



Experimental Optimization of Operating Condition to Decline the Concentration Polarization on the Surface of Reverse Osmosis Membrane

A. R. Zahedipoor¹, A. Zahedipoor², M. Rahbari-Sisakht³, D. Emadzadeh^{3*}

1- Ph. D. in Chemical Engineering, Membrane Science and Technology Research Center,
Gachsaran Branch, Islamic Azad University, Gachsaran, Iran

2- M. Sc. in Chemical Engineering, Third Refinery of South Pars Gas Complex, Asaluyeh, Iran

3- Assistant Professor of Chemical Engineering, Membrane Science and Technology Research Center,
Gachsaran Branch, Islamic Azad University, Gachsaran, Iran

Email: D.emadzadeh322@gmail.com

Abstract

This research addressed the experimental optimization of the operating conditions to decrement the concentration polarization on the reverse osmosis (RO) membrane. Regarding the number and diversity of the effective parameters (salt concentration, pressure, flow rate, and pH) of desalination process, Taguchi design of experiment (DoE) was employed to decrease the number of tests and costs. The contribution of various parameters and optimal conditions to achieve the highest desalination were determined using Taguchi DoE and ANOVA as implemented in Minitab 16 software. The RO desalination increased in various conditions by prolonging the time for tests 5, 4, and 6. The best desalination performance of the polyamide composite membrane (97.24%) was achieved for salt concentration, pressure, flow rate, and pH of 1500 ppm, 10 bar, 0.5 L/min, and 7, respectively. The highest water flux through the polyamide composite membrane during the RO process was 41.04 L/m²hr which was observed in test 6. Such an enhancement in the water flux can be assigned to the decrease in the concentration polarization on the polyamide composite membrane.

Received: 23 January 2023

Accepted: 5 April 2023

Page Number: 115-125

Keywords:

Concentration Polarization,
Membrane,
Reverse Osmosis,
Polyimide Composit

Please Cite this Article Using:

Zahedipoor, A. R., Zahedipoor, Rahbari-Sisakht, A., M., & Emadzadeh, D. (2024). Experimental Optimization of Operating Condition to Decline the Concentration Polarization on the Surface of Reverse Osmosis Membrane. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 22(131), 115-125, [In Persian].



مطالعه آزمایشگاهی بهینه‌سازی شرایط عملیاتی برای کاهش پلاریزاسیون غلظتی بر روی سطح غشای اسمز معکوس (RO)

احمد رضا زاهدی پور^۱، ابوذر زاهدی پور^۲، مسعود راهبری سی سخت^۳، داریوش عمادزاده^{۳*}

۱- دکتری مهندسی شیمی، مرکز تحقیقات علوم و فناوری غشا، دانشگاه آزاد اسلامی، گچساران، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، پالایشگاه سوم مجتمع گاز پارس جنوبی، عسلویه، ایران

۳- استادیار مهندسی شیمی، مرکز تحقیقات علوم و فناوری غشا، دانشگاه آزاد اسلامی، گچساران، ایران

پیام نگار: D.emadzadeh322@gmail.com

چکیده

در این پژوهش بهینه‌سازی شرایط عملیاتی برای کاهش پلاریزاسیون غلظتی بر روی سطح غشای اسمز معکوس (RO) به صورت آزمایشگاهی بررسی شد؛ لذا باتوجه به تعداد و تنوع مشخصه‌های تأثیرگذار (غلظت نمک، فشار، دبی و pH) بر میزان دفع نمک و همچنین باهدف کاهش تعداد آزمایش‌ها و هزینه‌ها از روش طراحی آزمایش تاگوجی استفاده شد. با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب ۱۶ و تحلیل تاگوجی و همچنین با استفاده از روش آماری تحلیل واریانس ANOVA درصد سهم شاخص‌های مختلف و همچنین شرایط بهینه برای بیشترین میزان دفع نمک تعیین و نتایج زیر حاصل شد. با افزایش زمان برای آزمایش‌های (۴، ۵ و ۶) میزان دفع نمک در فرایند اسمز معکوس (RO) برای شرایط مختلف آزمایش افزایش یافت. بهترین عملکرد غشای کامپوزیتی پلی‌آمید برای دفع نمک در شرایط غلظت نمک ۱۵۰۰ ppm، فشار ۱۰ bar، دبی ۰/۵ Lit/min و pH=۷ با مقدار ۹۷/۲۴ درصد حاصل شد. بیشترین شار آب عبوری از غشای کامپوزیتی پلی‌آمید در فرایند اسمز معکوس ۴۱/۰۴ (L/m².hr) است که در شرایط آزمایش ۶ به دست آمد که می‌توان این افزایش شار آب عبوری را مربوط به کاهش میزان پلاریزاسیون غلظتی بر روی سطح غشای کامپوزیتی پلی‌آمید دانست.

کلیدواژه‌ها:

پلاریزاسیون غلظتی،

غشا،

اسمز معکوس،

دفع نمک،

کامپوزیت پلی‌آمید

* گچساران، دانشگاه آزاد اسلامی، گروه مهندسی شیمی

استناد به مقاله:

زاهدی پور، احمد رضا، زاهدی پور، ابوذر، راهبری سی سخت، مسعود، و عمادزاده، داریوش. (۱۴۰۲). مطالعه آزمایشگاهی بهینه‌سازی شرایط عملیاتی برای کاهش پلاریزاسیون غلظتی بر روی سطح غشای اسمز معکوس (RO)، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۲(۱۳۱)، ۱۱۵-۱۲۵.

رشد سریع جمعیت و صنعتی شدن جوامع در دهه‌های گذشته در سراسر جهان، تقاضا برای منابع را به‌طور قابل توجهی افزایش داده‌است. بنابراین، رفع نیازهای اساسی انسان دشوارتر شده و دسترسی به آب آشامیدنی، غذا و انرژی الکتریکی را محدود می‌کند [۱]. اگرچه آب، بیشتر زمین را در بر گرفته، اما تنها حدود ۲/۵ درصد آن به‌عنوان آب شیرین در دسترس است. با این حال، درصد آب شیرین موجود برای مصرف بسیار کمتر است؛ زیرا تقریباً سه چهارم این منبع در یخچال‌ها و کلاهک‌های یخی منجمد شده که استفاده از آن را در کوتاه‌مدت عملاً غیرممکن می‌کند [۲]. تاکنون روش‌های مختلفی از جمله فرایند جذب سطحی اسمز معکوس [۳]، تبادل یون [۴]، نانوپالایش غشایی [۵] برای حذف نمک از آب، مطالعه شده‌است. از بین فرایندهای غشایی، استفاده از روش اسمز معکوس بسیار پرطرفدار است و در سال‌های اخیر، بررسی‌های آزمایشگاهی، مدل‌سازی و شبیه‌سازی بسیاری بر روی آن انجام گرفته‌است و نزدیک به ۶۰ درصد شیرین‌سازی‌های آب دریا به‌وسیله اسمز معکوس انجام می‌شود [۶]. بیشتر غشاهایی که در فرایندهای تصفیهٔ پساب‌ها به‌کار می‌رود، غشاهای پلیمری هستند که برپایهٔ سازوکار حلالیت - نفوذ عمل می‌کنند. این سازوکار در مقیاس مولکولی به‌معنی عبور مولکول‌ها از غشای پلیمر است؛ بر این اساس که مولکول از یک طرف غشا جذب می‌شود و از میان فضاهای خالی زنجیرهای پلیمر نفوذ می‌کند و سرانجام از سمت دیگر غشا خارج می‌شود. مطابق مدل حلالیت - نفوذ، نفوذ مولکول‌ها از میان غشاها با دو مشخصهٔ اصلی ضریب نفوذ و ضریب حلالیت کنترل می‌شود [۷]. در یک حالت ایده‌آل برای توصیف عملکرد خوب غشا، تراوایی بالا همراه با گزینش‌پذیری خوب و حذف آلاینده، همواره موضوعی است که مد نظر محققان فعال در زمینهٔ غشاهای پلیمری بوده‌است. هرچه تراوایی غشا بالا باشد، هزینهٔ انرژی مصرفی در فرایند پالایش کاهش می‌یابد و گزینش‌پذیری بالا در شرایط تراوایی یکسان، عملکرد غشا را در تصفیهٔ پساب افزایش می‌دهد. این مسأله به‌روش‌های مختلفی در ساخت غشاها محل توجه قرار می‌گیرد. یکی از شیوه‌های مرسوم افزودن ترکیبات پیشرفته به بافت پلیمری غشا در حین فرایند تولید آن است که به آن‌ها غشاهای بسترآمیخته گفته می‌شود. غشاهای پلیمری بسترآمیخته قابلیت بالایی در جذب ترکیبات مختلف موجود

در سیالات در فاز گازی و مایع دارند. این غشاها علاوه‌بر دارا بودن خاصیت تراوایی مناسب، به‌دلیل داشتن گروه‌های عاملی در سطوح خارجی می‌توانند ترکیبات آلی و معدنی را به‌خوبی روی سطح بیرونی خود جذب و مولکول‌های سیال را از منافذ خود به‌آسانی عبور دهند [۸].

بهبه‌نظر می‌رسد که فناوری‌های نمک‌زدایی راه حلی جذاب برای رفع بخشی از کمبود آب جهانی باشد؛ نمک‌زدایی شامل گرفتن آب با غلظت بالایی از کل جامدات محلول (TDS) و عبور دادن آن از راه فرایند تصفیه تا رسیدن به محدودهٔ غلظت مناسب برای استفادهٔ مربوطه است [۹]. برای به‌دست آوردن آب شیرین از راه نمک‌زدایی می‌توان به دو دستهٔ حرارتی (تقطیر) و غشایی (اسمز معکوس) تقسیم کرد، دستهٔ اول یکی از معمول‌ترین روش‌های شیرین‌سازی آب، تقطیر با استفاده از انرژی گرمایی است. در این دستگاه ابتدا آب با استفاده از حرارت به‌جوش می‌آید و سپس تبخیر می‌شود. در مرحلهٔ بعد با خنک کردن و چگالش آب می‌توان به آب خالص دست پیدا کرد. دستهٔ دوم، اسمز معکوس پرکاربردترین فناوری نمک‌زدایی غشایی است. نمک‌زدایی آب از راه اسمز معکوس، به‌دلیل مصرف پایین انرژی، بیشترین استفاده را برای تولید آب شیرین دارد. در این روش آب، از راه یک غشای نیمه‌تراوا عبور می‌کند و ناخالصی‌ها به‌دلیل بزرگ بودن مولکول‌های نمک نسبت به سوراخ‌های غشا اجازهٔ عبور پیدا نمی‌کنند. این غشاها از پلی‌آمید بسیار نازک ساخته شده‌اند که می‌توانند با باکتری‌ها آلوده شوند، بنابراین تصفیهٔ آب ضرورت ویژه‌ای پیدا خواهد کرد [۱۰].

با این حال، در طی فرایند اسمز معکوس باید به عوامل خاصی توجه شود. یکی از این عوامل اصطلاحاً عامل پلاریزاسیون غلظتی نامیده می‌شود که سبب مجموعه‌ای از پدیده‌ها می‌شود که یگراست بر روی غشاهای اسمز معکوس تأثیر می‌گذارند و در نتیجه، کیفیت آب حاصل و مصرف انرژی فرایند را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۱۱]. پلاریزاسیون غلظتی زمانی رخ می‌دهد که در حین جریان آب ورودی به سامانهٔ اسمز معکوس، نمک‌ها به‌وسیلهٔ غشای نیمه‌تراوا انباشته می‌شوند و یک لایهٔ متراکم را روی سطح آن تشکیل می‌دهند. غلظت در این نقطه به‌تدریج افزایش می‌یابد؛ زیرا با تداوم عبور جریان آب از غشاها، انباشت نمک ادامه پیدا می‌کند و غلظت نمک بالاتری حتی نسبت به مقیاس غلظت ورودی

ایجاد می‌شود [۱۲]. این پدیده، انتقال جرم در فرایند را محدود می‌کند و فشار عملیاتی، مصرف انرژی و توسعهٔ مقیاس را افزایش می‌دهد. هم‌چنین سبب کاهش کیفیت و شار نفوذ می‌شود [۱۳].

هنگ و همکاران [۱۴] غشاهای نانوکامپوزیت (TFN) را با استفاده از بسپارش سطحی بین پلی‌اتیلن‌یمین (PEI) و تری‌مزوئیل کلراید (TMC) با ترکیب نانوذرات سلولز (CNCs)، برای حذف Cu (II) و Pb (II) از آب مطالعه کردند. محیط اندازه‌گیری زاویهٔ تماس با آب و آزمایش آب خالص نشان داد که آب دوستی سطح غشاهای TFN با افزایش غلظت CNC ها بهبود یافته‌است. نتایج نشان داد که نفوذ آب غشاهای TFN در مقایسه با غشای TFC با جرم بارگذاری CNC ها ۵/۵ میکروگرم بر سانتی‌متر مربع ۷۰ درصد افزایش یافته‌است.

سان و همکاران [۱۵] در تحقیقی، برای بالا بردن راندمان نمک‌زدایی آب با شوری بالا از GO-PVA استفاده کردند. نتایج نشان داد که نفوذپذیری غشاهای پلی‌وینیل الکل-اکسید گرافن به شبکهٔ متقابل بین صفحه‌های نانوغرافن بستگی دارد. غشاهای بهینه‌شدهٔ پلی‌وینیل الکل-اکسید گرافن شار آب برجسته‌ای بیش از ۹۸ gr/m².hr و ۹۹/۹۹ درصد دفع نمک را در نمک‌زدایی محلول کلرید سدیم ۱۰ درصد وزنی در ۸۵ °C نشان می‌دهند.

بغدادی و همکاران [۱۶] تأثیر دما را روی ضخامت لایهٔ پلاریزاسیون غلظتی در دو نوع غشا با ماکرومولکول‌های خارجی^۱ و ماکرومولکول‌های داخلی^۲ با استفاده از نرم‌افزار FilmTec به لحاظ نظری بررسی کردند. محققان گزارش کردند که شار نفوذ با افزایش دما چندان تغییر نمی‌کند؛ اما ضخامت لایهٔ پلاریزاسیون غلظتی با افزایش دما کاهش می‌یابد و این کاهش وقتی ماکرومولکول‌ها درون غشا تعبیه شده باشند، بیشتر است؛ درحالی‌که وقتی ماکرومولکول‌ها به عنوان یک لایهٔ جداگانه بر روی سطح غشا عمل می‌کنند، کمتر است.

لی و همکاران [۱۷] عملکرد شکل مینیاتوری یک سانتریفیوژ غشای نانومتخلخل را برای نمک‌زدایی اسمز معکوس بررسی کردند. آنان سرعت زاویه‌ای بحرانی برای نمک‌زدایی اسمز معکوس، پلاریزاسیون غلظتی و بازده انرژی را بر حسب مشخصه‌های مختلف طراحی، اندازهٔ منافذ، طول سانتریفیوژ CNT متخلخل، و نرخ شار آب شیرین بررسی کردند. این محققان گزارش کردند که چگالی غلظت یون در

دیوارهٔ غشا تقریباً صفر است که نشان می‌دهد پلاریزاسیون غلظت می‌تواند برای سانتریفیوژ غشای نانومتخلخل پیشنهادی آن‌ها وجود نداشته باشد.

احسانی و همکاران [۱۸] اثر مشخصه‌های دما، فشار و pH بر عملکرد غشاهای اسمز معکوس صنعتی را برای یافتن بهترین کیفیت محصول در خروجی بررسی کردند. نتایج نشان داد که در دمای ۲۵°C، فشار ۱۴/۱ bar و pH ۷/۵، خالص‌ترین محصول به دست آمد. به طور خلاصه، واضح است که مطالعهٔ کاهش غلظت پلاریزاسیون موضوعی است که در حال حاضر به روش‌های مختلفی بررسی می‌شود. بنابراین، مدل‌ها و شبیه‌سازی‌های متعددی برای درک اثرات آن بر عملکرد سامانه‌های اسمز معکوس و چگونگی به حداقل رساندن آن‌ها ارائه شده‌است. اگرچه گزارش شده‌است که برخی از غشاهای جدید که اخیراً پیشنهاد شده‌اند با این مشکل مواجه نیستند؛ اما هنوز هم توسعهٔ ترفندهایی برای به حداقل رساندن آن در سامانه‌های اسمز معکوس که در حال حاضر با غشاهای معمولی کار می‌کنند، مورد توجه است [۱۹].

هدف این پژوهش کاهش پلاریزاسیون غلظتی بر روی سطح غشای اسمز معکوس به کمک بهینه‌سازی شرایط عملیاتی به صورت آزمایشگاهی و هم‌چنین اثرات فشار، pH، غلظت و نوع ماده بر میزان پلاریزاسیون غلظتی در فرایند اسمز معکوس بررسی می‌شود.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱ مواد

در این کار تحقیقاتی از غشای صنعتی کامپوزیتی پلی‌آمید BW30-400 ساخت کشور آمریکا و از محلول‌های اسید هیدروکلریک (Merck, >99.5%, HCl)، هیدراکسید سدیم (Merck, >99.5%, NaOH) و نمک کلرید سدیم (Merck, >99.5%, NaCl) در آب مقطر (کیما، ایران) برای فرایند اسمز معکوس استفاده شده‌است.

برای استفاده از روش تاگوچی ابتدا باید عوامل تأثیرگذار بر درصد دفع نمک تعداد سطوح آزمایش را مشخص کرد که این عوامل شامل شامل غلظت نمک در خوراک، اختلاف فشار در سمت غشا، دبی جریان خوراک و pH جریان ورودی است که عوامل ذکر شده به ازای سه سطح مختلف، آزمایش می‌شوند. عوامل و سطوح آزمایش در جدول (۱) آورده شده‌است.

1. Ex Situ
2. In Situ

جدول ۲. شرایط آزمایشگاهی در هر آزمایش.

Table 2. Experimental conditions in each experiment.

No test	Salt concentration (ppm)	Pressure (bar)	Flow (lit/min)	pH
1	1000	14	0.5	4
2	1000	12	0.75	7
3	1000	10	1	9
4	1500	14	0.75	9
5	1500	12	1	4
6	1500	10	0.5	7
7	2000	14	1	7
8	2000	12	0.5	9
9	2000	10	0.75	4

$$J = \frac{\Delta V}{A_m \cdot \Delta t} \quad (1)$$

که در رابطه بالا A_m مساحت مؤثر غشا، ΔV حجم آب نفوذ کرده در غشا، Δt زمان است. همچنین برای درصد دفع نمک (R) از رابطه (۲) استفاده می‌شود که C_p غلظت نمک نفوذ کرده و C_f غلظت نمک در خوراک است.

$$R = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100 \quad (2)$$

جدول ۱. عامل و ۳ سطح به‌ازای هر عامل.

Table 1. Factors and 3 levels per agent.

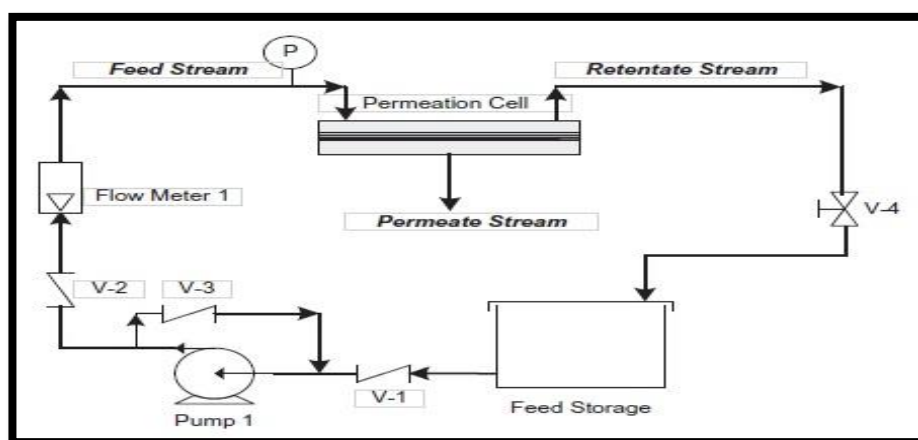
Factor	Level	Leve2	Leve3
Salt concentration(ppm)	1000	1500	2000
Pressure (bar)	14	12	10
Flow(lit/min)	0.5	0.75	1
PH	4	7	9

با وارد کردن ۴ عامل فوق در بخش قبلی و هرکدام در ۳ سطح به نرم‌افزار، تعداد آزمایش‌های مورد نیاز و شرایط هر آزمایش به‌صورت جدا مشخص خواهد شد. تعداد عوامل و سطوح که به‌ترتیب ۴ و ۳ هستند. تعداد آزمایش‌های مورد نیاز به‌روش تاگوچی که ۹ آزمایش است، به‌دست آمد. به‌منظور تسهیل در ارزیابی شرایط آزمایشگاهی در هر آزمایش در جدول (۲) این موارد آورده شده‌است.

۲-۲ ارزیابی عملکرد غشا

شکل (۱) سامانه اسمز معکوس (RO) با پالایش جریان متقابل را برای ارزیابی عملکرد غشای صنعتی پلی‌آمید نشان می‌دهد. لذا باتوجه به جدول (۲) عملکرد غشا، برای کاهش پلاریزاسیون غلظتی بررسی خواهد شد.

از معادله (۱) برای به‌دست‌آوردن شار آب خالص و تراوایی آب در غشا استفاده می‌شود [۲۰].



شکل ۱. سامانه اسمز معکوس (RO) برای ارزیابی عملکرد غشا.

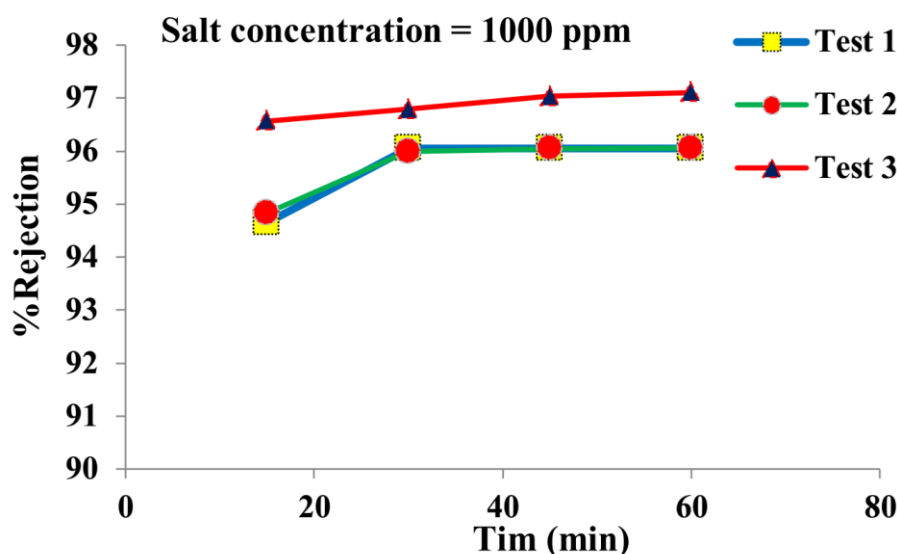
Figure. 1. Reverse Osmosis System (RO) to evaluate membrane performance.

۳-۲ بررسی عملکرد غشا با محلول نمک با غلظت ۱۰۰۰ppm
باتوجه به شکل (۲) در زمان‌های بین ۱۰ تا ۲۰ دقیقه میزان دفع نمک به وسیله غشا افزایش می‌یابد و پس از گذشت زمان ۳۰ دقیقه تغییر مشاهده نمی‌شود. این روند افزایش در آزمایش ۳ (فشار ۱۰ bar، دبی ۱ Lit/min و pH=۹) بیشتر است که در این شرایط عملکرد غشا بهتر بود و درصد دفع نمک ۹۷/۱۱ درصد است. همچنین شار آب عبوری از غشای کامپوزیتی پلی‌آمید در فرایند اسمز معکوس ۳۰/۱ L/m².hr است که نسبت به آزمایش ۱ و ۲ پایین‌تر است.

۴-۲ بررسی عملکرد غشا با محلول نمک با غلظت ۱۵۰۰ppm
شکل (۳) تغییرات درصد دفع نمک برحسب زمان‌های متفاوت با استفاده از غشای صنعتی کامپوزیتی پلی‌آمید با محلول نمک با غلظت ۱۵۰۰ ppm را نشان می‌دهد. باتوجه به شکل (۳) با گذشت زمان در شرایط مختلف آزمایش میزان دفع نمک به وسیله غشا افزایش می‌یابد. این روند افزایش در آزمایش شماره ۶ (فشار

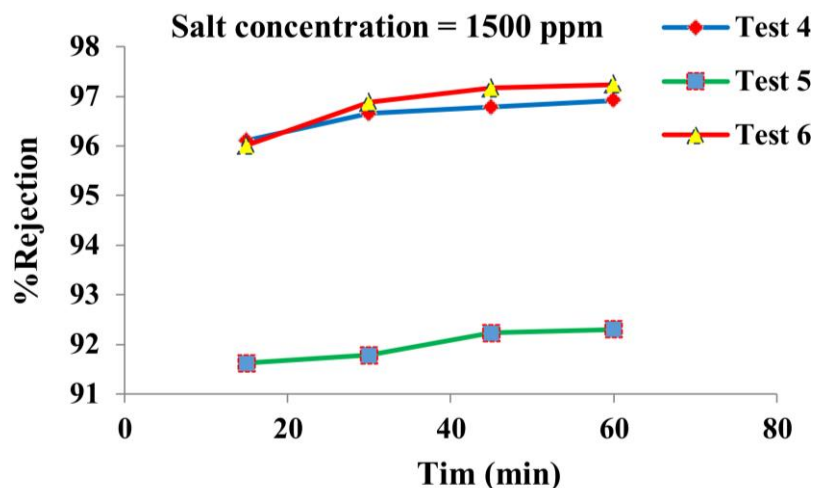
۱۲ bar، دبی ۰/۵ lit/min و pH=۷) بیشتر است که در این شرایط عملکرد غشا بهتر بود و درصد دفع نمک ۹۷/۲۴ درصد است که نسبت به همه آزمایش‌های انجام شده درصد دفع نمک با غشا بالاتر است. همچنین در این شرایط شار آب عبوری از غشای کامپوزیتی پلی‌آمید در فرایند اسمز معکوس ۴۱/۰۴ L/m².hr است که نسبت به آزمایش شماره ۴ و ۵ بالاتر است.

۵-۲ بررسی عملکرد غشا با محلول نمک با غلظت ۲۰۰۰ppm
نتایج شکل (۴) نشان می‌دهد که با گذشت زمان درصد دفع نمک در آزمایش ۷ و ۸ روند نزولی دارد؛ ولی در آزمایش ۹ روند صعودی دارد. بیشترین درصد دفع نمک با غشای کامپوزیتی پلی‌آمید مربوط به شرایط آزمایش ۷ (فشار ۱۴ bar، دبی ۱ lit/min و pH=۷) است. در این شرایط عملکرد غشا بهتر بود و درصد دفع نمک ۹۷/۱۸ درصد است. همچنین در این شرایط شار آب عبوری از غشای کامپوزیتی پلی‌آمید در فرایند اسمز معکوس ۳۵/۵۷ L/m².hr است که نسبت به آزمایش شماره ۸ و ۹ بالاتر است.



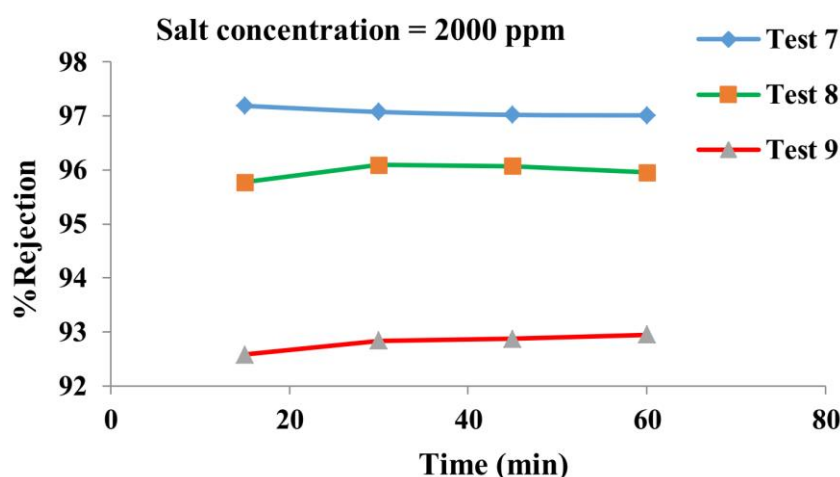
شکل ۲. درصد دفع نمک به وسیله غشا در زمان‌های متفاوت با محلول نمک با غلظت ۱۰۰۰ ppm.

Figure 2. The percentage of salt removal by the membrane at different times with a salt solution with a concentration of 1000 ppm.



شکل ۳. درصد دفع نمک به وسیله غشا در زمان‌های متفاوت با محلول نمک با غلظت ۱۵۰۰ ppm.

Figure 3. The percentage of salt removal by the membrane at different times with a salt solution with a concentration of 1500 ppm.



شکل ۴. درصد دفع نمک به وسیله غشا در زمان‌های متفاوت با محلول نمک با غلظت ۲۰۰۰ ppm.

Figure 4. The percentage of salt removal by the membrane at different times with a salt solution with a concentration of 2000 ppm.

که محلول نمک با غلظت ۱۵۰۰ ppm است عملکرد غشای کامپوزیتی پلی‌آمید بهتر است که در این شرایط بیشترین شار آب عبوری از غشا را داریم که می‌توان این افزایش شار آب عبوری از غشا را مربوط به کاهش میزان پلاریزاسیون غلظتی بر روی سطح غشای کامپوزیتی پلی‌آمید دانست.

جدول (۳) خلاصه‌ای از داده‌های مربوط به درصد دفع نمک و شار آب عبوری از غشا را در شرایط مختلف آزمایش نشان داده‌است.

نتایج حاصل از بررسی شکل‌های درصد دفع نمک به وسیله غشا در زمان‌های متفاوت با شرایط مختلف نشان داد که عامل فشار باتوجه به این که به عنوان نیرو محرکه برای جداسازی در فرایندهای اسمز معکوس (RO) است و مهم‌ترین مشخصه برای بهبود سامانه اسمز معکوس محسوب می‌شود؛ با افزایش فشار درصد دفع نمک روند افزایشی محسوسی ندارد، لذا در فشار ۱۰ bar نسبت به فشار ۱۲ bar و ۱۴ bar درصد دفع نمک به وسیله غشای کامپوزیتی پلی‌آمید روند افزایشی بهتری را نشان داده‌است. همچنین در حالتی

جدول ۳. نتایج مربوط به درصد دفع نمک و شار آب عبوری از غشا در شرایط مختلف آزمایش.

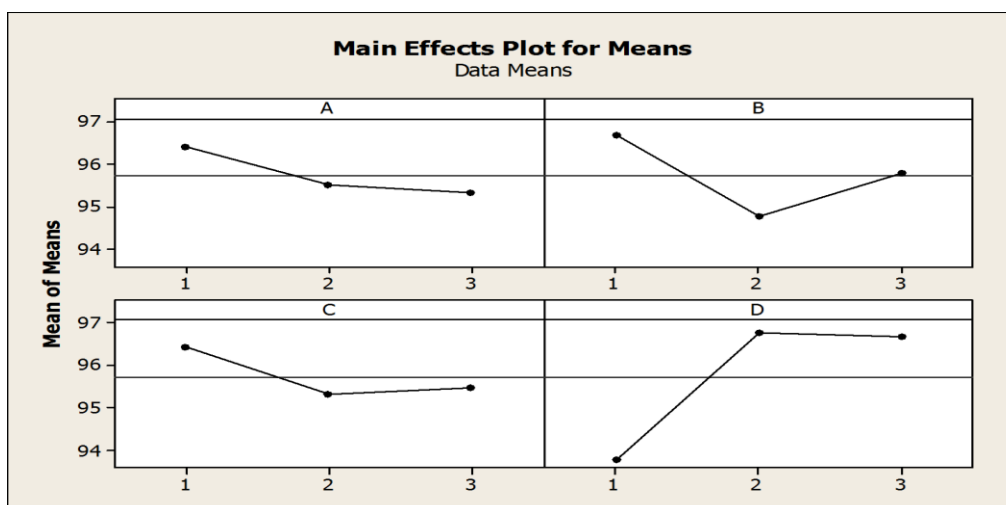
Table 3. The results related to the percentage of salt removal and water flux passing through the membrane in different test conditions.

No test	Salt concentration (ppm)	Pressure (bar)	Flow (lit/min)	pH	Flow of passing water (L/m ² .hr)	salt removal (%)
1	1000	14	0.5	4	35.57	96.05
2	1000	12	0.75	7	35.57	95.98
3	1000	10	1	9	30.1	97.11
4	1500	14	0.75	9	41.04	96.20
5	1500	12	1	4	32.83	96.3
6	1500	10	0.5	7	41.04	97.24
7	2000	14	1	7	35.57	97
8	2000	12	0.5	9	32.83	95.95
9	2000	10	0.75	4	24.62	95.95

شد، هدف از تحلیل ANOVA به دست آوردن نسبت واریانس هر یک از چهار عامل غلظت نمک، فشار، دبی و pH نسبت به واریانس کل است. از آنجا که هر چهار عامل در این تحقیق، سه سطحی در نظر گرفته شده‌اند، میزان درجه آزادی برای مقایسه مقادیر پاسخ در سه سطح از هر عامل برابر با ۲ است و کل درجه آزادی برابر ۸ حساب شد. بنابراین درجه آزادی برای خطا صفر حساب شد که این امر به دلیل یکسان بودن مقادیر درجه آزادی است. در جدول (۴) نیز نتایج حاصل از انجام آزمون تحلیل واریانس به‌طور مختصر آورده شده است.

در این کار تحقیقاتی از نرم‌افزار Minitab 16 و تحلیل تاگوچی و روش آماری تحلیل واریانس ANOVA، میزان سهم عوامل مختلف و همچنین شرایط بهینه برای بیشترین میزان دفع نمک تعیین شد. با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و نرم‌افزار، شکل (۵) ترسیم شده است. در شکل (۵) شاخص‌های A غلظت نمک، B فشار، C دبی و pH، D است.

برای پیدا کردن اهمیت نسبی مشخصه‌ها بر روی هر کدام از خروجی‌ها از روش آماری آنالیز واریانس استفاده شده است. در این مرحله داده‌ها به وسیله آزمون ANOVA و با نرم‌افزار تحلیل آماری



شکل ۵. اثر مشخصه‌های در نظر گرفته شده در سطوح مختلف بر درصد دفع نمک.

Figure 5. The effect of parameters considered at different levels on salt removal percentage.

جدول ۴. نتایج حاصل از تحلیل واریانس ANOVA بر دفع نمک.

Table 4. The results of ANOVA analysis of variance on salt excretion.

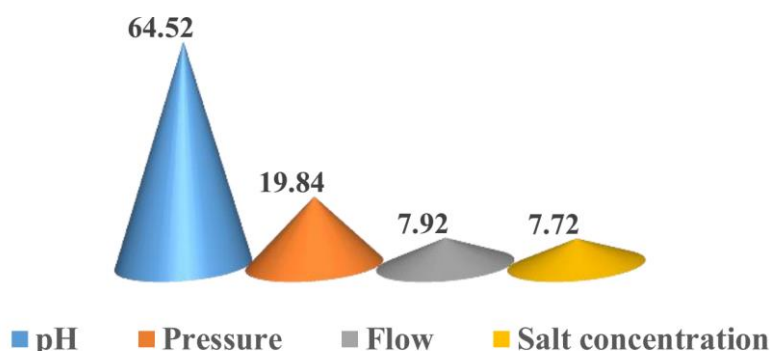
No.	Factor	Degrees of freedom	Sum of squares	variance	Percentage share
1	Salt concentration	2	2.0904	1.04520	7.72
2	Pressure	2	5.3715	2.68573	19.84
3	Flow	2	2.1437	1.07178	7.92
4	pH	2	17.4619	8.69099	64.52
5	Total	8	27.0675	13.4938	100

تأثیر دفع نمک با تغییر سطوح مختلف، شرایط بهینه دفع نمک با انجام محاسبات آماری توسط نرم‌افزار به شرح جدول (۵) تعیین شد. باتوجه به شکل (۶) و جدول (۵) بهترین درصد دفع نمک مربوط به شرایط آزمایش با غلظت نمک ۱۵۰۰ ppm (سطح ۲)، فشار ۱۰ bar (سطح ۱)، دبی ۰/۵ Lit/min (سطح ۱) و pH ۷ (سطح ۲) است. مقایسه نتایج پیش‌بینی شده در نرم‌افزار با نتایج آزمایشگاهی، درصد دفع نمک به وسیله غشای کامپوزیتی پلی‌آمید در فرایند اسمز معکوس براساس شرایط بهینه در جدول (۶) گزارش شده است.

مشخصه‌های تأثیرگذار بر درصد دفع نمک در شکل (۶) آورده شده است. درصد تأثیر عوامل بر میزان دفع نمک در محدوده سطوح در نظر گرفته نشان می‌دهد که PH با ۶۴/۵۲ درصد عامل تأثیرگذار است و بیشترین سهم را در دفع نمک دارد و در مقابل غلظت نمک با ۷/۷۲ درصد، تأثیر کمی بر این فرایند دارد.

۳. ارزیابی شرایط بهینه

پس از بررسی‌های مربوط به شدت اثر عوامل انتخابی و نیز چگونگی



شکل ۶. درصد سهم مشخصه‌های تأثیرگذار بر میزان دفع نمک با غشای کامپوزیتی پلی‌آمید.

Figure 6. Percentage contribution of parameters influencing the rate of salt removal by polyamide composite membrane.

جدول ۵. مقادیر بهینه مشخصه‌های تأثیرگذار حساب شده به وسیله نرم‌افزار.

Table 6. Optimal values of effective parameters calculated by software.

Factor	Optimal level	Optimum amount
Salt concentration	1	ppm 1500
Pressure	1	bar 10
Flow	1	lit/min 0.5
pH	2	7

جدول ۶. مقایسه نتایج پیش‌بینی‌شده در نرم‌افزار با نتایج آزمایشگاهی.

Table 6. Comparison of predicted results in the software with experimental results

Parametr	Value
Salt concentration	ppm 1500
Pressure	bar 10
Flow	lit/min 0.5
pH	7
percentage of salt removal Experimental results	L/m ² .hr.24.97
percentage of salt removal Software results	L/m ² .hr.99.05
Percentage error	1.73

مراجع

- [1] Dévora-Isiordia, G. E., Cásares-De la Torre, C. A., Morales-Mendivil, D. P., Montoya-Pizeno, R., Velázquez-Limón, N., Aguilar-Jiménez, J. A., & Ríos-Arriola, J. (2022). Evaluation of concentration polarization due to the effect of feed water temperature change on reverse osmosis membranes. *Membranes*, 13(1), 3.
- [2] Vorosmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., & Lammers, R. B. (2000). Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *science*, 289(5477), 284-288.
- [3] Wei, W., Zou, X., Ji, X., Zhou, R., Zhao, K., & Wang, Y. (2021). Analysis of Concentration Polarisation in Full-Size Spiral Wound Reverse Osmosis Membranes Using Computational Fluid Dynamics. *Membranes*, 11(5), 353.
- [4] Shang, C., Pranantyo, D., & Zhang, S. (2020). Understanding the roughness-fouling relationship in reverse osmosis: mechanism and implications. *Environmental science & technology*, 54(8), 5288-5296.
- [5] Gu, B., Adjiman, C. S., & Xu, X. Y. (2017). The effect of feed spacer geometry on membrane performance and concentration polarisation based on 3D CFD simulations. *Journal of Membrane Science*, 527, 78-91.
- [6] Salehi, K., Esfandiari, N., Shekoohi, K., & Haghighi, A. H. (2022). An Overview of Energy Recovery Devices in Seawater Desalination by Reverse Osmosis Method. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 21(123), 74-84. [In Persian]

۴. نتیجه‌گیری

- با افزایش زمان برای آزمایش‌های (۴،۵) درصد دفع نمک با غشای کامپوزیتی پلی‌آمید در فرایند اسمز معکوس (RO) برای شرایط مختلف آزمایش، روند صعودی دارد.

- بهترین عملکرد غشای کامپوزیتی پلی‌آمید برای دفع نمک در شرایط غلظت نمک ۱۵۰۰ ppm، فشار ۱۰ bar، دبی ۰/۵ Lit/min و pH=۷ با مقدار ۹۷/۲۴ L/m².hr درصد حاصل شد.

- عامل فشار باتوجه‌به اینکه به‌عنوان نیرومحركه برای جداسازی در فرایندهای اسمز معکوس (RO) است و مهم‌ترین مشخصه برای بهبود سامانه اسمز معکوس محسوب می‌شود، با افزایش فشار درصد دفع نمک روند افزایشی محسوسی ندارد؛ لذا در فشار ۱۰ bar نسبت‌به فشار ۱۲ bar و ۱۴ bar درصد دفع نمک به‌وسیله غشای کامپوزیتی پلی‌آمید روند افزایشی بهتری را نشان داده‌است.

- در حالتی که محلول نمک با غلظت ۱۵۰۰ ppm است، بیشترین شار آب عبوری از غشای کامپوزیتی پلی‌آمید در فرایند اسمز معکوس ۴۱/۰۴ L/m².hr است که در شرایط آزمایش ۶ به‌دست آمد که می‌توان این افزایش شار آب عبوری را مربوط‌به کاهش میزان پلاریزاسیون غلظتی برروی سطح غشای کامپوزیتی پلی‌آمید دانست.

- [7] Toh, K. Y., Liang, Y. Y., Lau, W. J., & Weihs, G. F. (2020). 3D CFD study on hydrodynamics and mass transfer phenomena for SWM feed spacer with different floating characteristics. *Chemical Engineering Research and Design*, 159, 36-46.
- [8] Haidari, A. H., Heijman, S. G. J., & Van Der Meer, W. G. J. (2018). Optimal design of spacers in reverse osmosis. *Separation and purification technology*, 192, 441-456.
- [9] Medina, J., Antonio, J., (2000). Desalinización de aguas salobres y de mar en ósmosis inversa, Mundi Prensa, Madrid, España.
- [10] Robles-Lizárraga, A., Martínez-Macías, M. D. R., Encinas-Guzmán, M. I., Larraguibel-Aganza, O. D. J., Rodríguez-López, J., & Dévora-Isiordia, G. E. (2020). Design of reverse osmosis desalination plant in Puerto Peñasco, Sonora, México. *Desalination Water Treat*, 175, 1-10.
- [11] Najid, N., Kouzbour, S., Gourich, B., Necibi, M. C., & Elmidaoui, A. (2024). Comparison of Different Membrane Technologies for Boron Removal from Seawater. In *Membrane Technologies for Heavy Metal Removal from Water* (pp. 143-176). CRC Press.
- [12] Voutchkov, N. (2013). Desalination engineering: planning and design.
- [13] Solís-Carvajal, C. A., Vélez Pasos, C. A., & Ramírez-Navas, J. S. (2022). Membrane technology: Ultrafiltration. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 11(22), 26-36.
- [14] Hoang, M. T., Pham, T. D., Verheyen, D., Nguyen, M. K., Pham, T. T., Zhu, J., & Van der Bruggen, B. (2020). Fabrication of thin film nanocomposite nanofiltration membrane incorporated with cellulose nanocrystals for removal of Cu (II) and Pb (II). *Chemical Engineering Science*, 228, 115998.
- [15] Sun, J., Qian, X., Wang, Z., Zeng, F., Bai, H., & Li, N. (2020). Tailoring the microstructure of poly (vinyl alcohol)-intercalated graphene oxide membranes for enhanced desalination performance of high-salinity water by pervaporation. *Journal of Membrane Science*, 599, 117838.
- [16] Baghdadi, Y. N., Alnouri, S. Y., Matsuura, T., & Tarboush, B. J. A. (2018). Temperature Effects on Concentration Polarization Thickness in Thin-Film Composite Reverse Osmosis Membranes. *Chemical Engineering & Technology*, 41(10), 1905-1912.
- [17] Ehsani, A., SoleimaniMehri, A., Hajian Nejad, D., Bataqwa, H., & Zanganeh, M. (2019). Investigation of the effect of operating parameters on the performance of industrial reverse osmosis membranes relying on the removal of carbonate and bicarbonate. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 17, 47-59. [In Persia]
- [18] Li, T., Tu, Q., & Li, S. (2019). Molecular dynamics modeling of nano-porous centrifuge for reverse osmosis desalination. *Desalination*, 451, 182-191.
- [19] Ríos-Arriola, J., Velázquez, N., Aguilar-Jiménez, J. A., Dévora-Isiordia, G. E., Cásares-de la Torre, C. A., Corona-Sánchez, J. A., & Islas, S. (2022). State of the Art of Desalination in Mexico. *Energies*, 15(22), 8434.
- [20] Rahimpour, A., Jahanshahi, M., Mollahosseini, A., & Rajaeian, B. (2012). Structural and performance properties of UV-assisted TiO₂ deposited nano-composite PVDF/SPES membranes. *Desalination*, 285, 31-38.