد. تحلیل حساسیت نشان داد که با افزایش قیمت آب یا تشدید مقررات تخلیه، جذابیت این روش به سرعت افزایش می یابد [15].

سیستم الکتروکواگولاسیون (EC) گزینه میانی با CAPEX و OPEX متعادل بود. سیستم سنتی شیمیایی (CP) علیرغم سرمایه گذاری اولیه پایین و دوره بازگشت به ظاهر کوتاه، به دلیل NPV منفی و عدم امکان بازیابی منابع، در بلندمدت به صرفه نبود. همچنین هزینه های پنهان ناشی از دفع لجن خطرناک و ریسک عدم رعایت استانداردهای آینده، از جذابیت آن می کاهد [16].

نتیجه مقایسه نهایی: ترکیب هوشمندانه فناوری ها می تواند بهینه ترین راهکار باشد. به عنوان مثال، پیش تصفیه با الکتروکواگولاسیون یا شیمیایی ساده برای حذف بخش عمده فلزات و مواد معلق، به دنبال آن یک سیستم غشایی نانوفیلتراسیون برای پالایش نهایی و بازیافت آب، یا یک ستون تبادل یونی پولیشینگ برای دستیابی به استاندارد تخلیه بسیار سختگیرانه، می تواند هم هزینه کل (TAC) را کاهش دهد و هم عملکرد کلی سیستم را بهبود بخشد [16].



شکل ۱۳: مقایسه اقتصادی روش های تصفیه فاضلاب فلزات سنگین

## ۷. پیشنهادات

با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش و تحلیل فنی و اقتصادی روش‌های مختلف تصفیه پساب صنایع آبکاری، ارائه مجموعه‌ای از راهکارهای اجرایی و پژوهشی می‌تواند به بهبود مدیریت پساب‌های صنعتی و افزایش کارایی سیستم‌های تصفیه کمک نماید. در این راستا، مهم‌ترین پیشنهادات این تحقیق به شرح زیر ارائه می‌شود.

نخست، با توجه به اینکه یکی از مهم‌ترین موانع استفاده از فناوری‌های پیشرفته تصفیه پساب در صنایع کوچک و متوسط، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه است، پیشنهاد می‌شود نهادهای دولتی و سازمان‌های مرتبط با محیط زیست با ارائه تسهیلات مالی، وام‌های کم‌بهره و مشوق‌های اقتصادی، شرایط لازم برای به‌کارگیری فناوری‌های نوین تصفیه را در صنایع فراهم نمایند. چنین حمایت‌هایی می‌تواند نقش مهمی در نوسازی سیستم‌های تصفیه و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از فعالیت‌های صنعتی داشته باشد.

دوم، تدوین سیاست‌های تشویقی برای بازیابی و استفاده مجدد از منابع موجود در پساب‌های صنعتی از اهمیت زیادی برخوردار است. ایجاد بازار برای خرید پساب‌های غلیظ حاوی فلزات یا آب تصفیه‌شده با کیفیت بالا می‌تواند به شکل‌گیری مدل‌های اقتصادی جدید در مدیریت پساب کمک کند و صنایع را به سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پیشرفته‌تر مانند تبادل یونی، نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس ترغیب نماید.

سوم، با توجه به نتایج این تحقیق، استفاده از سیستم‌های تصفیه چندمرحله‌ای در صنایع آبکاری می‌تواند عملکرد فنی و اقتصادی بهتری نسبت به استفاده از یک فناوری منفرد داشته باشد. بنابراین پیشنهاد می‌شود طراحی سیستم‌های تصفیه پساب به گونه‌ای انجام گیرد که ابتدا از یک مرحله پیش تصفیه مانند رسوب‌دهی شیمیایی یا الکتروکواگولاسیون برای کاهش بار آلودگی اولیه استفاده شود و سپس فرآیندهای پیشرفته‌تری مانند تبادل یونی، نانوفیلتراسیون یا اسمز معکوس به عنوان مرحله تکمیلی به کار گرفته شوند.

چهارم، توسعه فناوری‌های بومی در زمینه تولید غشاهای تصفیه و رزین‌های تبادل یونی می‌تواند نقش مهمی در کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و کاهش وابستگی به تجهیزات وارداتی داشته باشد. سرمایه‌گذاری در تحقیقات کاربردی و همکاری میان دانشگاه‌ها، مراکز پژوهشی و صنایع مرتبط می‌تواند زمینه لازم برای بومی‌سازی این فناوری‌ها را فراهم نماید.

پنجم، با توجه به ارزش اقتصادی فلزات سنگین مورد استفاده در فرآیندهای آبکاری، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده تمرکز بیشتری بر روی بازیابی و استفاده مجدد از فلزاتی مانند نیکل، کروم و مس از جریان‌های پساب صورت گیرد. بازیابی این فلزات علاوه بر کاهش بار آلودگی زیست‌محیطی، می‌تواند به عنوان یک منبع اقتصادی برای واحدهای صنعتی محسوب شود و هزینه‌های بهره‌برداری سیستم‌های تصفیه را کاهش دهد.

ششم، انجام مطالعات جامع‌تر در مقیاس صنعتی برای ارزیابی همزمان شاخص‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم‌های مختلف تصفیه پیشنهاد می‌شود. چنین مطالعاتی می‌تواند به ارائه مدل‌های تصمیم‌گیری دقیق‌تر برای انتخاب فناوری مناسب تصفیه در صنایع آبکاری کمک کند و مسیر توسعه سیستم‌های پایدار مدیریت پساب را هموار سازد.

## جدول ۱۴: پیشنهادات

| ردیف | پیشنهاد                              | توضیح                                                                                               |
|------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1    | اجرای تصفیه چندمرحله‌ای              | استفاده از پیش تصفیه شیمیایی به همراه تبادل یونی با نانوفیلتراسیون برای افزایش راندمان و کاهش هزینه |
| 2    | طراحی متناسب با کیفیت پساب           | انتخاب فرآیند تصفیه بر اساس غلظت فلزات و شوری پساب هر واحد صنعتی                                    |
| 3    | بازیابی فلزات با ارزش                | بررسی امکان بازیافت نیکل، کروم و مس از پساب برای کاهش هزینه‌های عملیاتی                             |
| 4    | توسعه مدل اقتصاد چرخشی               | استفاده مجدد از آب تصفیه‌شده و فلزات بازیافتی در چرخه تولید                                         |
| 5    | بررسی فنی-اقتصادی در پژوهش‌های آینده | تحلیل دقیق‌تر هزینه، انرژی، لجن تولیدی و دوره بازگشت سرمایه در مقیاس صنعتی                          |

## ۸. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی و ارزیابی اقتصادی روش‌های مختلف تصفیه پساب‌های صنعتی حاوی فلزات سنگین در صنایع آبکاری پرداخته شد. روش تحقیق مبتنی بر تحلیل توصیفی-تحلیلی و بررسی داده‌های فنی و اقتصادی فناوری‌های مختلف تصفیه بود. در این راستا، ابتدا ویژگی‌های کیفی پساب صنایع آبکاری و ترکیب فلزات سنگین موجود در آن بررسی شد و سپس عملکرد فنی و اقتصادی روش‌های رایج و نوین تصفیه از جمله رسوب‌دهی شیمیایی، تبادل یونی، الکتروکواگولاسیون و اسمز معکوس مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین به منظور ارزیابی عملی این فناوری‌ها، یک مطالعه موردی بر روی یک واحد صنعتی آبکاری با ظرفیت متوسط انجام شد تا کارایی و هزینه‌های واقعی سیستم‌های تصفیه مورد تحلیل قرار گیرد.

نتایج بررسی‌ها نشان داد که پساب صنایع آبکاری معمولاً دارای غلظت بالایی از فلزات سنگین نظیر نیکل، کروم، روی و مس است که در صورت تخلیه مستقیم می‌تواند آثار زیست‌محیطی قابل توجهی بر منابع آب و خاک داشته باشد. تحلیل پارامترهای کیفی پساب در مراحل مختلف تصفیه نشان داد که استفاده از فرآیندهای پیش تصفیه مانند تنظیم pH و رسوب‌دهی شیمیایی می‌تواند بخش قابل توجهی از فلزات سنگین را حذف کند. با این حال، برای دستیابی به کیفیت مطلوب پساب خروجی و رعایت استانداردهای زیست‌محیطی، استفاده از فرآیندهای تکمیلی ضروری است.

بررسی و مقایسه فناوری‌های مختلف تصفیه نشان داد که روش‌های پیشرفته مانند تبادل یونی، نانوفیلتراسیون و اسمز معکوس قادرند راندمان حذف فلزات سنگین را به بیش از ۹۰ تا ۹۵ درصد برسانند. نتایج تحلیل اقتصادی نیز نشان داد که اگرچه برخی از این فناوری‌ها دارای هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالاتری هستند، اما به دلیل کاهش هزینه‌های عملیاتی، امکان بازیابی فلزات ارزشمند و کاهش تولید لجن خطرناک، در بلندمدت می‌توانند از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشند. نتایج

مطالعه موردی انجام شده نیز نشان داد که استفاده از یک سیستم ترکیبی شامل رسوب‌دهی شیمیایی و تبادل یونی می‌تواند ضمن دستیابی به راندمان بالای حذف فلزات، هزینه‌های سالانه تصفیه را نسبت به برخی روش‌های دیگر به طور قابل توجهی کاهش دهد.

بر اساس نتایج این تحقیق، پیشنهاد می‌شود در صنایع آبکاری از سیستم‌های تصفیه چندمرحله‌ای متناسب با ویژگی‌های پساب استفاده شود تا علاوه بر افزایش راندمان حذف آلاینده‌ها، هزینه‌های بهره‌برداری نیز کاهش یابد. همچنین حمایت‌های مالی و سیاست‌های تشویقی برای توسعه فناوری‌های نوین تصفیه، بومی‌سازی تجهیزات و توسعه فناوری‌های تولید غشا و رزین‌های تبادل یونی می‌تواند نقش مهمی در گسترش کاربرد این سیستم‌ها داشته باشد. علاوه بر این، توجه بیشتر به بازیابی فلزات با ارزش از پساب و انجام مطالعات جامع‌تر در مقیاس صنعتی می‌تواند به توسعه رویکردهای پایدار در مدیریت پساب‌های صنعتی و حرکت به سمت اقتصاد چرخشی در صنایع آبکاری کمک کند.

## ۹. منابع

1. Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 407-418.
2. Barakat, M. A. (2011). New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*, 4(4), 361-377.
3. World Health Organization (WHO). (2023). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed.).
4. Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, F. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). Metcalf & Eddy, Inc.
5. Mohammadi, T., Moheb, A., Sadrzadeh, M., & Razmi, A. (2005). Modeling of metal ion removal from wastewater by electrodialysis. *Separation and Purification Technology*, 41(1), 73-82.
6. Kurniawan, T. A., Chan, G. Y., Lo, W. H., & Babel, S. (2006). Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals. *Chemical Engineering Journal*, 118(1-2), 83-98.
7. Qdais, H. A., & Moussa, H. (2004). Removal of heavy metals from wastewater by membrane processes: a comparative study. *Desalination*, 164(2), 105-110.
8. Azimi, A., Azari, A., Rezakazemi, M., & Ansarpour, M. (2017). Removal of heavy metals from industrial wastewaters: a review. *ChemBioEng Reviews*, 4(1), 37-59.
9. Gunatilake, S. K. (2015). Methods of removing heavy metals from industrial wastewater. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies*, 1(1), 12-18.
10. Gao, J., Sun, S. P., Zhu, W. P., & Chung, T. S. (2014). Green modification of outer selective P84 nanofiltration (NF) hollow fiber membranes for cadmium removal. *Journal of Membrane Science*, 499, 361-369.
11. Hua, M., Zhang, S., Pan, B., Zhang, W., Lv, L., & Zhang, Q. (2012). Heavy metal removal from water/wastewater by nanosized metal oxides: a review. *Journal of Hazardous Materials*, 211, 317-331.
12. Kharissova, O. V., Dias, H. R., & Kharisov, B. I. (2015). Magnetic adsorbents for heavy metal removal. *Environmental Chemistry Letters*, 13(1), 1-14.
13. Malamis, S., & Katsou, E. (2013). A review on zinc and nickel adsorption on natural and modified zeolite, bentonite and vermiculite: examination of process parameters, kinetics and isotherms. *Journal of Hazardous Materials*, 252, 428-461.
14. Pugazhendhi, A., Boovaragamoorthy, G. M., Ranganathan, K., & Naushad, M. (2018). New insights into the mechanism of heavy metal removal from water using natural zeolite. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 57, 404-410.

15. Rybicki, S. (2020). Economic evaluation of wastewater treatment and recycling projects—A review. *Water Resources and Industry*, 24, 100132.
16. Sadegh, H., Ali, G. A., Gupta, V. K., Makhlof, A. S. H., Shahryari-ghoshekandi, R., Nadagouda, M. N., ... & Megiel, E. (2017). The role of nanomaterials as effective adsorbents and their applications in wastewater treatment. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 7(1), 1-14.
17. Vardhan, K. H., Kumar, P. S., & Panda, R. C. (2019). A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives. *Journal of Molecular Liquids*, 290, 111197.
18. Wang, L. K., Hung, Y. T., & Shammass, N. K. (Eds.). (2005). *Physicochemical treatment processes* (Vol. 3). Springer Science & Business Media.
19. Zare, E. N., Motahari, A., & Sillanpää, M. (2018). Nanoadsorbents based on conducting polymers for removal of heavy metal ions from water: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 26, 48-61.
20. Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. McGraw-Hill.
21. Gupta, V. K., Nayak, A., & Agarwal, S. (2015). Bioadsorbents for remediation of heavy metals. *Environmental Engineering Research*.

۲۲. سازمان حفاظت محیط زیست ایران. (۱۴۰۰). آئین نامه جلوگیری از آلودگی آب

۲۳. صفوی، س. ی. و قدوسی، م. (۱۳۹۸). تصفیه پیشرفته آب و پساب. انتشارات دانشگاه تهران

۲۴. محمدی، ع. (۱۳۹۹). کاربرد فناوری نانو در حذف فلزات سنگین از پساب های صنعتی. مجله علوم و تکنولوژی

محیط زیست، ۲۲(۴)، ۱۴۰-۱۲۵

۲۵. غلامی، ر. و حسینی، س. ع. (۱۴۰۲). ارزیابی اقتصادی-زیست محیطی روش های مختلف تصفیه پساب صنایع

آبکاری. نشریه مهندسی منابع آب، ۱۶(۱)

26. Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38(1), 11-4