مجله سلامت و محیط زیست، فصلنامه‌ی علمی پژوهشی
انجمن علمی بهداشت محیط ایران
دوره نوزدهم ، شماره اول، بهار ۱۴۰۵، صفحات ۱۱۹ تا ۱۳۶

Available online: https://ijhe.tums.ac.ir
مقاله پژوهشی

تحلیل مقایسه‌ای کارایی فرایندهای تصفیه فاضلاب در صنایع آبکاری نیکل-کروم و روی در حذف آلاینده‌ها

بهرام نعیمی[۱]، مریم حدادی[۱]، محمود علی محمدی[۲،۱]، محمد هادی دهقانی[۳،۱]، مینا آقائی[۲،۱]، فضل اله چنگانی[*۳،۱]

۱- گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
۲- مرکز تحقیقات کیفیت آب، پژوهشکده محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
۳- مرکز تحقیقات مواد زائد جامد، پژوهشکده محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۹
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۶
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۲۶

واژگان کلیدی: فاضلاب صنعتی، آبکاری، کارایی تصفیه، فلزات سنگین

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:
fchangan@tums.ac.ir

چکیده

زمینه و هدف: رشد شتابان فعالیت های صنعتی و شهری در دهه‌های اخیر باعث افزایش استفاده از فرآیندهای آبکاری و تولید فاضلاب‌های حاوی فلزات سنگین و ترکیبات سمی نظیر سیانید و فنول شده است. آلاینده‌هایی که می‌توانند مخاطرات قابل‌توجهی برای سلامت انسان و محیط‌زیست ایجاد کنند. این مطالعه با هدف ارزیابی کمی و کیفی فاضلاب صنایع آبکاری و سنجش انطباق آن با استانداردهای تخلیه، به دنبال ارائه مبنایی برای بهبود مدیریت پساب و کاهش پیامدهای محیط زیستی است.

روش بررسی: این مطالعه به صورت مقطعی در دو کارگاه آبکاری نیکل – کروم و روی مجهز به سیستم تصفیه داخلی در استان تهران انجام شد. پس از بررسی فرآیندهای آبکاری و واحدهای تصفیه، نمونه‌برداری به صورت لحظه ای در دو نوبت از فاضلاب خام و پساب خروجی صورت گرفت، به‌گونه‌ای که در هر نوبت ۶ نمونه و در مجموع ۱۲ نمونه جمع‌آوری گردید. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری و کارایی سیستم‌ها در حذف آلاینده‌ها ارزیابی شد.

یافته‌ها: یافته‌های حاصل از آنالیز نشان داد که در پساب واحد ۱ مقادیر COD و فلز نیکل و در پساب واحد ۲ مقدار فلز روی بالاتر از حدود مجاز تعیین شده قرار داشتند. سیستم تصفیه در واحد آبکاری نیکل – کروم بیشترین راندمان حذف را برای کروم (۱۰۰ درصد) و همچنین برای روی، فسفات و نیکل (۹۹-۹۴ درصد) نشان داد، در حالی‌که راندمان حذف COD و TSS به‌ترتیب ۴۵ و ۶۹ درصد برآورد شد. در واحد آبکاری روی، راندمان حذف نیکل، روی، COD و فسفات در حدود ۹۸ تا ۹۹ درصد بود، در حالی‌که کمترین کارایی حذف مربوط به سیانید (۵۰ درصد) و مس (۳۳ درصد) گزارش گردید.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این مطالعه نشان داد که مقادیر برخی پارامترهای پساب خروجی واحدها فراتر از حدود مجاز تعیین شده در استانداردهای سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران بوده و این امر ضرورت ارتقای فرآیندهای تصفیه و بهبود مدیریت پساب را به‌طور جدی نشان می‌دهد.

Please cite this article as: Naeimi B, Haddadi M, Alimohammadi M, Dehghani MH, Aghaei M, Changani F. The comparative analysis of wastewater treatment efficiency in nickel–chrome and zinc electroplating industries for pollutant removal. Iranian Journal of Health and Environment. 2026;19(1):119-36.

Copyright © 2026 Iranian Association of Environmental Health، and Tehran University of Medical Sciences. Published by Tehran University of Medical Sciences. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Noncommercial uses of the work are permitted، provided the original work is properly cited.

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-06-26]

مقدمه

در بسیاری از صنایع مدرن استفاده از فلزات و آلیاژها برای تولید قطعات مختلف ضروری است. اما این فلزات به‌طور ذاتی همیشه واجد تمامی ویژگی‌های موردنیاز از جمله مقاومت در برابر خوردگی، سختی، دوام حرارتی و زیبایی ظاهری نیستند. به‌منظور ارتقاء خواص سطحی فلزات، فرآیندهای پوشش‌دهی نظیر آبکاری فلزی نقش حیاتی ایفا می‌کنند (۱). با وجود اهمیت فراوان این صنعت، یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط زیستی مرتبط با آن تولید حجم زیادی از فاضلاب‌های صنعتی است (۲، ۳). این فاضلاب‌ها اغلب حاوی ترکیبات شیمیایی سمی و خطرناک از جمله پاک‌کننده‌های قلیایی، سیانیدها، فلزات سنگین (کروم، نیکل، روی، مس و...)، حلال‌های چربی‌زدایی، روغن و چربی و فنول هستند (۴-۹). در صورت دفع مستقیم این آلاینده‌ها به محیط خطراتی جدی برای سلامت انسان، منابع آب و اکوسیستم‌ها ایجاد خواهد شد (۴، ۱۰-۱۲). یکی از آلاینده های اصلی فاضلاب صنایع آبکاری نیز فلزات سنگین هستند. وجود یون‌های فلزی در فاضلاب‌های آبکاری علاوه بر افزایش سمیت، به‌طور قابل‌توجهی خاصیت خورندگی آن را نیز تشدید می‌کند. مطالعات نشان داده‌اند که مواجهه طولانی‌مدت با فلزات سنگین موجود در پساب آبکاری می‌تواند منجر به بروز بیماری‌هایی نظیر سرطان، کم‌خونی، اختلالات کبدی و کلیوی شود (۷). در پاسخ به درخواست‌های روزافزون برای تصفیه و مدیریت فاضلاب‌های تولید شده در صنعت آبکاری فلزات فناوری‌های مختلفی برای کاهش یا حذف آلاینده‌های موجود در این فاضلاب‌ها توسعه یافته و به کار گرفته شده است (۱۳)؛ از جمله می‌توان به روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مانند رسوب شیمیایی، تبادل یونی، جذب سطحی، فیلتراسیون غشایی، انعقاد الکتریکی، اکسیداسیون پیشرفته و بازیابی زیستی اشاره کرد (۱۰، ۱۴-۱۶). هر یک از این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارند و انتخاب آن‌ها به نوع آلاینده، غلظت آن، حجم پساب، هزینه‌ها و امکانات موجود بستگی دارد. بررسی‌های انجام شده حاکی از آن است که مطالعات گسترده‌ای در سطح ملی و بین‌المللی پیرامون ارزیابی کارایی فرآیندهای نوین در تصفیه فاضلاب صنایع آبکاری صورت گرفته است. این مطالعات به‌طور مستمر در جستجوی بهینه‌ترین روش‌ها برای کاهش آلاینده‌های زیان‌آور و ارتقای کارایی سیستم‌های تصفیه بوده‌اند (۱۷-۲۰). در مصر ترکیب کلرزنی قلیایی و کاهش شیمیایی همراه با انعقاد توسط CaO و $FeSO_4$ موفق به حذف کامل سیانید و کاهش فلزات سنگین تا سطوح مجاز شد (۵). همچنین در مراکش الکترو‌انعقاد با الکترود آلومینیومی تحت ولتاژ ۱۲ V کاهش قابل توجهی در COD، نیکل و کروم به ترتیب به میزان ۷۷ درصد، ۸۸ درصد و ۶۶ درصد ایجاد کرد (۲۱). در مجموع استفاده از منعقدکننده‌های شیمیایی به ویژه سولفات آهن با توجه به وابستگی کارایی آن به عواملی مانند pH، زمان تماس و دوز مصرفی روشی مؤثر در حذف یون‌های فلزی سنگین به ویژه Cr (VI) از فاضلاب‌های صنعتی به شمار می‌رود. نتایج یک مطالعه انجام شده در ایران نیز مؤید این نکته است (۲۲). با وجود توسعه و معرفی روش‌های نوین تصفیه بسیاری از واحدهای آبکاری در کشور همچنان به دلیل موانع فنی و محدودیت‌های اقتصادی از روش‌های سنتی و در برخی موارد غیرکارآمد برای تصفیه فاضلاب خود بهره می‌برند (۲۳). در ایران نیز با توجه به تمرکز قابل توجه صنایع آبکاری در مناطق شهری بررسی کیفیت پساب خروجی این واحدها و سنجش میزان تطابق آن‌ها با استانداردهای سازمان حفاظت محیط‌زیست از اهمیت بالایی برخوردار است. لازم به تأکید است که در ایران تاکنون مطالعه‌ای جامع که به‌طور یکپارچه راندمان حذف انواع آلاینده‌ها را در واحدهای آبکاری مورد ارزیابی قرار داده باشد گزارش نشده است؛ به‌طوری‌که عمده پژوهش‌های پیشین بر بررسی و حذف یک آلاینده مشخص یا گروه محدودی از آلاینده‌ها

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-06-26]

متمرکز بوده‌اند. بر این اساس، خلأ قابل‌توجهی در داده‌های مستند و قابل اتکا درباره عملکرد واقعی سیستم‌های تصفیه مورد استفاده در صنایع داخلی ایران وجود دارد. از این‌رو، مطالعه حاضر با هدف ارزیابی و مقایسه عملکرد سیستم‌های تصفیه فاضلاب آبکاری انجام شد تا ضمن پر کردن خلأهای علمی موجود، زمینه بهینه‌سازی فرایندهای تصفیه و پیش‌بینی عملکرد آن‌ها فراهم شود. از سوی دیگر، نتایج این پژوهش می‌تواند به صنایع آبکاری در انتخاب روش‌های تصفیه کارآمدتر و مقرون‌به‌صرفه‌تر، کاهش بار آلاینده‌ها و انطباق با استانداردهای محیط زیستی کمک کند. اگرچه این پژوهش نوآوری بنیادی در معرفی روش‌های نوین تصفیه ارائه نمی‌دهد، اما ارزش علمی آن در تحلیل و به‌کارگیری فناوری‌های شناخته‌شده در مقیاس صنعتی و شرایط واقعی ایران است.

مواد و روش‌ها

این مطالعه یک مطالعه مقطعی از نوع تجربی است که با هدف تحلیل مقایسه‌ای کارایی سیستم‌های تصفیه فاضلاب در دو واحد صنعت آبکاری نیکل-کروم و روی در شهر تهران انجام گرفته است.

_ *منطقه مورد مطالعه*

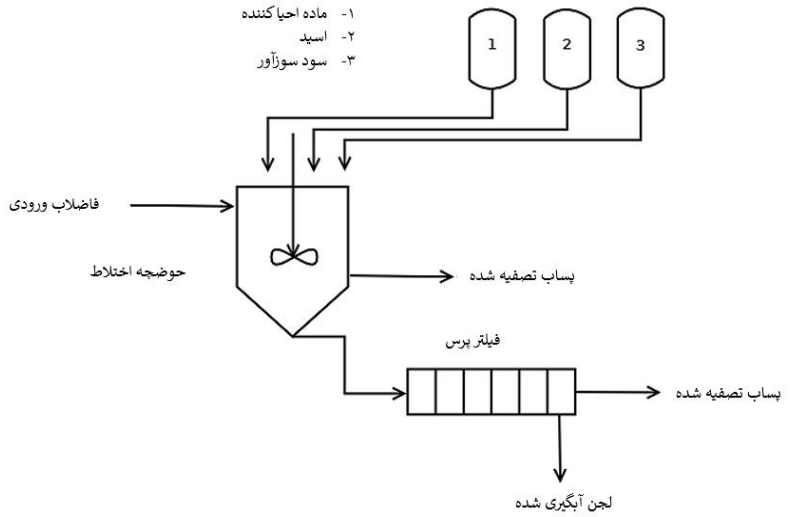
مطالعه حاضر در دو واحد صنعتی واقع در استان تهران انجام گرفت. یکی از این واحدها کارخانه‌ای فعال در زمینه آبکاری نیکل-کروم و دیگری کارخانه‌ای در حوزه آبکاری روی است که از مراکز مهم صنعتی کشور در زمینه فلزکاری و پوشش‌دهی فلزات به‌شمار می‌روند. این پژوهش در بازه زمانی نیمه دوم سال ۱۴۰۱ تا نیمه نخست سال ۱۴۰۲ اجرا شد. بازدیدهای میدانی در فصل پاییز انجام شد و نمونه‌برداری‌ها طی ماه‌های آبان و آذر صورت گرفت. فرایندهای آبکاری در این صنایع با تولید فاضلاب‌هایی همراه است که دارای بار آلودگی بالایی از جمله فلزات سنگین مانند نیکل، کروم و روی، ترکیبات آلی، شوینده‌ها و ذرات معلق هستند. از این‌رو تصفیه مؤثر این نوع فاضلاب‌ها برای پیشگیری از آلودگی منابع آب و خاک منطقه از اهمیت محیط زیستی بالایی برخوردار است.

_ *فرآیند تصفیه فاضلاب و گردش عملیات در واحدهای مختلف*

آبکاری شماره ۱ (نیکل-کروم)

در کارگاه شماره ۱ که از آب چاه با دبی m^3/day ۱ استفاده می‌کند، مطابق شکل ۱ از روش ترسیب هیدروکسیدی براي حذف فلزات سنگین، ذرات معلق و مواد محلول موجود در فاضلاب استفاده می‌شود. اساس این روش حلالیت پایین هیدروکسیدهاي فلزي در حالت قلیایي است. در این کارگاه به دلیل حجم پایین تولید، تصفیه فاضلاب به صورت منقطع انجام می‌گیرد. به منظور حذف کروم شش ظرفیتی به روش ترسیب شیمیایی در ابتدا لازم است این عنصر به حالت سه ظرفیتی خود احیا شود. لذا در ابتدای فرآیند تصفیه، pH فاضلاب سنجیده می‌شود. در صورتی که فاضلاب اسیدی باشد نیازی به افزودن اسید به مخزن نیست. اما اگر فاضلاب به دلیل وجود مواد قلیایی، خاصیت اسیدی لازم را نداشته باشد با افزودن اسید سولفوریک به فاضلاب شرایط اسیدی لازم تأمین می‌گردد. سپس با افزودن عوامل شیمیایی احیاکننده مثل متابی‌سولفیت سدیم، کروم شش ظرفیتی به کروم سه ظرفیتی احیا می‌گردد. در ادامه با افزودن سود و بالا بردن pH، کروم، نیکل و بسیاری از آلاینده های موجود در فاضلاب به شکل رسوب حذف می‌گردند. پس از اتمام عملیات ته نشینی پساب تصفیه شده از مخزن خارج شده و لجن برای آبگیری به فیلترپرس هدایت می‌گردد در هر مرحله به منظور کنترل فرآیند، pH فاضلاب سنجیده و در صورت لزوم کنترل می‌گردد.

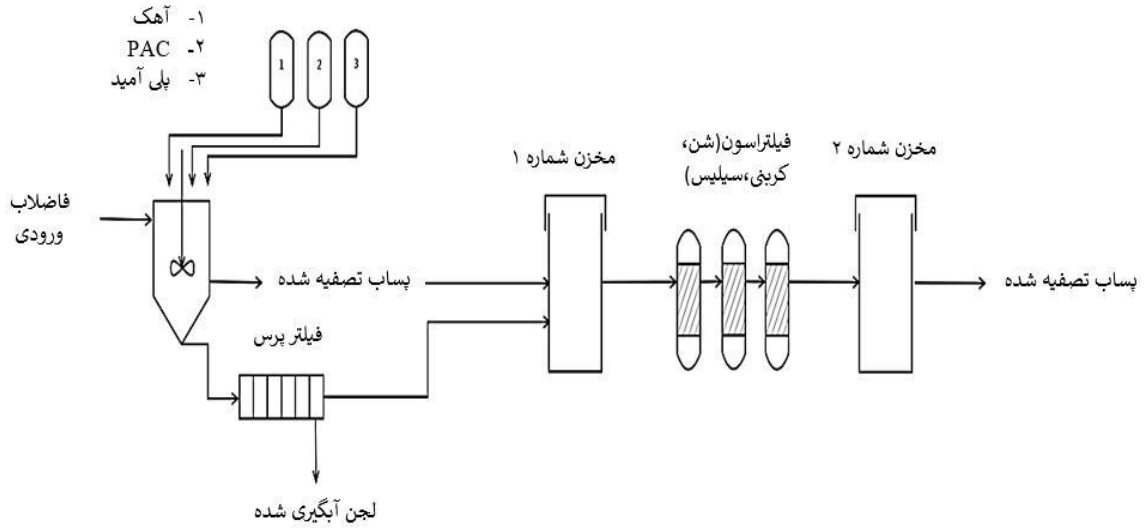
[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-06-26]



شکل ۱- فرآیند تصفیه فاضلاب و گردش عملیات در آبکاری شماره ۱

آبکاری شماره ۲ (گالوانیزه اسیدی(روی))

در واحد ۲ که از آب چاه با دبی m^3/day ۲ استفاده می‌کند مطابق شکل ۲، فاضلاب ورودی ابتدا وارد مخزن واکنش شده و در این مرحله مواد شیمیایی شامل آهک، پلی‌آلومینیوم کلراید (PAC) و پلی‌آمید به آن اضافه می‌شود. آهک برای تنظیم و کنترل pH، PAC به‌منظور تشکیل فلاک و پلی‌آمید برای افزایش اندازه و استحکام فلاک‌ها به کار می‌روند. پس از تکمیل واکنش‌های شیمیایی و انجام فرآیند ته‌نشینی، لجن باقیمانده به منظور آب‌گیری به واحد فیلتر پرس منتقل می‌شود. پساب تصفیه شده از این مرحله به مخزن شماره ۱ هدایت شده و در آن ذخیره می‌شود. سپس برای حذف ذرات معلق باقیمانده و سایر آلاینده‌های احتمالی، پساب از سه مخزن فیلتراسیون عبور می‌کند. در نهایت پساب حاصل کیفیت لازم را برای استفاده مجدد در فرآیند تولید به دست آورده و قابلیت بازچرخانی در سیستم ر دارد.



شکل ۲- فرآیند تصفیه فاضلاب و گردش عملیات در آبکاری شماره ۲

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-06-26]

_ *نمونه برداری*

به‌منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی فاضلاب و ارزیابی عملکرد سیستم‌های تصفیه، برنامه نمونه‌برداری از آب ورودی به سیستم، فاضلاب تولیدی و پساب تصفیه شده طراحی و اجرا شد. نقاط برداشت نمونه شامل خروجی منبع تأمین آب، ورودی تصفیه‌خانه و خروجی تصفیه‌خانه در هر واحد بود. این نقاط به‌گونه‌ای انتخاب شدند که نمایانگر کیفیت واقعی فاضلاب ورودی و خروجی هر فرآیند باشند. با توجه به بررسی دو کارگاه آبکاری در این مطالعه، در هر نوبت نمونه‌برداری مجموعاً شش نمونه جمع‌آوری شد؛ به‌گونه‌ای که از هر کارگاه یک نمونه از منبع تأمین آب، یک نمونه از ورودی سیستم تصفیه و یک نمونه از خروجی سیستم تصفیه برداشت گردید. نظر به آن‌که کمیت و کیفیت آب مصرفی، میزان فاضلاب تولیدی و شاخص‌های عملکردی واحدها در طول سال تغییرات قابل‌توجهی نداشت، نمونه‌برداری در دو نوبت مجزا، یک‌بار در آبان‌ماه و یکبار در آذرماه انجام شد که می‌توانست نماینده مناسبی از شرایط بهره‌برداری سیستم‌ها باشد. در مجموع، تعداد نمونه‌های جمع‌آوری شده در این مطالعه به ۱۲ نمونه رسید. بر اساس دستورالعمل‌های استاندارد نمونه‌برداری، اگرچه برای اندازه‌گیری برخی پارامترها از جمله فلزات، فنول، BOD، سیانید و جامدات امکان استفاده از ظروف پلاستیکی یا شیشه‌ای وجود دارد، اما برای اندازه‌گیری پارامترهایی نظیر روغن و چربی و فسفات استفاده از ظروف شیشه‌ای الزامی است. از این‌رو، به‌منظور اطمینان از صحت و دقت نتایج، کلیه نمونه‌ها در ظروف شیشه‌ای به حجم ۵۰۰ mL و بصورت لحظه ای (grab) برداشت شدند (۲۴). این ظروف پیش از نمونه‌برداری به‌طور کامل با اسید شسته و پاکسازی شده بودند. نمونه‌های جمع‌آوری شده پس از ثبت مشخصات و کدگذاری، بلافاصله در شرایط سرد و در دمای حدود ۴ °C به آزمایشگاه منتقل شدند تا از بروز تغییرات شیمیایی و بیولوژیکی احتمالی جلوگیری شود. این نمونه‌ها تا زمان انجام آنالیز در شرایط سرد نگهداری شده و سپس مورد آنالیز قرار گرفتند.

_ *آنالیز نمونه ها*

تعیین مقادیر پارامترها بر اساس دستورالعمل‌های مندرج در کتاب روش‌های استاندارد برای آزمون آب و فاضلاب انجام گرفت (۲۵). آنالیز فلزات سنگین شامل نیکل (Ni)، کروم (Cr)، روی (Zn) و مس (Cu) با استفاده از دستگاه ICP-MS مدل Agilent 7900 و به روش قرائت مستقیم انجام شد. به منظور اطمینان از دقت نتایج کلیه مراحل آماده‌سازی، نگهداری و اندازه‌گیری نمونه‌ها مطابق با استانداردهای بین‌المللی و الزامات سازمان حفاظت محیط‌زیست انجام گردید. داده‌های خام حاصل از اندازه‌گیری‌ها در نرم‌افزار Microsoft Excel ثبت و پردازش شدند.

_ تضمین و کنترل کیفیت داده‌ها

برای هر آلاینده، نمونه‌های استاندارد و نمونه‌های تکراری (Duplicate Samples) مورد آنالیز قرار گرفت تا صحت و دقت نتایج ارزیابی شود؛ به‌طوری‌که نتایج حاصل از نمونه‌های تکراری با ضریب انحراف معیار کمتر از ۵ درصد به‌عنوان نتایج قابل قبول در نظر گرفته شدند. همچنین، در برخی آنالیزها از استاندارد شامل محلول‌هایی با غلظت‌های مشخص آلاینده استفاده شد تا عملکرد و قابلیت اطمینان روش‌های اندازه‌گیری مورد تأیید قرار گیرد.

یافته‌ها

مقادیر اندازه‌گیری شده شاخص‌های کیفی فاضلاب و مقادیر مجاز بر اساس استانداردهاي خروجی فاضلاب برای تخلیه به چاه جذبی در جدول ۱ ارائه شده‌اند تا تصویری جامع از وضعیت ورودی و خروجی واحدهای آبکاری فراهم شود و مبنایی برای قضاوت درباره انطباق یا عدم انطباق نتایج با الزامات قانونی بدست آید. توجه به این مقایسه نه‌تنها تصویری روشن از میزان دستیابی به استانداردها به دست می‌دهد، بلکه می‌تواند نقاط ضعف بالقوه فرآیندهای تصفیه

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-06-26]

را نیز آشکار سازد و راهنمایی برای ارتقای عملکرد آن‌ها در شرایط عملیاتی آینده باشد. به‌منظور تمرکز بر آلاینده‌های کلیدی، شکل ۳ تنها پارامترهایی را نمایش می‌دهد که در پساب خروجی دو واحد آبکاری شماره ۱ و ۲ از حدود مجاز تعیین شده در استانداردهای ملی ایران تجاوز کرده‌اند. در این شکل بخش (a) به تغییرات غلظت فلز روی، بخش (b) به غلظت فلز نیکل و بخش (c) به تغییرات شاخص COD اختصاص یافته است. افزون بر این، شکل ۴ راندمان حذف هر یک از این آلاینده‌ها را در دو واحد مورد بررسی به‌صورت مقایسه‌ای نشان می‌دهد و بدین ترتیب امکان تحلیل دقیق‌تر کارایی فرآیندهای تصفیه و ارزیابی تفاوت عملکرد آن‌ها فراهم می‌شود.

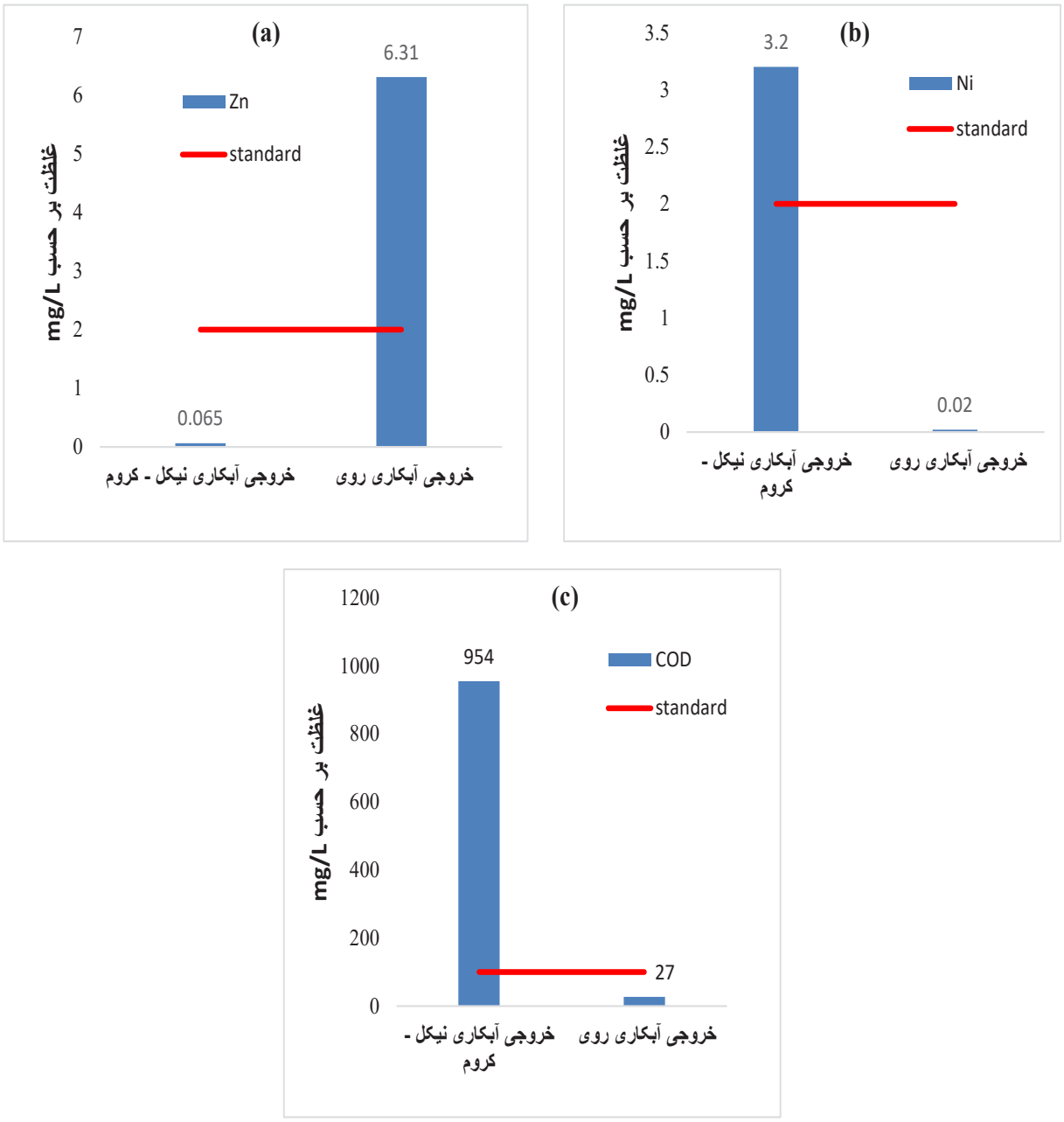
جدول ۱- مقایسه غلظت پارامترهای فیزیکی- شیمیایی و فلزات سنگین در ورودی و خروجی فرآیند آبکاری با حدود مجاز استاندارد تخلیه فاضلاب*

پارامتر	آبکاری نیکل – کروم		آبکاری روی		استانداردهای خروجی فاضلاب
	ورودی	خروجی	ورودی	خروجی	
Cr	۲/۳	۰/۰۰۵	–	–	۲
Cu	۰/۸۸	۰/۴۵	۰/۰۶	۰/۰۴	۱
Ni	۵۱/۲	۳/۲	۰/۹	۰/۰۲	۲
Zn	۷/۱۳	۰/۰۶۵	۷۳۴/۱	۶/۳۱	۲
TDS	۲۲۳۵	۴۴۵۰	۷۲۵۰	۵۵۰	-**
TSS	۸۴	۲۶	۶۶۰	۱۵	–
COD	۱۷۴۰	۹۵۴	۱۱۶۲	۲۷	۶۰ (لحظه ای ۱۰۰)
روغن و چربی	۱/۶	۰/۳	۱/۳	۰/۳	۱۰
فنول	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۵	۰/۰۱	ناچیز
سیانید	۰/۱۶۳	۰/۰۳۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	۰/۱
فسفات	۳۶/۸	۱/۵	۱۹/۷	۰/۱	۶

* مقادیر در جدول فوق همگی بر حسب mg/L هستند.

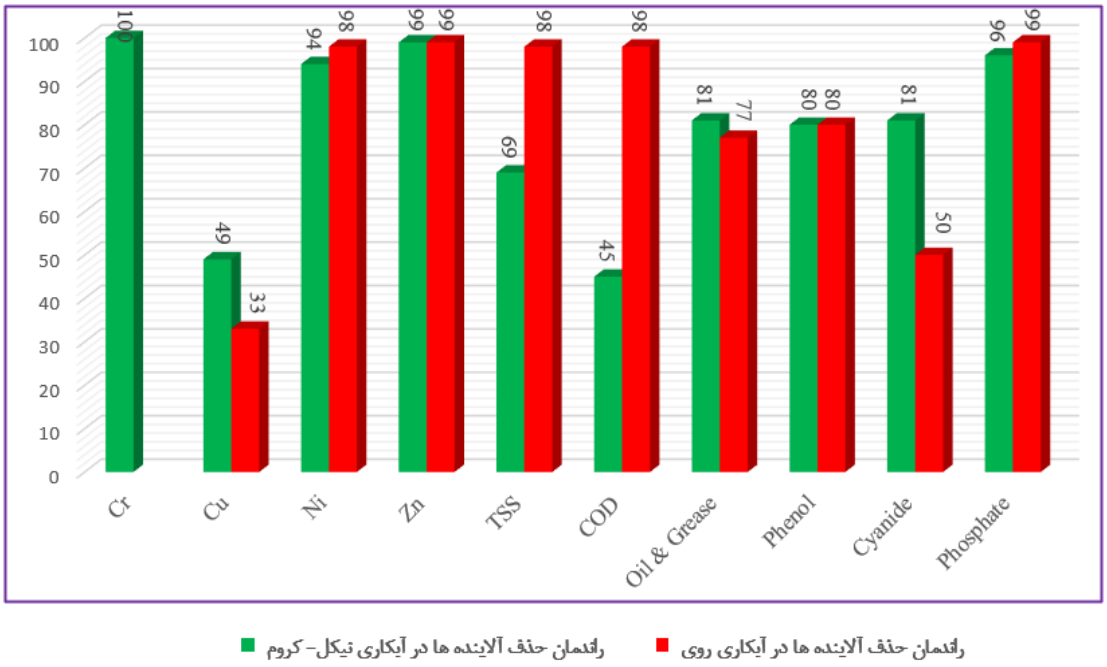
** طبق استاندارد خروجی فاضلاب ایران، پارامتر TDS برای تخلیه به چاه جذبی در جدول استاندارد مقدار مشخصی ندارد، بلکه تحت شرایط تبصره‌ها ممکن است محدودیت اعمال شود.

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-06-26]



شکل ۳- پارامترهای متجاوز از استانداردهای ملی ایران در خروجی از آبکاری شماره ۱ و ۲ ، a) فلز روی، b) فلز نیکل و COD (c

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-06-26]



شکل ۴- مقایسه راندمان حذف آلاینده‌ها در دو واحد آبکاری

بحث

در مطالعه حاضر کارایی فرایندهای تصفیه فاضلاب در صنایع آبکاری نیکل – کروم و روی در حذف آلاینده‌های مختلف از جمله فلزات سنگین (کروم، نیکل، مس و روی)، کل جامدات محلول (TDS)، کل جامدات معلق (TSS)، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD)، روغن و چربی، فنول، سیانید و فسفات مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که فرایند تصفیه در کارگاه شماره ۱ (آبکاری نیکل–کروم) بر اساس ترسیب شیمیایی بوده در حالی که در کارگاه شماره ۲ (آبکاری روی) از انعقاد شیمیایی استفاده می‌شد. نتایج مطالعه حاکی از آن بود که واحدهای مورد بررسی در حذف برخی آلاینده‌ها عملکرد قابل قبولی داشتند. با این حال برخی پارامترها در خروجی صنایع بالاتر از حد مجاز تعیین شده در استانداردهای ملی کشور بودند که ضرورت بهبود فرایندهای تصفیه و مدیریت پساب را نشان می‌دهد. جزئیات پارامترهای خروجی در ادامه ارائه شده است.

فلزات سنگین: در این مطالعه بر اساس نتایج به‌دست آمده غلظت کروم در فاضلاب کارگاه شماره ۱ برابر با ۲/۳ mg/L تعیین گردید. پس از اعمال فرآیند تصفیه این فلز سنگین به‌صورت کامل از فاضلاب حذف شد. به‌عبارتی غلظت آن در پساب خروجی به کمتر از حد تشخیص روش آنالیز رسید. مطالعات دیگر نیز نشان داده‌اند که در شرایط کنترل شده، استفاده از فرایند ترسیب شیمیایی منجر به دستیابی به راندمان‌های بسیار بالا و در برخی موارد حتی حذف کامل کروم شده است (۲۶). در مقابل در فاضلاب کارگاه شماره ۲ هیچگونه ردپایی از فلز کروم تشخیص داده نشد. دستیابی به حذف کامل در فرایند ترسیب نشان‌دهنده آن است که این واحد، به‌عنوان روشی ساده و کم هزینه، از توانایی بالایی

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-06-26]

برای ایفای نقشی مؤثر در مرحله پیش‌تصفیه و حتی به‌عنوان فرایند اصلی تصفیه فاضلاب های آلوده به فلز کروم برخوردار است. غلظت فلز مس در فاضلاب کارگاه شماره ۱ و ۲ به‌ترتیب ۰/۸۸ و ۰/۰۶ mg/L ثبت شد. پس از طی فرآیند تصفیه سطح این آلاینده به‌ترتیب به ۰/۴۵ و ۰/۰۴ mg/L کاهش پیدا کرد. راندمان حذف مس در واحدهای آبکاری شماره ۱ و ۲ به‌ترتیب ۴۹ و ۳۳ درصد گزارش شد. تحلیل نتایج نشان داد که مقادیر باقیمانده مس در پساب خروجی کاملاً در محدوده استانداردهای محیط زیستی قرار دارد. اگرچه غلظت فلز مس در پساب خروجی در محدوده مجاز استاندارد قرار دارد، اما باید توجه داشت که غلظت‌های ورودی در این مطالعه بسیار پایین بوده‌اند. بدیهی است در شرایطی که بار ورودی مس افزایش یابد، دو فرایند مورد بررسی به‌تنهایی قادر به تأمین الزامات استاندارد نخواهند بود و در چنین حالتی، به‌کارگیری فرایندهای تصفیه با راندمان بالاتر و کارآمدتر ضرورت خواهد داشت. میزان فلز نیکل در فاضلاب واحدهای آبکاری شماره ۱ و ۲ به‌ترتیب برابر با ۵۱/۲ و ۰/۹ mg/L اندازه‌گیری شد. پس از تصفیه غلظت این فلز در پساب خروجی به‌ترتیب به ۳/۲ و ۰/۰۲ mg/L کاهش یافت. راندمان حذف نیکل برای این واحدها به‌ترتیب ۹۴ و ۹۸ درصد گزارش شد. نتایج نشان داد که میزان نیکل در پساب خروجی آبکاری شماره ۱ بالاتر از حدود استاندارد قرار دارد. همچنین غلظت‌های پایینی از فلز نیکل در آب مصرفی آبکاری شماره ۲ مشاهده شد. به‌طور کلی، فرایند ترسیب شیمیایی یکی از روش‌های کارآمد در حذف فلز نیکل از محیط‌های آبی محسوب می‌شود، مشروط بر آن‌که سایر پارامترهای مؤثر بر فرآیند به‌طور مناسب کنترل و تنظیم شوند. ترسیب این یون در محیط آبی عمدتاً به‌صورت تشکیل هیدروکسید نیکل رخ می‌دهد. این فرآیند از pH حدود ۳ آغاز شده و با افزایش pH شدت می‌یابد، به‌گونه‌ای که در pH حدود ۹ میزان ترسیب به‌طور قابل‌توجهی افزایش پیدا می‌کند. در نهایت، در pH برابر با ۱۱، ترسیب نیکل عملاً به‌صورت کامل انجام می‌شود (۲۷). از این رو توصیه می‌شود در گام نخست و پیش از به‌کارگیری هرگونه فناوری یا فرایند جدید، شرایط عملیاتی واحد اول، به ویژه کنترل pH، به‌صورت دقیق تنظیم و بهینه‌سازی شود. میزان فلز روی در فاضلاب واحدهای آبکاری شماره ۱ و ۲ به‌ترتیب برابر با ۷/۱۳ و ۷۳۴/۱ mg/L اندازه‌گیری شد. پس از فرآیند تصفیه، غلظت این فلز در پساب خروجی به‌ترتیب به ۰/۰۶۵ و ۶/۳۱ mg/L کاهش یافت. هر دو واحد در حذف روی دارای راندمان ۹۹ درصد بودند. راندمان بالای هر دو فرایند بیانگر اثربخشی قابل توجه فرایندهای ترسیب و انعقاد شیمیایی در تصفیه فاضلاب‌های آلوده به فلز روی است. با وجود راندمان بالای حذف در آبکاری شماره ۲، نتایج نشان داد که میزان روی در پساب خروجی این واحد همچنان با استانداردهای موجود مطابقت ندارد. نکته قابل توجه وجود غلظت بالای روی (۳/۱ mg/L) در آب مصرفی فرآیند بود که می‌تواند ناشی از استفاده مجدد از پساب تصفیه شده باشد. علاوه بر این با توجه به دفع پساب مازاد به چاه جاذب، آلودگی آب چاه کارگاه به فلز روی نیز به‌عنوان یکی از عوامل احتمالی این مشکل در نظر گرفته می‌شود. به‌طور کلی، در شرایطی که غلظت آلاینده در جریان ورودی بسیار بالا باشد، فرایند ترسیب به‌تنهایی قادر به کاهش غلظت خروجی تا محدوده‌های مجاز استاندارد نخواهد بود؛ از این‌رو، در چنین شرایطی به‌کارگیری واحدهای پیش‌تصفیه یا استفاده از فرایندهای تصفیه تکمیلی و کارآمدتر ضروری به نظر می‌رسد. بر اساس نتایج مطالعه‌ای نشان داده شد که فاضلاب تولیدی از بخش‌های آبکاری نیکل–کروم و گالوانیزه به شدت آلوده به فلزات سنگین از جمله مس، نیکل، کروم و روی بود. غلظت اولیه این فلزات در آب شست‌وشوی بخش آبکاری به ترتیب ۱۴/۸، ۱۳/۳ و ۴۰/۹ mg/L و در بخش گالوانیزه برای روی ۸۰ mg/L گزارش شد. روش اصلاح شامل تغییر فرآیند شست‌وشو و پیش‌تصفیه و سپس تصفیه ترکیبی انعقاد–ته‌نشینی با استفاده از آهک و کلرید آهن بود. نتایج نشان داد که پس از اعمال این اقدامات راندمان حذف فلزات سنگین در خروجی

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-06-26]

فاضلاب به بیش از ۹۹ درصد رسیده است (۲۸). در مطالعه‌ای دیگر نتایج نشان داد که استفاده از فرآیند انعقاد شیمیایی با ترکیب $FeSO_4$ و CaO (به ترتیب ۸۰ و ۶۰ mg/L) قادر است کروم، مس، نیکل و روی را به ترتیب با راندمان ۱۰۰، ۹۹، ۹۹ و ۹۵ درصد از جریان فاضلاب حذف کند. همچنین با به‌کارگیری فرآیند احیای شیمیایی، کروم شش ظرفیتی (Cr^{+6}) به‌طور مؤثر از فاضلاب بخش نیکل-کروم پیش از ورود به جریان فاضلاب نهایی حذف شد (۵).

جامدات: مطالعات مختلف گستره وسیعی از مقادیر را برای غلظت جامدات در فاضلاب صنایع آبکاری گزارش کرده اند. در مطالعه‌ای بر روی یک نمونه فاضلاب واقعی حاوی روی، سرب و کروم، میانگین TSS فاضلاب خام ۱۰۹/۴۱ mg/L گزارش شد (۲۹). همچنین در یک مطالعه بر روی نمونه واقعی از فاضلاب آبکاری، TDS نمونه فاضلاب خام ۴۲۵۱ mg/L اعلام شد (۲۲). در مطالعه حاضر بررسی غلظت جامدات محلول در فاضلاب خام و پساب تصفیه شده نشان می‌دهد غلظت TDS در پساب تصفیه شده آبکاری شماره ۱ افزایش و در آبکاری شماره ۲ کاهش یافته است. دلیل این افزایش را می‌توان به افزایش غلظت یون‌هایی مثل سدیم و کلراید نسبت داد که به دلیل افزودن ترکیباتی مثل سود، متابی سولفیت سدیم و ترکیبات حاوی نمک های کلریدی وارد جریان پساب می گردند. در یک مطالعه در بررسی راندمان فرآیند ترسیب شیمیایی نشان داده شد که این فرایند در حذف فلزات سنگین بسیار مؤثرتر از حذف ترکیباتی مثل سدیم، کلراید، منیزیم و ... عمل می کند (۳۰). کاهش غلظت جامدات محلول در آبکاری شماره ۲ را نیز می‌توان به عملکرد واحد فیلتراسیون پس از عملیات انعقاد شیمیایی نسبت داد. در بررسی فاضلاب تولیدی در یک واحد آبکاری میزان TDS فاضلاب خام برابر با ۱۹۱۵ mg/L اندازه‌گیری شد. با استفاده از انواع جاذب‌های نانو غلظت TDS در پساب خروجی به محدوده ۴۰۸/۷ تا ۴۷۵/۷ mg/L کاهش یافت (۳۱). اگرچه استانداردی برای جامدات معلق پساب جهت تخلیه در چاه جاذب تعریف نشده است اما نتایج حاصل از اندازه‌گیری TSS در مطالعه حاضر نشان داد کیفیت پساب تولیدی از نظر تخلیه در آب های سطحی نیز از سطح قابل قبولی برخوردار است. کارایی واحدهای تصفیه در حذف TSS در آبکاری‌های شماره ۱ و ۲ به ترتیب ۶۹ و ۹۸ درصد بود.

COD: فاضلاب صنایع آبکاری به دلیل استفاده گسترده از مواد شیمیایی در طول فرآیند تولید معمولاً از COD نسبتاً بالایی برخوردار هستند. در این واحدها مواد شیمیایی بکار رفته در مراحل چربی‌زدایی شیمیایی یا الکتروشیمیایی، وان آبکاری و اسیدشویی از جمله منابع تولید کننده COD هستند (۳۲، ۳۳). در این مطالعه میزان COD در ورودی و خروجی دو واحد آبکاری بررسی شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که غلظت COD در ورودی آبکاری‌های شماره ۱ و ۲ به‌ترتیب برابر با ۱۷۴۰ و ۱۱۶۲ mg/L است، در حالی که مقادیر COD در خروجی این واحدها به‌ترتیب به ۹۵۴ و ۲۷ mg/L کاهش یافته است. مطالعه حاضر نشان داد نتایج حاصل از اندازه‌گیری COD در آبکاری شماره ۲ مطابق با استاندارد است اما در آبکاری شماره ۱ مقدار اندازه‌گیری شده بسیار بالاتر از حدود استاندارد اعلام شده بود. کارایی واحدهای تصفیه در حذف COD در آبکاری‌های شماره ۱ و ۲ به ترتیب ۴۵ و ۹۸ درصد بود. به‌طور کلی و بر اساس شواهد حاصل از مطالعات انجام شده، فرایندهای ترسیب و انعقاد شیمیایی به‌تنهایی قادر به دستیابی به راندمان‌های بالای حذف COD نیستند؛ از این‌رو، برای رسیدن به حدود مجاز و استانداردهای مربوط به تخلیه، به‌کارگیری مراحل تصفیه تکمیلی و پیشرفته‌تر ضروری است (۳۴). برای مثال کارایی بالای تصفیه در آبکاری شماره ۲ را می‌توان به استفاده از واحد فیلتراسیون در فرآیند تصفیه در این آبکاری نسبت داد. برای واحد ۱ نیز توصیه می‌شود بر پایه انجام مطالعات دقیق‌تر و با لحاظ شرایط عملیاتی و کیفی موجود، به‌منظور دستیابی به حدود مجاز تخلیه، یک واحد تصفیه پیشرفته‌تر طراحی و در نظر گرفته شود.

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-06-26]

روغن و چربی: مقادیر روغن و چربی موجود در فاضلاب صنایع آبکاری بسته به نوع صنعت و گستردگی فرآیندهای انجام شده در آن دارای تنوع قابل توجهی است. بررسی‌های مختلف مقادیر متفاوتی از روغن و چربی را در فاضلاب این صنایع گزارش کرده‌اند. به‌عنوان نمونه در یک مطالعه موردی میزان روغن و چربی در فاضلاب یک واحد آبکاری برابر با ۵ ± ۱۸/۶ mg/L اندازه‌گیری شده است (۳۵). در مطالعه حاضر میزان روغن و چربی در آبکاری‌های شماره ۱ و ۲ به ترتیب ۱/۶ و ۱/۳ mg/L و در پساب خروجی هر دو واحد ۰/۳ mg/L اندازه گیری شد. از جمله پارامترهای مؤثر بر کارایی حذف روغن و گریس به‌وسیله فرایندهای ترسیب و انعقاد شیمیایی می‌توان به pH، میزان بار آلی، کدورت و سایر خصوصیات کیفی فاضلاب اشاره کرد؛ به‌گونه‌ای که هرچه شرایط عملیاتی به محدوده‌های بهینه نزدیک‌تر باشد، راندمان حذف این آلاینده‌ها به‌طور محسوسی افزایش خواهد یافت (۳۶). برای مثال در مطالعه‌ای که بر روی یک نمونه فاضلاب آبکاری گالوانیزه با هدف حذف کروم ۶ ظرفیتی انجام شد، میزان روغن و چربی در فاضلاب خام ۴۲/۲- ۳۰/۶ mg/L گزارش شده است. در این بررسی که از یک مخزن جداگانه برای تفکیک روغن و چربی استفاده شده، TSS و روغن و چربی پس از ۳ h ته‌نشینی تقریباً به طور کامل حذف شدند (۳۷). در هر دو واحد آبکاری نتایج حاصل از اندازه گیری روغن و چربی مطابق با استاندارد ملی ایران بود. کارایی واحدهای تصفیه در آبکاری‌های شماره ۱ و ۲ به ترتیب ۸۱ و ۷۷ درصد بود. با توجه به نزدیکی مقادیر راندمان حذف، می‌توان استنباط کرد که هر دو فرایند از کارایی قابل قبولی برخوردار بوده‌اند و اختلاف مشاهده شده بیشتر نشان‌دهنده غلبه نسبی مکانیزم‌های جدایش فیزیکی بر فرایندهای ناپایدارسازی شیمیایی است، نه برتری مطلق یک روش نسبت به دیگری. این یافته بیانگر آن است که ویژگی‌های فیزیکی روغن و چربی موجود در جریان ورودی، نقش تعیین‌کننده‌تری در عملکرد سیستم نسبت به نوع فرایند تصفیه به‌کاررفته ایفا کرده‌اند.

فنول: به‌طور معمول در تهیه محلول‌های آبکاری از ترکیبات حاوی فنول استفاده می‌شود. از این رو احتمال وجود آلاینده فنول در فاضلاب‌های تولیدی این صنایع وجود دارد (۳۸). در مطالعه حاضر میزان فنول در فاضلاب آبکاری‌های شماره ۱ و ۲ به ترتیب ۰/۰۱ و ۰/۰۵ mg/L و در پساب خروجی به ترتیب ۰/۰۰۲ و ۰/۰۱ mg/L اندازه گیری شد. راندمان حذف فنول در این فرایندها به‌شدت تحت تأثیر pH، نوع و مقدار مواد منعقدکننده و سایر پارامترهای عملیاتی قرار دارد و تغییر هر یک از این عوامل می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در کارایی نهایی فرآیند ایفا کند (۳۹). در یک مطالعه موردی بر روی فاضلاب صنعت الکترونیک (خصوصیات مشابه با فاضلاب آبکاری) با استفاده از فرآیند احیای شیمیایی با $FeSO_4.6H_2O$ فنول موجود در فاضلاب با راندمان ۱۰۰ درصد حذف شد (۵). در هر دو واحد آبکاری نتایج حاصل از اندازه گیری فنول مطابق با استاندارد ملی ایران بود. کارایی واحدهای تصفیه در هر دو واحد آبکاری ۸۰ درصد بود. برابری راندمان‌های به‌دست آمده نشان می‌دهد که حذف فنول در سیستم مورد بررسی وابستگی محسوسی به نوع فرایند فیزیکی–شیمیایی نداشته و بیش از هر چیز تحت تأثیر ماهیت ذاتی فنول به‌عنوان یک ترکیب آلی محلول قرار گرفته است.

سیانید: همان‌گونه که در مورد بسیاری از پارامترهای آلاینده مشاهده می‌شود غلظت سیانید در پساب واحدهای آبکاری نیز بسته به نوع صنعت و تنوع فرآیندهای مورد استفاده متفاوت است. این ماده یکی از خطرناک‌ترین ترکیبات شیمیایی با سمیت بسیار بالا است که رهاسازی آن در محیط‌زیست می‌تواند آثار شدید، پایدار و گسترده‌ای بر سلامت انسان، اکوسیستم‌ها و تعادل زیستی بر جای گذارد (۴۰). در مطالعات مختلف مقادیر گوناگونی برای غلظت سیانید در فاضلاب این صنایع گزارش شده است. به‌عنوان مثال در یک مطالعه بر روی فاضلاب خام یک واحد آبکاری غلظت

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-06-26]

سیانید برابر با ۱۸۰ mg/L اندازه‌گیری شد. با استفاده از نانوجاذب‌ها این مقدار به محدوده ۱/۰۳ تا ۱/۸ mg/L کاهش یافت. اما با وجود راندمان جذب بالای ۹۹ درصد مقدار سیانید باقیمانده در پساب خروجی همچنان بالاتر از حدود استانداردهای سازمان جهانی بهداشت بود (۳۱). ترکیبات حاوی سیانید به‌طور معمول در محلول‌های استفاده شده در وان‌های آبکاری یافت می‌شوند. علاوه بر این پاک‌کننده‌های قوی قلیایی نیز ممکن است شامل سیانید باشند. سیانیدها به‌عنوان یکی از عوامل کمپلکس‌کننده رایج در صنایع آبکاری شناخته می‌شوند و نقش مهمی در فرآیندهای این صنعت ایفا می‌کنند (۳۸). در مطالعه حاضر میزان سیانید در فاضلاب آبکاری‌های شماره ۱ و ۲ به ترتیب ۰/۱۶۳ و ۰/۰۰۶ mg/L و در پساب خروجی به ترتیب ۰/۰۳۱ و ۰/۰۰۳ mg/L اندازه گیری شد. راندمان حذف در واحد ۱ و ۲ به ترتیب ۸۱ و ۵۰ درصد بود. در هر دو واحد هم نتایج خروجی با استاندارد ملی همخوانی داشتند و مقادیر کمتر از میزان استاندارد بودند. این یافته‌ها بیانگر آن است که افزودن فیلتراسیون نیز نتوانسته است محدودیت ذاتی فرآیند انعقاد–فیلتراسیون در حذف سیانید محلول را برطرف سازد؛ به‌گونه‌ای که حذف سیانید در سیستم شماره ۱ عمدتاً از طریق همراهی با ذرات قابل ته‌نشینی و در نتیجه فرآیندهای ترسیبی انجام پذیرفته است. با این حال، هرچند به دلیل پایین بودن غلظت سیانید در جریان ورودی، غلظت خروجی هر دو واحد در محدوده استاندارد قرار دارد، اما در شرایطی که غلظت ورودی افزایش یابد، با توجه به اینکه حد استاندارد محیط زیستی خروجی برابر با ۰/۱ mg/L است، به‌کارگیری فرآیندهای تصفیه تکمیلی و پیشرفته‌تر اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.

فسفات: در مطالعه حاضر غلظت فسفات در فاضلاب ورودی آبکاری‌های شماره ۱ و ۲ به‌ترتیب برابر با ۳۶/۸ و ۱۹/۷ mg/L اندازه گیری شد. پس از فرآیند تصفیه، غلظت فسفات در پساب خروجی این واحدها به‌ترتیب به ۱/۵ و ۰/۱ mg/L کاهش یافت. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها نشان داد که مقادیر فسفات در پساب خروجی هر دو واحد آبکاری با استانداردهای مربوطه مطابقت دارد. کارایی واحدهای تصفیه در حذف فسفات در آبکاری‌های شماره ۱ و ۲ به‌ترتیب برابر با ۹۶ و ۹۹ درصد بود. راندمان بالای حاصل از عملکرد هر دو واحد نشان‌دهنده اثربخشی قابل توجه فرایندهای فیزیکی– شیمیایی در حذف فسفات است. اختلاف جزئی مشاهده شده میان آن‌ها بیانگر نقش تکمیلی انعقاد شیمیایی و فیلتراسیون در ایجاد بهبود محدود اما مؤثر و همچنین پایدارسازی کیفیت پساب خروجی می‌باشد. در یک مطالعه که امکان اعمال اقدامات کنترل آلودگی قبل از تصفیه نهایی فاضلاب آبکاری بررسی شد، غلظت فسفات در فاضلاب خام برابر با ۰/۶ mg/L گزارش شد که پس از کنترل در خط به ۰/۵ mg/L کاهش یافت. استفاده از ترسیب شیمیایی با آهک این مقدار را به ۰/۴ mg/L کاهش داد و با به‌کارگیری همزمان آهک و $FeCl_3$ نیز همان مقدار ۰/۴ mg/L به دست آمد (۲۸). در مطالعه‌ای دیگر نشان داده شد که فرآیند انعقاد شیمیایی با استفاده از آهک و کلرید فریک قادر است با راندمان ۸۶ درصد ترکیبات حاوی فسفر را از فاضلاب صنایع آبکاری حذف کند. در این مطالعه غلظت فسفر در فاضلاب خام ۱۰ mg/L و در پساب تصفیه شده ۱/۶ mg/L گزارش شد (۴۱). مطالعه‌ای که توسط Dabaghian و همکاران با هدف انتخاب بهترین فناوری موجود برای تصفیه فاضلاب واحدهای آبکاری کوچک انجام شد نشان داد که از نظر معیارهای فنی و اقتصادی روش ترسیب شیمیایی به‌عنوان گزینه‌ای مناسب شناخته می‌شود درحالی‌که از منظر معیارهای محیط زیستی سیستم اسمز معکوس عملکرد بهتری دارد. این یافته‌ها بر اهمیت انتخاب فناوری مناسب با در نظر گرفتن ملاحظات فنی، اقتصادی و محیط زیستی در فرآیندهای تصفیه فاضلاب تأکید دارند (۲۳).

با توجه به نتایج این پژوهش و مرور منابع مرتبط، می‌توان چند توصیه عملی برای ارتقای فرآیند تصفیه در صنایع آبکاری ارائه داد. در گام نخست افزایش نظارت و پایش مداوم

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-06-26]

کیفیت پساب به‌ویژه در واحدهایی که اقدام به بازیافت پساب می‌کنند ضروری است تا از تجمع و افزایش غلظت فلزاتی نظیر روی جلوگیری شود. همچنین ارتقای سیستم‌های موجود از طریق افزودن مراحل تکمیلی مانند انعقاد شیمیایی به واحدهایی که صرفاً از روش ترسیب بهره می‌برند یا استفاده از جاذب‌های پیشرفته برای کاهش TDS می‌تواند بهبود قابل‌توجهی در کارایی ایجاد کند. در نهایت، آموزش و ارتقای دانش اپراتورها در زمینه اصول علمی تصفیه و نگهداری از تجهیزات، نقش کلیدی در تضمین عملکرد پایدار و دستیابی به استانداردهای ملی خواهد داشت.

محدودیت‌های این مطالعه را می‌توان در چند محور اصلی بیان کرد. نخست آن‌که با توجه به کوچک بودن مقیاس کارگاه‌ها و در نتیجه حجم پایین تولید فاضلاب، سیستم‌های تصفیه به‌صورت منقطع بهره‌برداری می‌شدند. از این‌رو امکان نمونه‌برداری از پساب تصفیه شده در زمان‌های دلخواه فراهم نبود. علاوه بر این دانش ناکافی بهره‌برداران از فرآیندهای علمی تصفیه و آشنایی محدود آنان با ترکیبات مورد استفاده در فرآیندهای تولید و تصفیه یکی دیگر از چالش‌های اساسی محسوب می‌شد. بهره‌برداری سنتی از فرآیندهای تولید و فقدان اطلاعات دقیق علمی از سوی بهره‌برداران نیز بر پیچیدگی موضوع می‌افزود. همچنین به دلیل هزینه بالای انجام آزمایش‌های کیفی امکان تکرار آزمون‌ها در بازه‌های زمانی مختلف و با دفعات بالا وجود نداشت.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش طیف گسترده‌ای از متغیرهای کیفی فاضلاب مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه نتایج حاصل از آنالیز فاضلاب با استانداردهای سازمان حفاظت محیط زیست ایران نشان داد که در آبکاری شماره ۱ مقادیر COD و فلز نیکل و در آبکاری شماره ۲ مقادیر فلز روی بالاتر از حدود مجاز تعیین شده در استانداردها بودند. در آبکاری شماره ۲ بخشی از فاضلاب پس از تصفیه مجدداً در فرآیندهای صنعتی استفاده می‌شد. این موضوع می‌تواند به کاهش مصرف آب کمک کند اما همچنین ضرورت کنترل دقیق‌تر کیفیت پساب بازیافتی را نیز برجسته می‌کند. این یافته‌ها بیانگر این است که علیرغم استفاده از روش‌های تصفیه فیزیکوشیمیایی هنوز چالش‌هایی در راستای رعایت کامل استانداردهای محیط زیستی وجود دارد. بنابراین بهبود فرآیندهای تصفیه و اجرای سیستم‌های نظارتی دقیق‌تر برای کاهش آلاینده‌ها در این واحدهای صنعتی ضروری به نظر می‌رسد. اگرچه دامنه مطالعه حاضر محدود به تعداد مشخصی از واحدهای آبکاری بود، اما پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی گستره وسیع‌تری از واحدهای صنعتی مورد بررسی قرار گیرد تا نتایج به شکلی جامع‌تر قابل تعمیم باشند. همچنین بررسی تأثیر تغییرات فصلی و نوسانات زمانی بر کیفیت پساب می‌تواند دیدگاه دقیق‌تری از پایداری عملکرد سیستم‌های تصفیه ارائه دهد.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان کلیه نکات اخلاقی از جمله عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده ها و داده سازی را در این مقاله رعایت کرده اند. این پایان نامه که این مقاله از آن مشتق شده است، با کد اخلاق IR.TUMS.SPH.REC.1402.201 به تصویب رسیده است.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل بخشی از پایان نامه با عنوان "بررسی کیفیت فاضلاب سه کارگاه آبکاری در تهران و ارزیابی کارایی سیستم تصفیه آنها در سال ۱۴۰۱" در مقطع کارشناسی ارشد با کد ۹۸۱۳۳۸۸۰۰۱ است که با حمایت دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران اجرا شده است.

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-06-26]

References

1. Ally SH, Kamish W, Van Der Spuy EA. Water and wastewater management in the metal finishing industry. Pretoria, South Africa: Water Research Commission; 2016. Report No.: TT 644/15.

2. Zhijie G, Yanping G, Shoupeng L, Shaoqing F, Yanghong D, Xuelian O, et al. Decomplexation of heterogeneous catalytic ozonation assisted with heavy metal chelation for advanced treatment of coordination complexes of Ni. Science of the Total Environment. 2020;732:139223.

3. Arab Ameri N, Godini H, Zarrabi M, Darvishmotevalli M. A study on the performance of the wastewater treatment plant in Charmshahr industrial estate and the potential of reuse for effluent and disposal sludge. Iranian Journal of Health and Environment. 2025;17(4):757-74 (in Persian).

4. Rajoria S, Vashishtha M, Sangal VK. Treatment of electroplating industry wastewater: a review on the various techniques. Environmental Science and Pollution Research. 2022;29(48):72196-246.

5. Abdel Wahaab R, Alseroury F. Wastewater treatment: a case study of electronics manufacturing industry. International Journal of Environmental Science and Technology. 2019;16:47-58.

6. Yang JS, Li LJ. Research on electroplating wastewater treatment and operation effect in Jiangmen. Advanced Materials Research. 2013;765:2904-07.

7. Moersidik SS, Nugroho R, Handayani M, Pratama MA. Optimization and reaction kinetics on the removal of nickel and COD from wastewater from electroplating industry using electrocoagulation and advanced oxidation processes. Heliyon. 2020;6(2):e03319.

8. Heidmann I, Calmano W. Removal of Zn(II), Cu(II), Ni(II), Ag(I) and Cr(VI) present in aqueous solutions by aluminium electrocoagulation. Journal of Hazardous Materials. 2008;152(3):934-41.

9. Altaf SN, Akhtar W. Wastewater from electroplating industries of Karachi. 24 th WEDC Conference. Islamabad: WEDC, Loughborough University; 1998. p.125-28.

10. Xiangtao Y, Yue H, Xiangyu R, Chengchun S, Mingyong W. Research progress on the removal, recovery and direct high-value materialization of valuable metal elements in electroplating/ electroless plating waste solution. Journal of Water Process Engineering. 2022;46:102577.

11. Huang Z, Hwang JY, Huang C, Shi Y. Electroplating wastewater treatment in China. Materials Engineering- From Ideas to Practice: An EPD Symposium in Honor of Jiann-Yang Hwang. Switzerland: Springer; 2021. p. 225-32.

12. Seid Mohammadi A, Asgari G, Shokoohi R, Shahbazi P. Investigating the relationship between the alkalinity of the influent wastewater and the performance of the anaerobic unit of the wastewater treatment plant and providing a solution to increase the alkalinity of the influent wastewater. Iranian Journal of Health and Environment. 2020;13(3):485-94 (in Persian).

13. Rajoria S, Vashishtha M, Sangal VK. Review on

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-06-26]

the treatment of electroplating industry wastewater by electrochemical methods. Materials Today: Proceedings. 2021;47:1472-79.

14. Mohamed TK, Hoda E, Ahmed SM, Robert WP, Mohamed KM. A critical review of state-of-the-art technologies for electroplating wastewater treatment. International Journal of Environmental Analytical Chemistry. 2024;104(16):4143-76.

15. Deepak S, Parmesh Kumar C, Savita D, Abhinesh Kumar P. Electrocoagulation treatment of electroplating wastewater: A review. Journal of Environmental Engineering. 2020;146(10):03120009.

16. Hosseini SS, Bringas E, Tan NR, Ortiz I, Ghahramani M, Alaei Shahmirzadi MA. Recent progress in development of high performance polymeric membranes and materials for metal plating wastewater treatment: A review. Journal of Water Process Engineering. 2016;9:78-110.

17. Yu X, Hou Y, Ren X, Sun C, Wang M. Research progress on the removal, recovery and direct high-value materialization of valuable metal elements in electroplating/electroless plating waste solution. Journal of Water Process Engineering. 2022;46:102577.

18. Muhammed Kamil O, Hanife SE. Treatment of metal plating wastewater using iron electrode by electrocoagulation process: Optimization and process performance. Process Safety and Environmental Protection. 2018;119:207-17.

19. Lu BJ, Wu K. Electroplating wastewater treatment method and development trend analysis. 4th International Conference on Material Science and Technology. Wuhan: IOP Publishing; 2020. p. 012092.

20. Qasem NA, Mohammed RH, Lawal DU. Removal of heavy metal ions from wastewater: A comprehensive and critical review. Npj Clean Water. 2021;4(1):1-15.

21. Lekhlif B, Oudrhiri L, Zidane F, Drogui P, Blais J. Study of the electrocoagulation of electroplating industry wastewaters charged by nickel (II) and chromium (VI). Journal of Materials and Environmental Science. 2014;5(1):111-20.

22. Akar S, Lorestani B, Sobhanardakani S, Cheraghi M, Moradi O. Removal of Ni(II) and Cr(VI) Ions from electroplating wastewater using ferrous sulfate. Journal of Advances in Environmental Health Research. 2021;9(2):149-58.

23. Dabaghian M, Hashemi S, Ebadi T, Maknoon R. The best available technology for small electroplating plants applying analytical hierarchy process. International Journal of Environmental Science & Technology. 2008;5:479-84.

24. United States Environmental Protection Agency (USEPA). Industrial user inspection and sampling manual for POTW's. Washington, DC: USEPA; 1994. Report No.: EPA OWM-0025.

25. Rice EW, Baird RB, Eaton AD, Clesceri LS. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington, DC: American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation; 2012.

26. Ramakrishnaiah C, Prathima B. Hexavalent chromium removal from industrial wastewater

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-06-26]

by chemical precipitation method. International Journal of Applied Engineering Research. 2012;2(2):599-603.

27. Escudero GR, Espinoza EE, Rao F. Chemical precipitation of nickel species from waste water. International Research Journal of Pure and Applied Chemistry. 2017;15(2):1-7.

28. Abou Elela SI, Ibrahim HS, Abou Taleb E. Heavy metal removal and cyanide destruction in the metal plating industry: an integrated approach from Egypt. The Environmentalist. 2008;28(3):223-29.

29. Bo L, Dongdong Y, Qi W, Song L, Shaogui Y, Wenfei W. Feasibility of a two-stage biological aerated filter for depth processing of electroplating-wastewater. Bioresource Technology. 2009;100(17):3891-96.

30. Peng C, Meng H, Song S, Lu S, Lopez Valdivieso A. Elimination of Cr (VI) from electroplating wastewater by electrodialysis following chemical precipitation. Separation Science and Technology. 2005;39(7):1501-17.

31. Bankole M, Abdulkareem A, Tijani J, Ochigbo S, Afolabi A, Roos W. Chemical oxygen demand removal from electroplating wastewater by purified and polymer functionalized carbon nanotubes adsorbents. Water Resources and Industry. 2017;18:33-50.

32. Hung YT, Lo HH, Yapijakis C. Handbook of Industrial and Hazardous Wastes Treatment. London: Taylor & Francis; 2004.

33. Zhou YD, Sun M, Wang LJ, Xi GN. Research of treatment technology for electroplating wastewater. Applied Mechanics and Materials. 2014;487:713-16.

34. Sudbundit A, Changchai N. The paint factory's wastewater: COD removal by chemical precipitation method. Rmutsb Academic Journal. 2018;6(2):171-81.

35. Oden MK, Sari Erkan H. Treatment of metal plating wastewater using iron electrode by electrocoagulation process: Optimization and process performance. Process Safety and Environmental Protection. 2018;119:207-17.

36. Chatoui M, Lahsaini S, Aguelmous A. Removal of oil and grease from vegetable oil refinery wastewaters by coagulation-flocculation process. Moroccan Journal of Chemistry. 2017;5(4):683-90.

37. Hackbarth FV, Maass D, De Souza AAU, Vilar VJ, De Souza SMAGU. Removal of hexavalent chromium from electroplating wastewaters using marine macroalga pelvetia canaliculata as natural electron donor. Chemical Engineering Journal. 2016;290:477-89.

38. Wang LK, Hung YT, Lo HH, Yapijakis C. Handbook of Industrial and Hazardous Wastes Treatment. Florida: CRC Press; 2004.

39. Swamy NK, Singh P, Sarethy I. Precipitation of phenols from paper industry wastewater using ferric chloride. Rasayan Journal of Chemistry. 2011;4(2): 452-56.

40. Kheradpisheh Z, Movahedian Atar H, Salehii najafabadi M. Survey of efficiency of electrochemical treatment in cyanid removal from industrial wastewatersrs. Iranian Journal of Health and Environment. 2012;4(4):411-18 (in Persian).

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-06-26]

41. Abou Elela SI, El Kamah HM, Aly HI. Waste minimization in the electroplating industry (case study). International Journal of Environmental Studies. 2007;55(4):287-96.

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-06-26]

Available online: https://ijhe.tums.ac.ir

Orginal Article

The comparative analysis of wastewater treatment efficiency in nickel–chrome and zinc electroplating industries for pollutant removal

Bahram Naeimi[1], Maryam Haddadi[1], Mahmood Alimohammadi[1,2], Mohammad Hadi Dehghani[1,3], Mina Aghaei[1,2], Fazlollah Changani[1,3,*]

1- Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran
2- Center for Water Quality Research (CWQR), Institute for Environmental Research, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran
3- Center for Solid Waste Research (CSWR), Institute for Environmental Research, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

ARTICLE INFORMATION:

Received: 18 February 2026
Revised: 11 May 2026
Accepted: 16 May 2026
Published: 16 June 2026

Keywords: Industrial wastewater, Electroplating, Treatment efficiency, Heavy metals

***Corresponding Author:**
fchangan@tums.ac.ir

ABSTRACT

Background and Objective: The rapid expansion of industrial and urban activities in recent decades has led to the increased use of electroplating processes and the generation of wastewater containing heavy metals and toxic compounds such as cyanide and phenol. These pollutants can pose significant risks to human health and the environment. This study aims to conduct a quantitative and qualitative assessment of wastewater from electroplating industries and to evaluate its compliance with discharge standards, thereby providing a basis for improving wastewater management and mitigating environmental impacts.

Materials and Methods: This cross-sectional study was conducted at two nickel–chromium and zinc electroplating units equipped with on-site treatment systems in Tehran Province. Following an assessment of the electroplating processes and treatment units, grab sampling was performed twice on both raw wastewater and effluent samples. In each sampling event, six samples were collected, resulting in a total of 12 samples. Physical and chemical characteristics were measured, and the performance of the treatment systems in removing pollutants was evaluated.

Results: The analytical results indicated that in the effluent from unit 1, the concentrations of COD and nickel, and in the effluent from unit 2, the concentration of zinc, exceeded the established permissible limits. The treatment system in the nickel–chromium electroplating unit exhibited the highest removal efficiency for chromium (100%) as well as for zinc, phosphate, and nickel (94–99%), whereas the removal efficiencies for COD and TSS were estimated at 45% and 69%, respectively. In the zinc electroplating unit, the removal efficiencies for nickel, zinc, COD, and phosphate were approximately 98–99%, while the lowest removal efficiencies were observed for cyanide (50%) and copper (33%).

Conclusion: The findings of this study indicated that the concentrations of several parameters in the treated effluents exceeded the permissible limits established by Department of Environment (DoE) of Iran standards, highlighting the urgent need to upgrade treatment processes and improving wastewater management.

Please cite this article as: Naeimi B, Haddadi M, Alimohammadi M, Dehghani MH, Aghaei M, Changani F. The comparative analysis of wastewater treatment efficiency in nickel–chrome and zinc electroplating industries for pollutant removal. Iranian Journal of Health and Environment. 2026;19(1):119-36.

Copyright © 2026 Iranian Association of Environmental Health، and Tehran University of Medical Sciences. Published by Tehran University of Medical Sciences. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Noncommercial uses of the work are permitted، provided the original work is properly cited.

[Downloaded from journals.tums.ac.ir on 2026-06-26]