

تحلیل پارامترهای مختلف در طراحی سیستم اسمز معکوس (مطالعه موردی: سیستم نمک‌زدایی کارخانه روغن نینا)

سمیه صالحی^{۱*} و محمد جواد خانجانی^۲

چکیده

بحران آب آشامیدنی در بسیاری از نقاط جهان وجود دارد. تکنولوژی‌های نمک‌زدایی تا حد زیادی مشکلات کمبود آب را کاهش می‌دهند و کیفیت زندگی و وضعیت اقتصادی را بهبود می‌بخشند. با توجه به اینکه فرایندهای نمک‌زدایی مختلفی وجود دارد؛ اما اسمز معکوس از فرایندهای غشایی است که اخیراً پیشرفت‌ها و کاربردهای زیادی داشته است. همواره فاکتورهای زیادی بر عملکرد یک سیستم نمک‌زدایی تأثیر دارد؛ از جمله این موارد، می‌توان به تغییرات دما، فشار، غلظت آب ورودی، میزان آب ورودی، نحوه طراحی و چیدمان ممبرین‌ها اشاره کرد. در این پژوهش، تغییرات هر یک از این پارامترها و تأثیر آن بر عملکرد سیستم با معادلات ریاضی، پکیج نرم‌افزاری و تجربیات میدانی به دست آمد. طبق یافته‌ها، فشار و دما همواره به‌عنوان فاکتوری با کارکرد متناقض در حفظ کیفیت و کمیت آب تصفیه‌شده عمل می‌کنند. افزایش غلظت و میزان آب ورودی باعث کاهش کیفیت آب تصفیه‌شده می‌شود. برای افزایش ۱۰٪ راندمان می‌توان سیستم دو مرحله‌ای یا سیستم با بازگشت آب را طراحی کرد. همچنین، آرایش سری ممبرین‌ها، عملکرد بهتری نسبت به آرایش موازی آنها داشت؛ به طوری که باعث بهبود ۱۲٪ در راندمان شد.

واژه‌های کلیدی: آرایش ممبرین‌ها، اسمز معکوس، پارامترهای طراحی، نمک‌زدایی.

ارجاع: صالحی س. و خانجانی م. ج. ۱۳۹۷. تحلیل پارامترهای مختلف در طراحی سیستم اسمز معکوس (مطالعه موردی: سیستم نمک‌زدایی کارخانه روغن نینا). مجله پژوهش آب ایران. ۳۱: ۷۵-۸۳.

۱- کارشناس ارشد مهندسی آب، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان.
۲- استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

* نویسنده مسئول: salehi.civil88@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۰۸

مقدمه

شعبان و یحیی (۲۰۱۷) با بررسی نرم‌افزاری سیستم اسمز معکوس دریافتند که تأثیر تغییرات دما در کیفیت آب تصفیه‌شده بیشتر از تغییرات فشار و غلظت آب ورودی است. بله‌میتی و ايسار (۲۰۱۷) با مدل‌سازی به روش عددی و حل معادلات انتقال جرم به بهترین شبیه‌سازی ریاضی به سیستم اسمز معکوس دست یافتند. نتایج مقایسه سیستم یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای در پژوهش تواتی و همکاران (۲۰۱۷) نشان داد که سیستم دو مرحله‌ای عملکرد بهتری دارد و افزایش جریان و غلظت آب ورودی عملکرد آن را بهبود می‌بخشد.

هدف از این پژوهش، تحلیل دقیق پارامترهای مؤثر بر طراحی سیستم می‌باشد. در پژوهش‌های گذشته تنها با تکیه بر مدل‌سازی ریاضی یا نرم‌افزاری به تحلیل پارامترها پرداخته شده است؛ اما در این پژوهش، از داده‌های میدانی نیز کمک گرفته شد، تا با در نظر گرفتن عوامل محیطی و شرایط عملیاتی بتوان تأثیرگذاری دقیق‌تر هر یک از پارامترها را بررسی کرد.

مواد و روش‌ها

مدل‌سازی ریاضی

در مدل‌سازی ریاضی سیستم اسمز معکوس از مدل محلول آشفته برای پیش‌بینی عملکرد سیستم و کیفیت آب تصفیه‌شده استفاده می‌شود. این مدل به طور کلی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$M_p = C(\Delta P - \Delta p) \quad (1)$$

M_p ، شار آب تصفیه‌شده از ممبرین؛ C ، ضریب ثابت؛ ΔP ، اختلاف فشار بین آب تصفیه‌شده و آب ورودی در دو طرف ممبرین؛ و Δp ، اختلاف فشار اسمزی دو طرف ممبرین است. با اصلاح این مدل شار آب تصفیه‌شده از ممبرین به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$M_p = K_w (\Delta P - \Delta p) A C_1 \quad (2)$$

M_p ، شار آب تصفیه‌شده و بر حسب لیتر بر دقیقه؛ C_1 ، ضریب تبدیل (1000 L/m^3)؛ K_w ، ضریب نفوذپذیری آب و بر حسب m/min.bar ؛ A ، مساحت ممبرین بر حسب مترمربع است (بارلو و همکاران، ۲۰۱۵).

در این پژوهش، فشار اسمزی تقریباً خطی در نظر گرفته می‌شود. تعدادی از محققین معادلات مختلفی را برای به‌دست آوردن فشار اسمزی پیشنهاد کرده‌اند. این معادلات تا حدودی مشابه هستند. ال دسوکی و اتونی

اسمز معکوس، یک حالت از فیلتراسیون تحت فشار است که فیلتر آن یک غشای نیمه تراواست. این غشا، آب شیرین را از خود عبور می‌دهد و یک محلول غلیظ با فشار بالا از آن خارج می‌شود. عملکرد تصفیه، شامل چهار زیرمرحله است: پیش‌تصفیه، پمپاژ فشار بالا، تصفیه و پس‌تصفیه. این سیستم، یک فن‌آوری کامل است و معمولاً به‌عنوان یک روش نمک‌زدایی پرکاربرد استفاده می‌شود. ظرفیت این سیستم بین ۰/۱ مترمکعب در روز (برای استفاده خانگی) تا ۳۹۵۰۰۰ مترمکعب در روز (برای کاربردهای تجاری) متغیر است. امروزه، اسمز معکوس یک تکنولوژی پیشرو با ۵۳٪ سهم جهانی در تولید آب شیرین است (مایر، ۲۰۱۳).

اوه و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از یک مدل ریاضی به شبیه‌سازی سیستم اسمز معکوس و مقایسه نتایج با نرم‌افزار ROSA پرداختند. این شبیه‌سازی در مقیاس کوچک انجام شده بود. مدل ریاضی سازگاری بسیار خوبی با نتایج نرم‌افزار داشت. لو و همکاران (۲۰۱۲) با مدل‌سازی ریاضی و برنامه‌ریزی خطی، عملکرد سیستم اسمز معکوس با چندین ورودی و خروجی را بهینه کردند. این بهینه‌سازی با تابع یک هدفه هزینه انجام شد. همچنین، با توجه به نوع کاربری و کیفیت آب ورودی، تعداد ممبرین‌ها در محفظه فشار نیز بهینه‌سازی شد. چوی و کیم (۲۰۱۵) با معادلات ریاضی و مدل آشفستگی محلول، سیستم اسمز معکوس دو مرحله‌ای را مدل‌سازی کردند. مدل‌سازی برای ماکزیمم‌کردن شار، مینیمم‌کردن مصرف انرژی و غلظت بور انجام شد. الشقری و همکاران (۲۰۱۵) به طراحی و تجزیه و تحلیل هزینه یک کارخانه اسمز معکوس فتوولتائیک خورشیدی برای موسسه Masdar پرداختند. در این طراحی با راندمان ۴۰٪، قیمت هر لیتر آب تولیدی حدود ۱ دلار بر مترمکعب است. آنکی و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی حرکت جریان آب ورودی در ممبرین با معادلات ناویر-استوکس و انتقال جرم پرداختند و همچنین آنها در پژوهش دیگری (۲۰۱۶) در بررسی میزان جریان ورودی به سیستم اسمز معکوس دریافتند که عملکرد ممبرین در میزان جریان‌های ورودی مختلف متفاوت است؛ به‌طوری که هر چه میزان جریان ورودی کمتر باشد عملکرد سیستم نیز پایین‌تر است.

اندیس p ، نشان دهنده آب تصفیه شده؛ b ، آب شور خروجی و f ، آب ورودی می باشد. \bar{p} ، به عنوان فشار اسمزی داخل ممبرین و بر حسب بار تعریف می شود. بنابراین، $\Delta\pi$ ، معرف اختلاف فشار اسمزی دو طرف ممبرین و بر حسب بار می باشد.

K_w ، ضریب نفوذپذیری نیز به پارامترهای مختلفی بستگی دارد. برخی از محققین تأثیر عوامل مختلف بر ضریب نفوذپذیری را بررسی کردند و معادلات مختلفی را پیشنهاد داده اند. براساس نتایج، ضریب نفوذپذیری به فشار ورودی، میزان رسوب و غلظت آب ورودی بستگی دارد.

(۲۰۰۲) عامل ضرب 0.7584 را تا شوری 42 gr/l استفاده کردند. گرادس و همکاران (۲۰۰۱) و وارده و موروان (۲۰۰۸) عامل ضرب 0.8051 را تا شوری 90 gr/l پیشنهاد دادند. بارلو و همکاران (۲۰۱۵) از معادلات زیر برای ساده تر شدن کار استفاده کردند:

$$p_p = 0.7579x_p \quad (۳)$$

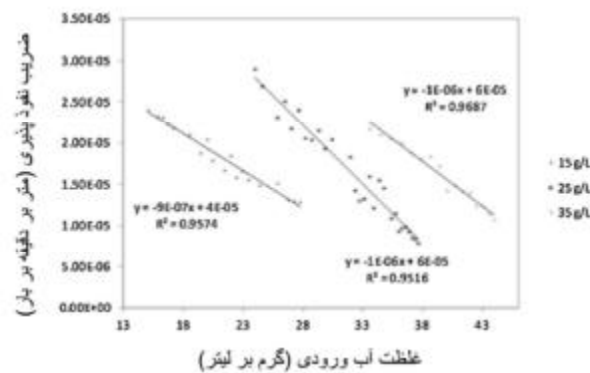
$$p_b = 0.7579x_b \quad (۴)$$

$$p_f = 0.7579x_f \quad (۵)$$

$$\bar{p} = 0.5(p_f - p_b) \quad (۶)$$

$$\Delta p = \bar{p} - p_p \quad (۷)$$

در این معادلات x ، معرف غلظت یا شوری آب بر حسب گرم بر لیتر و π ، معرف فشار اسمزی بر حسب بار است.



شکل ۱- تغییرات ضریب نفوذپذیری به غلظت آب ورودی [۶]

حسب مگاپاسکال و به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\Delta P_f = \frac{0.0033 \times Q_a \times L_{pv} \times m}{W \times d^3} \quad (۹)$$

$$L_{pv} = m \times l_m \quad (۱۰)$$

$$m = 1.234 \times 10^{-6} \exp\left(0.00212x_f + \frac{1965}{273.15 + T}\right) \quad (۱۱)$$

Q_a ، میانگین نرخ جریان عبوری از ممبرین بر حسب مترمکعب بر ساعت؛ L_{pv} ، طول محفظه ممبرین و بر حسب متر؛ m ، تعداد ممبرین ها؛ l_m ، طول ممبرین بر حسب متر و l ، ویسکوزیته آب بر حسب کیلوگرم بر متر ثانیه است. حداکثر افت فشار در محفظه می تواند 0.35 مگاپاسکال باشد (ردی و همکاران، ۲۰۱۳).

با استفاده از معادلات ارائه شده، ابتدا به مدل سازی ریاضی سیستم اسمز معکوس پرداخته شد. در این مدل سازی، شار آب تصفیه شده به عنوان متغیر وابسته و هر یک از پارامترهای دما، فشار و غلظت آب ورودی به عنوان متغیر مستقل عمل می کنند. در این مدل سازی ها، فرضیاتی در

بارلو و همکاران (۲۰۱۵) در نتایج خود مشاهده کردند که K_w ، بیشترین وابستگی را به غلظت آب ورودی دارد. هرچه غلظت آب ورودی بیشتر باشد، ضریب نفوذپذیری آب نیز کوچک تر خواهد بود. شکل ۱، تغییرات K_w به غلظت آب ورودی را نشان می دهد و خط رگرسیون خطی بهترین برازش انجام شده برای فرایند اسمز معکوس است. یکی دیگر از پارامترهای مؤثر بر شار آب تصفیه شده، اختلاف فشار دو طرف ممبرین است. لو و همکاران (۲۰۱۲) اختلاف فشار دو طرف ممبرین را به صورت زیر تعریف کردند:

$$\Delta P = P_f - P_p - 0.5\Delta P_f \quad (۸)$$

P_p و P_f ، به ترتیب فشار آب تصفیه شده و آب ورودی بر حسب مگاپاسکال است. ΔP_f ، افت فشار در ممبرین است که به مشخصات ممبرین بستگی دارد و بر حسب مگاپاسکال محاسبه می شود. در هر ممبرین با عرض W و فضای بین صفحات ممبرین d با واحد متر، افت فشار بر

آب ورودی تغییرات شار آب تصفیه شده بررسی شد.

نتایج و بحث

مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی ریاضی و نرم افزاری برای اطمینان از نتایج حاصل از دو روش، با شرایط یکسان باید مقایسه ای انجام شود تا بتوان به نتایج اطمینان حاصل کرد و درصد خطای نسبی را به دست آورد. به همین جهت، افت فشار حاصل از هر دو مدل سازی ریاضی و نرم افزاری به دست آمد. جدول ۲، مقایسه نتایج افت فشار حاصل از هر دو روش را در دماهای مختلف به خوبی نشان می دهد.

طبق نتایج به دست آمده از مدل سازی های انجام شده، در دمای ۱۵ تا ۳۰ درجه نتایج تطابق بیشتری با هم دارند. افزایش و کاهش دما باعث افزایش اختلاف بین نتایج حاصل از دو روش می شود. این اختلاف ها می تواند ناشی از فاصله گرفتن از شرایط استاندارد و لحاظ نشدن اثرهای افزایش دما در معادلات ریاضی باشد. اما به طور کلی، می توان ادعا کرد که نتایج مدل سازی ها تفاوت قابل توجهی با هم ندارند و این اختلاف ها قابل توجیه هستند. در ادامه، برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر کیفیت آب تصفیه شده و راندمان سیستم، علاوه بر نتایج نرم افزار و معادلات ریاضی، از داده های میدانی نیز استفاده شده است؛ زیرا در برخی موارد، نرم افزار قادر نیست تا با ثابت در نظر گرفتن برخی پارامترها تأثیر سایر عوامل را بررسی کند. بنابراین از داده های میدانی نیز کمک گرفته شد تا نتایج واقعی تری به دست آید.

مورد کیفیت آب ورودی، دما، مشخصات ممبرین شامل نوع فیلتر، مساحت مؤثر، فضای بین صفحات ممبرین، طول و عرض ممبرین در نظر گرفته شده است. فرضیات در نظر گرفته شده درباره مشخصات ممبرین در جدول ۱ بیان شده اند. دبی آب ورودی ۶۰ مترمکعب بر ساعت و تغییرات دمایی از ۵ تا ۴۵ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده است. همچنین، کیفیت آب ورودی از ۱ تا ۸ گرم بر لیتر متغیر است. در نهایت، با استفاده از نرم افزار MATLAB 2012 رفتارهای تغییرات فشار، دما و غلظت آب ورودی نسبت به شار آب تصفیه شده ترسیم شده است.

جدول ۱- مشخصات ممبرین

نوع ممبرین	BW30-400
مساحت مؤثر ممبرین	۳۷ مترمربع
فضای بین صفحات ممبرین	۲۸ میلی متر
عرض ممبرین	۱/۵ متر
طول ممبرین	۱/۰۱۶ متر

مدل سازی نرم افزاری

نرم افزار تحلیل سیستم های اسمز معکوس یا به اختصار ROSA توسط شرکت Dow-Filmtec عرضه شده است. این نرم افزار به منظور بررسی کارایی سیستم های اسمز معکوس طراحی شده با ممبرین اسمز معکوس و نانوفیلتراسیون، توسط این شرکت به کار گرفته می شود. بنابراین، پس از مدل سازی ریاضی، با شرایط مشابه مدل سازی با نرم افزار ROSA نیز انجام شد. در طراحی با نرم افزار نیز تمامی فرضیات مشابه در مدل سازی ریاضی در نظر گرفته شد. همچنین، با تغییرات دما، فشار و غلظت

جدول ۲- مقایسه نتایج افت فشار حاصل از مدل سازی ریاضی و نرم افزار

دمای آب (درجه سانتی گراد)	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵
افت فشار ناشی از مدل ریاضی (بار)	۰/۲۵	۰/۲۲	۰/۲۰	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۱۳	۰/۱۲
افت فشار ناشی از مدل نرم افزاری (بار)	۰/۲۵	۰/۲۱	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۱۷	۰/۱۴	۰/۱۶	۰/۱۵

تأثیر فشار بر جریان و کیفیت آب تصفیه شده

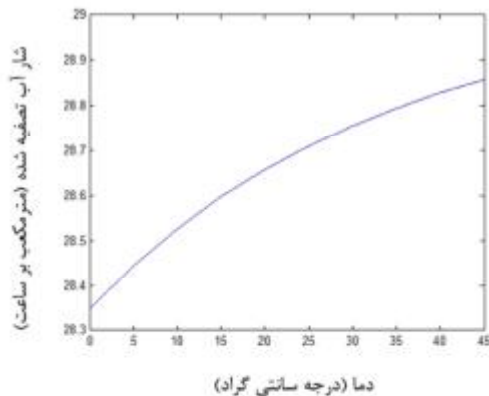
در مدل سازی نرم افزاری نمی توان فشار را ثابت در نظر گرفت و تأثیر سایر پارامترها را نسبت به آن به دست آورد. اما با مطالعات میدانی انجام شده در این پژوهش، به صورت تجربی مشاهده شد که افزایش فشار منجر به افزایش خطی شار آب تصفیه شده می شود. شکل ۲، تغییرات شار

آب تصفیه شده نسبت به فشار را به خوبی نشان می دهد. همچنین، فشار ورودی با افزایش نرخ راندمان افزایش می یابد و منجر به افزایش نرخ انرژی مخصوص نیز می شود. انرژی مخصوص تنها به فشار ورودی وابسته نیست؛ بلکه به نرخ آب ورودی نیز بستگی دارد. بنابراین، افزایش راندمان منجر به افزایش مصرف انرژی کل و در

۱) عملاً با افزایش دما، میزان شدت جریان نفوذ و بازیافت افزایش می‌یابد که می‌توان از آن به‌عنوان یکی از مزایای طراحی سیستم اسمز معکوس اشاره کرد. قابل توجه است که در نرم‌افزار به دلیل اینکه فشار را نمی‌توان ثابت در نظر گرفت، با افزایش دما، میزان فشار کاهش پیدا می‌کند و افت فشار منجر به کاهش میزان شدت جریان نفوذ و بازیافت می‌شود.

جدول ۳- فرضیات طراحی

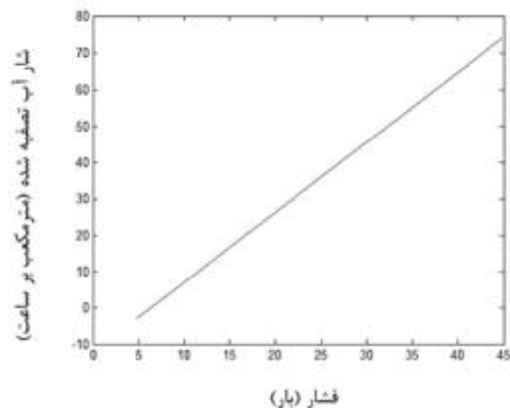
فرضیات	مشخصات
تعداد ممبرین	۳۰
نوع آرایش ممبرین	۶ ممبرین سری در ۵ ردیف موازی
نوع ممبرین	Bw30-400
غلظت آب ورودی	۹ گرم در لیتر
دبی آب ورودی	۶۰ مترمکعب در ساعت
دما	از ۱۰ تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد متغیر



شکل ۳- تغییرات شار آب تصفیه‌شده نسبت به دما

افزایش دما، افزایش فشار اسمزی آب ورودی و میزان مصرف انرژی بیشتری را به همراه دارد. افزایش دما منجر به افزایش غلظت مواد جامد محلول در آب تصفیه‌شده می‌شود. این امر، باعث می‌شود کیفیت آب تصفیه‌شده افت پیدا کند؛ در مقابل، از غلظت آب دفع‌شده کاسته می‌شود و کیفیت بهتری را خواهد داشت. اوه و همکاران (۲۰۰۹) یافتند که با کاهش دما انرژی مخصوص افزایش می‌یابد؛ زیرا غلظت مواد جامد محلول در دمای پایین کاهش می‌یابد. در نتایج چوی و کیم (۲۰۱۴) مشاهده می‌شود که با افزایش دمای آب ورودی نفوذ آب به ممبرین‌ها بیشتر می‌شود؛ در حالی که تحت شرایط فشار ثابت غلظت آب

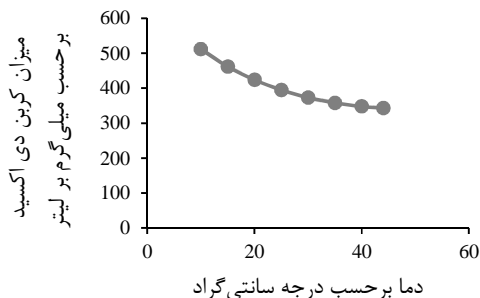
نهایت افزایش فشار آب ورودی می‌شود. انرژی مورد نیاز برای سیستم به پیش‌تصفیه و نوع طراحی بستگی دارد، که هر دوی آنها با توجه به میزان کیفیت آب خروجی تعیین می‌شوند. فشار مورد نیاز برای پمپ‌ها در موقعیت‌های مختلف متفاوت خواهد بود. مصرف انرژی کل و هزینه انرژی به‌عنوان تابعی از نرخ راندمان در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین، برای کنترل هزینه سیستم اسمز معکوس باید نرخ راندمان را تنظیم کرد.



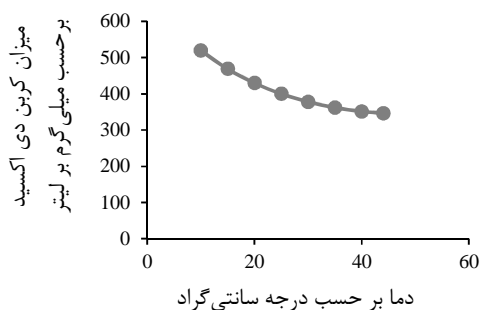
شکل ۲- تغییرات شار آب تصفیه‌شده نسبت به فشار

تأثیر دما بر جریان و کیفیت آب تصفیه‌شده

دمای آب ورودی نیز، نقش مهمی را در عملکرد سیستم اسمز معکوس دارد. با کاهش دما، انرژی مخصوص افزایش می‌یابد؛ همچنین، افزایش دما، میزان نفوذ آب در ممبرین را افزایش می‌دهد. با این حال، با شار ثابت، افزایش دما منجر به کاهش کیفیت آب دفع‌شده می‌شود. هرچه دمای ورودی آب پایین‌تر باشد، کیفیت آب تصفیه‌شده بهتر خواهد بود. علاوه بر این، بهره‌برداری از سیستم اسمز معکوس در دماهای پایین نیازمند مقدار زیادی انرژی است تا نفوذپذیری آب را کاهش دهد. با افزایش دما شار آب تصفیه‌شده به‌صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. شکل ۳، این تغییرات را به خوبی نشان می‌دهد. برای رسیدن به نتایج دقیق‌تر، چندین سیستم با دمای آب ورودی مختلف و با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها، از جمله تعداد المان‌ها و آرایش آنها، نوع ممبرین، غلظت آب ورودی و میزان آن با هم مقایسه شدند. فرضیات در نظر گرفته‌شده در این قسمت، در جدول ۳ و نتایج طراحی‌های انجام‌شده در زیر بیان شده‌اند:



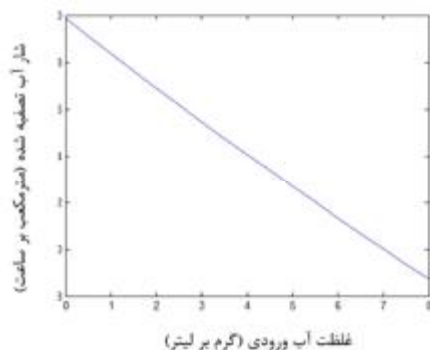
شکل ۶- تغییرات میزان کربن دی اکسید موجود در آب تصفیه شده نسبت به تغییرات دما



شکل ۷- تغییرات میزان کربن دی اکسید موجود در آب دفع شده نسبت به تغییرات دما

تأثیر کیفیت آب ورودی بر جریان و کیفیت آب تصفیه شده

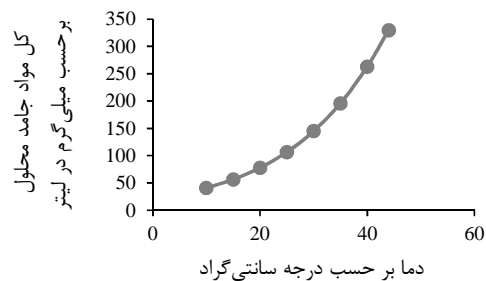
میزان شوری آب، تأثیر مستقیمی بر میزان و کیفیت آب تولیدی می‌گذارد؛ به طوری که هرچه میزان جامدات محلول در آب ورودی بیشتر باشد، میزان این املاح در آب تصفیه شده بیشتر خواهد بود؛ در نتیجه، شار آب تصفیه شده کاهش می‌یابد. شکل ۸، این تغییرات را به خوبی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کردار به صورت خطی تغییر می‌کند.



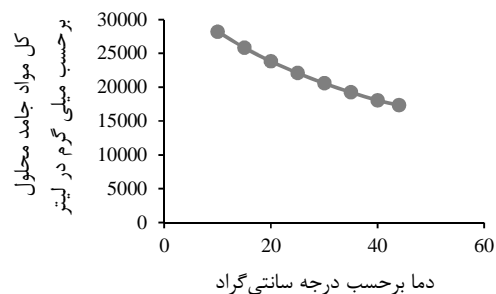
شکل ۸- تغییرات شار آب تصفیه شده نسبت به غلظت آب ورودی

دفع شده کاهش می‌یابد. در این پژوهش برای بررسی این مورد از داده‌های چندین آب با کیفیت مختلف استفاده شد. روند کلی تغییرات در تمامی موارد با شکل ۴ و ۵ تطابق دارد.

(۲) افزایش دما باعث کاهش میزان کربن دی اکسید موجود در آب تصفیه شده و آب دفع شده می‌شود. نرخ کاهش میزان کربن دی اکسید در آب تصفیه شده و دفع شده تقریباً مقدار یکسانی است. در بررسی این مورد نیز، از داده‌های چندین آب با کیفیت مختلف استفاده شد. روند تغییرات کلی در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. بنابراین، دمای آب ورودی همواره به عنوان فاکتوری با کارکرد متناقض در حفظ کیفیت و کمیت آب تصفیه شده عمل می‌کند. دمای بهینه باید با توجه به شرایط و کیفیت مورد نیاز آب تولیدی تعیین شود تا سیستم بتواند بهترین عملکرد را داشته باشد.



شکل ۹- تغییرات غلظت آب تصفیه شده نسبت به دما



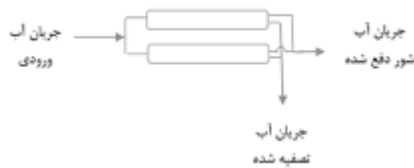
شکل ۱۰- تغییرات غلظت آب دفع شده نسبت به دما

مقایسه فشار در هر دو حالت در جدول ۴ نشان داده شده است.

(۴) از لحاظ اقتصادی و بازار تجاری طول محفظه نگهدارنده ممبرین‌ها حداکثر حدود ۶ متر است و ۶ ممبرین سری را در کنار هم قرار می‌دهد. در صورت نیاز به قرارگیری بیشتر ممبرین‌ها در کنار هم می‌توان دو محفظه را با لوله‌های رابط به هم متصل کرد. این‌گونه طراحی در کارخانه‌های بزرگ نمک‌زدایی قابل پیش‌بینی است.



شکل ۹- اتصال سری ممبرین‌ها



شکل ۱۰- اتصال موازی ممبرین‌ها

تأثیر نحوه چیدمان ممبرین‌ها بر راندمان سیستم

یکی از عوامل مؤثر در طراحی سیستم، ترتیب و نحوه قرارگیری ممبرین‌ها می‌باشد. تعداد ممبرین‌ها، چیدمان ممبرین‌ها به صورت موازی یا متوالی، نوع طراحی سیستم به صورت یک مرحله‌ای یا چند مرحله‌ای و میزان آب ورودی به محفظه، از عوامل مؤثر در طراحی هستند. طی طراحی‌های مختلف، تأثیر نحوه چیدمان ممبرین بر راندمان سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت. در یک طراحی ساده، میزان آب ورودی ۱۰ مترمکعب در ساعت در نظر گرفته شد. طراحی با دو ممبرین و با چیدمان موازی و متوالی انجام شد و نتایج زیر حاصل شد:

(۱) در حالت سری سیستم راندمان بالاتری نسبت به حالت موازی دارد. بازیافت ممبرین‌ها پایین‌تر و در نتیجه طول عمر ممبرین‌ها بیشتر است. شکل ۹ و ۱۰، حالت اتصال سری و موازی ممبرین‌ها را به خوبی نشان می‌دهد.

(۲) کیفیت آب تصفیه‌شده در حالت سری بهتر از حالت موازی است. نتایج حاصل از کیفیت در جدول ۴ مشخص شده است.

(۳) با وجود مزایای سیستم سری، این سیستم به فشار بالاتری نسبت به سیستم موازی احتیاج دارد.

جدول ۴- مقایسه نتایج حاصل از دو نوع طراحی سری و موازی

طراحی موازی	طراحی سری	پارامتر
۱۰/۹۷	۷/۶۴	غلظت آب تصفیه‌شده (میلی‌گرم بر لیتر)
۵/۷۵	۵/۶۱	pH
۵/۱۱	۸/۲۴	فشار ورودی (بار)
%۱۹	%۳۲	راندمان

(۱) با دو مرحله‌ای کردن سیستم، بازیافت ممبرین‌ها کاهش می‌یابد و طول عمر آنها افزایش می‌یابد.
(۲) دو سیستم تقریباً کیفیت آب تصفیه‌شده، میزان انرژی مصرفی و فشار ورودی یکسانی را دارند. تنها با تغییر چیدمان ممبرین‌ها و دو مرحله‌ای کردن آن، سیستم راندمان ۱۰٪ بالاتری خواهد داشت.

مطالعه موردی سیستم نمک‌زدایی

سیستم نمک‌زدایی مورد استفاده در کارخانه روغن نینا در استان کرمان با ظرفیت ۲۰ مترمکعب در ساعت برای این پژوهش در نظر گرفته شده است. با توجه به کیفیت آب

بنابراین، با توجه به میزان آب ورودی به سیستم، ابتدا سری شش‌تایی از ممبرین‌ها در یک محفظه قرار می‌گیرد؛ سپس، سری شش‌تایی بعدی به صورت موازی با محفظه اول قرار می‌گیرد. با توجه به کیفیت آب خروجی از مرحله اول می‌توان سیستم را دو عبوره در نظر گرفت تا به کیفیت مطلوب مورد نظر رسید.

همچنین، می‌توان برای افزایش راندمان سیستم‌های یک‌مرحله‌ای، با تعداد ممبرین یکسان، سیستم‌های دو مرحله‌ای را طراحی کرد. با مقایسه سیستم‌های یک‌مرحله‌ای و دو مرحله‌ای نتایج زیر حاصل شد:

یکی از مشکلات اصلی سیستم‌های نمک‌زدایی، تلخ‌آب تولیدی است که نسبتاً حجم و غلظت بالایی دارد. با توجه به تحلیل تلخ‌آب این سیستم، از این آب برای کشاورزی فضای سبز کارخانه استفاده می‌شود. سیستم پیش‌تصفیه برای این سیستم، شامل فیلتر شنی، فیلتر کربنی، فیلتر ۲۰ میکرونی، فیلتر ۵ میکرونی، و لامپ UV و تزریق آنتی اسکالانت می‌باشد. همچنین، از تزریق سود برای تنظیم pH در پس‌تصفیه استفاده می‌شود. هزینه‌های کلی سیستم و هزینه نهایی هر لیتر آب در جدول ۶ آمده است.

خروجی مطلوب و برای رسیدن به بیشترین راندمان، این دستگاه به صورت تک‌مرحله‌ای با ۴ محفظه فشار موازی طراحی شده است. در هر محفظه فشار ۶ فیلتر اسمز معکوس جای می‌گیرد. عمر هر یک از فیلترها با توجه به فشار آب وارد شده به هر المان و راندمان آنها در حدود ۵ سال می‌باشد. همچنین، طبق طراحی انجام‌شده راندمان ۶۵٪ و طول عمر ۳۰ سال برای این سیستم انتظار می‌رود. کیفیت آب ورودی تأثیر مستقیمی بر کیفیت آب خروجی داشته و هر دو نقش تعیین‌کننده‌ای در طراحی دارند. اطلاعات تحلیل شیمیایی آب ورودی، آب شیرین و شور خروجی در جدول ۵ موجود می‌باشد.

جدول ۵- تحلیل شیمیایی آب ورودی، آب شیرین و شور خروجی

مشخصات	تحلیل آب ورودی	تحلیل آب شیرین تولیدی	تحلیل تلخ‌آب
pH	۷/۵	۷/۴	۷/۷
TH (میلی‌گرم بر لیتر)	۳۰۰	۵	۶۲۰
TDS (میلی‌گرم بر لیتر)	۷۰۰	۴۰	۱۴۰۰

جدول ۶- هزینه نهایی هر لیتر آب تصفیه‌شده از سیستم نمک‌زدایی طراحی شده

پارامتر	هزینه
پیش‌تصفیه و پس‌تصفیه (ریال)	۳۰۰,۰۰۰,۰۰۰
اتصالات، ممبرین، پرشل وصل و نصب (ریال)	۹۰۰,۰۰۰,۰۰۰
پمپ (ریال)	۲۰۰,۰۰۰,۰۰۰
هزینه نصب، تعمیر و نگهداری و تعویض ممبرین‌ها	۲,۵۰۰,۰۰۰,۰۰۰
تأمین نیروی برق هر مترمکعب آب (ریال)	۱۰,۰۰۰
هزینه نهایی هر مترمکعب آب (ریال)	۲۵,۰۰۰

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، پارامترهای مؤثر در طراحی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. از جمله پارامترهای مهم در طراحی فشار، دما، کیفیت آب ورودی، راندمان و چیدمان ممبرین‌هاست. تغییرات هر یک از این پارامترها و تأثیرش بر عملکرد سیستم با معادلات ریاضی، پکیج نرم‌افزاری و تجربیات میدانی به دست آمد. نتایج هر یک از این روش‌ها توسط روش دیگر مورد ارزیابی و صحت‌سنجی قرار گرفت. برخی مؤلفه‌ها تأثیر دوگانه بر عملکرد سیستم دارند. بنابراین، باید با در نظر گرفتن هزینه، کاربری، کیفیت آب تصفیه‌شده و کیفیت آب شور خروجی بتوان یک سیستم بهینه را طراحی کرد. نتایج به صورت خلاصه در ادامه بیان شده‌اند:

- (۱) عملاً با افزایش دما، میزان شدت جریان نفوذ و راندمان افزایش می‌یابد که می‌توان از آن به عنوان یکی از مزایای طراحی سیستم اسمز معکوس اشاره کرد. افزایش دما منجر به افزایش غلظت مواد جامد محلول در آب تصفیه‌شده می‌شود. این امر، باعث می‌شود کیفیت آب تصفیه‌شده افت پیدا کند و در مقابل، از غلظت آب دفع‌شده کاسته شود و کیفیت بهتری را داشته باشد. بنابراین، دمای آب ورودی همواره به عنوان فاکتوری با کارکرد متناقض در حفظ کیفیت و کمیت آب تصفیه‌شده عمل می‌کند.
- (۲) فشار نیز همچون دما تأثیری دوگانه بر مؤلفه‌های مختلف دارد و باید با دقت در مورد میزان بهینه آن نظر داد. از یک‌سو، افزایش فشار کیفیت آب

- desalination process in batch mode. *Computers and Chemical Engineering*. 83: 139-156.
5. Belhamiti O. and Absar B. 2017. A numerical study of fractional order reverse osmosis desalination model using Legendre wavelet approximation. DOI: 10.22052/ijmc.2017.86494.1289.
 6. Choi J. S. and Kim J. T. 2015. Modeling of Full-Scale Reverse Osmosis Desalination System: Influence of Operational Parameters. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 21: 261-268.
 7. El-Dessouky H. T. and Ettouney H. M. 2002. *Fundamentals of sea water desalination*. Amsterdam: Elsevier Science. 691 p.
 8. Geraldes V. M. Semiao V. A. and de Pinho M. N. 2001. Flow and mass transfer modelling of nanofiltration. *Journal of Membrane Science*. 191: 109-28.
 9. Lu Y. Liao A. and Hu Y. 2012. The design of reverse osmosis systems with multiple-feed and multiple-product. *Journal of Desalination*. 307: 42-50.
 10. Mayere A. 2013. Energy Consumption and Water Production Cost of Conventional and Renewable-Energy-Powered Desalination Processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 24: 343-356.
 11. Oh H. J. Hwang T. M. and Lee S. 2009. A simplified simulation model of RO systems for seawater desalination. *Journal of Desalination*. 238: 128-139.
 12. Reddy V. Kaushik S. C. Ranjan K. R. and Tyagi S. K. 2013. State-of-the-art of solar thermal power plants: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 27: 258-273.
 13. Shaaban S. and Yahya H. 2017. Detailed analysis of reverse osmosis systems in hot climate conditions. *Journal of Desalination*. 423: 41-51.
 14. Touati Kh. Tadeo F. and Elfil H. 2017. Osmotic energy recovery from reverse osmosis using two-stage pressure retarded osmosis. *Journal of Energy*. 132: 213-224.
 15. Wardeh S. and Morvan H. P. 2008. CFD simulations of flow and concentration polarization in spacer-filled channels for application to water desalination. *Chemical Engineering Research and Design*. 86: 1107-1116.

تولیدی را افزایش می‌دهد و از سوی دیگر، این افزایش فشار نیاز به پمپ‌های قوی‌تری داشته که خود باعث افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و یا جاری طرح می‌شود. به همین جهت، در طراحی فشار باید از افزایش بیهوده هزینه‌ها جلوگیری کرد.

۳) میزان شوری آب تأثیر مستقیمی بر کیفیت آب تولیدی می‌گذارد؛ به طوری که هرچه میزان جامدات محلول در آب ورودی بیشتر باشد، میزان این املاح در آب تصفیه‌شده نیز بیشتر خواهد بود. نکته مهم در کاهش این املاح در آب ورودی، استفاده از سیستم پیش تصفیه مناسب می‌باشد.

۴) طراحی سیستم، نقش بسیار مهمی بر راندمان، هزینه و مصرف آب دارد. در واقع، طراحی تنها با دیدگاه مهندسی و به صورت تجربی به دست می‌آید. برای افزایش راندمان می‌توان سیستم دو مرحله‌ای یا سیستم با بازگشت آب را طراحی کرد. افزایش راندمان با افزایش فشار و در نتیجه افزایش مصرف برق همراه است. در سیستم طراحی‌شده با بازگشت آب میزان مصرف برق تفاوت چشم‌گیری با سیستم دو مرحله‌ای دارد؛ در حالی که کیفیت آب تصفیه‌شده تقریباً یکسانی دارند. همچنین، نحوه آرایش ممبرین‌ها بر راندمان و کیفیت آب تصفیه‌شده تأثیر دارد. آرایش سری ممبرین‌ها عملکرد بهتری نسبت به آرایش موازی آنها دارد.

منابع

1. Alsheghri A. Sharief S. A. Rabbani S. and Aitzhan N. Z. 2015. Design and cost analysis of a solar photovoltaic powered reverse osmosis plant for Masdar institute. *Energy Procedia*. 75: 319-324.
2. Anqi A. E. Alkhamis N. and Oztekin A. 2015. Numerical simulation of brackish water desalination by a reverse osmosis membrane. *Journal of Desalination*. 369: 156-164.
3. Anqi A. E. Alkhamis N. and Oztekin A. 2016. Computational study of desalination by reverse osmosis- three dimensional analyses. *Journal of Desalination*. 388: 38-49.
4. Barello M. Manca D. Patel R. and Mujtaba I. M. 2015. Operation and modeling of RO

