

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و چهارم، شماره هشت، آبان ماه ۱۴۰۱ (۱۱۳-۱۰۳)

## مطالعه تصفیه پساب شبیه‌سازی شده صنایع آبکاری حاوی فلز سنگین نیکل با فرایند

### اسمز مستقیم

اسماعیل کوهستانیان<sup>\*</sup>

[koohestanian@pgs.usb.ac.ir](mailto:koohestanian@pgs.usb.ac.ir)

محمد نعمت زادا

تاریخ پذیرش: ۹۸/۳/۱

تاریخ دریافت: ۹۷/۳/۲۸

#### چکیده

زمینه و هدف: فاضلاب صنایع آبکاری، یکی از پر مخاطره‌ترین نوع فاضلاب صنعتی است. امروزه فرایند اسمز مستقیم با قابلیت‌های بالقوه، به‌کارگیری آن جهت کاربردهای مختلف غشایی مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است، لذا در تحقیق حاضر فرایند اسمز مستقیم برای تصفیه پساب شبیه‌سازی شده صنایع آبکاری حاوی فلز سنگین نیکل مورد مطالعه قرار گرفته است. علاوه بر این اثرات متغیرهای فرایند نظیر دما، فشار اسمزی و غلظت محلول خوراک بر عملکرد فرایند اسمز مستقیم از نظر شار آب تولیدی و راندمان دفع فلز نیکل ارزیابی شده است.

روش بررسی: به منظور تحلیل آماری داده‌ها، کاهش هزینه‌های انجام آزمایش و صرفه جویی در زمان از نرم افزار Minitab و روش Taguchi برای طراحی آزمایش و تجزیه و تحلیل داده استفاده شده است.

یافته‌ها: نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که فرایند اسمز مستقیم علاوه بر شار آب تولیدی قابلیت حذف فلز سنگین نیکل تا بیش از ۹۸٪ در شرایط مختلف عملیاتی را دارا است

بحث و نتیجه‌گیری: افزایش فشار اسمزی و غلظت محلول خوراک به ترتیب سبب افزایش و کاهش شار آب تولیدی و میزان دفع نیکل می‌شوند، اما با افزایش دما میزان شار آب تولیدی افزایش و میزان دفع نیکل کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: فرایند غشایی، اسمز مستقیم، صنایع آبکاری، تصفیه پساب، فلزات سنگین.

۱- استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ایرانشهر، ایرانشهر، ایران. \* (مسوول مکاتبات)

۲- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

## **Study of treatment of simulated electroplating wastewater containing heavy-metal Nickel by forward osmosis**

**Esmail Koohestanian** <sup>1\*</sup>

[koohestanian@pgs.usb.ac.ir](mailto:koohestanian@pgs.usb.ac.ir)

**Mohammad Nematzadeh** <sup>2</sup>

Admission Date: May 22, 2019

Date Received: June 18, 2018

### **Abstract**

**Background and Objective:** One of the most hazardous industrial wastewater is electroplating industry wastewater. Nowadays, the forward osmosis (FO) process with potential capabilities has been considered by many researchers for its various membrane applications. Hence, in the present study, for the treatment of simulated electroplating wastewater containing heavy-metal Nickel, has been investigated the FO process. Furthermore, the influence of process variables such as temperature, osmotic pressure and feed concentration have been evaluated on the performance of the FO process for water flux and Nickel rejection efficiency.

**Material and Methodology:** In order to analyze the data and to reduce the cost of conducting the test and saving time, to design of experiment and analyze the data have been used the Minitab software and the Taguchi method.

**Finding:** The results of the experiments showed that the forward osmosis process has the ability to produce water flux and even remove heavy metal Nickel to over 98% in different operating conditions.

**Discussion & Conclusion:** The increase of the osmotic pressure and feed solution concentration increased and reduced the water flux and Nickel rejection, respectively, but with increasing temperature, the amount of water flux increased and the amount of nickel removal was reduced.

**Keywords:** Membrane process, Forward osmosis, Electroplating, Wastewater treatment, Heavy metals.

---

1- Assistant professor of chemical engineering, Islamic Azad university, Iranshahr branch, Iranshahr, Iran.  
\*(Corresponding Author)

2- Ph. D student of chemical engineering, university of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

## مقدمه

که از جمله این روش‌ها می‌توان به تهنشینی شیمیایی، الکترولیز، ترسیب، انعقاد، لخته‌سازی، تبادل یونی، جذب سطحی، جذب بیولوژیکی، حذف فلزات به کمک میکروب‌ها و بسیاری از روش‌های دیگر اشاره نمود. علاوه بر عدم کارایی بالای این روش‌ها در حذف، دارای مشکلاتی از قبیل پیچیدگی فرایند، هزینه زیاد و مصرف بالای مواد شیمیایی است (۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳).

توسعه غشا و فناوری‌های غشایی در پنج دهه گذشته سبب شده تا از فرایندهای جداسازی غشایی برای تصفیه فاضلاب‌های صنعتی و شهری به طور فزاینده‌ای مورد استفاده قرار گیرد با توجه به این که صنعت بعد از کشاورزی بالاترین میزان مصرف آب را به خود اختصاص داده است. توسعه صنایع و استفاده از مواد شیمیایی مختلف سبب شده تا علاوه بر افزایش تقاضای آب، فاضلاب‌های حاوی آلاینده‌های خطرناک تولید و به محیط زیست تخلیه گردد که منجر به آلوده شدن منابع آبی می‌گردد. همچنین صنعت آبکاری با مصرف بالای آب سهم بالایی در آلوده نمودن منابع آبی دارد. لذا از روش‌های غشایی نظیر اسمز معکوس برای تصفیه و تامین استانداردهای تعیین شده برای پساب خروجی صنایع مختلف استفاده شده است (۱۴، ۱۵ و ۱۶).

اگرچه فرایند اسمز معکوس نسبت به دیگر فرایندهای تصفیه دارای مزایای فراوانی است اما به دلیل وجود مشکلاتی از قبیل مصرف انرژی بالا، گران بودن، بازیافت پایین آب و اشکالات زیست محیطی سبب شده تا محققین همواره در جستجوی یک تکنولوژی مناسب با بازیافت بالا و ارزان‌تر برای تولید آب شرب از تمامی منابع آب غیر قابل شرب باشند (۱۷).

در حال حاضر یکی از فناوری‌های موثر و جدید برای تحقیقات در زمینه تصفیه پساب و نمک‌زدایی، فرایند غشایی اسمز مستقیم می‌باشد که یک فرایند اسمزی است که آب غیر قابل شرب در یک سمت غشا نیمه تراوا و در سمت دیگر محلول با غلظت بالا قرار دارد. در اثر این اختلاف غلظت آب از غشا در جهت کاهش غلظت تراوش می‌کند. محلول با غلظت بالا معمولاً

آلودگی ناشی از فلزات سنگین در محیط زیست علاوه بر تهدید جدی برای سلامت انسان، یک مشکل و نگرانی زیست محیطی در جهان امروز محسوب می‌شود. با توسعه صنایع مختلف، بخش‌های صنعتی فراوانی از قبیل معدن کاری، ذوب فلزات، متالوژی، صنایع آهن و فولاد، صنایع آبکاری و ریخته‌گری، صنایع هوا فضا و انرژی اتمی سبب آلودگی محیط زیست به فلزات سنگین همانند سرب، جیوه، کروم، مس، کادمیوم، روی و نیکل می‌گردد (۱، ۲). محلول‌هایی که در صنعت آبکاری مورد استفاده قرار می‌گیرند با اندک تفاوتی همانند یک سم خطرناک در بدن موجودات عمل می‌کنند. پساب‌های تولید شده در این کارگاه‌ها معمولاً سمی بوده و آن‌ها به قدری زهرآگین‌اند که حتی در غلظت‌های کم و پایین نیز برای ارگانسیم‌های بدن بسیار سمی می‌باشند (۳، ۴).

نیکل یکی از مهمترین فلزاتی است که در صنایع آبکاری به کار گرفته می‌شود. تاریخچه آبکاری نیکل به بیش از صدها سال پیش باز می‌گردد. پوشش نیکل برای کاربرد های تزئینی، مهندسی و شکل‌دهی الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد که سهم آبکاری برای مواد تزئینی ۸۰٪ و برای اهداف مهندسی جهت حفاظت در برابر خوردگی و بهبود مقاومت در برابر سایش سطوح محصولات فولادی و فلزات غیر آهنی و شکل‌دهی الکتریکی ۲۰٪ است. اگرچه مقدار اندک نیکل برای انسان ضروری است اما افزایش مقدار آن برای سلامت انسان مضر بوده که در غلظت‌های کم باعث سردرد، سرگیجه، حالت تهوع، سرفه‌های خشک و سخت شده و در غلظت‌های بالاتر شانس مبتلا شدن به سرطان ریه، سرطان مجاری تنفسی، سرطان حنجره، سرطان استخوان و پروستات افزایش می‌یابد. بر اساس استاندارد مقررات ملی زیست محیطی ایران، حداکثر غلظت قابل قبول برای فلز نیکل در پساب خروجی صنایع 2 ppm است (۵، ۶).

در حال حاضر روش‌های زیادی برای حذف فلزات سنگین از فاضلاب‌های صنعتی بخصوص صنایع آبکاری از قبیل روش‌های فیزیکی، شیمیایی و روش‌های بیولوژیکی بکار گرفته می‌شود،

تولیدی و نفوذ معکوس به عنوان یک املاح جاذب مناسب جهت کاربردهای تصفیه فاضلاب و پساب صنعتی مورد توجه است (۲۱). لذا فشار اسمزی آن با استفاده از نرم افزار OLI Stream Analyzer در دماهای ۲۰، ۳۰ و ۴۰ °C محاسبه شده و نتایج در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به این که غلظت نیکل در پساب صنایع آبکاری بسته به شرایط هر کارگاه متغیر گزارش شده است. در این پژوهش محدوده غلظتی بین ۵۰ تا ۲۵۰ میلی گرم در لیتر در نظر گرفته شده است.

#### جدول ۱- مقادیر محاسبه شده غلظت محلول جاذب در

##### دما و فشار اسمزی مشخص.

Table 1. Calculated values of draw solution concentration at the specified temperature and osmotic pressure.

غلظت (g/l)			فشار اسمزی (atm)
۴۰ °C	۳۰ °C	۲۰ °C	
۱۸/۷	۱۹/۲	۱۹/۷	۱۴
۳۵/۱	۳۵/۹	۳۶/۷	۲۸
۴۹/۷	۵۰/۷	۵۱/۹	۴۲

#### ۲- سیستم آزمایشگاهی اسمز مستقیم

همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده، سیستم اسمز مستقیم در مقیاس آزمایشگاهی به منظور انجام آزمایشها استفاده شده است. این سیستم متشکل از مدول غشایی قاب صفحه‌ای است که یک سل غشایی جریان متقاطع با طراحی خاص می‌باشد که در هر دو سمت غشا کانال مستطیلی متقارن به طول ۱۲/۶ و عرض ۷/۶ و ارتفاع ۰/۵ سانتی متر تعبیه شده است که مساحت موثر غشاء ۹۵/۷۶ سانتی متر مربع را ایجاد می‌نماید. غشا مورد استفاده از جنس سلولز تری استات (CTA) بوده و برای انجام تمامی آزمایشها با جهت‌گیری غشا در مدل نرمال (محلول جاذب با لایه فعال در تماس است) استفاده شده است. در هر دو کانال مشا سپه‌سره‌های پلاستیکی قرار داده شده، که علاوه بر پشتیبانی از غشا، سبب افزایش اغتشاش و انتقال جرم و کاهش

از نمک‌های انحلال پذیر در آب با وزن مولکولی پایین تهیه می‌شود که به آن محلول جاذب گفته می‌شود در اسمز مستقیم آب خالص به‌طور پیوسته از آب غیر قابل شرب به محلول جاذب منتقل می‌شود و آب غیر قابل شرب غلیظتر و محلول جاذب رقیق‌تر می‌شود (۱۸).

از مزیت‌های مهم اسمز مستقیم کار در فشار بسیار پایین است که مصرف انرژی و هزینه‌ها را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. همچنین اسمز مستقیم دارای قابلیت دفع طیف گسترده‌ای از آلاینده‌ها و تمایل به رسوب کم‌تر می‌باشد (۱۹). در حالی که اسمز معکوس دارای معایب اجتناب‌ناپذیر نظیر مصرف انرژی بالا و رسوب گذاری شدید غشا است. فرآیند اسمز مستقیم با وجود قابلیت‌ها و مزایای فراوان می‌تواند جایگزین مناسب و ارزان برای کاربردهای مختلف فرآیندهای محرک فشاری باشد (۲۰). بنابراین می‌توان از مزیت‌های بالقوه اسمز مستقیم برای تصفیه پساب صنایع آبکاری استفاده نمود و علاوه بر بازیافت آب برای مصرف مجدد در واحدهای آبکاری، از انتشار و آلودگی منابع آب جلوگیری کرد. هدف این تحقیق ارزیابی کارایی فرآیند اسمز مستقیم جهت حذف فلز سنگین نیکل از پساب شبیه سازی شده صنایع آبکاری و بررسی نقش و تاثیر متغیرهای فرآیند نظیر دما، فشار اسمزی و غلظت محلول خوراک می‌باشد.

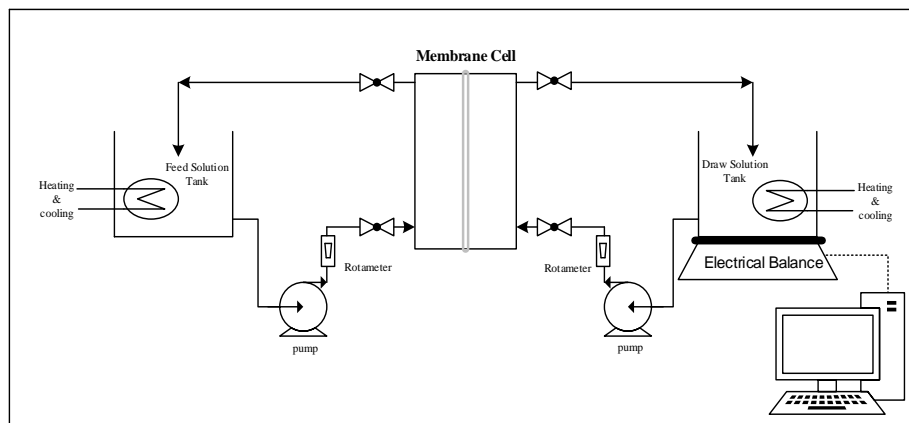
#### مواد و روش‌ها

##### ۱- موادها

منیزیم کلراید ( $MgCl_2$ ) به عنوان املاح جاذب و سولفات نیکل ( $NiSO_4 \cdot 7 H_2O$ ) برای پساب مصنوعی در آزمایش‌های استفاده شده، که از آب مقطر برای تهیه و آماده‌سازی محلول‌های جاذب و محلول خوراک (پساب مصنوعی) استفاده شده است. شایان ذکر است که مواد مصرف شده از شرکت مرک آلمان با درجه خلوص بالا برای آنالیزهای دقیق آزمایشگاهی تهیه شده است.  $MgCl_2$  به دلیل راندمان اسمزی مناسب و دارا بودن دیگر شرایط از قبیل غیر سمی بودن، قیمت و فشار اسمزی مناسب و دارا بودن عملکردی مناسب از نظر شار آب

روتامتر استفاده شده است همچنین دمای محلول خوراک و جاذب در دمای مورد نظر با دقت  $1 \pm ^\circ\text{C}$  ثابت نگه داشته می‌شود.

پلاریزاسیون غلظتی خارجی می‌گردد. جهت به گردش در آوردن محلول جاذب و خوراک با دبی ۴ لیتر بر دقیقه به صورت همسو در دو طرف غشا از پمپ‌های مگنتی و جهت اندازه‌گیری از



شکل ۱ - شماتیک سیستم فرآیند اسمز مستقیم استفاده شده در مقیاس آزمایشگاهی

Figure 1. Schematic diagram of the laboratory-scale forward osmosis process system

### ۳- تعیین شار آب و میزان دفع فلزات سنگین

شار آب به‌وسیله اندازه‌گیری تغییرات وزن محلول جاذب در یک دوره زمانی مشخص تعیین می‌گردد به طوری که در اثر اختلاف فشار اسمزی آب از طریق غشا در جهت رقیق شدن محلول جاذب تراوش و در نتیجه میزان وزن محلول جاذب افزایش می‌یابد. این داده‌ها بیانگر افزایش وزن محلول در یک دوره زمانی مشخص است که برای محاسبه میزان تراوش به صورت حجمی از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$j_w = \frac{\Delta m}{\rho A \Delta t}$$

که  $j_w$  (l/m<sup>2</sup> h) شار آب تولیدی،  $\Delta m$  (g) تغییرات وزنی محلول جاذب در یک دوره زمانی مشخص،  $\rho$  (g/l) دانسیته آب،  $A$  (m<sup>2</sup>) مساحت موثر غشا و  $\Delta t$  (h) مدت زمان می‌باشد (۲۲). هر آزمایش در مدت زمان ۶ ساعت صورت می‌پذیرد که میانگین شار آب تولیدی در این مدت محاسبه شده است. همچنین برای محاسبه میزان دفع بعنوان درصد فلزات سنگین موجود در محلول خوراک که غشا مانع از عبور آنها می‌شود از رابطه زیر استفاده شده است:

$$R = 1 - \frac{C_d \times (V_d / V_p)}{C_f}$$

که  $C_d$  (ppm) غلظت فلزات سنگین در محلول جاذب در انتهای هر آزمایش اسمز مستقیم،  $V_d$  (l) حجم نهایی محلول جاذب،  $V_p$  (l) حجم آب تراوش کرده و  $C_f$  (ppm) غلظت فلزات سنگین در محلول خوراک می‌باشد (۲۲). پس از پایان هر آزمایش در مدت زمان ۶ ساعت نمونه‌گیری و  $C_d$  با سیستم طیف‌سنجی اتمی مدل AA670 اندازه‌گیری می‌شود.

### ۴- طراحی آزمایش

با توجه به این امر که برای بررسی سه پارامتر دما، فشار اسمزی و غلظت فلز سنگین در خوراک به‌طور همزمان بر میزان شار آب و میزان دفع فلز سنگین با فرایند اسمز مستقیم نیاز به تعداد زیادی آزمایش می‌باشد، در تحقیق حاضر برای بررسی سه پارامتر دما، فشار اسمزی و غلظت فلز سنگین در خوراک در سه سطح بطور همزمان بر میزان شار آب تولیدی و میزان دفع فلز سنگین با فرایند اسمز مستقیم از طراحی آزمایش به کمک نرم افزار Minitab با روش Taguchi استفاده شده است. برای کاهش تعداد آزمایش‌ها تا حدی که امکان بررسی تاثیر همه پارامترها وجود داشته باشد با توجه به وجود سه فاکتور در سه سطح، از آرایه متعامد L9 استفاده می‌گردد. متغیرهای فرایند و محدوده آنها در جدول ۲ ارائه شده است.

## جدول ۲- متغیرها و سطوح طراحی آزمایش

Table 2. Variable and level of the experimental design

سطوح			فاکتورها	متغیر (واحد)
-۱	۰	+۱		
۲۰	۳۰	۴۰	A	دما (°C)
۱۴	۲۸	۴۲	B	فشار اسمزی (atm)
۵۰	۱۵۰	۲۵۰	C	غلظت خوراک (ppm)

## نتایج

در این تحقیق داده‌ها بر اساس روش Taguchi برای طراحی آزمایش با دو بار تکرار جمع آوری شده است که میانگین نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است و در نهایت برای تعیین تاثیر فاکتورها، داده‌ها با نرم افزار Minitab جهت معنی دار بودن و برهمکنش فاکتورها آنالیز شده است.

## جدول ۳- طراحی آزمایش با روش تاگوچی و نتایج محاسبه شده.

Table 3. Experimental design by Taguchi method and calculated results

پاسخ		پارامترها			مرحله
میزان دفع (%)	شار آب ( $l/m^2 h$ )	C	B	A	
۹۹/۱۱	۵/۶۲	۵۰	۱۴	۲۰	۱
۹۹/۳	۶/۹۳	۱۵۰	۲۸	۲۰	۲
۹۹/۵۸	۸/۷۲	۲۵۰	۴۲	۲۰	۳
۹۸/۷۷	۶/۱۹	۱۵۰	۱۴	۳۰	۴
۹۸/۳۸	۷/۳۲	۲۵۰	۲۸	۳۰	۵
۹۸/۹۹	۹/۱۲	۵۰	۴۲	۳۰	۶
۹۸/۰۷	۷/۲۳	۲۵۰	۱۴	۴۰	۷
۹۸/۷۹	۱۰/۳	۵۰	۲۸	۴۰	۸
۹۸/۶۳	۱۱/۹۸	۲۵۰	۴۲	۴۰	۹

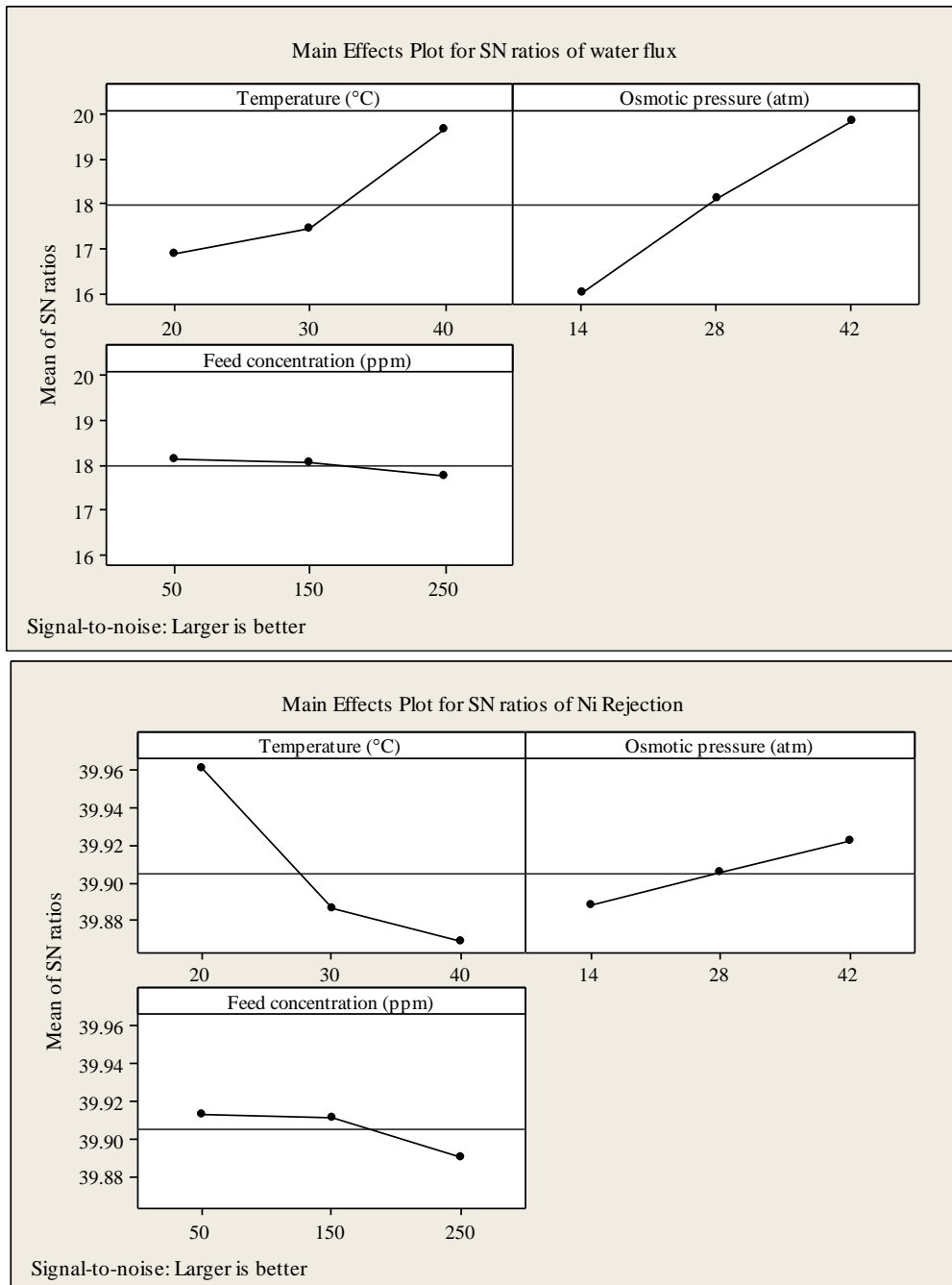
پاسخ‌ها بهتر است یا این که پاسخ مقداری مشخص و نرمال بهتر است) استفاده می شود (۲۳). در این مطالعه با توجه به این که بیشتر بودن پاسخ‌های مورد مطالعه بهتر است، لذا برای انجام آنالیز نسبت S/N گزینه larger is better انتخاب گردید. لذا وقتی مقادیر S/N بزرگتر مدنظر باشد رابطه ذیل تعریف شده و مقادیر S/N در معادله جایگزاری می شود (۲۴).

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right]$$

برای بررسی و بهینه سازی پارامترهای عملیاتی فرایند از روش S/N استفاده شده است در این روش سیگنال و نویز نشان دهنده مقادیر مطلوب و نامطلوب برای پاسخ خروجی است که استفاده از تابع افت با روش Taguchi برای ارزیابی عملکرد پاسخ خروجی پیشنهاد شده است. با به کارگیری مقادیر این تابع که به عنوان نسبت S/N ارائه می گردد می توان تاثیر و اثر بخشی آنها را تعیین نمود. بطور معمول برای آنالیز و تجزیه و تحلیل با نسبت S/N سه دسته (کمتر بودن یا بیشتر بودن

نتایج آنالیز ANOVA برای تجزیه و تحلیل داده‌ها جهت بررسی اهمیت و میزان اثر هر پارامتر در جدول ۴ نشان داده شده است تا مشخص گردد، بین آزمایش‌های طراحی شده جهت ارزیابی عملکرد فرایند اسمز مستقیم اختلاف معنی‌دار وجود دارد.

که  $Y_i$  پاسخ خروجی،  $n$  تعداد تکرار آزمایش می‌باشد. مقدار S/N برای شار آب تولیدی و میزان دفع نیکل در سطوح مختلف هر پارامتر در شکل ۲ نشان داده شده است که بر اساس اصول روش Taguchi بیشترین مقدار نسبت S/N بیانگر سطح بهینه هر پارامتر در محدوده تعیین شده می‌باشد. همچنین



شکل ۲- میانگین نسبت S/N خروجی فاکتورهای دما، فشار اسمزی و غلظت محلول خوراک بر میزان شار آب تولیدی و میزان دفع نیکل.

Figure 2. Mean S/N ratio for produced water flux and nickel rejection based on factors of temperature, osmotic pressure, and feed solution concentration.

جدول ۴- آنالیز ANOVA جهت ارزیابی متغیرهای فرایند بر شار آب تولیدی و میزان دفع نیکل.

Table 4. Analysis of variance (ANOVA) for produced water flux and rejection nickel.

رتبه	P	F	مجموع مربعات	درجه آزادی	فاکتورها
نتایج آنالیز ANOVA برای شار آب تولیدی					
۲	۰/۰۳۶	۲۶/۶۳	۱۳/۱	۲	دما (°C)
۱	۰/۰۲۲	۴۵/۴۶	۲۲/۳۷	۲	فشار اسمزی (atm)
۳	۰/۶۵۹	۰/۵۲	۰/۲۵۶	۲	غلظت خوراک (ppm)
نتایج آنالیز ANOVA برای میزان دفع نیکل					
۱	۰/۰۹	۱۰/۱	۰/۰۱۴	۲	دما (°C)
۲	۰/۴۵	۱/۲	۰/۰۰۲	۲	فشار اسمزی (atm)
۳	۰/۵۹	۰/۶۸	۰/۰۰۹	۲	غلظت خوراک (ppm)

## بحث

### ۱- تاثیر فشار اسمزی

با توجه به این که در فرایند اسمز مستقیم جهت انتقال آب از املاح جاذب قابل حل در آب برای تامین نیروی محرکه استفاده می گردد، لذا برای تسریع در فرایند تصفیه با اسمز مستقیم از محلول جاذب غلیظ استفاده می شود. در این تحقیق از املاح جاذب  $MgCl_2$  با راندمان اسمزی بالا برای تهیه محلول جاذب با فشار اسمزی ۱۴، ۲۸ و ۴۲ اتمسفر استفاده شده است. با توجه به شکل ۲ و نتایج جدول ۴، با افزایش فشار اسمزی از ۱۴ به ۲۸ و ۴۲ اتمسفر به ترتیب سبب افزایش تقریباً ۲۹ و ۵۸ درصدی شار آب تولیدی می گردد. اما برای میزان دفع نیکل اگرچه سبب افزایش راندمان حذف شده اما مقدار معناداری نبوده است. دلیل این تغییرات افزایش نیروی محرکه اسمزی با افزایش فشار اسمزی و در نتیجه افزایش گرادیان غلظت در داخل غشا است که این امر سبب تسریع انتقال مولکول های آب از طریق غشا و از بین زنجیره های پلیمری آن می شود. در نتیجه شار آب به طور قابل توجهی افزایش می یابد که می تواند سبب نفوذ املاح و حرکت آن ها در بین زنجیرهای پلیمری و کاهش راندمان دفع نیکل شود. اما به علت خاصیت گزینش پذیری بالای غشا مورد استفاده، تاثیر افزایش فشار اسمزی بر کاهش راندمان دفع بر اساس آنالیز ANOVA معنادار نبوده است (۲۵، ۲۶).

### ۲- تاثیر دما

علاوه بر وابستگی پدیده ها نظیر انتقال جرم، پلاریزاسیون غلظتی و غیره در فرآیندهای غشایی به دما، بر اساس معادله Van't Hoff فشار اسمزی با دما افزایش می یابد (۲۷). همان طوری که در شکل ۲ نشان داده شده، شار آب تولیدی با افزایش دما افزایش و میزان دفع نیکل کاهش می یابد، به طوری که با افزایش دما از ۲۰ به ۴۰ °C میزان شار آب تقریباً ۴۰٪ افزایش و میزان دفع به مقدار بسیار کمی کاهش می یابد که این کاهش با توجه به آنالیز ANOVA صورت گرفته (جدول ۴) مقدار معناداری نمی باشد. افزایش ۳۰٪ شار آب برای محلول جاذب ۱/۵ مولار  $Na_2SO_4$  در مقابل محلول خوراک ۰/۶ مولار  $NaCl$  با افزایش دما از ۲۵ به ۴۵ °C گزارش شده است (۲۸). تغییرات شار آب و میزان دفع نیکل با افزایش دما را می توان به وسیله چندین فاکتور ممکن بیان نمود. ویسکوزیته سیال، پلاریزاسیون غلظتی، ضریب انتقال جرم و نفوذپذیری آب که همه اینها به دما وابسته اند (۲۸)، با افزایش دما فشار اسمزی افزایش و ویسکوزیته سیال و مقدار مقاومت نفوذ املاح در لایه پشتیبان کاهش می یابد. با افزایش انتقال یونهای املاح جاذب به لایه پشتیبان پلاریزاسیون غلظتی تقلیل می یابد از طرفی افزایش دما سبب افزایش ضریب نفوذپذیری آب و ضریب انتقال جرم می شود (۲۸، ۲۹). در نتیجه دمای بالاتر موجب بهبود عملکرد



عملکرد و کارایی بهتری نسبت به فرایندهای غشایی محرک فشاری و روش‌های متداول شیمیایی دارا است و فشار اسمزی و دما عوامل تعیین کننده‌ای بر نرخ بازیافت آب و میزان دفع نیکل می‌باشند.

### تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد ابرانشهر برای پیشبرد آزمایش‌هایی که نتایج آن در مقاله حاضر ارائه شده، تامین شده است که به این وسیله نهایت تشکر و قدردانی می‌گردد.

### References

1. Wang J, Chen C. Biosorption of heavy metals by *Saccharomyces cerevisiae*: a review. *Biotechnology advances*. 2006;24(5):427-51.
2. Algarra M, Jiménez MV, Rodríguez-Castellón E, Jiménez-López A, Jiménez-Jiménez J. Heavy metals removal from electroplating wastewater by aminopropyl-Si MCM-41. *Chemosphere*. 2005;59(6):779-86.
3. Chen Y, Gu G. Preliminary studies on continuous chromium (VI) biological removal from wastewater by anaerobic-aerobic activated sludge process. *Bioresource technology*. 2005;96(15):1713-21.
4. Sheng PX, Ting Y-P, Chen JP, Hong L. Sorption of lead, copper, cadmium, zinc, and nickel by marine algal biomass: characterization of biosorptive capacity and investigation of mechanisms. *Journal of colloid and interface science*. 2004;275(1):131-41.
5. Padmavathy V, Vasudevan P, Dhingra S. Biosorption of nickel (II) ions on Baker's yeast. *Process Biochemistry*. 2003;38(10):1389-95.

فرایند اسمز مستقیم می‌گردد. اما باید توجه داشت که در اثر افزایش دما و با گذشت زمان میزان نفوذ معکوس املاح جاذب و فلز نیکل به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد زیرا در اثر افزایش دما نفوذ در لایه پشتیبان و بین زنجیره‌های پلیمری غشا آسان‌تر و افزایش یافته و سبب رسوب املاح در غشا و تشدید پلاریزاسیون غلظتی داخلی می‌شود، لذا باید دمای عملیاتی را جهت بهره‌گیری حداکثری از مزیت آن بهینه نمود (۲۶، ۲۸).

### ۳- تاثیر غلظت محلول خوراک

با توجه نتایج ارائه شده در جدول ۴ و شکل ۲ با افزایش غلظت محلول خوراک شار آب تولیدی و میزان دفع نیکل کاهش می‌یابد اما بر اساس آنالیز ANOVA این کاهش معنی دار نمی‌باشد و برای هر دو پارامتر مقدار کاهش برای افزایش غلظت محلول خوراک از ۱۵۰ به ۲۵۰ ppm بیشتر از افزایش غلظت از ۵۰ به ۱۵۰ ppm می‌باشد. بدیهی است با افزایش غلظت محلول خوراک در نتیجه کاهش نیروی محرکه اسمزی عملکرد سیستم از نظر شار آب تولیدی و میزان دفع تقلیل یابد، همچنین افزایش غلظت محلول خوراک می‌تواند سبب تشدید اثر مخرب پلاریزاسیون غلظتی گردد، اما با توجه به غلظت کم محلول خوراک تاثیر آن بر عملکرد فرایند تصفیه بسیار ناچیز بوده و معنی دار نمی‌باشد (۲۲).

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق، حذف خوب و بالای یون‌های فلز سنگین نیکل با به‌کارگیری فرایند اسمز مستقیم ارائه شد که از غشا اسمز مستقیم سلولز تری استات بعنوان واسط جدا ساز و از محلول جاذب منیزیم کلراید با عملکرد مناسب به عنوان تامین کننده نیروی محرکه اسمزی استفاده گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش غلظت محلول خوراک شار آب و راندمان حذف کاهش ناچیز یافته و با افزایش فشار اسمزی عملکرد فرایند اسمز مستقیم بهبود می‌یابد، اما با افزایش دما شار آب بطور قابل توجهی افزایش و در حالی که میزان دفع کاهش می‌یابد. نتایج حاصل شده از نظر شار آب تولیدی و راندمان دفع بیش از ۹۸/۵ درصد بیانگر آن است که فرایند تصفیه اسمز مستقیم

15. Qdais HA, Moussa H. Removal of heavy metals from wastewater by membrane processes: a comparative study. *Desalination*. 2004;164(2):105-10.
16. Ipek U. Removal of Ni (II) and Zn (II) from an aqueous solution by reverse osmosis. *Desalination*. 2005;174(2):161-9.
17. McCutcheon JR, McGinnis RL, Elimelech M. Desalination by ammonia-carbon dioxide forward osmosis: influence of draw and feed solution concentrations on process performance. *Journal of Membrane Science*. 2006;278, 114-23.
18. Cath TY, Childress AE, Elimelech M. Forward osmosis: principles, applications, and recent developments. *Journal of Membrane Science*. 2006;281(1):70-87.
19. Shaffer DL, Werber JR, Jaramillo H, Lin S, Elimelech M. Forward osmosis: where are we now? *Desalination*. 2015;356:271-84.
20. Liu L, Wang M, Wang D, Gao C. Current patents of forward osmosis membrane process. *Recent Patents on Chemical Engineering*. 2009;2(1):76-82.
21. Achilli A, Cath TY, Childress AE. Selection of inorganic-based draw solutions for forward osmosis applications. *Journal of Membrane Science*. 2010;364(1):233-41.
22. Cui Y, Ge Q, Liu X-Y, Chung T-S. Novel forward osmosis process to effectively remove heavy metal ions. *Journal of Membrane Science*. 2014;467:188-94.
23. Moghaddam J, Kolahgar-Azari S, Karimi S. Determination of optimum conditions for nano-silver preparation from AgCl based on the Taguchi design
6. Villaescusa I, Fiol N, Martínez Ma, Miralles N, Poch J, Serarols J. Removal of copper and nickel ions from aqueous solutions by grape stalks wastes. *Water research*. 2004;38(4):992-1002.
7. Li H, Liu T, Li Z, Deng L. Low-cost supports used to immobilize fungi and reliable technique for removal hexavalent chromium in wastewater. *Bioresource technology*. 2008;99(7):2234-41.
8. Meena AK, Mishra G, Rai P, Rajagopal C, Nagar P. Removal of heavy metal ions from aqueous solutions using carbon aerogel as an adsorbent. *Journal of Hazardous Materials*. 2005;122(1-2):161-70.
9. Rao M, Parwate A, Bhole A. Removal of Cr<sup>6+</sup> and Ni<sup>2+</sup> from aqueous solution using bagasse and fly ash. *Waste management*. 2002;22(7):821-30.
10. Remoudaki E, Hatzikioseyian A, Kousi P, Tsezos M. The mechanism of metals precipitation by biologically generated alkalinity in biofilm reactors. *Water research*. 2003;37(16):3843-54.
11. Zhao G, Li M, Hu Z, Hu H. Dissociation and removal of complex chromium ions containing in dye wastewaters. *Separation and Purification Technology*. 2005;43(3):227-32.
12. Sharma Y, Prasad G, Rupainwar D. Removal of Ni (II) from aqueous solutions by sorption. *International journal of environmental studies*. 1991;37(3):183-91.
13. Yan G, Viraraghavan T. Heavy metal removal in a biosorption column by immobilized *M. rouxii* biomass. *Bioresource technology*. 2001;78(3):243-9.
14. Zhang Y. *Plating Wastewater Treatment*. 2017.

27. Noh M, Mok Y, Lee S, Kim H, Lee SH, Jin G-w, et al. Novel lower critical solution temperature phase transition materials effectively control osmosis by mild temperature changes. *Chemical Communications*. 2012;48(32):3845-7.
28. Zhao S, Zou L .Effects of working temperature on separation performance, membrane scaling and cleaning in forward osmosis desalination. *Desalination*. 2011;278(1):157-64.
29. Nematzadeh M, Samimi A, Shokrollahzadeh S. Application of sodium bicarbonate as draw solution in forward osmosis desalination: influence of temperature and linear flow velocity. *Desalination and Water Treatment*. 2016;57(44):20784-91.
- by the use of optical properties of silver. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2012;51(8):3224-8.
24. Sheidaei B, Behnajady MA. Determination of optimum conditions for removal of Acid Orange 7 in batch-recirculated photoreactor with immobilized TiO<sub>2</sub>-P25 nanoparticles by Taguchi method. *Desalination and Water Treatment*. 2015;56(9):2417-24.
25. Ng HY, Tang W, Wong WS. Performance of forward (direct) osmosis process: membrane structure and transport phenomenon. *Environmental Science & Technology*. 2006;40(7):2408-13.
26. Baker RW. Overview of membrane science and technology. *Membrane technology and applications*. 2004;3:1-14.