

## بررسی امکان حذف آلومینیوم و سولفات از پساب صنایع آندایزینگ<sup>۱</sup> با استفاده از نانوفیلتراسیون<sup>۲</sup>

شهاب فرج‌اللهی<sup>۳\*</sup>

[sfarajollahi@yahoo.com](mailto:sfarajollahi@yahoo.com)

علی تریان<sup>۴</sup>

غلامرضایی بیدهدی<sup>۴</sup>

علی اصغر قدیم‌خانی<sup>۳</sup>

علی محمدپور<sup>۳</sup>

نسیم زارع<sup>۳</sup>

مهدی جانقربان<sup>۳</sup>

تاریخ پذیرش: ۸۸/۹/۲۵

تاریخ دریافت: ۸۸/۵/۵

### چکیده

تصفیه پساب صنایع آبکاری به علت آلودگی زیاد و آلوده کردن آب و خاک، ضروری است. به علت مصرف زیاد آب این صنایع، استفاده مجدد و بازیابی پساب تصفیه شده، اهمیت خاصی دارد. در این تحقیق حذف آلومینیوم و سولفات از پساب صنایع آبکاری آلومینیوم با استفاده از پایلوت نانوفیلتراسیون مورد بررسی قرار گرفته است.

در ابتدا با خنثی سازی پساب، مقدار آلومینیوم در پساب کاهش داده شده و سپس امکان تصفیه پساب با استفاده از فرآیند نانوفیلتراسیون مورد مطالعه قرار گرفته است. پارامترهای مؤثر در فرآیند که در پایلوت مورد مطالعه قرار گرفته عبارتند از: دما و فشار کاری دستگاه هنگام تصفیه با نانوفیلتراسیون. در این مطالعه از غشا NF۹۰ که توسط شرکت فیلم‌تک<sup>۵</sup> ساخته شده است، به عنوان نانوفیلتر استفاده می‌شود. این تحقیق در دماهای ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سانتی گراد و فشارهای ۵ الی ۲۰ بار انجام شد. نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که بهترین بازده حذف آلومینیوم و سولفات در فشارهای بین ۷/۵ تا ۱۲/۵ بار و دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد به دست می‌آید. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش دما و فشار، فلاکس آب عبوری از نانوفیلتراسیون افزایش می‌یابد.

**واژه های کلیدی:** پساب صنایع آندایزینگ، جداسازی توسط غشا، نانوفیلتراسیون، پلاریزاسیون غلظتی.

1 - Anodizing

2 - Nanofiltration

۳- کارشناس ارشد مهندسی عمران - محیط زیست، دانشگاه تهران\* (مسئول مکاتبات).

۴- استاد دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران.

5 - Filmtec

## مقدمه

کاهش می‌یابد، از این رو از نظر اقتصادی نسبت به اسمز معکوس بهینه‌تر است.

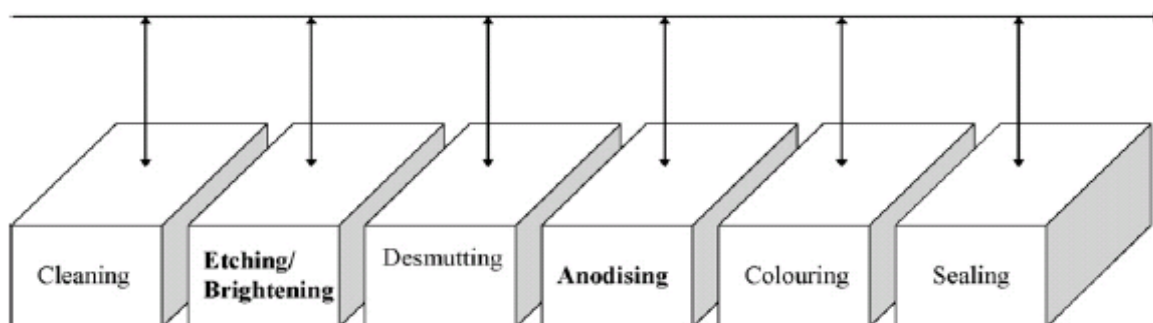
اولین کاربردهای نانوفیلتراسیون به نیمه دوم دهه هشتاد میلادی بر می‌گردد (۳ و ۴). در مطالعه‌ای که توسط وانگ و همکاران در سال ۲۰۰۳ برای تصفیه و استفاده مجدد از آب شستشوی نهایی صنایع آبکاری غیر الکترونیکی انجام یافت، یک سیستم هیبرید شامل میکروفیلتر، تابش UV، کربن فعال، نانوفیلتر و تبادل یونی، مورد استفاده قرار گرفت. در این فرآیند تصفیه، فلزات پساب با استفاده از غشای نانوفیلتر حذف شدند. آب پیش تصفیه شده با استفاده از نانوفیلتر به دو جریان غلیظ (شامل نمک‌ها و فلزات) و نفوذی (آب تمیز) مجزا گردید و در مرحله نهایی (ارتقاء کیفیت)، آب تمیز تصفیه شده توسط نانوفیلتر با استفاده از یک بستر ترکیبی یونی، عاری از یون شده و آب دمین<sup>۳</sup> به دست آمد. سپس جریان آب نفوذی (تمیز شده) دمین به سیستم شستشوی عملیات آبکاری بازگردانیده شد. نتایج مطالعات اولیه نشان داد که توسط سیستم غشا نانوفیلتر، آب تولیدی با کیفیت بالا (بدون فلزات سنگین) به صورت مرتب و پیوسته و با ریکواری کل در حدود ۹۰٪ تولید می‌شود (۵).

در مطالعه دیگر امکان تصفیه پساب شستشوی صنایع آبکاری که حاوی مس و کروم است با استفاده از سه نوع غشا نانوفیلتر (NTR-7450, DL, DK) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش فشار، حذف کروم و مس توسط هر سه نوع غشا اندکی افزایش می‌یابد. حذف متوسط کروم توسط غشاهای DL و DK به ترتیب برابر ۹۶/۶٪ و ۹۴/۷٪ می‌باشد. حذف مس نیز به صورت متوسط برابر ۹۰/۰٪ و ۸۲/۸٪ می‌باشد. حذف مس (Cu) و کروم (Cr) توسط غشای NTR-7450 کمتر از ۷۰٪ است. همچنین مشاهده شد که در محدوده این آزمایش با افزایش دما، در حذف مس (Cu) و کروم (Cr) تغییرات مشهودی دیده نمی‌شود (۶).

آبکاری فرآیندی است که ضخامت یکنواختی بر روی تمامی سطوح قطعات مورد نظر صرف‌نظر از شکل و هندسه قطعات ایجاد می‌کند. ورق، پروفیل و قطعات آلومینیوم که در صنایع ساختمانی و دیگر صنایع تولید و استفاده می‌شوند، بسته به کارایی و مقاومت‌های متفاوت آبکاری می‌شوند که این فرآیند به عنوان آندایزینگ آلومینیوم شناخته می‌شود. در آندایزینگ آلومینیوم از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که معمول‌ترین این فرآیندها، استفاده از اسید سولفوریک می‌باشد. کل فرآیند معمولاً شامل چندین مرحله متوالی است که به ترتیب عبارتند از تمیزکاری، لکه‌گیری<sup>۱</sup> با استفاده از سود، شفاف‌سازی و دود زدایی توسط اسید نیتریک، آندایزینگ در محلول اسید سولفوریک، رنگ آمیزی و در نهایت آب بندی<sup>۲</sup> می‌باشد که در شکل ۱ به صورت شماتیک نشان داده شده است (۲۰۱).

در فرآیند آندایزینگ همچون دیگر صنایع آبکاری به منظور جلوگیری از آسیب دیدن قطعات و آلودگی ناشی از محلول‌های فرآیندی، قطعات در وان‌هایی با آب شستشو داده می‌شوند. این امر باعث ایجاد پساب‌های مختلفی از جمله پساب‌های اسیدی و بازی می‌شود که میزان آلومینیوم، سولفات و سدیم در این پساب‌ها زیاد است.

پساب‌های شستشو معمولاً با استفاده از روش‌های معمول همچون اکسایش-کاهش و یا ته‌نشینی تا جایی که پساب از نظر استاندارد تخلیه به سیستم فاضلاب شهری و یا آب‌های سطحی مجاز باشد، تصفیه می‌شود. جهت کاهش آب مصرفی در این صنایع، تکنولوژی‌های جدیدی همچون فرآیندهای غشایی برای استفاده مجدد از آبی که در فرآیند آبکاری استفاده می‌شود، وجود دارد. یکی از این روش‌ها استفاده از فرآیند نانوفیلتراسیون است. نانوفیلتراسیون فرآیندی جذاب‌تر نسبت به سایر تکنولوژی‌ها برای حذف فلزات و دیگر آلودگی‌ها همچون اسمز معکوس است. چرا که فشار عملیاتی در مقایسه با سیستم اسمز معکوس با ثابت نگه داشتن همان فلاکس، کمتر است. در نتیجه انرژی مصرف شده و سرمایه اولیه در لوله کشی و پمپ‌ها



شکل ۱- شماتیک فرآیند ساده شده در صنایع معمول آندایزینگ

غشا نانوفیلتر به دو جریان غلیظ (شامل نمک‌ها) و نفوذی (آب تمیز) تفکیک می‌شود.

#### ۱- پیش تصفیه

پژوهش‌های قبلی، ترکیبات سیلیکات آلومینیوم، هیدروکسید آلومینیوم و فسفات آلومینیوم را در هنگام تصفیه با غشا به عنوان علت گرفتگی معرفی کرده‌اند (۹، ۱۰ و ۱۱). بنابراین برای کاهش گرفتگی غشا، ما تلاش کردیم در این مرحله آلومینیوم محلول را از پساب جدا کنیم. لذا پیش تصفیه، یک مرحله کلیدی در فرآیند طراحی شده است.

بر اساس شکل ۲ می‌توان مشاهده کرد که در بازه pH ۷/۵ الی ۶/۵ محلولیت آلومینیوم کم‌ترین مقدار را خواهد داشت. پس از جمع‌آوری پساب‌ها از کارخانه آبکاری آلومینیوم، با ترکیب جریان‌های اسیدی و بازی، خنثی سازی انجام می‌شود و در نتیجه آلومینیوم محلول به هیدروکسید آلومینیوم نامحلول تبدیل می‌شود و در مخزن ته نشینی رسوب می‌کند. بدین ترتیب مقدار زیادی آلومینیوم از پساب حذف می‌شود. بنابراین محلولی با کدورت کم در حد کم‌تر از ۱ NTU به واحدهای نانوفیلتراسیون وارد می‌شود (۱۲).

کرم<sup>۱</sup> و همکاران روشی را برای تصفیه پساب حاوی مس، روی و کروم از آبکاری فلزات با استفاده از فرآیند اسمز معکوس به همراه ته‌نشینی گزارش کرده‌اند که در نهایت ریکاوری کلی برابر ۹۵٪ داشته است (۷). آهن<sup>۲</sup> و همکاران کارایی نانوفیلتر را در حذف آهن در پساب شستشوی آبکاری نیکل مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها فشار عملیاتی بهینه برای نانوفیلتر در این کاربرد و همچنین تاثیر معنی‌دار pH در حذف کلراید را تشخیص دادند (۸).

با توجه به کمبود تحقیقات انجام شده در تصفیه پساب صنایع آبکاری آلومینیوم، بالاخص توسط فرآیند نانوفیلتراسیون، در این تحقیق کارایی فرآیند نانوفیلتراسیون به همراه پیش تصفیه ترسیب شیمیایی، در میزان حذف یون‌های سولفات و آلومینیوم از این پساب در دماها و فشارهای مختلف توسط پابلوت نانوفیلتراسیون بررسی شده است.

#### مواد و روش‌ها

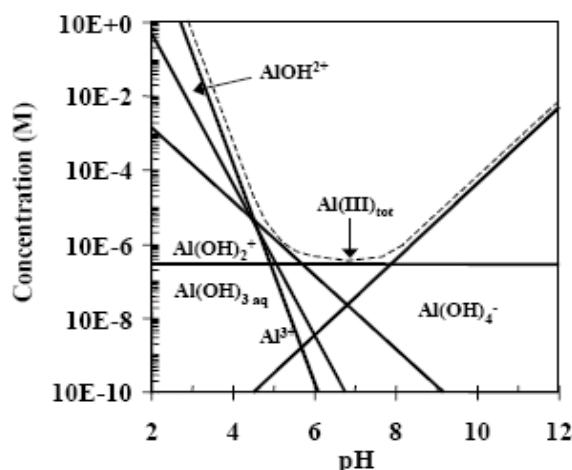
فرآیند انجام مطالعه تصفیه پساب صنایع آندایزینگ آلومینیوم با استفاده از نانوفیلتراسیون شامل دو مرحله است:

۱. پیش تصفیه - در این مرحله جریان آب ورودی به منظور کاهش آلومینیوم تصفیه می‌شود.
۲. حذف کل مواد محلول باقی‌مانده با استفاده از نانوفیلتراسیون - آب پیش تصفیه شده با استفاده از

بر روی لوله جریان ورودی تعبیه شده است که اجازه می‌دهد نرخ جریان ورودی به نانوفیلتر تنظیم شود. همچنین فشار عملیاتی آب ورودی با استفاده از یک شیر قطع جریان که بر روی خط جریان غلیظ بعد از محفظه غشا نصب شده است و یک گیج فشار که فشار داخل مدول صفحه‌ای را نشان می‌دهد، تنظیم می‌گردد (شکل ۳).

همان طور که گفته شد، دمای آب عبوری از نانوفیلتر تاثیر به سزایی در فلاکس و بازده عملیاتی در حذف مواد دارد. لذا به منظور ثابت نگه داشتن دما از یک سیستم کنترلی دما شامل کویل خنک کننده، هیتر و یک سویچ کنترلی استفاده شده است. بدین ترتیب می‌توان پیلوت را در دمای ثابت و تیرانس ۰/۳ درجه سانتی‌گراد راهبری کرد.

در ابتدای راه اندازی در هر یک از مراحل، برای آن که عملیات نانوفیلتراسیون به صورت پایدار برسد، پیلوت به صورت پیوسته، به مدت دو ساعت کار می‌کند. میزان فلاکس و مقدار مواد محلول در آب نفوذی تمیز اندازه گرفته می‌شود، هنگامی که به مقادیر ثابتی برسد، نمونه برداری آغاز می‌شود. مجدداً با تغییر فشار عملیاتی، زمانی داده می‌شود تا تمام پارامترها به حالت پایدار برسد و بار دیگر، نمونه برداری انجام شود. در هر نمونه برداری، سه نمونه با فاصله زمانی ۱۰ دقیقه برداشت می‌شود و در هر مرحله دبی آب نفوذی تمیز اندازه گیری می‌شود.

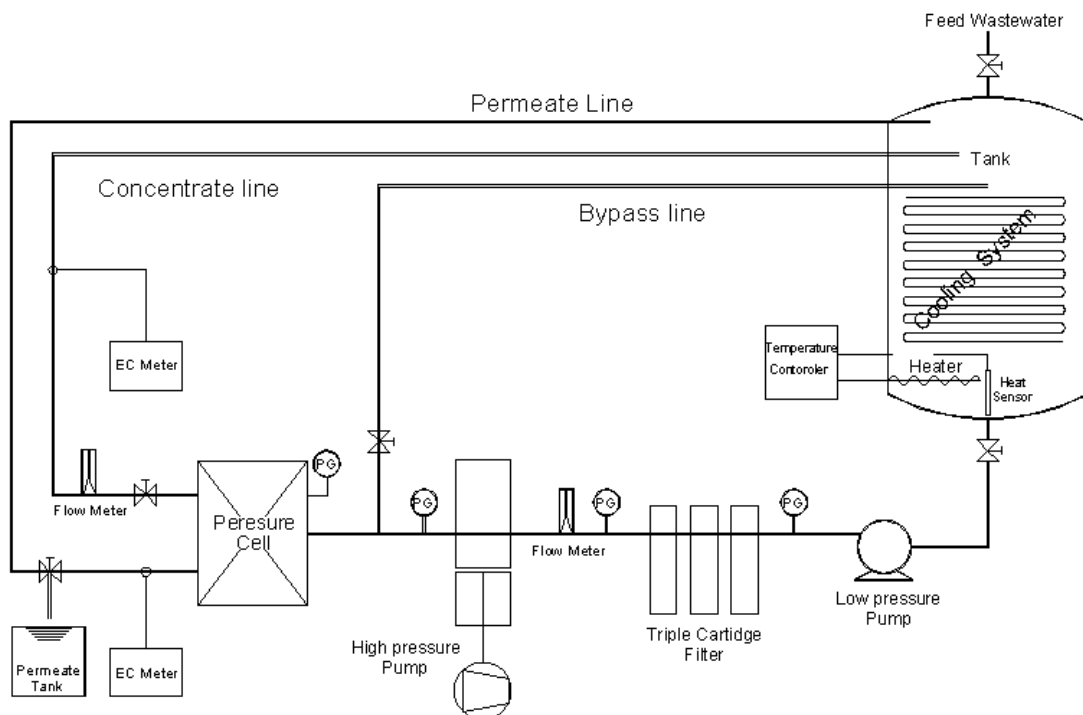


شکل ۲- حلالیت آلومینیوم در بازه pH

## ۲- حذف سولفات با استفاده از نانوفیلتراسیون

در این تحقیق به منظور بررسی عملکرد دقیق عملیات نانوفیلتراسیون، یک پیلوت نانوفیلتر با مدول صفحه‌ای در دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران طراحی و ساخته شد. پساب پیش تصفیه شده بعد از عمل خنثی سازی در مرحله قبل (که عمده آلودگی آن سدیم و سولفات است) در مخزن پیلوت جمع آوری می‌شود.

در این پیلوت آب داخل مخزن با استفاده از یک پمپ با فشار کم از کارتریج فیلترها (۱۰ میکرومتر، کربن فعال و ۵ میکرومتر) به عنوان میکروفیلتر، به منظور حذف مواد معلق و اجتناب از گرفتگی کلوئیدی، عبور می‌کند و سپس با استفاده از پمپ فشار قوی به غشا نانوفیلتر وارد می‌شود. یک شیر کمکی



شکل ۳- نمودار طرح کلی پایلوت نانوفیلتراسیون

فیلتر و جدا می‌کند. این بازده به پارامترهای عملیاتی که شامل فشار عملیاتی، دما، pH و غلظت جریان ورودی، نرخ جریان و درصد ریکاوری است، بستگی دارد. در این مطالعه، تاثیر فشار عملیاتی و دما مورد بررسی قرار گرفت.

غشا نانوفیلتر از نوع NF90 است که ساخت شرکت فیلم‌تک می‌باشد. مشخصات این غشا با محدودیت وزن مولکولی بین ۲۰۰ الی ۳۰۰ دالتون، در جدول یک نشان داده شده است (۱۳ و ۱۴).

بازده حذف و فلاکس در عملیات نانوفیلتراسیون به پارامترهای مختلفی که شامل فشار عملیاتی، دما، pH و غلظت جریان ورودی، نرخ جریان و درصد ریکاوری است، بستگی دارد. در این مطالعه، تاثیر فشار عملیاتی و دما بر بازده حذف کل مواد محلول و یون‌های سولفات و آلومینیوم باقی مانده از فرآیند پیش تصفیه مورد بررسی قرار گرفت.

در حین عملیات، نانوفیلتر یون‌های سولفات، سدیم و آلومینیوم باقی مانده از فرآیند پیش تصفیه را با بازده متفاوت

## جدول ۱- مشخصات غشا NF90

جنس غشا	پلی آمید
بیشینه فشار بهره‌برداری	۶۰۰ psig (۴۱ bar)
بیشینه دمای بهره‌برداری	۶۰۰ psig (۴۱ bar)
نوع مدول غشا	مدول صفحه ای
محدوده pH در بهره برداری پیوسته	۲ الی ۱۱
محدوده pH، در شستشوی کوتاه مدت	۱ الی ۱۲
بیشینه شاخص چگالی لای <sup>۱</sup> ورودی	۵ SDI
بیشینه فلاکس	۰/۴ m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /h
جنس غشا	پلی آمید
بیشینه فشار بهره‌برداری	۶۰۰ psig (۴۱ bar)
بیشینه دمای بهره‌برداری	۶۰۰ psig (۴۱ bar)
نوع مدول غشا	مدول صفحه ای
محدوده pH در بهره برداری پیوسته	۲ الی ۱۱
محدوده pH، در شستشوی کوتاه مدت	۱ الی ۱۲
بیشینه شاخص چگالی لای <sup>۲</sup> ورودی	۵ SDI
بیشینه فلاکس	۰/۴ m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /h

کارایی غشا نانوفیلتر بر اساس درصد حذف ترکیبات خاص، به طوری که از رابطه یک تعریف می‌شود، مطالعه می‌شود:

$$(1) \quad \text{درصدحذف (Rejection)} = (1 - C_p/C_f) \times 100 \%$$

که در آن  $C_p$  و  $C_f$  به ترتیب غلظت ترکیبات در خوراک و آب نفوذی تمیز می‌باشند.

## نتایج و بحث

نتایج در مرحله پیش تصفیه نشان می‌دهد، هنگامی که جریان‌های اسیدی و بازی با یکدیگر خنثی می‌شوند، بازده حذف آلومینیوم به ۹۷ تا ۹۹٪ می‌رسد و مقدار باقی مانده نیز اکثراً به صورت ذرات کلوییدی است که قبل از ورود به نانوفیلتر توسط میکروفیلترها گرفته می‌شود.

لذا ترکیبات آلومینیوم به عنوان عامل اصلی گرفتگی، در هنگام تصفیه با غشا نانوفیلتراسیون به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. غلظت یون‌ها در پساب پیش تصفیه شده به عنوان جریان ورودی به واحد نانوفیلتراسیون در جدول ۲ نشان داده شده است.

## آنالیز نمونه‌ها

آنالیز بر روی نمونه‌هایی که از پساب اصلی و در حین مطالعه پایلوتی جمع آوری شده‌اند، انجام شد که شامل کل مواد محلول<sup>۳</sup> (یا هدایت الکتریکی)، غلظت آلومینیوم و آنیون‌ها، بر اساس استاندارد روش آزمایش آب و فاضلاب می‌باشد. برای آنالیز کل مواد محلول نمونه، از دستگاه TDS-meter مدل sension378 ساخت شرکت هچ<sup>۴</sup> استفاده شد. مقدار آلومینیوم با استفاده از دستگاه ICP و آنیون‌ها، سولفات و نیترات در نمونه‌ها با استفاده از اسپکتوفتومتر مدل DR 5000 ساخت شرکت هچ اندازه گیری گردید (۱۵).

- 1 -Silt density index (SDI)
- 2 -Silt density index (SDI)
- 3 -Total Dissolved Solid (TDS)
- 4 -HACH

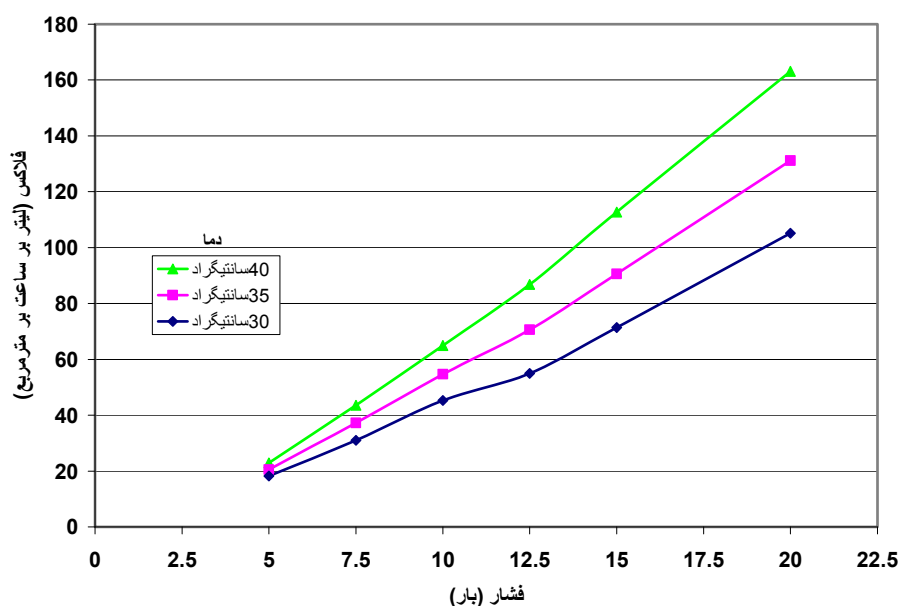
جدول ۲- غلظت یون‌ها در پساب پیش تصفیه شده به عنوان جریان ورودی به پایلوت نانوفیلتراسیون

غلظت (ppm)	یون‌ها	غلظت (ppm)	یون‌ها
$6970 \pm 330$	کل مواد محلول (TDS)	$2080 \pm 85$	سدیم ( $Na^+$ )
$4230 \pm 150$	سولفات ( $SO_4^{2-}$ )	$2/4 \pm 0/1$	آلومینیوم ( $Al^{3+}$ )
$185 \pm 15$	نیتрат ( $NO_3^-$ )	$1/9 \pm 0/1$	منیزیم ( $Mg^{2+}$ )

صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود دمای ۴۰ درجه نسبت به دیگر دماها، فلاکس بیشتری دارد که علت این امر کاهش ویسکوزیته محلول به دلیل افزایش دما می‌باشد. از طرف دیگر با توجه به حداکثر دمای مجاز که ۴۰ درجه سانتی گراد است، دماهای بالاتر آزمایش نشد.

آثار دما و فشار بر روی پارامترهای بهره‌برداری و کارایی غشا نانوفیلتر در دماهای ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه سانتی گراد و فشارهای ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵، ۱۵ و ۲۰ بار مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۴ فلاکس آب نفوذی (مقدار جریان آب عبوری از واحد سطح نانوفیلتر) از غشای NF90 را در فشارهای مختلف نشان می‌دهد.

همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، در هر دما با افزایش فشار، فلاکس آب نفوذی از غشای NF90 به



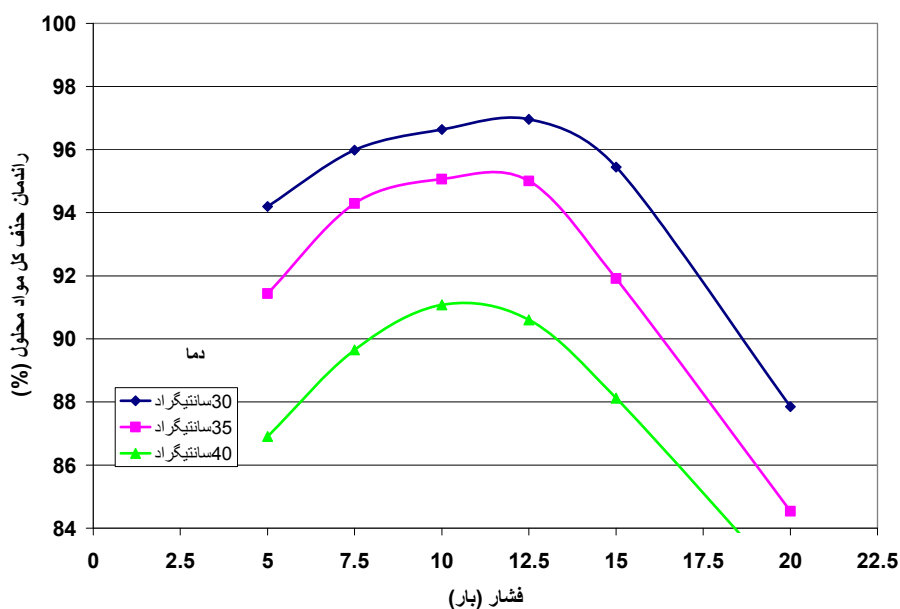
شکل ۴- تاثیر فشار و دمای کاربردی بر فلاکس عبوری در فرآیند نانوفیلتراسیون

است. همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، کل مواد محلول پساب به صورت موفقیت آمیز با بازده ۸۹ تا ۹۷٪ در دماهای مختلف با استفاده از نانوفیلتر حذف می‌شود. نتایج مشابه را می‌توان برای یون‌های سولفات در آب تولیدی (تمیز)

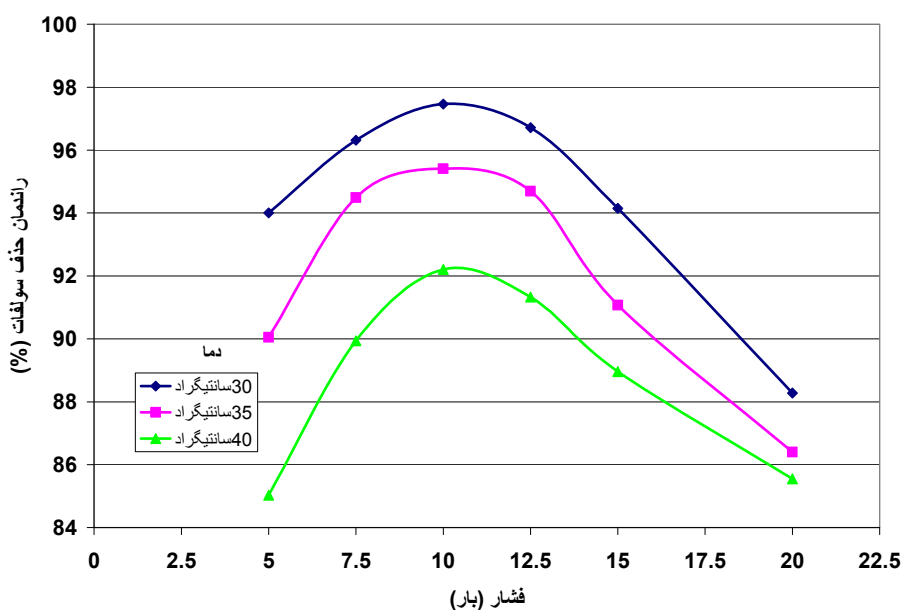
در ادامه، بازده حذف مواد توسط غشا NF90 در دماها و فشارهای متفاوت بررسی شد. بازده فرآیند نانوفیلتراسیون در حذف کل مواد محلول، سولفات و آلومینیوم از پساب به ترتیب در نمودارهای ۵، ۶ و ۷ نمایش داده شده

معین، با تقریب خوبی ثابت باقی می‌ماند. نتایج (شکل‌های ۶ و ۷) نشان می‌دهد که بهترین بازده حذف آلومینیوم و سولفات در فشار ۷/۵ تا ۱۲/۵ بار و دمای ۳۰ درجه برای راهبری نانوفیلتراسیون با این پساب اتفاق می‌افتد.

که به مقدار متوسط  $142 \pm 248$  میلی‌گرم می‌رسد، مشاهده کرد. به عبارتی دیگر، سولفات به صورت متوسط ۹۴٪ کاهش می‌یابد. از طرف دیگر بازده حذف آلومینیوم با نانوفیلتر در محدوده ۹۰ تا ۹۶٪ قرار دارد (شکل ۷). نتایج نشان می‌دهد که تمام حذف‌ها، در دامنه دوره آزمایشی ۲ ساعته و در فشار



شکل ۵- تاثیر فشار و دمای کاربردی بر بازده حذف کل مواد محلول در فرآیند نانوفیلتراسیون



شکل ۶- تاثیر فشار و دمای کاربردی بر بازده حذف سولفات در فرآیند نانوفیلتراسیون

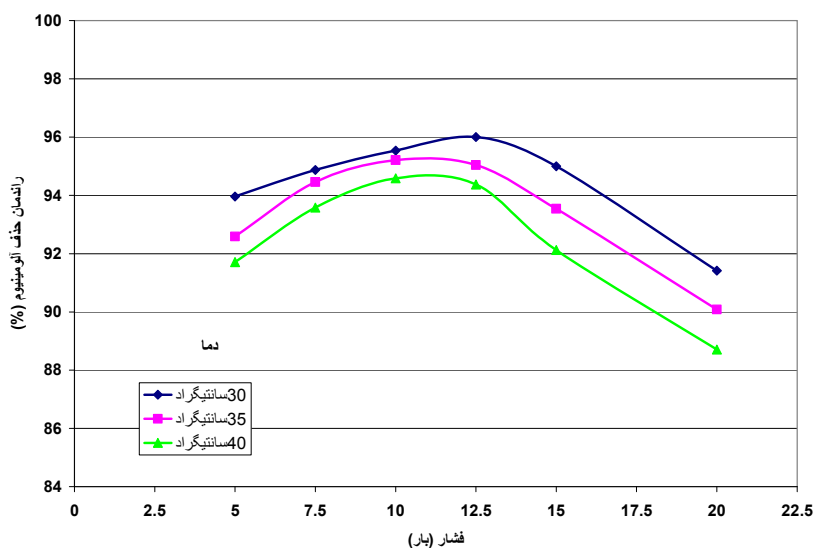


مشاهده شده است که هرچه قدر بار نانوفیلتر منفی تر باشد، پس دهی و حذف آنیون‌های دو ظرفیتی نسبت به آنیون‌های تک ظرفیتی بهتر است. زیرا نیروی دافعه الکتریکی بین یون‌های منفی و غشا با افزایش ظرفیت آنیون‌ها بیشتر می‌شود. هنگامی که یون‌های تک ظرفیتی و دو ظرفیتی منفی همزمان در محلول موجود باشند، عبور یون‌های یک ظرفیتی در حضور یون‌های دو ظرفیتی، به ظاهر آسان‌تر می‌شود. شدت این اثر ممکن است به بار غشا و ترکیب یون‌های محلول جریان ورودی وابسته باشد. این موضوع هنگامی قابل توجه است که غلظت سولفات در پساب ورودی بسیار بیشتر از نیترات باشد (جدول ۲). لذا در چنین شرایطی که سولفات با غلظت بسیار بالا به عنوان یون‌های دو ظرفیتی موجود است، حذف نیترات بسیار حساس به حذف سولفات می‌باشد و بازده حذفش بسیار کمتر از سولفات می‌گردد (۱۷ و ۱۸).

با توجه به نتایج می‌توان از جریان آب نفوذی از غشا نانوفیلتر در فرآیند آبرکاری آلومینیوم استفاده مجدد نمود. جریان تغلیظ شده نیز به سیستم تصفیه پساب به روش معمول برای تصفیه، قبل از تخلیه به فاضلاب شهری هدایت می‌شود.

فشار مناسب در تمام دماها، برای راهبری پابلوت نانوفیلتراسیون با این پساب به عنوان جریان ورودی در حدود ۱۰ بار است. زیرا نتایج نشان می‌دهد که حذف کل مواد محلول و یون‌ها، توسط غشا NF90 تا حدود فشار ۱۰ بار افزایش می‌یابد به عبارتی دیگر می‌توان گفت با افزایش فشار کاربردی تا حدود ۱۰ بار، غلظت‌ها کاهش یافته و سپس با افزایش مجدد فشار، بازده حذف کل مواد محلول (TDS) و یون‌ها کاهش می‌یابد.

علت این امر را می‌توان با پدیده پلاریزاسیون غلظتی توجیه کرد. در فشار بالاتر از ۱۰ بار غلظت مواد محلول در لایه‌ای بسیار نزدیک به غشا به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد، لذا با توجه به فشار و غلظت بالا و همچنین بار سطحی غشا، کاتیون‌های پساب با توجه به جدول ۲، که بیشتر یون سدیم است و از انرژی هیدرتاسیون کمی نیز برخوردار است، از سطح غشا نانوفیلتر فرار می‌کند. همچنین با توجه به این نکته که بار پساب باید در پشت غشا نانوفیلتر، خنثی باشد، با فرار سدیم، آنیون‌ها نیز که بخش اعظمی از آن را یون سولفات تشکیل داده است، از سطح غشا نانوفیلتر عبور می‌کنند. در نتیجه با افزایش فشار بیشتر از ۱۰ بار، بازده کاهش می‌یابد. همچنین با ادامه افزایش فشار، پدیده پلاریزاسیون غلظتی تشدید می‌شود و لذا با کاهش بیشتر بازده کل مواد محلول و یون‌ها مواجه می‌شویم (۱۶).



شکل ۷- تاثیر فشار و دمای کاربردی بر بازده حذف آلومینیوم در فرآیند نانوفیلتراسیون

## نتیجه گیری

## تقدیر و تشکر

قوانین و مقررات محیط زیستی، صنایع را ملزم می‌کنند تا پساب‌هایی را که شامل آلودگی‌هایی همچون یون سولفات هستند، قبل از تخلیه به محیط زیست، غلظتشان را تا سطح قابل قبولی کاهش دهند. از آنجا که صنایع متعددی، دارای پساب حاوی یون‌های سولفات و سدیم هستند، این مطالعه، فرآیند نانوفیلتراسیون را تکنیکی موفق در حذف این یون‌ها از جریان پساب می‌داند و پیشنهاد می‌کند که پساب صنایع به ویژه صنایع آندایزینگ آلومینیوم که محتوی یون‌های مذکور هستند، بعد از تصفیه با نانوفیلتراسیون، به چرخه استفاده مجدد در صنایع بازگردند.

از آن جا که غشا نانوفیلتراسیون در حذف آلودگی‌های پساب آندایزینگ مؤثر است، آب نفوذی تمیز را می‌توان در شستشوی صنایع آندایزینگ مجدداً استفاده نمود. به منظور بررسی اثر دما بر کارایی غشا، فلاکس عبوری و بازده حذف، در دماهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج (شکل‌های ۶ و ۷) نشان داد که بهترین شرایط حذف سولفات و آلومینیوم از این پساب، در فشار ۷/۵ تا ۱۲/۵ بار و در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد در فرآیند نانوفیلتراسیون بدست می‌آید. البته با توجه به مسائل گرفتگی غشا، بهترین فشار عملیاتی فشار ۷/۵ بار است.

در فرآیند نانوفیلتراسیون با افزایش دما، فلاکس آب نفوذی افزایش و حذف کل مواد محلول، سولفات و آلومینیوم کاهش می‌یابد. علاوه بر این، در حذف آلومینیوم با افزایش دما در این دامنه کاری تغییر مشهودی مشاهده نمی‌شود. در انتها می‌توان گفت، استفاده مجدد از پساب صنایع آبکاری آلومینیوم که شامل فلز آلومینیوم (که به صورت ته‌نشینی جدا و تصفیه شده است) و آلودگی یون‌ها همچون سولفات است، بعد از تصفیه با نانوفیلتراسیون امکان پذیر می‌باشد و می‌تواند با مشارکت در تأمین آب فرآیند، استفاده از منابع آب را کم کند. این موضوع مخصوصاً در کشوری همچون ایران که از گذشته کمبود منابع آب داشته، بسیار با ارزش است.

از معاونت محترم پژوهشی دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران به خاطر حمایت مالی با شماره ۸۲۰۲۰۰۳/۱/۵ از پروژه فوق تشکر و قدردانی می‌گردد. در ضمن از تمام کارشناسان محترم آزمایشگاه دانشکده محیط زیست به خاطر همکاری و توصیه‌های مفیدشان و همچنین از شرکت آندایزینگ آلومینیوم دورال برای تهیه پساب‌های مورد نیاز در این تحقیق، سپاسگزار می‌شود.

## منابع

1. Álvarez-Ayuso E. (2009). Approaches for the treatment of waste streams of the aluminum anodizing industry, *Journal of Hazardous Materials* 164, pp. 409 – 414.
2. Pajunen P. (2002). Chemical Recovery of Caustic Etch and Anodizing Baths, Presented at the 1st Annual "Intensive" Equipment Workshop, Grand Rapids, Michigan, USA.
3. Erikson, P. (1988). Nanofiltration extends the range of membrane filtration, *Environ. Prog.*, 7 (1), pp. 1-17.
4. Conlon, W.J. & McClellan, S.A. (1989). Membrane softening: treatment process comes of age, *Journal of AWWA* 81 (11), pp. 47-51.
5. Wong F. S., Qin J. J., Wai M. N., Lim 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; *Journal of Separation and Purification Technology* 29, pp. 41-51.
6. Wang Z., Liu G., Fan Z., Yang X., Wang J., Wang S. (2007). Experimental study on treatment of electroplating wastewater by

- Waters, 3rd ed., John Wiley and Sons, New York.
13. FILMTEC product information catalog, [www.dow.com/liquidseps/lit/down\\_lit.htm](http://www.dow.com/liquidseps/lit/down_lit.htm).
  14. FILMTEC Technical Manual of Reverse Osmosis Membranes, [www.dow.com/liquidseps/lit/down\\_lit.htm](http://www.dow.com/liquidseps/lit/down_lit.htm).
  15. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2005). 21th edn, American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC, USA.
  16. Baker R. W. (2004). Membrane Technology and Applications. Second Editon, John Wiley & Sons Ltd.
  17. Ratanatamskul C., Yamamoto K., Urase T. and Ohgaki S. (June, 1996) IAWQ 18th Biennial International Conference, Singapore.
  18. ترابیان. ع.، شکوهی، م. نبی بیدهندی. غ. و قدیم خانی. ع. (۱۳۸۶). بررسی کارایی غشا نانوفیلتراسیون در حذف نیترات از آب آشامیدنی در شرایط عملی مختلف. فصل نامه علمی-پژوهشی "آب و فاضلاب" ۶۱، صفحات ۱۵-۲۳.
  7. Kremen SS, Hayes C, Dubos M. (1977). Large-scale reverse osmosis processing of metal finishing rinse water. *Journal of Desalination* 20, pp.71-75.
  8. Ahn KH, Song KG, Cha HY, Yeom IT. (1999). Removal of ions in nickel electroplating rinse water using low-pressure nanofiltration. *Journal of Desalination* 122, pp. 77-84.
  9. Gabelich C. J., Ishida K. P., Gerringer F. W., Evangelista R., Kalyan M., "Mel" Suffet I.H. (2006). Control of residual aluminum from conventional treatment to improve reverse osmosis performance, *Journal of Desalination* 190, pp.147-160.
  10. Gabelich C.J., Yun T.I., Coffey B.M., Chen W.R. and Suffet I.H (2005). The role of dissolved aluminum in silica chemistry for membrane processes. *Journal of Desalination*, 180, pp. 307-319.
  11. Gabelich C.J., Yun T.I., Coffey B.M. and Suffet I.H. (2002). Effects of aluminum sulfate and ferric chloride coagulant residuals on polyamide membrane performance. *Journal of Desalination* 150, pp.15-30.
  12. Stumm W. and Morgan J.J. (1996). *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural*