

## بررسی عملکرد سیستم غشایی نانوفیلتراسیون در حذف فلزات سنگین نیکل، کروم و کادمیوم از فاضلاب های صنعتی

امیرحسام حسنی<sup>۱</sup>

سید مهدی برقی<sup>۲</sup>

مریم محمدی<sup>۳</sup>

تاریخ پذیرش: ۸۷/۷/۳

تاریخ دریافت: ۸۷/۳/۱۱

### چکیده

با پیشرفت فن آوری و تعدد صنایع مختلف، پساب حاصل از فرایندهای صنعتی تهدیدی جدی برای محیط زیست به شمار می رود. این گونه پساب ها که حاوی فلزات سنگین حاصل از فرایندهای صنعتی گوناگون می باشند، با ورود به محیط زیست اثرات نامطلوبی برارگانیسم های زنجیره غذایی و انسان می گذارند.

در زمینه حذف فلزات سنگین از فاضلاب های صنعتی به روش ترسیب شیمیایی، تبادل یونی و روش های بیولوژیکی تحقیقات زیادی صورت گرفته است ولی کاربرد سیستم های غشایی نظیر نانوفیلتراسیون امروزه به عنوان یک روش مناسب و کارآمد مطرح بوده و تحقیقات بسیاری در این زمینه در حال انجام می باشد.

هدف اصلی این پژوهش ارزیابی کارایی سیستم نانوفیلتراسیون در حذف فلزات سنگین نیکل، کروم و کادمیوم از پساب های صنعتی و عوامل مؤثر بر عملکرد آن می باشد. در این تحقیق با استفاده از یک پایلوت نانوفیلتراسیون به ظرفیت ۴۰ مترمکعب در روز به همراه فیلترهای ۱ و ۵ میکرونی و یک غشای نیمه تراوی پلی آمید (NF90 - 4040)، سعی شد با افزایش غلظت فلزات سنگین موجود در فاضلاب ساخته شده مصنوعی، تأثیر تغییرات غلظت در روند حذف فلزات سنگین به صورت مجزا و مخلوط چند فلز مورد بررسی قرار گیرد.

۱- دانشیار دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران- ایران

۲- استاد دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف

۳- کارشناس ارشد مهندسی محیط زیست دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات (مسئول مکاتبات)

براساس نتایج حاصل با افزایش غلظت فلزات سنگین کارایی سیستم نانوفیلتراسیون افزایش یافت که بالاترین بازده در حذف فلزات، در غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر به دست آمد و میانگین بازده حذف تک تک و مخلوط فلزات فوق به ترتیب ۹۵.۴٪ و ۹۷.۵٪ حاصل شد.

همچنین با افزایش غلظت فلزات ورودی، فشار عملیاتی سیستم کاهش و درصد بازیابی غشا افزایش یافت و میانگین بازده بازیابی غشا در حالت حذف مجزا و مخلوط فلزات به ترتیب ۷۲.۸٪ و ۷۲.۴٪ حاصل شد، و بیشترین بازده حذف و بالاترین درصد بازیابی غشا و کمترین فشار کاربردی در حذف فلز کادمیوم مشاهده گردید.

**واژه های کلیدی:** نانوفیلتراسیون، فلزسنگین، فاضلاب صنعتی، درصد بازیابی.

## مقدمه

شده و جریان فیلتر شده خروجی از غشای نانو میسر می باشد (۲).

در سال ۱۹۹۷، Cassano et al., در زمینه بازیابی و استفاده مجدد مواد شیمیایی در فرایندهای موبری، چربی گیری و دباغی کروم به وسیله غشاها پژوهشی انجام دادند و از نتایج به دست آمده کاهش تأثیر محیط، ساده سازی فرایندهای خالص سازی فاضلاب، استفاده مجدد و آسان از لجن، کاهش هزینه های دفع، صرفه جویی در مصرف مواد شیمیایی و آب حاصل شد (۳).

در سال ۲۰۰۰، Oh et al., در مطالعه ای از نانوفیلتراسیون فشار ضعیف به همراه یک پمپ دوچرخه ای به منظور تصفیه آب زیرزمینی آلوده به آرسنیک استفاده کردند و دریافتند یک فرایند NF فشار ضعیف با پیش اکسایش آرسنیت به آرسنات یا فرایند RO همراه با یک سیستم پمپاژ دوچرخه ای را می توان برای تصفیه آب زیرزمینی آلوده به آرسنیک در مناطقی که تأمین الکتریسیته عملی نیست به کار برد (۴).

در سال ۲۰۰۱، Chihani et al., عملکرد مس و نقره را در کمپلکس واسط بطریق نانوفیلتراسیون روی غشای معدنی و آلی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بیانگر این مطلب بودند که در تصفیه روی غشای آلی فقط وزن مولکولی را می توان به عنوان یک پارامتر غالب در ارتباط با بازده حذف مدنظر قرار داد. از سوی دیگر براساس هر دو مورد واکنش الکتریکی و اندازه مولکولی، غشای دوخصلتی ( آمفوتری )

نیاز به بازیافت یون های فلزی از فاضلاب های صنعتی در سال های اخیر هم از نظر اقتصادی به واسطه ذخیره هزینه از طریق فروش یا بازیافت فلزات و هم از نظر زیست محیطی به واسطه جلوگیری از تأثیر فلزات سنگین سمی بر رشد ریز موجودات و تغییر در زنجیره غذایی که شامل انسان ها هم می شود مورد توجه قرار گرفته است. روش های رایج در حذف فلزات سنگین بیشتر براساس تکنیک های فیزیکی و شیمیایی استوار است که شامل فیلتراسیون، ترسیب شیمیایی و تبادل یونی می باشد. همه این روش های متعارف زمانی مطرح می شوند که با غلظت های کم فلزات سنگین در فاضلاب و هزینه های عملیاتی و راه اندازی بالا و انتخاب پذیری پایین فلزات مواجه هستیم. در مقابل، برای حذف فلزات سنگین از فرآیندهای غشایی می توان استفاده نمود که به واسطه هزینه کم تر و عملیات آسان تر و انتخاب پذیری و بازده بالاتر به صورت قابل توجهی مورد توجه قرار گرفته است. لذا به دلیل غلظت کم و حجم زیاد فاضلاب، روش های متعارف در حذف و بازیافت فلزات سنگین کاربرد زیادی پیدا نکرده است. اگرچه گرایش های جهانی به سمت وضع قوانین و استانداردهای محیط زیستی سخت تری در حال حرکت است، اما جریان های اقتصادی، سیستم های تصفیه با هزینه کم را تقویت می نماید (۱).

در سال ۱۹۹۷، Cassano et al., از فرایندهای غشایی به منظور بهبود کیفیت کروم بازیابی شده در عملیات دباغی استفاده نمودند و دریافتند استفاده مجدد از کروم بازیابی

آزمایشگاهی و بازده آن‌ها برای حذف کروم (III) را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشانگر حفظ قابل قبول کروم (III) بود که به نوع غشا، غلظت‌های به کار رفته و شرایط عملیاتی وابسته می‌باشد و چهار غشای مزبور به سبب بارشان عملکردهای مختلف در طی نفوذ نشان دادند (۱۰). در سال ۲۰۰۵، Ku et al., تأثیر ترکیب محلول، روی حذف یون‌های مس را توسط سیستم نانوفیلتراسیون مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که حذف یون‌های مس با افزایش یافتن ظرفیت بار آنیون همراه (کوآنیون‌ها) موجود در محلول آبی افزایش می‌یابد. همچنین مقادیر حذف مس در محلول‌های اسیدی بیشتر از محلول‌های قلیایی حاصل شد و استفاده از فشار بیشتر، حذف مس را افزایش نداد (۱۱).

در سال ۲۰۰۵، Kosutic et al., از غشاهای نانوفیلتراسیون به منظور حذف آرسنیک و آفت کش‌ها از آب آشامیدنی استفاده نمودند و دریافتند دفع آرسنات ۲ بازی سدیم و نیز آنیون آرسنات از آب زیرزمینی طبیعی به وسیله غشاهای نانوفیلتراسیون به طور رضایت بخشی زیاد می‌باشد و یکی از غشاهای نانوفیلتراسیون نشانگر مقادیر سرعت نفوذ عالی می‌باشد (۱۲).

در سال ۲۰۰۶، Frenzel et al., از فن آوری غشایی به همراه فرایند تبخیر به منظور بازیابی آب حاصل از مخلوط پساب‌های زاید اسیدکرومیک استفاده نمودند و دریافتند که ترکیب غشاها و تبخیر می‌تواند یک شیوه مؤثر برای کاهش هزینه و کاهش لوازم و تجهیزات تبخیر مصرف کننده انرژی زیاد باشد (۱۳).

در سال ۲۰۰۶، Wang & Chang از نانوفیلتراسیون (PBI) پلی‌بنزیمیدازول هالوفیبر به منظور حذف کروم از فاضلاب استفاده نمودند و دریافتند که کروم‌ها می‌توانند به طور مؤثری از محلول قلیایی به وسیله PBI با حفظ پایداری مکانیکی و شیمیایی آن‌ها تحت فشار و قلیائیت بالا حذف شوند (۱۴).

در سال ۲۰۰۸، Gamal Khedr سیستم‌های غشایی RO و NF را در مقایسه با روش‌های کلاسیک یا در

معدنی امکانات مختلف جداسازی میان ۲ فلز را بر طبق میزان pH میسر ساخت (۵).

در سال ۲۰۰۲، Wong et al., یک مطالعه مقدماتی در زمینه به کارگیری فرایندهای غشایی در تصفیه و استفاده مجدد از آب شستشوی حاصل از فرایند آب کاری انجام دادند. نتایج حاصل نشان داد که جریان فیلتر شده با کیفیت بالا به طور پیوسته به وسیله سیستم غشایی نانوفیلتراسیون با درصد بازیابی ۹۰٪ تولید می‌شود و فرایند مذکور بیشتر برای تصفیه فاضلاب حاوی فلزات سنگین مهم اما با یون‌های تک ظرفیتی کم کاربردی می‌باشد (۶). در سال ۲۰۰۴، ابوقدیس و موسی یک مطالعه مقایسه‌ای در زمینه حذف فلزات سنگین به وسیله فرایندهای غشایی انجام دادند. نتایج حاکی از بازده بالای حذف فلزات سنگین توسط فرایند RO (۹۸٪ و ۹۹٪ به ترتیب برای مس و کادمیوم) و NF (۹۰٪ حذف یون‌های مس موجود در آب ورودی) بود. همچنین تأثیرگذاری غشاهای RO و NF در تصفیه فاضلاب حاوی بیش از یک فلز سنگین بازده حذف ۹۹٪، ۹۷٪ به ترتیب برای RO و NF را نشان داد و با توجه به کیفیت خوب آب فیلتر شده می‌توان آن را برای مصارف بعدی بازیابی نمود (۷).

در سال ۲۰۰۴، Ballet et al., ضرایب انتقال و دفع نمک کادمیوم را توسط غشای نانوفیلتر مورد مطالعه قرار دادند و باقی مانده کادمیوم به عنوان تابع یون‌های مخالف، نیروی یونی و pH مورد مطالعه قرار گرفت و در نهایت انتقال از میان غشای TFCS توسط ترمودینامیک برگشت ناپذیر توضیح داده شد (۸).

در سال ۲۰۰۴، Wahab Mohammad et al., تحقیقی در زمینه استفاده بالقوه از غشاهای نانوفیلتراسیون در تصفیه فاضلاب صنعتی حاصل از آب کاری نیکل را به صورت غیرانتخابی انجام دادند و دریافتند به طور کلی دفع Ni صرف نظر از وجود یون‌های دیگر زیاد می‌باشد (۹).

در سال ۲۰۰۵، Ortega et al., از نانوفیلتراسیون در بازیابی کروم (III) از فاضلاب‌های دباغی استفاده نمودند و عملکرد چهار غشای نانوفیلتراسیون مختلف در مقیاس

درصد دفع کاملاً پایین بوده و فلاکس نفوذی در غلظت ورودی بالاتر کاهش یافته است (۱۶). هدف از انجام این تحقیق بررسی عملکرد سیستم غشایی نانوفیلتراسیون در حذف فلزات سنگین نیکل، کروم و کادمیوم از فاضلاب های صنعتی و عوامل موثر بر عملکرد آن است.

#### روش تحقیق

نمونه های فاضلاب مصنوعی به وسیله اضافه نمودن مقادیر مختلف کروم، نیکل و کادمیوم به صورت دی کرومات پتاسیم ( $K_2Cr_2O_7$ )، کلرید نیکل ( $NiCl_2$ ) و سولفات کادمیوم ( $CdSO_4$ ) به آب حاوی ملاس قند تهیه شد. COD پساب مورد استفاده با توجه به آنالیزهای انجام گرفته روی پساب صنایع تولیدکننده فاضلاب های حاوی فلزات سنگین حدود ۵۰۰ میلی گرم بر لیتر در نظر گرفته شد. ترکیب فاضلاب مورد استفاده در این تحقیق در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

ترکیب با آن ها به منظور تعیین بازده بهینه فرایند و هزینه به کار برد و دریافت NF دارای بازده مشابه در حذف سختی همانند سختی گیری با آهک می باشد و عبور جریان فیلتر شده از NF با RO با صرف یک هزینه اضافی کم سبب افزایش بازیابی آب تا ۹۵٪ گشت. از طرف دیگر جداسازی کاتیون های فلزات سنگین  $Hg^{2+}$ ،  $Ag^+$ ،  $Cd^{2+}$  و HMC از مخلوط محلول های نمکی به وسیله نانوفیلتراسیون در مقایسه با حذف متعارف به وسیله ته نشینی هیدروکسیدها و سولفیدها یا به وسیله رزین های تعویض یونی تحت شرایط مشابه انجام شد. ارزیابی مقایسه ای نتایج نشانگر بازده بالای NF (۹۸٪ جداسازی با بیش از ۹۰٪ بازیابی) بود (۱۵). در سال ۲۰۰۸، Muthukrishnan & Guha از غشاهای نانو(غشای با دفع بالا NFI و غشای با دفع پایین NFII) برای حذف کروم چند ظرفیتی ( $Cr^{+6}$ ) استفاده کردند. آن ها دریافتند که درصد دفع کروم با افزایش pH محلول ورودی افزایش یافت. همچنین مشاهده گردید اثر غلظت ورودی بر

جدول ۱- ترکیبات موجود در فاضلاب بر حسب میلی گرم بر لیتر

ترکیبات موجود در فاضلاب ( میلی گرم در لیتر ) در فازهای I & II پژوهش						غلظت ترکیبات عناصر سنگین
$CdSO_4$		$NiCl_2$		$K_2Cr_2O_7$		
II	I	II	I	II	I	
-	۲/۸۵۴	-	۲/۲۰۹	-	۲/۸۲۶	۱
-	۱۴/۲۷۰	-	۱۱/۰۴۷۷	-	۱۴/۱۳۴	۵
۲۸/۵۴۰	۲۸/۵۴۰	۲۲/۰۹۵	۲۲/۰۹۵	۲۸/۲۶۹	۲۸/۲۶۹	۱۰
-	۱۴۲/۷۰۴	-	۱۱۰/۴۷۷	-	۱۴۱/۳۴۶	۵۰
۲۸۵/۴۰۹	۲۸۵/۴۰۹	۲۲۰/۹۵۴	۲۲۰/۹۵۴	۲۸۲/۶۹۲	۲۸۲/۶۹۲	۱۰۰

- فشار سنج جهت اندازه گیری محدوده فشار میکرو فیلترها صفر تا ۱۵۰ پوند بر اینچ ( صفر تا ۱۰ بار).
- پمپ میکروفیلتر ABSHAR PUMP CO با دبی ۱۰ تا ۳۷ لیتر در دقیقه .
- پمپ نانوفیلتر GEMOTORS-X5590GN 32KH5MOD
- کلید قطع و وصل مینیاتوری

جهت بررسی حذف فلزات سنگین نیکل، کروم و کادمیوم از سیستم غشایی نانوفیلتراسیون به ظرفیت ۴۰ مترمکعب در روز به همراه فیلترهای ۱ و ۵ میکرونی و یک غشای نیمه تراوای پلی آمید (NF90 – 4040) ساخت شرکت فیم تک امریکا استفاده شد که سطح فعال غشا ۷/۶ مترمربع و فشار کاربردی آن ۴/۸ بار می باشد.

- جهت بررسی COD دو نمونه در ساعات کاری ۴ و ۸ از جریان فیلتر شده خروجی از غشا مورد آنالیز قرار گرفت.

همچنین در زمان نمونه برداری دبی و TDS ورودی و خروجی و فشار غشا ثبت گردید.

#### نتایج و بحث

نتایج حاصل از عملکرد سیستم نانوفیلتراسیون در حذف منفرد فلزات سنگین

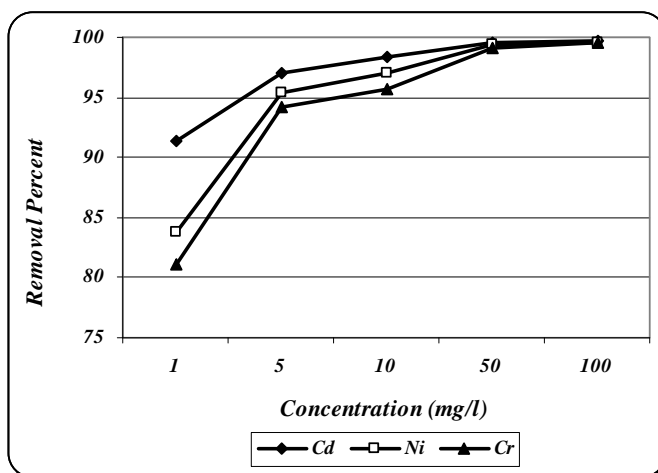
در این مرحله از تحقیق کارایی نانوفیلتراسیون در حذف منفرد فلزات سنگین نیکل، کروم و کادمیوم با غلظت های ۱، ۵، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر مورد بررسی قرار گرفت. مدت کارکرد سیستم نانوفیلتراسیون برای هر غلظت ۸ ساعت بود. همان طور که در نمودار ۱ مشاهده می گردد، با افزایش غلظت فلز ورودی به سیستم از ۱ به ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر، بازده حذف فلزات به وسیله غشا نانو افزایش یافت، و بیش ترین بازده حذف فلزات مربوط به غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر می باشد. همچنین با توجه به نتایج حاصل شده (نمودار ۱) میانگین بازده حذف فلزات سنگین  $\text{Cd}^{2+}$ ،  $\text{Ni}^{2+}$  و  $\text{Cr}^{6+}$  در تمامی غلظت ها به ترتیب ۹۷.۲۱٪، ۹۵.۰۴٪ و ۹۳.۹۱٪ به دست آمد، که در بین فلزات عبوری از سیستم، فلز کادمیوم دارای بیش ترین بازده حذف می باشد، که این ممکن است در نتیجه بزرگ تر بودن اندازه مولکولی  $\text{Cd}^{2+}$  نسبت به اندازه مولکولی سایر فلزات باشد. یک چنین نتیجه مشابهی به وسیله ابوقدیس و موسی نیز به دست آمد. آن ها دریافتند که یون های  $\text{Cd}^{2+}$  با بازده بالاتری در مقایسه با  $\text{Cu}^{2+}$  حذف می شوند که این می تواند در نتیجه بزرگ تر بودن اندازه مولکولی یون های کادمیوم نسبت به یون های مس باشد (۷).

در این آزمایش غلظت فلزات سنگین نیکل، کروم و کادمیوم به روش Atomic Absorption Spectrophotometry و بر اساس دستورالعمل 30LA کتاب استاندارد متد سال ۱۹۹۲، توسط دستگاه Flame Atomic Absorption، مدل HpectrAA.200، ساخت شرکت Varian اندازه گیری شده است. همچنین غلظت COD به روش Open Reflux, Titrimetric و بر اساس دستورالعمل 5220B کتاب استاندارد متد سال ۱۹۹۲ اندازه گیری شده است.

پژوهش در دو مرحله انجام گرفت. در مرحله اول عملکرد سیستم نانوفیلتراسیون در حذف تک تک فلزات سنگین با انجام تغییرات در غلظت فلز ورودی (۱۰۰، ۵۰، ۱۰، ۵، ۱ میلی گرم بر لیتر) و بررسی تأثیر تغییرات غلظت بر بازده حذف فلزات، درصد بازیابی غشا و فشار عملیاتی دستگاه مورد مطالعه قرار گرفت. در ادامه جهت مشاهده تأثیر حضور چند فلز بر روند حذف، مخلوطی از مقادیر مختلف فلزات سنگین نیکل، کروم و کادمیوم (۱۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر) به صورت توأم به وسیله سیستم غشایی نانوفیلتر مورد تصفیه قرار گرفتند. همچنین بازده حذف COD در حضور غلظت های مختلف فلزات سنگین مورد بررسی قرار گرفت.

به طور کلی در طول هر هشت ساعت کار دستگاه، چهارده نمونه از غشا گرفته شد که در نهایت چهار نمونه جهت اندازه گیری فلزات سنگین مورد آنالیز قرار گرفت و دو نمونه مورد آزمایش COD قرار گرفت.

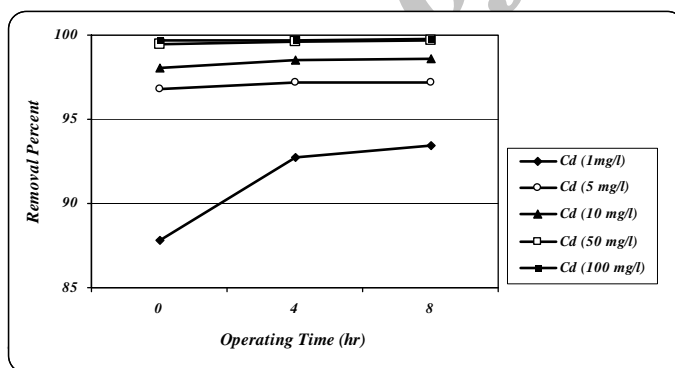
- در ساعات کاری ۴، ۰ و ۸ سه نمونه از جریان فیلتر شده خروجی از سیستم جهت آنالیز فلزات سنگین مورد استفاده قرار گرفت و از جریان باقی مانده (پساب خروجی از سیستم) در ساعات کاری ۸ یک نمونه مورد آنالیز قرار گرفت.



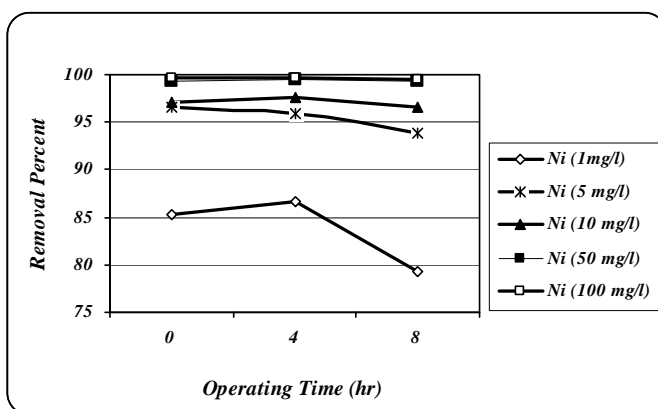
نمودار ۱- عملکرد سیستم نانوفیلتراسیون در حذف منفرد فلزات سنگین Ni، Cr و Cd در غلظت های مختلف ورودی

چنان که در نمودار ۳ و ۴ مشاهده می شود، فلزات سنگین نیکل و کروم در ساعت کاری ۴ به ترتیب دارای بیش ترین و کم ترین بازده حذف می باشند.

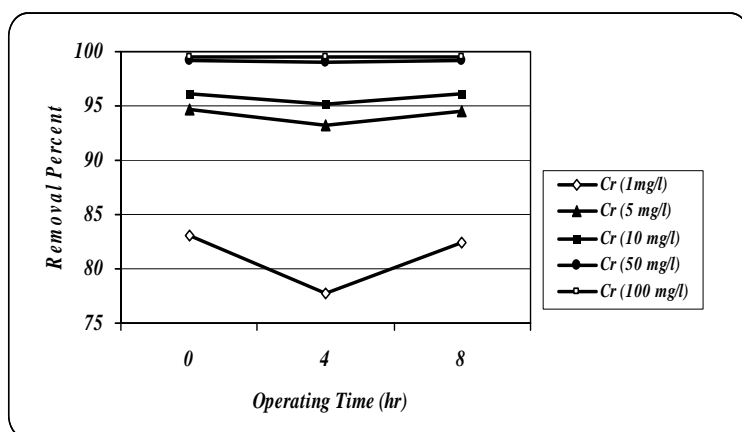
همان طور که در نمودار های ۳، ۲ و ۴ مشاهده می شود، روند حذف فلزات سنگین در ساعت های کاری دستگاه مسیر یکسانی را طی نمی نماید. در نمودار ۲ روند حذف غلظت های مختلف کادمیوم با گذشت زمان افزایش می یابد ولی



نمودار ۲- تغییرات درصد حذف کادمیوم بر حسب زمان در حذف منفرد غلظت های مختلف کادمیوم ورودی



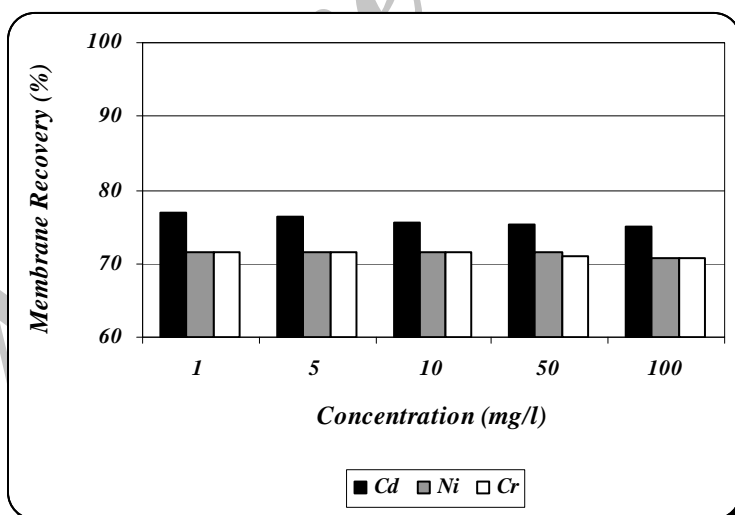
نمودار ۳- تغییرات درصد حذف نیکل بر حسب زمان در حذف منفرد غلظت های مختلف نیکل ورودی



نمودار ۴- تغییرات درصد حذف کروم بر حسب زمان در حذف منفرد غلظت های مختلف کروم ورودی

Muthukrishnan & Guha حاصل شد، آن ها دریافتند که فلاکس نفوذی در غلظت ورودی بالاتر کاهش یافته است (۱۶).

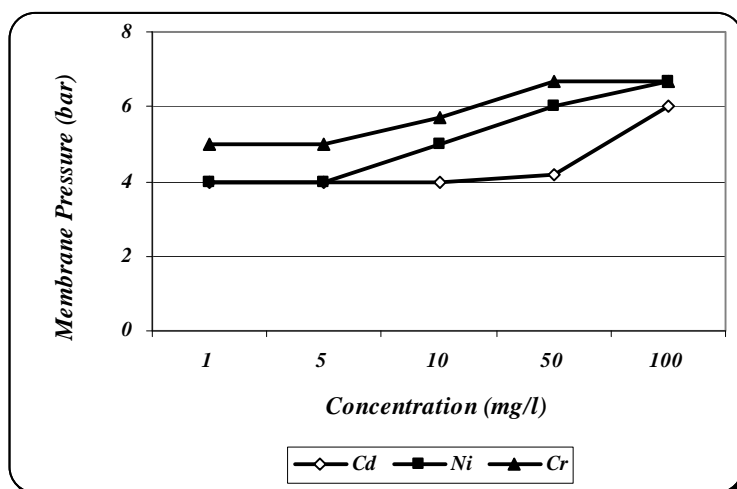
در ادامه به بررسی درصد بازیابی غشایی می پردازیم. با توجه به نمودار ۵ مشاهده می گردد با افزایش غلظت فلزات، درصد بازیابی غشا کاهش یافته به طوری که بیشترین و کمترین درصد بازیابی غشا به ترتیب برای غلظت ۱ و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر به دست آمد. نتیجه مشابهی نیز توسط



نمودار ۵- تغییرات درصد بازیابی غشا بر حسب غلظت در فلزات نیکل، کروم و کادمیوم

کادمیوم، نیکل و کروم به ترتیب ۴/۴۴، ۵/۱۴ و ۵/۸۲ بار حاصل گردید.

همان طور که در نمودار ۶ مشاهده می شود در نتیجه افزایش غلظت، فشار غشا افزایش یافته و بدین ترتیب کمترین و بیشترین فشار غشا در غلظت ۱ و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر مشاهده گردید و میانگین فشار غشا در هنگام عبور فلزات



نمودار ۶- تغییرات فشار غشا بر حسب غلظت در فلزات نیکل، کروم و کادمیوم

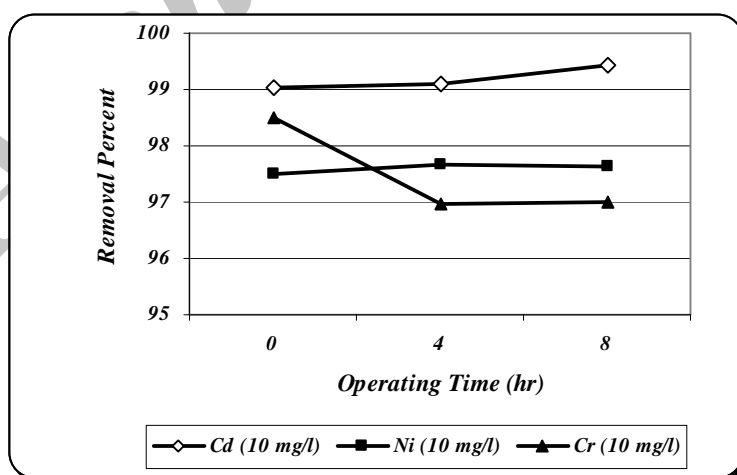
حذف فلزات سنگین کادمیوم، نیکل و کروم به ترتیب ۹۹/۱۹٪، ۹۷/۶۰٪ و ۹۷/۴۹٪ می باشد و همانند حذف منفرد در حذف توأم نیز کادمیوم دارای بیش ترین بازده حذف می باشد.

از نکات قابل توجه روند مشابه حذف فلزات سنگین می باشد. در حذف توأم فلزات، با گذشت زمان بازده حذف کادمیوم افزایش یافته و در ساعت کاری ۴ دستگاه، نیکل و کروم به ترتیب دارای بیش ترین و کم ترین بازده حذف می باشند.

نتایج حاصل از عملکرد سیستم نانوفیلتراسیون در حذف توأم فلزات سنگین

حذف توأم فلزات سنگین در دو غلظت ۱۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر انجام گرفت. در هر دو غلظت همانند حذف منفرد بازده حذف، درصد بازیابی غشا و فشار سیستم مورد بررسی قرار گرفت.

همان طور که در نمودار ۷ مشاهده می شود در حذف توأم فلزات سنگین (غلظت ۱۰ میلی گرم بر لیتر) میانگین بازده

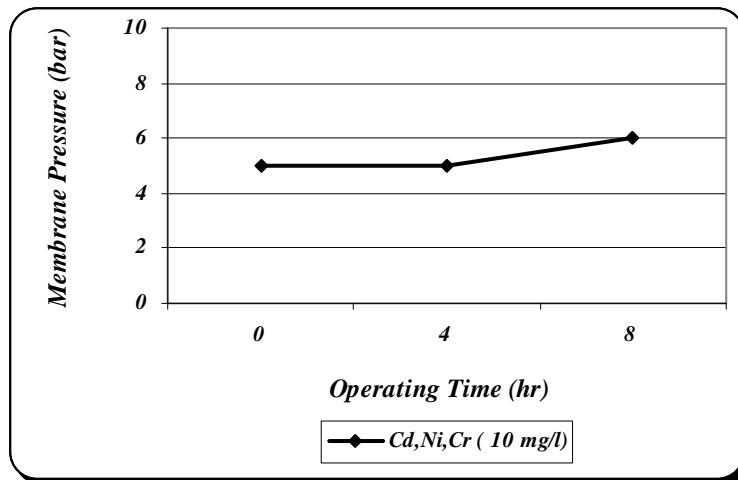


نمودار ۷- عملکرد سیستم نانوفیلتراسیون در حذف توأم فلزات سنگین نیکل، کروم و کادمیوم در غلظت ۱۰ میلی گرم بر لیتر.



گرم برلیتر به ترتیب ۰.۷۴/۹۱ و ۵/۳ بار می باشد.

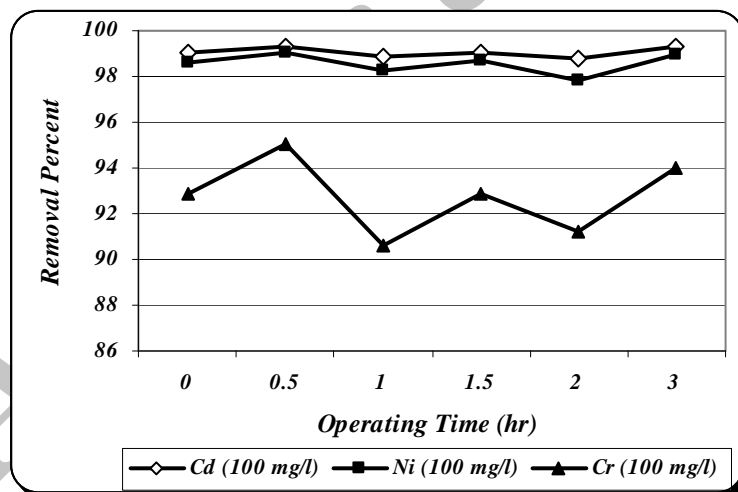
همچنین با توجه به نمودار ۷ و ۸ میانگین درصد بازیابی غشا و فشار در حذف توأم فلزات در غلظت ۱۰ میلی



نمودار ۸- تغییرات فشار غشا بر حسب زمان در حذف توأم فلزات در غلظت ۱۰ میلی گرم بر لیتر

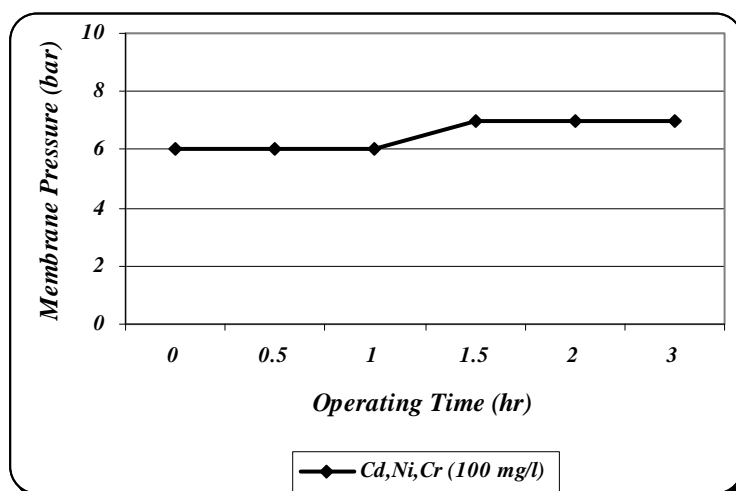
پایداری قرار نداشته و تغییرات صعودی و نزولی روند حذف نشان دهنده عدم پایداری سیستم می باشد.

با توجه به نتایج حاصل شده (نمودار ۹) در حذف توأم فلزات در غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر، غشا در وضعیت



نمودار ۹- عملکرد نانوفیلتر در حذف توأم فلزات سنگین در غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر

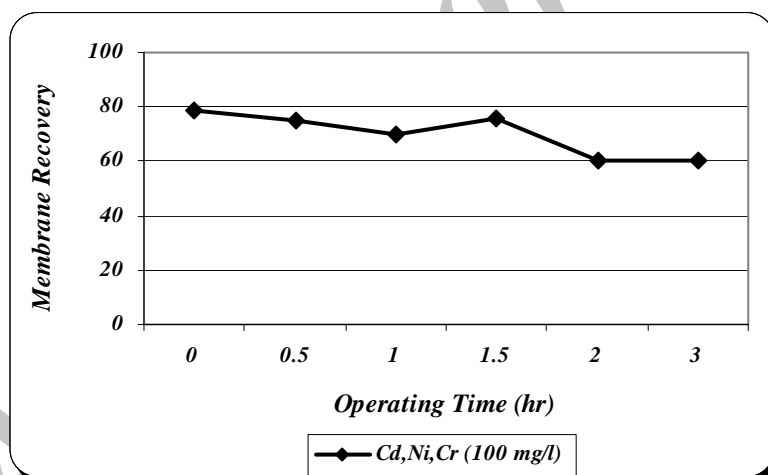
همان طور که در نمودار ۱۰ مشاهده می گردد در یک غلظت ثابت با گذشت زمان فشار سیستم افزایش یافته است.



نمودار ۱۰- تغییرات فشار سیستم بر حسب زمان در حذف توأم فلزات سنگین

پایداری برخوردار نبوده و نمودار روند صعودی نزولی طی می کند.

در نتیجه افزایش غلظت، درصد بازیابی کاهش و فشار غشا افزایش می یابد. ولی در غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر، در حذف توأم فلزات (نمودار ۱۱)، سیستم از وضعیت



نمودار ۱۱- تغییرات درصد بازیابی غشا بر حسب زمان در حذف توأم فلزات سنگین

#### نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده در فاز اول پژوهش با افزایش غلظت فلز ورودی بازده حذف تک تک فلزات نیکل، کروم و کادمیوم افزایش یافت که دلیل آن افزایش تدریجی لایه پلاریزاسیون غلظتی در سطح غشا و گرفتگی منافذ غشا می باشد که در مقابل عبور ذرات با اندازه مولکولی بزرگ تر به عنوان یک لایه محافظ عمل نموده و سبب جداسازی بیشتر ذرات می شود.

لازم به ذکر است سیستم نانوفیلتراسیون قادر به حذف COD در حضور غلظت های مختلف فلزات سنگین به میزان ۹۶/۲ درصد می باشد که این میزان کاهش بیانگر توانایی پایدار غشای نانو در حذف COD می باشد و تغییرات غلظت فلز ورودی تأثیری در بازده حذف COD ایجاد نکرده است.

در فاز دوم تحقیق، بازده نانوفیلتراسیون در حذف مخلوط فلزات در دو غلظت ۱۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده در غلظت ۱۰ میلی گرم بر لیتر حاکی از عملکرد مشابه غشای نانوفیلتر در حذف مخلوط فلزات می باشد. بدین صورت که با افزایش غلظت فلزات ورودی بازده حذف فلزات و فشار غشا افزایش و درصد بازیابی غشا کاهش یافت، با این تفاوت که درصد حذف فلزات بیشتر و بازیابی غشا کم تر از حالت حذف تک تک فلزات توسط غشا می باشد.

همچنین بازده بالاتر دستگاه در حذف مخلوط فلزات نشان دهنده تأثیر مثبت افزایش غلظت فلزات ورودی در روند صعودی بازده حذف فلزات سنگین مذکور می باشد.

در حذف مخلوط فلزات در غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر نوسانات زیادی در روند حذف فلزات و هم در درصد بازیابی مشاهده گردید و میزان درصد حذف در هر سه نوع فلز به طور تناوبی دچار افزایش و کاهش بود که نشان دهنده عدم پایداری سیستم در حذف توأم فلزات در غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر می باشد.

#### منابع

۱. بحرپیما، سارا، ۱۳۸۴، "عملکرد بیوراكتور غشایی در حذف فلزات سنگین از فاضلاب سنتتیک"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف، صص ۱-۱
2. Cassano, A., Drioli, E. & Molinari, R., (1997), "Recovery and reuse of chemicals in unhairing, of degreasing and chromium tanning processes by membranes", *Desalination*, Vol. 113, pp. 251-261
3. Cassano, A., Drioli, E., Molinari, R. & Bertolutti, C., (1997), "Quality improvement of recycled chromium in the tanning operation by membrane processes", *Desalination*, Vol. 108, pp. 193-203

همچنین نتایج به دست آمده نشان می دهد که یون های کادمیوم با بازده حذف بیشتری در مقایسه با نیکل و نیکل با بازده حذف بیشتر نسبت به کروم حذف می شوند که این ممکن است در نتیجه بزرگ تر بودن اندازه مولکولی کادمیوم نسبت به نیکل و نیکل در مقایسه با کروم باشد.

از طرف دیگر با افزایش غلظت فلز ورودی فشار غشا افزایش و درصد بازیابی کاهش یافت. این افزایش فشار می تواند به دلیل ایجاد لایه نازکی از مواد جدا شونده بر روی دیوار غشا باشد که در مقابل عبور فاضلاب حاوی فلزات سنگین مقاومت نموده و با افزایش غلظت فلز سنگین ورودی بر ضخامت این لایه افزوده شده به نحوی که باعث بالا رفتن فشار سیستم گردیده است. افزایش غلظت خوراک معمولاً باعث کاهش فلاکس نفوذی در فرایند صاف سازی غشا می گردد و در برخی موارد رفتار تغییرات فلاکس با غلظت همانند پیش بینی های اغلب مدل های پلاریزاسیون غلظتی به صورت لگاریتمی می باشد. یعنی بین فلاکس و لگاریتم غلظت خوراک رابطه ای خطی مشاهده می شود. چنین رابطه ای عمدتاً در شرایطی حاصل می گردد که سرعت جریان خوراک از روی سطح غشا نسبتاً کم باشد.

با توجه به مقادیر بازیابی آب در این تحقیق می توان بیان نمود که استفاده مجدد از فاضلاب های صنعتی حاوی فلزات سنگین پس از تصفیه به وسیله نانوفیلتراسیون عملی است و پساب حاصل از تصفیه می تواند مجدداً مورد استفاده قرار گیرد.

همچنین تأثیر تغییرات غلظت فلز ورودی بر میزان حذف COD فاضلاب مصنوعی مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده گردید سیستم نانوفیلتراسیون قادر به حذف COD در حضور غلظت های مختلف فلزات سنگین به میزان بالایی می باشد که این میزان کاهش بیانگر توانایی پایدار غشای نانو در حذف COD می باشد و تغییرات غلظت فلز ورودی تأثیری در بازده حذف COD ایجاد نکرده است. بیش ترین بازده حذف، بالاترین درصد بازیابی غشا و کم ترین فشار کاربردی در حذف فلز کادمیوم مشاهده گردید.

- Separation and Purification Technology, Vol.44, pp.45-52
11. Ku, Y., Chen, S.W. & Wang, W.Y., (2005), "Effect of solution composition on the removal of copper ions by nanofiltration", Separation and Purification Technology, Vol.43, pp.135-142
  12. Kosutic, K., Furac, L., Sipos, L., & Kunst, B., (2005), "Removal of arsenic and pesticides from drinking water by nanofiltration membranes" Separation and Purification Technology, Vol.42, pp.137-144
  13. Frenzel, I., Stamatiadis, Dimitrios, F. & Wessling, M., (2006), "Water recycling from mixed chromic acid waste effluents by membrane technology", Separation and Purification Technology, Vol.49, pp.76-83
  14. Wang, K.Y. & Chang, T.S., (2006), "Fabrication of polybenzimidazole (PBI) nanofiltration hollow fiber membranes for removal of chromate", Journal of Membrane Science, Vol.281, pp.307-315
  15. Gamal Khedr, M., (2008), "Membrane methods in tailoring simpler, more efficient, and cost effective wastewater treatment alternatives", Desalination, Vol.222, pp.135-145
  16. Muthukrishnan, M. & Guha, B.K., (2008), "Effect of pH on rejection of hexavalent chromium by nanofiltration", Desalination, Vol.219, pp.171-178.
  4. Oh, J.I., Yamamoto, K., Kitawaki, H., Nakao, S., Sugawara, T., Rahman, M.M. & Rahman, M.H., (2000), "Application of low-pressure nanofiltration coupled with a bicycle pump for the treatment of arsenic-contaminated groundwater", Desalination, Vol.132, pp.307-314
  5. Chihani, A., Akretche, D.E., Kerdjoudj, H., Persin, M., & Sarrazin, J., (2001), "Behaviour of copper and silver in complexing medium in the course of nanofiltration on both mineral and organic membrane", Separation and Purification Technology, Vol.22-23, pp.543-550
  6. Wong, F.S., Qin, J.J., Wai, M.N., Lima, A.L. & Adiga, M., (2002), "A pilot study on a membrane process for the treatment and recycling of spent final rinse water from electroless plating", Separation and Purification Technology, Vol.29, pp.41-51
  7. Abu Qdais, H. & Moussa, H., (2004), "Removal of heavy metals from wastewater by membrane processes: a comparative study", Desalination, Vol.164, pp.105-110
  8. Ballet, G.T., Gzara, I., Hafiane, A. & Dhahbi, M., (2004), "Transport coefficients and cadmium salt rejection in nanofiltration membrane", Desalination, Vol.167, pp.369-376
  9. Wahab Mohammad, A., Othaman, R., & Hilal, N., (2004), "Potential use of nanofiltration membranes in treatment of industrial wastewater from Ni-P electroless plating", Desalination, Vol.168, pp.241-252
  10. Ortega, L.M., Lebrun, R., Noel, I.M. & Hausler, R., (2005), "Application of nanofiltration in the recovery of chromium(III) from tannery effluents",