

استفاده از فن آوری اسمز معکوس (RO) جهت حذف کروم از پساب صنایع آبکاری

دکتر میترا غلامی^۱، حامد محمدی^۲، دکتر احمد عامری^۳، مرتضی رحیمی^۴

۱- استادیار دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی ایران، گروه مهندسی بهداشت محیط mitra326@yahoo.com

۲- مربی دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی زنجان، گروه بهداشت محیط

۳- دانشیار دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی ایران، گروه مهندسی بهداشت محیط

۴- دانشجوی کارشناسی دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی ایران

چکیده

زمینه و هدف: کروم از عناصر انتقالی گروه ۶ و بیست و یکمین عنصر فراوان در طبیعت است که بطور گسترده‌ای به دو حالت +۳ و +۶ ظرفیتی وجود دارد. نوع شش ظرفیتی آن بسیار سمی است. صنایع آبکاری سهم بسزایی در ورود کروم به داخل محیط زیست دارند. هدف از انجام این پژوهش تعیین راندمان حذف کروم از پساب صنایع آبکاری با استفاده از فرآیند غشایی اسمز معکوس است. همچنین در این پژوهش شرایط بهینه برای فرایند غشایی جهت حذف کروم از پساب صنایع آبکاری مورد بررسی قرار گرفته است.

روش بررسی: روش انجام تحقیق با توجه به ماهیت آن بر پایه داده‌های آزمایشگاهی، از نوع مطالعات بنیادی- کاربردی است. در این پژوهش، ابتدا محلولهای کروم با غلظتهای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی گرم در لیتر ساخته شد و از غشای اسمز معکوس با مدول مارپیچی مدل TE2521 ساخت شرکت CSM کره عبور داده شد. در این مرحله، تأثیر فشار عملیاتی، غلظت ورودی، دما و pH روی کارایی حذف کروم در هر غلظت، مورد بررسی قرار گرفته و تعیین شد.

یافته‌ها: نتایج حاصل از آزمایشات و اندازه‌گیریها نشان داد که شرایط بهینه سیستم در محدوده فشار 200 psi ($\alpha = 0.01$)، غلظت 10 g/L ($\alpha = 0.05$)، دما در محدوده 25°C ($\alpha = 0.05$)، و pH در محدوده ۶-۷ می‌باشد.

نتیجه‌گیری: راندمان حذف کروم از پساب صنایع آبکاری در شرایط بهینه عملکرد سیستم تا بیش از ۹۹ درصد اندازه گرفته شد. با مقایسه روش اسمز معکوس با سایر روشها، چنین به نظر می‌رسد که راندمان حذف توسط این روش مناسب است و می‌تواند در مقیاس میدانی بعنوان یک گزینه مؤثر بکار گرفته شود.

کلید واژه‌ها: حذف کروم، آبکاری، غشای اسمز معکوس (RO)

وصول مقاله: ۸۶/۹/۸ اصلاح نهایی: ۸۶/۱۱/۲۹ پذیرش مقاله: ۸۶/۱۱/۱۹

مقدمه

بالقوه شدید برای انسان و محیط زیست هم زمان بوده است. در کنار گسترش صنایع، محدودیت منابع طبیعی و افزایش تقاضا برای مصرف مواد خام، لزوم استفاده بهینه از آنها را در کنار حراست از منابع گرانبهای طبیعی ایجاد می‌کند و در این مسیر جلوگیری از آلودگی

توسعه اقتصادی و اجتماعی جوامع همراه با افزایش روز افزون جمعیت و در پی آن افزایش میزان و تنوع مواد مصرفی، ازدیاد و گوناگونی زائدات تولیدی را در پی داشته است. توسعه صنایع و کارخانه‌ها، با تهی سازی منابع طبیعی و تولید انواع گوناگون زائدات با خطرات

منابع طبیعی، از اولین گامهای اساسی در حفظ این منابع است (۱).

امروزه در جوامع رو به توسعه پسابهای صنعتی بدون انجام تصفیه و یا تصفیه نامطلوب به محیط زیست دفع می‌گردند و در هر منطقه مشکلات زیادی را بوجود آورده‌اند. پساب تولیدی در هر صنعت ویژگیهای خاص خود را دارد و همین امر موجب ورود آلاینده‌های متنوع به محیط زیست می‌شود (۲).

کروم از عناصر انتقالی گروه ۶ و بیست و یکمین عنصر فراوان در طبیعت است که بطور گسترده‌ای به دو حالت ۳+ و ۶+ ظرفیتی وجود دارد. این عنصر در حالت سه ظرفیتی از عناصر حیاتی بوده و در مقادیر جزئی در گیاهان و جانوران یافت می‌شود. نوع شش ظرفیتی آن بسیار سمی است و سرطان‌زایی آن به اثبات رسیده است. اغلب سنگها و خاکها حاوی مقادیر قابل توجهی کروم به صورت شش ظرفیتی هستند. علاوه بر منشأ طبیعی، مقادیر قابل توجهی از کروم از طریق صنایع چرم و دباغی، شیشه سازی، فیلم سازی، کود شیمیایی، متالورژی، ذوب فلزات، رنگ و لعاب، صنعت آلیاژی و آبکاری وارد محیط زیست می‌شود که در این خصوص پساب صنایع آبکاری سهم بسزایی دارد (۳،۴).

کروم در طبیعت بصورت کروم سه ظرفیتی یافت می‌شود. وجود کروم سه ظرفیتی برای متابولیسم چربی‌ها و گلوکز و همچنین در مصرف آمینو اسیدها ضروری می‌باشد. همچنین در جلوگیری از دیابت خفیف و آترواسکلروزیس مؤثر است. در صورت وجود ترکیبات آلی در خاک، منگنز و ترکیبات آن، کروم سه ظرفیتی به کروم شش ظرفیتی تبدیل می‌گردد که برای انسان و محیط زیست مخاطره آمیز خواهد بود و در مقادیر mg/l ۱۰ به ازای هر کیلوگرم از وزن بدن باعث نکروز کبد،

نفريت و مرگ می‌شود. همچنین از دیگر عوارض کروم شش ظرفیتی می‌توان به سرطان ریه و دستگاه گوارش اشاره کرد (۵).

امروزه صنعت آبکاری یکی از صناعی است که مقادیر قابل توجهی از کروم شش ظرفیتی را وارد محیط زیست می‌کند و با توجه به مخاطرات بهداشتی که ایجاد می‌کند، لازم است تا روش تصفیه مناسب جهت حذف آن از پساب این صنعت انتخاب گردد (۶،۷). روشهای متعددی برای حذف کروم از آب وجود دارد. به طور کلی این روشها به روشهای شیمیایی (انعقاد و لخته سازی)، رسوب دهی شیمیایی (رسوب با آلوم، رسوب با ترکیبات آهن، سختی گیری با آهک و حذف با ترکیبی از آهن و منگنز)، روشهای بیولوژیکی، فرآیندهای جذب سطحی (آلومینای فعال و تبادل یون)، فرآیندهای غشایی (روش اسمز معکوس و الکترودیالیز)، استخراج با حلال، تبخیر، تقطیر و انجماد نام برد. یکی دیگر از روشها، سدیمتاسیون است. با روش تقطیر، انجماد و استخراج مایع-مایع به ترتیب می‌توان ۹۵، ۹۰ و ۸۰ درصد کروم را حذف و یا بازیافت نمود.

هدف از این پژوهش بکارگیری سیستم غشایی اسمز معکوس جهت حذف کروم از پساب صنایع آبکاری و مقایسه این روش با دیگر روشهای بکار گرفته شده همچون ته نشینی، جذب سطحی، گواگولاسیون و روشهای بیولوژیکی است. همچنین در این پژوهش تأثیر عوامل مختلف همچون فشار، دما، pH و غلظت بر راندمان سیستم RO مورد بررسی قرار می‌گیرد.

روش بررسی

روش انجام تحقیق با توجه به ماهیت آن بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و یک سیستم عملی و اجرایی از

اندازه‌گیری جریان ورودی می‌باشد. نمودار ۱ نشان دهنده شمای کلی از پایلوت مورد استفاده است. جهت راه اندازی سیستم، پس از طراحی و ساخت پایلوت ابتدا فلاکس اولیه آب مقطر در فشارهای ۱۰۰ psi، ۱۲۰ psi، ۱۵۰ psi، ۱۷۰ psi و ۲۰۰ psi در شرایط دمایی $25^{\circ}C$ اندازه‌گیری و محاسبه گردید. سپس سیستم با فشارهای مورد نظر راه اندازی شد. پس از به دست آوردن فشار بهینه (۲۰۰ psi)، تغییرات دما، غلظت و pH مورد بررسی قرار گرفت و pH، غلظت و دمای بهینه تعیین شد.

در مرحله بعدی، با بدست آوردن دبی عبوری و همچنین با داشتن سطح فعال غشاء ارائه شده توسط کارخانه سازنده، میزان فلاکس عبوری (Q/A) از غشاء اندازه‌گیری شد (۸). لازم به ذکر است که برای تعیین دبی ورودی از فلومتر استفاده شد. جهت محاسبه دبی خروجی، حجم مشخصی از جریان عبوری از غشاء، در یک زمان مشخص توسط کرنومتر و استوانه مدرج اندازه‌گیری شد. برای محاسبه راندمان سیستم، پس از تعیین غلظت ورودی محلول کروم به غشاء و غلظت خروجی، بوسیله رابطه زیر راندمان حذف بدست آمد.

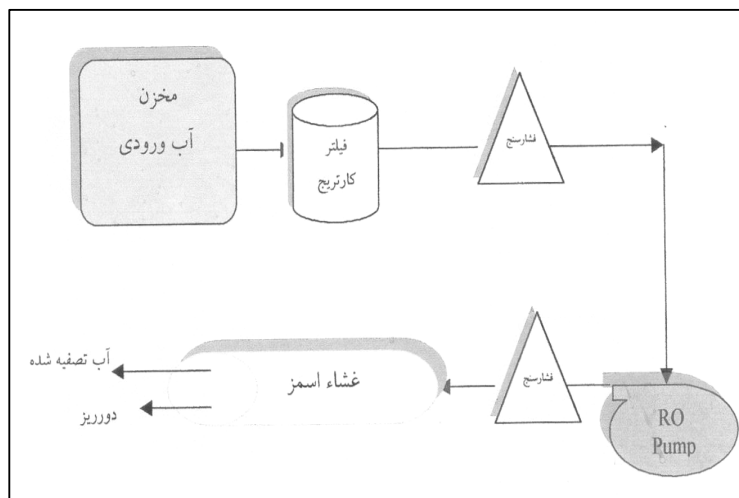
نوع مطالعات تجربی و توسعه‌ای بوده است. روش آماری مورد استفاده به منظور تعیین تعداد نمونه‌ها، روش Box-Benken از طریق نرم افزار Design Expert ver.7.0.1 بوده است. بر اساس متغیرهای وابسته و مستقل و با در نظر گرفتن ضریب $\alpha=0.05$ ، تعداد نمونه‌های مورد نیاز برای آنالیز آماری چند متغیره (فشار، دما، pH و غلظت) برابر با ۳۰ نمونه بوده است، که انجام آزمایشات در هر دوره (run) به صورت triple (سه تایی) انجام شده است (روی هم ۹۰ نمونه). تستهای آماری انجام شده، رگرسیون و correlation می‌باشد.

در ابتدا پس از بررسی پساب صنایع آبکاری و جمع‌آوری داده‌ها، غلظت متوسط کروم در این صنایع (در حدود 10g/L) مشخص گردید که این مقدار، به عنوان غلظت عبوری کروم از پایلوت در نظر گرفته شد. برای انجام این پژوهش، ابتدا پایلوت غشاء طراحی و ساخته شد. این پایلوت، شامل مخزن فاضلاب ورودی، فیلتر کارتریج کربن فعال برای حذف کلر، غشاء اسمز معکوس، الکتروپمپ برای تامین فشار اسمزی، بارومتر برای تنظیم فشار در ورودی و خروجی، فلومتر برای

$$\text{راندمان حذف} = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100$$

$$C_1 = \text{غلظت ورودی}$$

$$C_2 = \text{غلظت خروجی}$$



نمودار ۱: نمودار ساده جریان در پایلوت مورد استفاده

۵/۵، ۶/۵، ۷/۵، ۸/۵ تأثیر pH بر عملکرد غشاء تعیین شد.

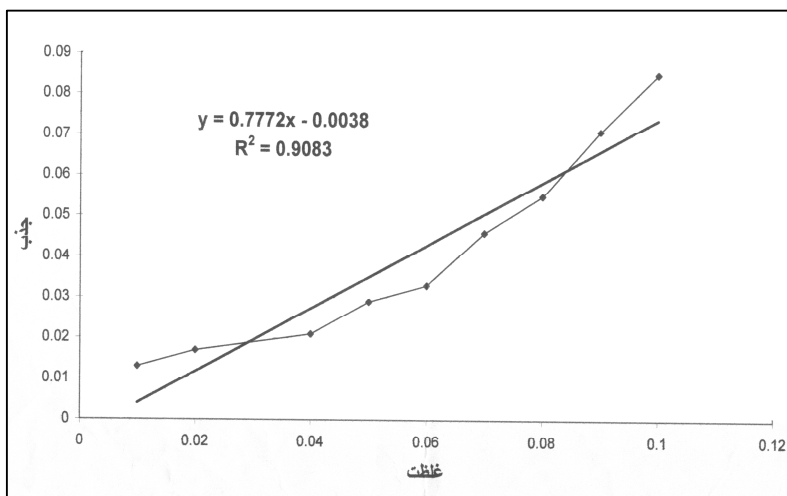
در تمام مراحل، میزان جذب در طول موج ۵۴۰ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر پریکین-المر دبل بیم UV-VIS مدل ۵۵۰S ساخت آمریکا خوانده شد (استاندارد متد Cr-D-۳۵۰۰) و راندمان حذف کروم در شرایط مختلف بدست آمد.

سپس نمودارهای مربوط به تغییرات کارایی و فلاکس جریان نسبت به هر یک از شرایط فوق رسم گردید.

مواد مورد استفاده در این تحقیق عمدتاً مواد و معرفهای شیمیایی مربوط به آزمایش و اندازه گیری کروم به روش رنگ سنجی، مطابق با دستورالعمل استاندارد متد و تهیه نمونه سنتتیک آب مقطر با غلظتهای مختلف کروم جهت عبور از پایلوت می باشد (۱۰، ۱۱). نمودار ۲ نشان دهنده منحنی استاندارد برای اندازه گیری کروم می باشد.

جهت بررسی تأثیر فشار، محلول کروم با غلظت ۱۰ گرم در لیتر با استفاده از آب مقطر تهیه گردید و در شرایط بهینه بدست آمده، ($T = 25^{\circ}C$ و $pH = 7$) در فشارهای مختلف در نظر گرفته شده (۱۰۰ psi، ۱۲۰ psi، ۱۵۰ psi، ۱۷۰ psi و ۲۰۰ psi) از غشاء اسمز معکوس عبور داده شد و در هر مرحله پس از اندازه گیری میزان جریان و فلاکس در یک فاصله زمانی (۴۰ تا ۶۰ دقیقه)، بر روی نمونه های برداشته شده آزمایش صورت گرفت.

برای تعیین ارتباط تغییرات غلظت و راندمان حذف، محلول نمونه با غلظتهای ۱، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ گرم بر لیتر کروم در شرایط مورد نظر از غشاء اسمز معکوس عبور داده شد. همچنین با در نظر گرفتن دماهای $15^{\circ}C$ ، $20^{\circ}C$ ، $25^{\circ}C$ ، $30^{\circ}C$ و $35^{\circ}C$ که توسط یخچال و هیتر ترموکوپل دار تنظیم گردید و در شرایط عملیاتی بیان شده در بالا، تأثیر دما بر عملکرد غشاء مورد بررسی قرار گرفت. با تغییر pH در مقادیر ۴/۵،

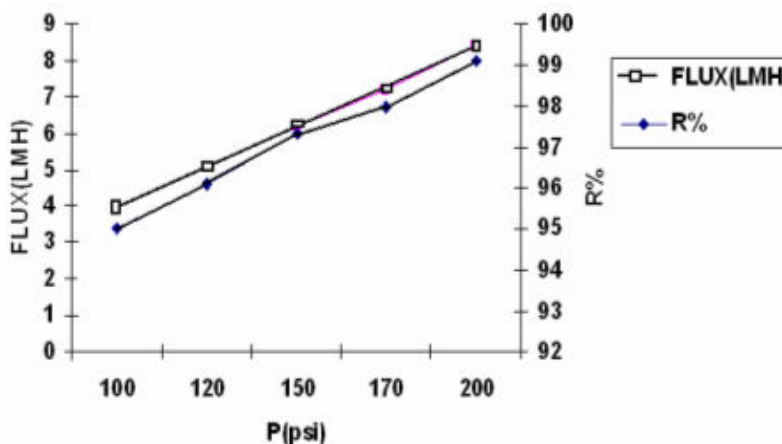


نمودار ۲: منحنی استاندارد کروم شش ظرفیتی

یافته‌ها

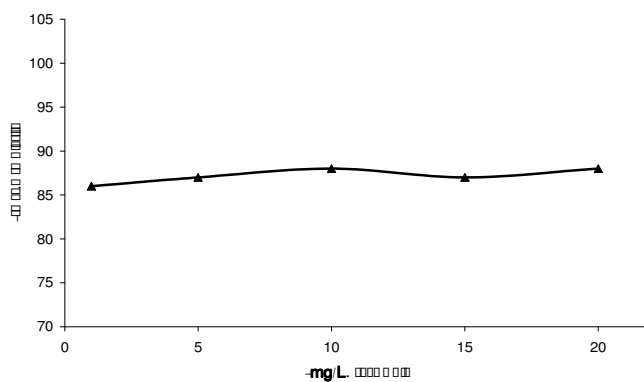
نمودار ۳ نشان دهنده تأثیر تغییرات فشار بر کارایی غشاء در حذف کروم و همچنین فلاکس عبوری از غشاء، در شرایط در نظر گرفته شده، می‌باشد. همانطوری که از نمودار مشخص است، با افزایش فشار، فلاکس جریان نیز افزایش می‌یابد.

نتایج حاصل از آزمایشات و اندازه‌گیریها نشان داد که شرایط بهینه سیستم در محدوده فشار ۲۰۰ psi (0.01) = α ، غلظت ۱۰ g/L ($\alpha = 0.05$)، دما در محدوده ۲۵ °C ($\alpha = 0.05$) و pH در محدوده ۶-۷ می‌باشد.



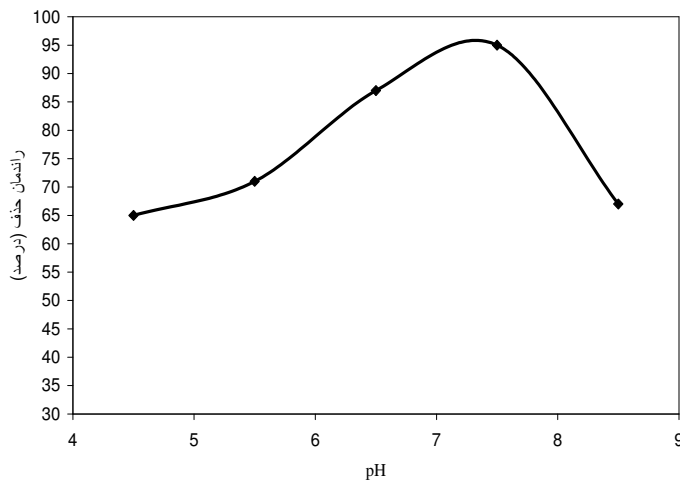
نمودار ۳: تأثیر تغییرات فشار بر روی کارایی حذف کروم و فلاکس عبوری از غشاء اسمز معکوس (C=10g/L و T=۲۵ °C, pH=۷)

تأثیر غلظت بر روی راندمان حذف در نمودار ۴ آورده شده است. همچنین ارتباط بین تغییرات فلاکس جریان و غلظت کروم در محلول آبی در شکل، آورده شده است. با افزایش غلظت در یک فشار و دبی معین، میزان فلاکس ثابت باقی می ماند.



نمودار ۴: تغییرات راندمان حذف کروم از محلول ورودی با تغییر غلظت محلول ورودی توسط غشاء اسمز معکوس (P=۲۰۰ psi و T=۲۵°C, pH=۷)

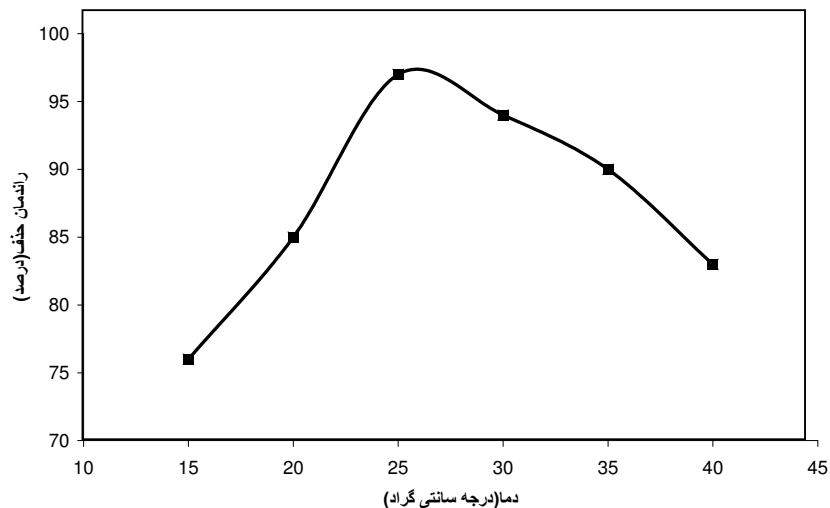
نمودار ۵ نمایانگر ارتباط بین pH محلول و راندمان حذف کروم توسط RO است.



نمودار ۵: تغییرات راندمان حذف کروم توسط غشاء اسمز معکوس با تغییرات pH محلول ورودی (P=۲۰۰ psi و T=۲۵°C, C=۱۰g/L)

می‌یابد. با توجه به نتایج بدست آمده از شکل، در محدوده دمایی °C ۲۵-۳۰ بیشترین فلاکس جریان برای غشاء وجود دارد.

نمودار ۶ نمایانگر تغییرات راندمان حذف کروم نسبت به افزایش درجه حرارت می‌باشد. با توجه به شکل، با افزایش دما میزان فلاکس جریان افزایش



نمودار ۶: تغییرات راندمان حذف کروم با تغییر دمای محلول ورودی توسط غشاء اسمز معکوس (P=۲۰۰psi و pH=۷, C=۱۰g/L)

بحث

همچنین درصد حذف کروم از پساب صنایع آبکاری با استفاده از دانه‌های کلسیم الگینیت حاوی اسید هیومیک حدود ۵۴٪ (۱۳)، و بوسيله کواگولاسیون شیمیایی ۹۹-۷۴ درصد بدست آمده است (۱۴). در ارزیابی دیگری میزان حذف کروم با استفاده از زائدات بیولوژیکی و ورمیکولیت ۹۴٪ بود (۱۵). درصد حذف کروم بوسيله سه نوع کربن فعال شامل C1 تولید شده از صنایع شکر و C2 و C3 (کربن فعال گرانولی) نیز به ترتیب ۹۸/۸۶٪، ۹۸/۶٪ و ۹۳٪ برآورد شده است (۱۶). طی تحقیقات دیگری درصد حذف کروم بوسيله قارچ گونه آسپرژیلوس از پساب صنایع آبکاری حدود ۷۰٪ بوده است (۱۷). همچنین در بررسی که بر روی حذف کروم

با توجه به نتایج به دست آمده، کارایی حذف کروم با استفاده از روش اسمز معکوس بیش از ۹۹ درصد می‌باشد. راندمان حذف کروم توسط روشهای دیگری مانند روش تبادل یون در بازیافت کروم ۹۹/۸ درصد بوده است (۱۱). همچنین با کاربرد قارچها در حذف بیولوژیکی کروم از فاضلاب صنایع چرم سازی که در آن از سه گونه قارچ به نامهای آسپرژیلوس نایگر، آسپرژیلوس آریزا استفاده شده است، با در نظر گرفتن مناسبترین غلظت کروم و بهترین میزان تلقیح، میزان حذف کروم به ترتیب ۹۳/۸، ۹۲/۴ و ۸۱/۳ درصد بوده است (۹). میزان کاهش کروم در پساب صنایع آبکاری توسط فرآیند ته نشینی نیز ۸۳/۲ درصد بوده است (۱۲).

غلظت آن به میزانی که بتوان پساب آن را وارد تصفیه خانه فاضلاب شهری کرد ($<5\text{mgCr}^{+6}/\text{l}$) (۲۰،۲۱). با توجه به نتایج به دست آمده، سیستم در فشار حدود ۲۰۰ psi بهترین کارایی را خواهد داشت ($\alpha=0.01$).

همانطوری که در نمودار ۴ مشاهده می‌گردد، افزایش غلظت کروم تا حدود ۱۰ گرم در لیتر سبب افزایش فلاکس جریان و میزان حذف کروم می‌شود. با افزایش غلظت از ۲۰ گرم در لیتر، راندمان حذف و فلاکس جریان دیگر روند افزایشی نداشته و ثابت باقی می‌ماند که این امر به واسطه کاهش اندازه منافذ سطح غشاء به دلیل تجمع کروم می‌باشد. در همین رابطه بررسی‌هایی در مورد اثرات غلظت و فشار بر فلاکس عبوری از غشاء در حذف رنگ از صنایع نساجی با استفاده از نانوفیلتراسیون برای استفاده مجدد از فاضلاب صنایع نساجی صورت گرفته است (۲۲،۲۳). همچنین پژوهشهایی که در زمینه تأثیر افزایش فشار بر روی راندمان حذف مواد رنگزا و آرسنیک انجام شده است (۸،۲۴). بررسی دیگری که در زمینه تأثیر غلظت در کاربرد نانوفیلتراسیون در کاهش رنگ از صنایع نساجی صورت گرفته است، نیز نشان دهنده تأثیر ناچیز تغییرات غلظت روی راندمان حذف و فلاکس جریان می‌باشد ($r=0.307$, $\alpha=0.05$) (۲۵).

در مورد تأثیر pH، لازم به ذکر است که میزان بار سطحی غشاء تابع جنس غشاء، pH و قدرت یونی محلول مجاور با غشاء است. بیشترین میزان فلاکس نفوذی و نیز بیشترین میزان قدرت نگهدارندگی غشاء را زمانی می‌توان انتظار داشت که بار الکتریکی سطح غشاء با بار الکتریکی مولکولهای حل شده همانم باشد (۲۲). با توجه به نمودار ۵، بهترین محدوده pH بین ۶-۷

از فاضلاب صنایع آبکاری بوسيله جذب روی بنتونیت صورت گرفت، درصد حذف کروم با استفاده از ۵ گرم بنتونیت بیش از ۹۹٪ بوده است (۱۸). در ارزیابی بیوراکتورها نیز میزان حذف کروم از پساب صنایع آبکاری توسط باکتریها ۹۰٪ و توسط قارچها ۶۴/۷٪ برآورد شده است (۱۹). بنابر این با توجه به نتایج بدست آمده و مقایسه آن با این پژوهش، می‌توان چنین بیان کرد که روش اسمز معکوس راندمان بالاتری نسبت به روشهای دیگر حذف کروم از پساب صنایع آبکاری از جمله روشهای ته نشینی، کواگولاسیون، بیولوژیکی، جذب سطحی و نانوفیلتراسیون دارد. همچنین سیستم غشایی اسمز معکوس در حذف کروم از پساب صنایع آبکاری به طور قابل ملاحظه‌ای مؤثر می‌باشد.

با توجه به نتایج بدست آمده که در نمودار (۳) نشان داده شده است، ملاحظه گردید که با افزایش فشار در سیستم RO، میزان فلاکس عبوری از سطح غشاء بر حسب لیتر بر متر مربع در ساعت و همچنین درصد حذف کروم افزایش می‌یابد ($r=0.878$, $\alpha=0.01$). دلیل این امر کاهش قطر منافذ سطح غشاء به واسطه تجمع کروم، نسبت به زمان است. همچنین میزان فشار مؤثر محلول عبوری از غشاء عامل تعیین کننده مقدار محلول نفوذی بوده و افزایش فشار، افزایش فلاکس محلول نفوذی را به دنبال خواهد داشت ($\alpha=0.01$, $r=0.833$). البته با افزایش فشار بیش از حد مشخص مقاومت غشاء هم زیاد می‌شود. نتایج به دست آمده از مطالعاتی که روی کارایی حذف کروم توسط سیستم غشایی اسمز معکوس در مقیاسهای پایلوت و صنعتی انجام شده است، نشان دهنده کاهش قابل توجه میزان کروم پس از عبور فاضلاب صنعت آبکاری حاوی کروم با غلظت بالا از غشای اسمز معکوس تا حد رسیدن

با مقایسه روش اسمز معکوس با سایر روشها، چنین به نظر می‌رسد که راندمان حذف توسط این روش مناسب بوده و می‌تواند در مقیاس میدانی به عنوان یک گزینه مؤثر بکار گرفته شود.

تشکر و قدردانی

این تحقیق با استفاده از حمایت مالی دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی- درمانی ایران در قالب طرح تحقیقاتی انجام گردیده است که بدین وسیله نویسندگان مقاله مراتب تقدیر و تشکر خود را از مسئولین آن مرکز و کلیه پرسنل محترم آزمایشگاه آب و فاضلاب دانشکده بهداشت ابراز می‌دارد.

می‌باشد. افزایش pH از حد مشخصی، سبب کاهش راندمان حذف می‌گردد.

با توجه به نمودار (۶) با افزایش دمای محلول ورودی به غشاء در ابتدا میزان فلاکس عبوری افزایش می‌یابد. البته تغییرات فلاکس جریان تا محدوده‌ای ادامه می‌یابد، سپس منحنی به صورت خط افقی در می‌آید. به عبارتی جنس غشاء عامل محدود کننده تأثیر دما روی افزایش فلاکس می‌باشد.

نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان بیان کرد که راندمان حذف کروم از پساب صنایع آبکاری در شرایط بهینه عملکرد سیستم تا بیش از ۹۹ درصد بوده است، که

منابع

۱. مصطفی پور، کرد. حذف آرسنیک آب آشامیدنی با استفاده از پراکسید هیدروژن و کلراید فریک. مجموعه مقالات ششمین همایش کشوری بهداشت محیط، ۱۳۸۲.
2. Nemerow, NL. Industrial and hazardous waste treatment. 2nd edit. VNR, Consulting Editorial board. New York, 1991. p. 409-5.
۳. باریک بین، بهنام. بررسی وضعیت کیفی و کمی کروم در منابع آب آشامیدنی شهر بیرجند و ارائه راه حل مناسب حذف آن. پایان نامه کارشناسی ارشد، تهران: گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۷۷.
4. WHO, UNEP. Environmental health criteria, 61 chromium. WHO, 1988.
۵. نوری سپهر، محمد. کاربرد قارچها در حذف بیولوژیکی کروم در فاضلاب صنایع چرم سازی. پایان نامه دکتری (Ph.D)، تهران: گروه مهندسی بهداشت محیط دانشکده بهداشت دانشگاه تهران، ۱۳۸۰.
۶. مجدندیا فریدون، خواجه نصیری ناصر. آبکاری فلزات. چاپ اول، تهران: انتشارات جهاد دانشگاهی، ۱۳۸۲.
۷. عزیز محمد، شاهین. بررسی جذب میکروبی پساب صنایع آبکاری. پایان نامه کارشناسی ارشد، تهران: گروه مهندسی شیمی دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۷۸.
۸. مختاری میراحمد. استفاده از فن‌آوری اسمز معکوس جهت حذف آرسنیک از آب آشامیدنی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، تهران: گروه بهداشت محیط دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی ایران، ۱۳۸۴.
۹. موسوی بتول. شیمی آزمایشگاهی آب و فاضلاب. چاپ اول، تهران: انتشارات سمر، ۱۳۸۴.
10. Sapha, Awwwa, Wpcf. Standard methods for water and wastewater examination. 21th ed. Joint Editorial board, Washington DC, 2001, 3-90- 3-93.
۱۱. اسمی نعمت الله. جلوگیری از اتلاف کروم در صنعت آبکاری و بررسی امکان بازیافت آن به روش تبادل یون. پایان نامه کارشناسی ارشد، تهران: گروه بهداشت محیط دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی تهران، ۱۳۷۸.

12. Song Z, Williams CJ, Edyvean RGJ. Sedimentation of tannery wastewater. *Water Res* 2000; 34: 2171-76.
13. Pandey AK, Pandey SD, Misra V, Srimal AK. Removal of chromium and reduction of toxicity to microtox system from tannery effluent by the use of calcium alginate beads containing humic acid. *Chemosphere* 2003; 51: 329-333.
14. Song Z, Williams J, Edyvean RGJ. Treatment of tannery wastewater by chemical coagulation. *Desal* 2004; 164: 249-59.
15. Sumathi KMS, Mahimairaja S, Naidu R. Use of low-cost biological wastes and vermiculite for removal of chromium from tannery effluent. *Bioresource Technol* 2005; 96: 309-31.
16. Fahim NF, Barsoum BN, Eid AE, Khalil MS. Removal of chromium(III) from tannery wastewater using activated carbon from sugar industrial waste. *J Hazardous Materials* 2006; 136: 303-9.
17. Srivastava S, Thakur IS. Isolation and process parameter optimization of *Aspergillus* sp. for removal of chromium from tannery effluent. *Bio-Resource Technol* 2006; 97: 1167-73.
18. Tahir SS, Naseem R. Removal of Cr (III) from tannery wastewater by adsorption onto bentonite clay. *Separation and Purification Technol.* 2006; 47: 457-471.
19. Srivastava S, Ahmad AH, Thakur IS. Removal of chromium and pentachlorophenol from tannery effluents. *Bioresource Technol* 2007; 98: 1128-32.
20. Hafez A, El-Manharawy MS, Khedr MS. RO membrane removal of unreacted chromium from spent tanning effluent. A pilot-scale study, Part 2[J]. *Desalination* 2002; 163: 345-58.
21. Hafez A, Manharawy SE. Design and performance of the two-stage/two-pass RO membrane system for chromium removal from tannery wastewater. Part 3. *Desalination* 2004; 165: 141-151.
22. Koyuncu I. Reactive dye treatment in dye/salt mixtures by nanofiltration membranes containing vinylsulphone dyes: Effects of feed concentration and cross flow velocity. *Desalination* 2002; 143: 243-53.
23. Tang C, Chen V. Nanofiltration of textile wastewater for water reuse. *Desalination* 2003; 143: 11-20.
24. Gholami M, Nasser S, Alizadeh-Fard M, Matssura T, Feng C, Kulbi M. Textile dye removal by membrane technology and biological oxidation. *Water Qual Res J Canada* 2003; 38: 379-391.
25. Bruggen V, Daems B, Wilms D, Vandecasteele C. Mechanisms of retention and flux decline for the nanofiltration of dye baths from the textile industry. *Separation and Purification Technol* 2001; 22-23: 519-28.