

CFD Simulation of the Desalination Process of Salt Water by Direct Contact Membrane Distillation (DCMD)

Reza Kolkol Salkhori¹, Hamid Reza Nazif^{2✉}

1. Mechanical Engineering Department, Imam Khomeini International University, Ghazvin, Iran. .

E-mail: rezasalkhori1371@gmail.com

2. Corresponding author, Mechanical Engineering Department, Imam Khomeini International University, Ghazvin, Iran. E-mail:

nazif@eng.ikiu.ac.ir

Article Info

ABSTRACT

Article type: research paper

Article history:

Received 4 February 2024

Received in revised form 10 April 2024

Accepted 23 June 2024

Published online 25 August 2024

Keywords:

Water desalination

Direct contact membrane distillation

Simulation

Computational fluid dynamics

This research models the desalination process using a direct contact membrane distillation method in a flat plate configuration with a PTFE membrane. The model employs computational fluid dynamics to solve the differential equations for momentum, heat, and mass transfer. Convective heat transfer in the membrane region is neglected, and mass transfer is described by empirical equations. The simulation results were then validated against available experimental data. Increasing the feed saltwater temperature from 42°C to 78°C led to a significant rise in permeate flux, from 3.59 L.m⁻².hr⁻¹ to 18.64 L.m⁻².hr⁻¹. The results demonstrate that the distillation flux is directly proportional to the stream velocities and membrane porosity, but inversely proportional to the feed salt concentration, permeate inlet temperature, membrane thickness, pore tortuosity, and membrane conductive heat transfer coefficient.

Cite this article: Kolkol Salkhori, Nazif (2024). CFD Simulation of the Desalination Process of Salt Water by Direct Contact Membrane Distillation (DCMD), *Journal of Separation Science and Engineering*, 16 (1), 1-16. <http://doi.org/10.22103/JSSE.2024.4332>



© The Author(s).

Publisher: Shahid Bahonar University of Kerman

شبیه سازی فرآیند شیرین سازی آب شور به وسیله تقطیر غشایی تماس مستقیم به روش دینامیک سیالات محاسباتی

رضا کل سلخوری^۱، حمیدرضا نظیف^۲ ✉

۱. گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین، ایران. رایانامه: rezasalkhori1371@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی، قزوین، ایران. رایانامه: nazif@eng.ikiu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: علمی پژوهشی	در این پژوهش، فرآیند نمک زدایی با روش تقطیر غشایی تماس مستقیم در پیکربندی صفحه تخت با غشایی از جنس پلی تترافلورواتیلن (PTFE) به روش دینامیک سیالات محاسباتی، با حل همزمان معادلات دیفرانسیلی انتقال ممنتوم، حرارت و جرم، مدل سازی شده است. در ناحیه غشاء از اثرات جابجایی حرارتی صرف نظر شده و از معادلات تجربی برای انتقال جرم بهره برداری شده است. در نهایت نتایج شبیه سازی با داده های تجربی موجود اعتبارسنجی گردید. بررسی ها نشان می دهد با افزایش دمای آب شور خوراک ورودی به تجهیز از ۴۲ به ۷۸ درجه سانتی گراد، نرخ تولید آب شیرین از $3.59 \text{ L.m}^{-2}.\text{hr}^{-1}$ به $18.64 \text{ L.m}^{-2}.\text{hr}^{-1}$ افزایش می یابد. همچنین تحقیق حاضر نشان می دهد که شار فرآیند تقطیر، با سرعت جریان ها و تخلخل غشاء، رابطه مستقیم، اما با غلظت نمک خوراک ورودی، دمای ورودی جریان نفوذ، ضخامت غشاء، پیچ و خم منافذ غشاء و ضریب انتقال حرارت هدایتی غشاء، رابطه عکس دارد.
تاریخچه مقاله: دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۵ دریافت پس از اصلاح: ۱۴۰۳/۱/۲۲ پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۴/۳ تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۶/۴	
کلمات کلیدی: نمک زدایی آب تقطیر غشایی تماس مستقیم شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی	

استناد: کل سلخوری، نظیف (۱۴۰۳). شبیه سازی فرآیند شیرین سازی آب شور به وسیله تقطیر غشایی تماس مستقیم به روش دینامیک سیالات محاسباتی. نشریه علوم و مهندسی جداسازی، (۱) ۱۶، ۱-۱۶.

<http://doi.org/10.22103/JSSE.2024.4332>



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه شهید باهنر کرمان

۱- مقدمه

اگرچه بخش بزرگی از زمین پوشیده از دریاها و اقیانوس‌ها است، اما مقدار بسیار کمی از آب آن‌ها شیرین است. طبق آمار بیش از ۹۶ درصد آب موجود در کره زمین را آب شور و بقیه را آب شیرین و نیمه شور تشکیل داده‌اند. در بسیاری از نقاط جهان، دسترسی مردم به آب آشامیدنی با جدی شدن خطر تغییرات اقلیمی و افزایش جمعیت، با بحران مواجه شده است. سازمان ملل پیش‌بینی کرده است تا سال ۲۰۵۰ بین ۲ تا ۷ میلیارد نفر با کمبود آب مواجه خواهند شد [۱]. امروزه نمک‌زدایی و تصفیه آب به راه حلی بسیار مقرون به صرفه برای مقابله با کمبود آب شیرین آشامیدنی در مناطق گرمسیری و فراساحلی تبدیل شده است. به طور کلی به فرآیند حذف نمک و مواد معدنی آلاینده از آب شور دریا به منظور دستیابی به آب تمیز و خالص جهت آشامیدن و مصارف صنعتی و خانگی، نمک‌زدایی گفته می‌شود [۲]. دو فناوری اساسی برای نمک‌زدایی آب دریا وجود دارد: تقطیر حرارتی و تقطیر غشایی. تقطیر حرارتی بر اساس تبخیر و تراکم عمل می‌کند. انرژی حرارتی، آب شور را به بخار تبدیل کرده و محصول نهایی آب مقطر و انرژی خواهد بود. عمده نمک‌ها غیرفرار هستند و در همان مخزن اولیه باقی می‌مانند [۳]. در تقطیر غشایی از غشاء خاصی استفاده می‌شود. غشاء، لایه‌ای نازک است که معمولاً از مواد متخلخل^۱ ساخته می‌شود. غشاهایی که برای نمک‌زدایی آب استفاده می‌شوند عموماً به گونه‌ای تولید می‌شوند که مولکول‌های آب را از خود عبور داده و از عبور مولکول‌های آلاینده و باکتری‌ها و ویروس‌ها جلوگیری به عمل آورند. جنس غشاهای معمولاً طیف وسیعی از مواد شامل پلیمرها و مواد غیر پلیمری مانند فلزات و سرامیک‌ها و کامپوزیت‌ها را در بر می‌گیرد [۴]. در فرآیندهای غشایی عموماً فشار و یا نیروی الکتریکی نیروی محرکه هستند. در تقطیر غشایی این نیروی محرکه، حرارتی است و این اختلاف دما مولکول‌های آب را به صورت بخار از منافذ کوچکی که در غشاء متخلخل وجود دارند عبور می‌دهد.

روش‌های اسمز معکوس (RO)^۲، میکرو فیلتراسیون (MF)^۳، الترافیلتراسیون (UF)^۴ و نانوفیلتراسیون (NF)^۵ از روش‌های غشایی هستند که با نیروی محرکه فشار کار می‌کنند.

الکترودیالیز (ED)^۶ و الکترودیالیز معکوس (RED)^۷ هم از روش‌هایی هستند که بر اساس نیروی محرکه الکتریکی کار می‌کنند [۵].

تقطیر غشایی (MD)^۸، روشی ساده و پرکاربردترین پیکربندی در بین دیگر پیکربندی‌ها است که در آن دو محلول با غلظت و دمای متفاوت در دو کانال خوراک و نفوذ توسط یک غشای نیمه‌تراوا از هم جدا می‌شوند. آب به شکل بخار از یک طرف به طرف دیگر غشاء نفوذ می‌کند و از عبور نمک جلوگیری می‌شود. مانند اسمز معکوس، گرادیان فشار و غلظت، نیروی محرکه هستند. اما بر خلاف اسمز معکوس که نیروی مکانیکی را برای تحمیل یک فشار معکوس برای به حرکت درآوردن نمک‌زدایی اعمال می‌کند، DCMD^۹، نیروی حرارتی را اعمال می‌کند که موجب ایجاد اختلاف فشار بخار بین آب نفوذ و آب دریا برای هدایت آب در سراسر غشاء می‌شود [۶]. در این راستا محققان مطالعات زیادی را از اواخر دهه ۱۹۶۰ میلادی پیرامون این مباحث ارائه کرده‌اند. در قرن حاضر بیشتر مطالعات بر شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و تجاری‌سازی سیستم‌های تقطیر غشایی متمرکز بوده است.

قدیری و همکاران [۷] یک مدل جامع دو بعدی برای پیش‌بینی انتقال آب در تماس دهنده‌های غشایی نانومتخلخل با نرم افزار کامسول شبیه‌سازی کردند. دستگاه تقطیر غشایی در نظر گرفته شده یک غشای صفحه تخت ناهمسو برای تولید آب خالص از آب شور بود. مدل توسعه‌یافته معادلات انتقال اصلی گرما، جرم و ممنتوم را فرموله کرده و از تکنیک‌های دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی عددی معادلات مدل استفاده شد. آنها ترکیبی از جریان نادسن^{۱۰} و جریان ویسکوز^{۱۱} را در مدل برای تخمین نرخ انتقال جرم در داخل منافذ غشاء استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در نواحی مجاور دیواره غشاء، تفاوت دما قابل توجه است که دلیل آن وجود یک لایه مرزی دما در نزدیکی دیواره غشاء می‌باشد که باعث کاهش اختلاف دمای در این ناحیه می‌شود.

بهمن یار و همکاران [۸] فرآیند تقطیر غشایی تماس مستقیم را با نرم‌افزار متلب مدل‌سازی کردند. آن‌ها دمای ورودی

⁷ Reverse Electrodialysis

⁸ Membrane Distillation

⁹ Direct Contact Membrane Distillation

¹⁰ Knudsen flow

¹¹ Viscous flow

¹ Porous materials

² Reverse osmosis

³ Micro-filtration

⁴ Ultra-filtration

⁵ Nano-filtration

⁶ Electrodialysis

استفاده شد. این مدل برای پیش‌بینی اختلاف دما در سطوح غشاء و سپس محاسبه اختلاف فشار بخار که منجر به شار نفوذی می‌شود استفاده شد و سپس نتایج مدل با داده های تجربی اعتبار سنجی شد. آنها توانستند شار نفوذی ۱۰۰ کیلوگرم بر مترمربع در ساعت در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد برای سمت تغذیه گرم و ۵ درجه سانتی‌گراد برای جریان سمت سرد به دست بیاورند و به راندمان تبخیری (حرارتی) از ۷۰٪ تا ۹۵٪ و نرخ بهره وری خروجی از ۰.۸ تا ۱.۲ دست پیدا کنند.

۲- بیان مساله

در این پژوهش، فرآیند نمک زدایی با روش تقطیر غشایی تماس مستقیم در پیکربندی صفحه تخت در هر دو حالت جریان همسو و ناهمسو به روش دینامیک سیالات محاسباتی، با حل همزمان معادلات دیفرانسیلی انتقال ممنتوم، حرارت و جرم حل شده است. در ناحیه غشاء از اثرات جابجایی حرارتی صرف‌نظر شده و از معادلات تجربی برای انتقال جرم بهره برداری شده است. در مطالعه حاضر فرضیات زیر جهت کاهش هزینه و زمان محاسبات و نزدیکی مدل به پدیده فیزیکی و ساده سازی معادلات برای پیاده سازی معادلات حاکم ارائه شده است.

- شرایط پایا است.
- غشاء ۱۰۰ درصد آب‌گریز است و فقط بخار آب از حفرات غشاء عبور می‌کند.
- با توجه به محاسبات، عدد رینولدز در حدود ۴۶۸ است و جریان آرام^{۱۴} در نظر گرفته می‌شود [۱۲].
- حرکت بدون لغزش روی مرز کانال های خوراک و نفوذ
- نادیده گرفتن اتلاف حرارتی به محیط
- عدم هرگونه واکنش شیمیایی در غشاء

هندسه سیستم DCMD به صورت دوبعدی و از نوع صفحه تخت^{۱۵} و با ابعاد موجود در شکل ۱ در نظر گرفته شد.

خوراک، سرعت و غلظت ورودی را در ۸ الی ۱۰ سطح تغییر دادند و مجموعاً ۸۰۰ نقطه آزمایشی تعیین کردند.

آن‌ها آزمایشات را با غشاهای PP^{۱۲} و PTFE^{۱۳} انجام دادند و نتیجه گیری کردند که بهینه ترین حالت برای ضخامت غشاء بین ۳۰ تا ۶۰ میکرومتر است. همچنین دریافتند افزایش دمای خوراک، منجر به افزایش پلاریزاسیون غلظتی و دمایی می‌شود. در حالی که با افزایش سرعت مجرای خوراک، پلاریزاسیون غلظتی و دمایی کاهش یافت. لوینه و همکاران [۹] مطالعه ای در مورد مدل سازی فرآیند تقطیر غشایی تحت خلاء انجام دادند. آن‌ها خوراک ورودی را آب خلیج فارس در نظر گرفتند و از نرم افزار متلب برای شبیه سازی استفاده کردند. در این مقاله پارامترهای مختلفی همچون دمای خوراک ورودی، میزان فشار خلاء در طرفین تراویده، غلظت خوراک ورودی، ضریب انتقال حرارت، سرعت خوراک و بعضی ویژگی‌های غشاء مثل تخلخل و ضخامت بررسی شدند. آنها نشان دادند زمانی که اندازه منافذ بسیار کوچک باشد، تقریباً هیچ تفاوت مهمی برای انتخاب مواد غشایی وجود ندارد. در این مدل سازی نتیجه گرفته شد که با افزایش دمای خوراک، سرعت خوراک، تخلخل و اندازه منافذ، شار افزایش یافته و همینطور با افزایش فشار خلاء، غلظت خوراک ورودی و ضخامت، شار سیستم کاهش می‌یابد.

الیوی و همکاران [۱۰] یک مدل دوبعدی که مکانیسم‌های انتقال گرما و جرم را در داخل ماژول DCMD شبیه سازی می‌کند، ارائه دادند. این مدل رفتار فرآیند را در فازهای متغیر زمان و حالت پایدار به‌ویژه زمانی که توسط منبع انرژی متناوب، مانند انرژی خورشیدی هدایت می‌شود، مورد مطالعه قرار داد. علاوه بر این، اعتبارسنجی تجربی شامل فاز تغییر زمانی است، که در آن دمای ورودی خوراک از ۳۰ درجه سانتی‌گراد تا ۷۵ درجه سانتی‌گراد با ۰.۱ درجه سانتی‌گراد افزایش در هر ۲ دقیقه متغیر بوده است.

خلیفه و همکاران [۱۱] در مقاله خود، تحقیقات جامع بر روی پارامترهای مختلف موثر بر عملکرد سیستم DCMD ارائه دادند. متغیرهای مورد بررسی شامل دمای خوراک گرم و نفوذ سرد، اختلاف و نسبت دمای خوراک-نفوذ، نرخ جریان خوراک و نفوذ، نسبت جریان خوراک به نفوذ، غلظت خوراک، اندازه منافذ غشاء، و تخریب غشا با گذشت زمان و غیره است. مدل تحلیلی، بر اساس معادلات انتقال گرما و جرم در ماژول DCMD، برای پیش‌بینی عملکرد سیستم در شرایط عملیاتی مختلف

¹⁴ Laminar flow

¹⁵ Flat sheet

¹² Polypropylene

¹³ Polytetrafluoroethylene

برای محاسبه آنتالپی تبخیر آب در محدوده دمایی موردنظر که وابسته به دماست از رابطه زیر استفاده می‌کنیم [۱۳].

$$h_{fg} = 1 \cdot 7535 (T) + 2024 \cdot 3 \quad (۶)$$

این رابطه آنتالپی بخار آب را به عنوان یک تابع ساده با توجه به دما در فشار اتمسفر نشان می‌دهد. این معادله در محدوده دمایی ۲۷۳ تا ۳۷۳ درجه کلوین قابل استفاده است [۱۳]. در رابطه انتقال حرارت در غشاء، به علت سرعت اندک جریان سیال و طبیعت نفوذی آن، از انتقال حرارت جابجایی صرف نظر شده است.

$$\nabla \cdot (k_m \nabla T_m) = 0 \quad (۷)$$

یا

$$\left[\frac{\partial^2 (k_m T_m)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (k_m T_m)}{\partial y^2} \right] = 0 \quad (۸)$$

برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی میانگین در غشاء از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$k_m = \varepsilon k_{vapor} + (1 - \varepsilon) k_{polymer} \quad (۹)$$

ضریب هدایت حرارتی بخار وابسته به دماست و از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۴].

$$k_{vapor} = 0 \cdot 0144 - 2 \cdot 16e^{-5} T_m \quad (۱۰)$$

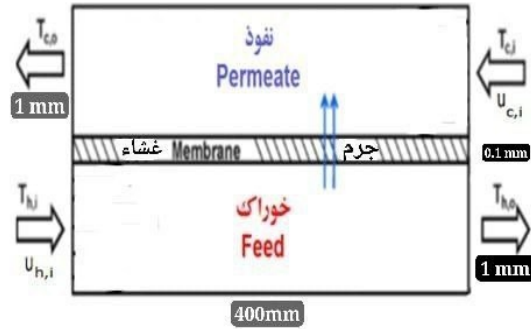
$$+ 1 \cdot 32e^{-7} T_m^2$$

در روابط بالا T_m بیانگر دمای غشاء می‌باشد. معادله انتقال جرم (غلظت آب) برای بررسی انتقال آب از ناحیه غلیظ به ناحیه رقیق در حالت کلی به شکل زیر نوشته می‌شود [۱۵].

$$\frac{\partial C_w}{\partial t} = -u_w (\nabla \cdot C_w) - (\nabla \cdot J_w) + R_w \quad (۱۱)$$

سرعت واکنش (R_w) آب در سیستم DCMD صفر است و قانون اول انتشار فیک ($J_w = -D_w \nabla C_w$) برای محاسبه شار آب قابل استفاده است. همچنین به دلیل پایا بودن جریان در تحقیق حاضر، مقدار $\frac{\partial C_w}{\partial t}$ صفر در نظر گرفته می‌شود.

معادله توزیع غلظت آب در کانال خوراک برای آب در شرایط پایدار طبق رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.



شکل ۱. هندسه ماژول ارائه شده در مطالعه حاضر

Figure 1. Geometry of the module presented

۲-۱- معادلات حاکم

معادلات حاکم، شامل معادلات انتقال جرم، ممنتوم و انرژی است که در هر سه ناحیه کانال هایمم خوراک، کانال نفوذ و همچنین غشاء، حل می‌شوند. ممنتوم عبوری از مجاری خوراک و نفوذ با حل معادلات پیوستگی^{۱۶} و ناویه- استوکس^{۱۷} بدست می‌آید. با توجه به آرام، پایا و غیرقابل تراکم بودن جریان در این دو کانال و با فرض توسعه یافتگی جریان و ثابت بودن ویسکوزیته، از معادلات زیر بهره می‌گیریم:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_w}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial u_w}{\partial x} = 0 \quad (۲)$$

برای محاسبه دما در نقاط مختلف غشاء، معادله موازنه انرژی را در طرف خوراک و نفوذ بر پایه انتقال حرارت رسانش و جابجایی مینویسیم:

$$\rho_w C_{p,w} u_w \frac{\partial T_w}{\partial x} = \frac{\partial^2 (k_w T_w)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (k_w T_m)}{\partial y^2} \quad (۳)$$

در مرزهای مشترک غشاء/ خوراک و غشاء/ نفوذ به ترتیب پدیده تبخیر و میعان رخ می‌دهد که با استفاده از موازنه انرژی به ترتیب برای مرزهای خوراک و نفوذ به روابط زیر می‌رسیم.

$$q = -K_m \frac{\partial T}{\partial z} - J \cdot h_{fg} \quad (۴)$$

$$q = -K_m \frac{\partial T}{\partial z} + J \cdot h_{fg} \quad (۵)$$

¹⁸ Incompressible flow

¹⁶ Continuity equation

¹⁷ Navier-Stokes equation

- C_m^D مکانیزم نفوذ ملکولی^{۲۰}
- C_m^S مکانیزم نفوذ سطحی^{۲۱}
- C_m^P مکانیزم نفوذ پویزوله^{۲۲}

با توجه به اینکه در تقطیر غشایی برهم‌کنش غشاء - ملکول پایین است و ناحیه نفوذ سطحی در قیاس با ناحیه نفوذ کوچک است، می‌توان از مکانیزم نفوذ سطحی صرف‌نظر کرد [۱۷]. نفوذ پویزوله هنگامی اتفاق می‌افتد که اختلاف فشار وجود داشته باشد و ملکول‌ها به علت اختلاف فشار، حرکت و نفوذ کنند. در فرآیند DCMD چون هر دو جریان خوراک و نفوذ، تحت فشار اتمسفریک هستند و اختلاف فشار زیادی وجود ندارد. بنابراین می‌توان از مکانیزم نفوذ پویزوله نیز در برابر دو مکانیزم دیگر صرف‌نظر کرد [۱۸].

وقتی قطر منافذ بسیار کوچک باشد، برخورد ملکول - دیواره بسیار بیشتر از برخورد ملکول - ملکول است و نفوذ نادرین بر دیگر مکانیزم‌ها غلبه می‌کند و اگر برعکس باشد نفوذ ملکولی غالب است و هنگامی که هیچ کدام از برخوردها از دیگر برخوردها به طور چشم‌گیری بیشتر نباشد، ترکیبی از هر دو مکانیزم را در محاسبات دخیل می‌کنیم [۱۹]. برای اطلاع از اینکه کدام یک از این سه مکانیزم (ملکولی، نادرین و ترکیب این دو) غالب است، عدد نادرین را محاسبه می‌کنیم. عدد نادرین نسبت مسافت آزاد میانگین ملکولی (λ) به متوسط اندازه منافذ (d_p) می‌باشد. اگر $Kn > 1$ باشد، یعنی برخوردهای ملکول - دیواره از برخورد ملکول - ملکول بیشتر است و نفوذ نادرین، مکانیزم غالب است. اگر $Kn < 0.01$ باشد، در این حالت هوا در منافذ غشاء در تله می‌ماند و به دلیل حلالیت پایین هوا در آب، نفوذ ملکولی مکانیزم غالب است. حالت سوم در محاسبه عدد نادرین زمانی رخ می‌دهد که $0.01 < Kn < 1$ باشد. در این حالت ملکول‌های آب با همدیگر در برخورد هستند و در بین ملکول‌های هوا هم پخش می‌شوند و انتقال جرم به صورت مکانیزم ترکیبی نادرین - ملکولی اتفاق می‌افتد. عدد نادرین را با توجه به اینکه قطر منافذ ۰.۲۲ میکرومتر است، به دست می‌آوریم.

$$Kn = \frac{\lambda}{d_p} = \frac{1.39 \times 10^{-7} \text{ m}}{2.2 \times 10^{-7} \text{ m}} = 0.63 \quad (18)$$

$$\left[\frac{\partial^2 (D_w C_w)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (D_w C_w)}{\partial y^2} \right] = u_w \frac{\partial C_w}{\partial x} \quad (12)$$

در فرآیند تقطیر غشایی، بر خلاف دیگر فرآیندهای غشایی، روابط ترمودینامیکی حضور دارد. در این مدل‌سازی از روش محلول ایده آل بر اساس قانون راولت اصلاح شده و رابطه آنتوان جهت تبدیل دما و غلظت به فشار بخار جزئی آب در سطح غشاء استفاده می‌کنیم. با توجه به رابطه آنتوان و ثابت های آن، فشار بخار آب خالص را از رابطه زیر به دست می‌آوریم [۱۶].

$$\log_{10} P^0 = 8.07131 - \frac{1730.63}{233.43 + T} \quad (13)$$

در رابطه فوق دما بر حسب سانتی‌گراد و فشار بر حسب میلی‌متر جیوه، جای‌گذاری می‌شوند. بنابراین فشار بخار جزئی جریان نفوذ از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۶].

$$P_{p-sat} = 133.32 \times 10^{8.07131 - \frac{1730.63}{233.43 + T}} \quad (14)$$

که این فشار بر حسب پاسکال می‌باشد. برای ناحیه خوراک که آب خالص نیست و نمک در آن محلول است، فشار بخار جزئی، با قانون راولت اصلاح شده طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۶].

$$P_{f-sat} = 133.322 \times x_w P^0 a_w \quad (15)$$

کسر مولی آب (نسبت تعداد مول آب به تعداد مول کل محلول) نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$x_w = 1 - x_{NaCl} \quad (16)$$

همچنین برای محاسبه فعالیت نمک در محلول آب - نمک (a_w) از رابطه زیر استفاده می‌کنیم.

$$a_w = 1 - 0.5 x_{NaCl} - 10 x_{NaCl}^2 \quad (17)$$

انتقال جرم در دو طرف غشاء توسط لایه مرزی کنترل می‌شود، ولی انتقال جرم در منافذ غشاء چند مکانیزم دارد که در ادامه به آن خواهیم پرداخت. از مدل گاز غبارآلود برای تحلیل انتقال جرم در غشاء استفاده می‌کنیم. در این مدل انتقال جرم در غشاء، طبق شرایط مختلف توسط ۴ مکانیزم رخ می‌دهد.

- C_m^{kn} مکانیزم نفوذ نادرین^{۱۹}

²¹ Surface penetration

²² Poiseuille diffusion

¹⁹ Knudsen diffusion

²⁰ Molecular diffusion

در رابطه ۲۵ روش محاسبه شار انتقال جرم میانگین ارائه شده است [۱۲].

$$J_{mean} = \frac{1}{L} \int_0^L J_w \cdot dL \quad (25)$$

۲-۲- پلاریزاسیون دمایی

دما روی سطح مشترک غشاء- جریان‌ها با دما در توده جریان‌ها تفاوت دارد. به عبارت دیگر اختلاف دما بین توده جریان‌ها بیشتر از اختلاف دما بین دو طرف غشاء است. به این اثر، اثر پلاریزاسیون دمایی می‌گویند که علت آن مقاومت لایه مرزی انتقال حرارت است. ضریب پلاریزاسیون دمایی که به صورت نسبت مقاومت لایه مرزی انتقال حرارت در دو جریان به کل مقاومت انتقال حرارت موجود در سیستم تعریف می‌شود، توسط رابطه ۲۶ قابل محاسبه است.

$$TPC = \frac{T_{f.m} - T_{p.m}}{T_f - T_p} \quad (26)$$

که در این رابطه T_f و T_p به ترتیب دما در توده خوراک و نفوذ شده هستند. همچنین $T_{f.m}$ و $T_{p.m}$ به ترتیب دمای سطح مشترک غشاء- خوراک و دمای سطح مشترک غشاء- نفوذ هستند. هر چه طراحی سیستم مطلوب‌تر باشد، ضریب پلاریزاسیون دمایی به ۱ نزدیک‌تر است، یعنی اختلاف دما بین طرفین غشاء نزدیک به اختلاف دما بین توده جریان‌هاست. در مقابل اگر ضریب پلاریزاسیون دمایی به صفر میل کند، بیشتر انتقال حرارت به وسیله لایه مرزی دو جریان کنترل شده و بنابراین نیرومحرکه و پیرو آن شار کمتر می‌شود [۲۱].

۲-۳- شرایط مرزی حاکم بر شبیه سازی

حال شرط‌های مرزی مربوطه را تعریف می‌کنیم. برای هر ناحیه، شروط مرزی آن ناحیه، به تفکیک معادلات انتقال ممنتوم، حرارت و جرم، در شکل ۲ قابل مشاهده است.

طبق محاسبات، مکانیزم غالب انتقال جرم در این شبیه سازی مکانیزم نفوذ ترکیبی نادسن - ملکولی خواهد بود. ضریب نفوذ ترکیبی نادسن- ملکولی به شکل زیر تعریف می‌شود [۲۰].

$$C_m^c = \left[\frac{1}{C_m^{kn}} + \frac{1}{C_m^D} \right]^{-1} \quad (19)$$

که در رابطه بالا ضریب نفوذ نادسن از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$C_m^{kn} = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon \tau}{\tau \delta} \left(\frac{8 M}{\pi R T} \right)^{0.5} \quad (20)$$

که δ و τ ، ε ، τ به ترتیب تخلخل، ضریب پیچ و خم منافذ، شعاع منافذ و ضخامت غشاء و همچنین M وزن مولکولی است که بخار شده و نفوذ می‌کند. R ثابت جهانی گازها و T دمای مطلق می‌باشد. ضریب نفوذ ملکولی نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$C_m^D = \frac{\varepsilon}{\tau \delta} \frac{P D}{P_a} \frac{M}{R T} \quad (21)$$

P_a فشار هوا درون منافذ غشاء، P فشار کل درون منافذ و D ضریب نفوذ ماده ای است که تبخیر می‌شود و نفوذ می‌کند. همچنین برای دقت بیشتر در محاسبات مکانیزم نفوذ پویزوله را هم در محاسبات دخیل و به مقدار بالا اضافه می‌کنیم. ضریب نفوذ پویزوله به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$C_m^P = \frac{1}{8} \frac{r^2 \varepsilon}{\tau \delta} \frac{1}{\eta} \frac{M P}{R T} \quad (22)$$

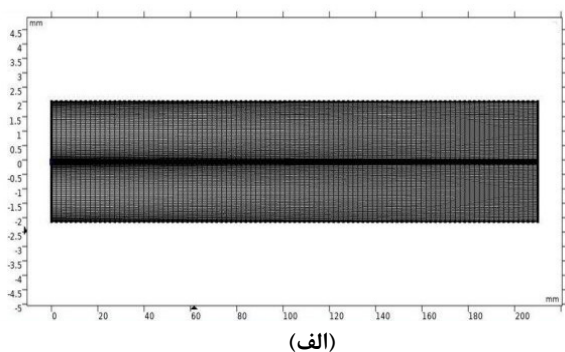
بنابراین ضریب نفوذ کلی با فرض نادیده گرفتن مکانیزم نفوذ سطحی به شکل زیر نوشته می‌شود.

$$C_m = \left[\frac{1}{C_m^{kn}} + \frac{1}{C_m^D} \right]^{-1} + C_m^P \quad (23)$$

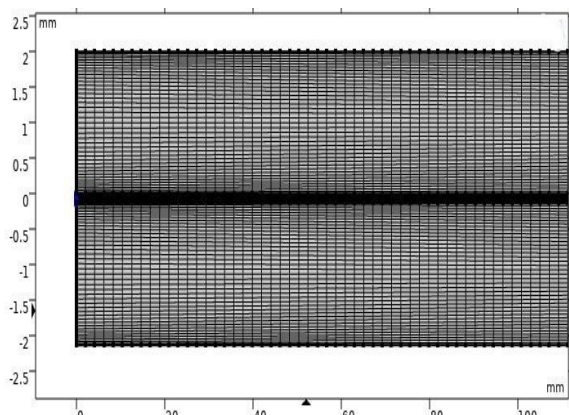
شار نفوذی با این فرض که شار تابع خطی از گرادین فشار بخار جزئی در سراسر غشاء است به صورت زیر قابل محاسبه است [۱۴].

$$J_w = -C_m \nabla P_m = C_m (P_{f.m} - P_{p.m}) \quad (24) \\ = C_m \left(\frac{dP}{dT} \right)_{T_m} (T_{f.m} - T_{p.m})$$

در نرم افزار کامسول، تعداد المان ها را از ۱۷۵۰ تا ۵۸۹۰۰ تغییر دادیم و برای هر حالت، میزان خطا جذر میانگین مربعات را برای شار نهایی سیستم نسبت به داده های آزمایشگاهی، محاسبه کردیم. همان طور که مشاهده می شود میزان خطا بعد از ۹۰۰۰ المان اختلاف چشم گیری ندارد و تاثیر ناچیزی در جواب نهایی مدل سازی خواهد داشت و تنها مدت محاسبات را طولانی تر خواهد کرد. بنابراین شبکه بندی شبیه سازی حاضر بر اساس این تعداد المان انجام شده است. شیوه شبکه بندی در شکل ۴ قابل مشاهده است.



(الف)



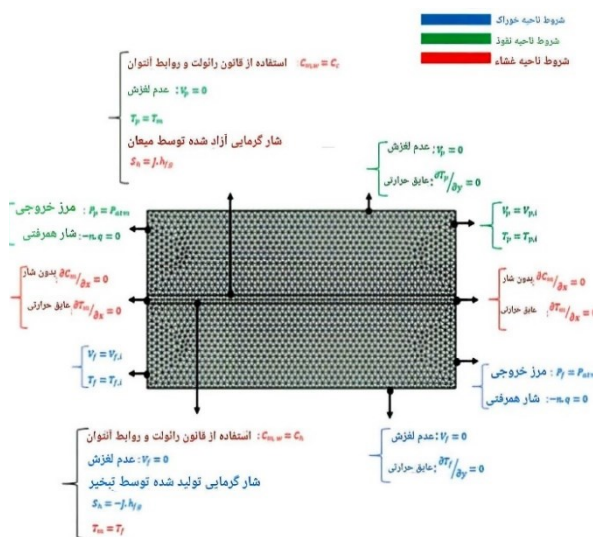
(ب)

شکل ۴. (الف) توزیع شبکه محاسباتی (ب) نمای بزرگ شده از توزیع شبکه محاسباتی در نیمه چپ هندسه تقطیر غشایی
Figure 4. a) computational grid, b) close up view of the computational grid from the left half of the distillation geometry

۳- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا به اعتبارسنجی نتایج مدل سازی می پردازیم، سپس تاثیر تغییر شرایط عملیاتی بر عملکرد سیستم را بررسی می کنیم.

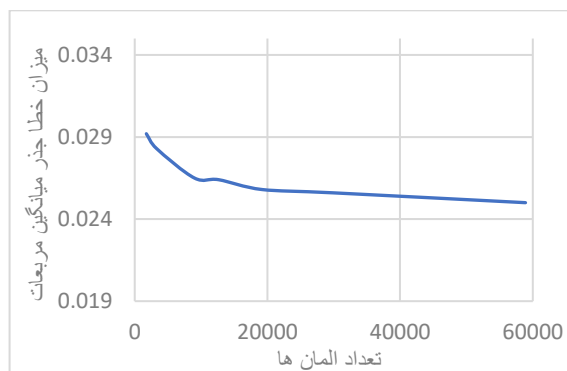
۱-۳- اعتبارسنجی



شکل ۲. شرایط مرزی استفاده شده در مطالعه حاضر
Figure 2. Boundary conditions used in the present study

۲-۴- شبکه بندی محاسباتی

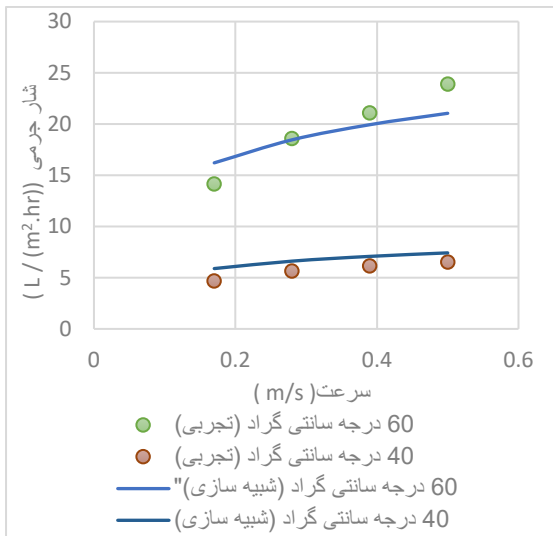
هندسه و شبکه محاسباتی (شامل حوزه های کانال خوراک، کانال نفوذ و غشاء) در شکل ۳ نشان داده شده است. شبکه به طور قابل ملاحظه ای در مرزها و دیواره ها تراکم بیشتری است تا بتواند نتایج دقیق تری ارائه دهد. معادلات به روش المان محدود گرا دیان مزدوج گسسته سازی شده و معادلات گسسته با روش تکراری به کمک نرم افزار کامسول تا خطای مانده 10^{-6} حل گردید. همچنین جواب نهایی نرم افزار، باید مستقل از شبکه بندی باشد. برای این منظور شبیه سازی برای دمای خوراک ورودی ۳۵ درجه سانتی گراد، دمای ورودی جریان نفوذ ۲۰ درجه سانتی گراد و سرعت ورودی در هر دو کانال، بین سرعت های ۰.۱۴ تا ۰.۲۶ متر بر ثانیه تکرار و با داده های آزمایشگاهی مقایسه شد تا متوجه شویم میزان خطا مساله تا چه حد به شبکه بندی مربوط است. نمودار زیر بیانگر میانگین خطا بر حسب تعداد المان هایی است که در شبکه بندی انجام شده است.



شکل ۳. بررسی وابستگی حل به نوع شبکه بر اساس بررسی میزان خطا جذر میانگین مربعات نسبت به تعداد المان ها
Figure 3. Assessment of mesh dependency in the solution based on an examination of RMSE versus the number of elements

سرعت (m/s)	نتایج آزمایشگاهی	نتایج شبیه سازی	درصد خطا نسبی
۰.۱۷	۲۹,۱	۳۰,۳	۴,۱
۰.۲۸	۲۷,۴	۲۷,۳۵	۰,۱۸
۰.۳۹	۲۶,۳	۲۵,۸۷	۱,۶
۰.۵۰	۲۵,۸	۲۴,۹۸	۳,۱

همچنین در مرجع آزمایشگاهی [۱۲] نتایج شار خروجی نسبت به سرعت موجود است که این مقادیر آزمایشگاهی را با نتایج شبیه سازی در شکل ۴ مقایسه کرده ایم. همچنین به دلیل اینکه نتایج آزمایشگاهی برای شار، در مقاله به صورت نمودار رسم شده است، برای محاسبه مقدار دقیق داده های تجربی، از نرم افزارهای مربوط به این کار استفاده شده است.



شکل ۵. مقایسه نتایج مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی هوانگ و همکاران [۱۲] برای شار انتقال جرم

Figure 5. Comparison of modeling results with experimental results of Hwang et al. [12] for mass transfer flux

جهت اطمینان بیشتر از اعتبار نتایج مدل سازی، آن ها را با نتایج آزمایشگاهی دیگر [۲۲] نیز، مقایسه نمودیم. بدین منظور شکل ۵ برای شرایط عملیاتی دمای جریان نفوذ ۲۰ درجه سانتی گراد و دمای جریان خوراک ورودی ۳۵ و ۴۰ درجه سانتی گراد و غلظت نمک ۳.۵ درصد وزنی، رسم شده است.

جهت اعتبار سنجی نتایج مدل سازی، آن ها را با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۱۲] مقایسه می کنیم. شرایط عملیاتی شامل دمای ورودی خوراک و نفوذ به ترتیب ۶۰ و ۲۰ درجه سانتی گراد و غلظت نمک ۱٪ وزنی می باشد. بدین منظور یک تجهیز با هندسه ورق تخت به طول ۰.۵ متر و عرض ۰.۱۵ متر ساخته شد. سلول غشایی از دو بخش سمت تغذیه و سمت نفوذ تشکیل شده است. محفظه ها از پلی اتیلن با چگالی بالا برای مقاومت در برابر خوردگی توسط محلول های نمک و آب دریا ساخته شده اند. تجهیز به صورت افقی در نظر گرفته شد، به طوری که محلول تغذیه از قسمت پایینی جریان می یابد، در حالی که آب خنک کننده از محفظه بالایی عبور می کند. قسمت خوراک و نفوذ توسط یک غشای متخلخل آبریز از جنس پلی تترافلورواتیلن از هم جدا شدند. نحوه انجام آزمایش مرجع به این صورت است که محلول های خوراک و نفوذ در مخازن دو جداره قرار می گیرند و با استفاده از پمپ های گریز از مرکز به گردش در می آیند. دمای خروجی دو طرف سرد و گرم به طور مداوم کنترل و به صورت الکترونیکی ثبت می شود. همچنین مایع تراوش شده از طریق یک استوانه مدرج گردش یافته و حجم آن در فواصل منظم اندازه گیری می شود. همچنین خلوص آب استخراج شده از طریق هدایت آب با استفاده از رسانایی سنج الکتریکی تعیین می شود.

خطای محاسباتی در روش عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است.

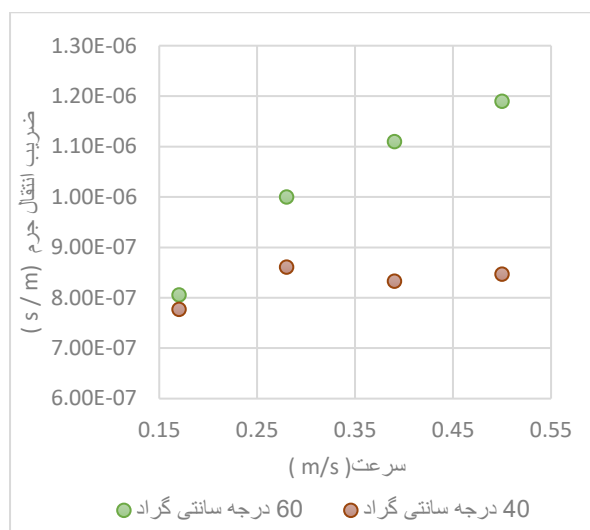
جدول ۱. مقایسه نتایج شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی [۱۲] برای دمای جریان گرم خروجی

Table 1. Comparison of simulation results with experimental results [12] for hot outlet flow temperature

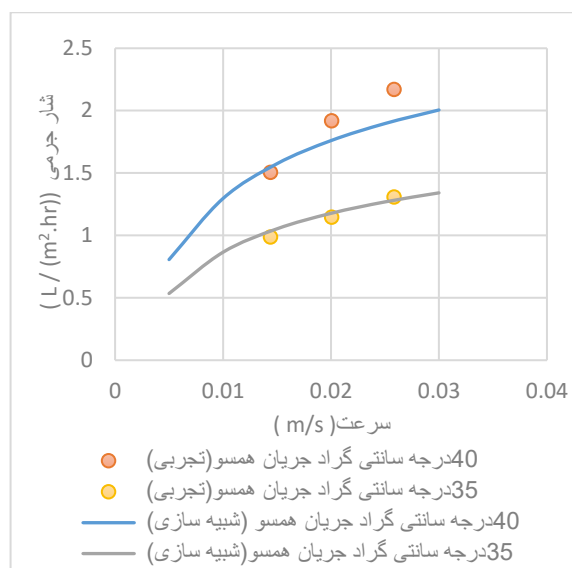
سرعت (m/s)	نتایج آزمایشگاهی	نتایج شبیه سازی	درصد خطا نسبی
۰.۱۷	۵۰.۱	۴۹.۹	۰.۳۹
۰.۲۸	۵۲.۳	۵۲.۷	۰.۷۸
۰.۳۹	۵۳.۹	۵۴.۱۲	۰.۴۰
۰.۵۰	۵۵.۱	۵۴.۹۹	۰.۱۹

جدول ۲. مقایسه نتایج شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی [۱۲] برای دمای جریان سرد خروجی

Table 1. Comparison of simulation results with experimental results [12] for cold outlet flow temperature



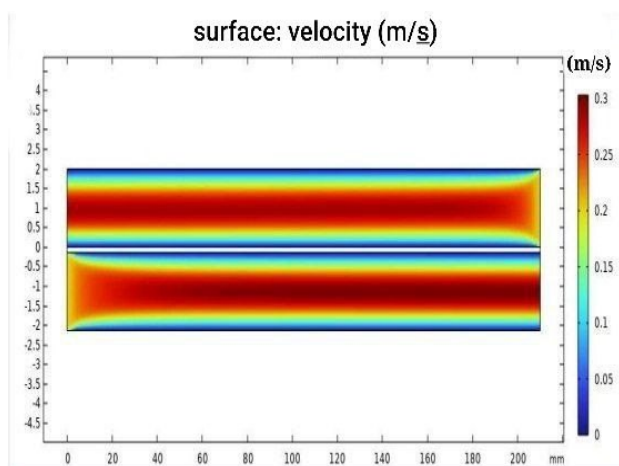
شکل ۷. تاثیر سرعت جریان بر روی ضریب انتقال جرم برای دمای ورودی خوراک ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی گراد
Figure 7. Effect of flow rate on mass transfer coefficient for feed inlet temperature of 40 and 60 degrees Celsius.



شکل ۶. مقایسه نتایج مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی چن و همکاران [۲۲] برای شار انتقال جرم
Figure 6. Comparison of modeling results with experimental results of Chen et al. [12] for mass transfer flux

۳-۳- توزیع سرعت

توزیع سرعت در کانال های خوراک و نفوذ سیستم تقطیر غشایی (جریان ناهمسو) در شکل ۸ نشان داده شده است. میدان سرعت با حل عددی معادلات ناوییه-استوکس بدست آمده است. در سیستم تقطیر غشایی پس از فاصله کوتاهی از ورودی هندسه غشایی، سرعت به طور کامل توسعه می یابد.



شکل ۸. توزیع سرعت جریان در ماژول تقطیر غشایی برای سرعت ورودی ۰.۲ متر بر ثانیه
Figure 8. Flow velocity distribution in the membrane distillation module for an inlet velocity of 0.2 m/s

۳-۴- توزیع دما

نیروی محرکه اصلی این نوع سیستم همان طور که قبلا ذکر شد، اختلاف دمای بین دو کانال سرد و گرم است. مدل ارائه شده قابلیت محاسبه توزیع دمای سیستم را در هر سه منطقه

از نمودارهای فوق می توان نتیجه گرفت نتایج مدل سازی، با نتایج آزمایشگاهی مقالات چن و همکاران و همچنین هوانگ و همکاران مطابقت خوبی دارد و اعتبار مدل سازی قابل قبول است. در جدول ۳ کمیت ها و مشخصات هندسه و اجزاء در هر دو مقاله آزمایشگاهی ذکر شده قابل مشاهده است.

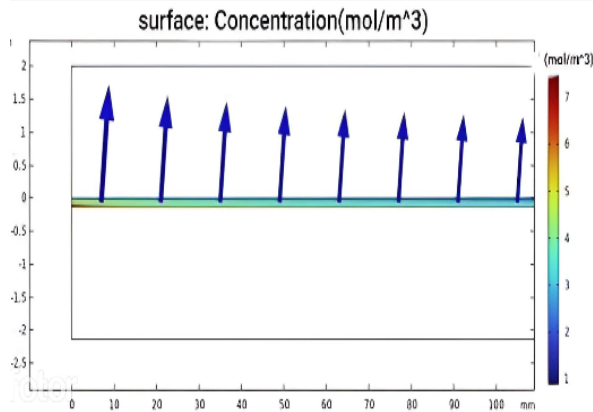
جدول ۳. مقایسه پارامترهای موجود در مقالات مرجع برای انجام و اعتبار سنجی مدل سازی

Table 3. Comparison of parameters available in reference articles to perform and validate modeling

مقاله چن و همکاران	مقاله هوانگ و همکاران	پارامتر
۰.۲۱	۰.۴	طول ماژول (m)
۰.۰۰۲	۰.۰۰۱	عرض کانال ها (m)
۱۳۰	۱۰۰	ضخامت غشاء (μm)
۰.۷۲	۰.۸۳	تخلخل غشاء
۱.۱۸	۱.۲	ضریب پیچ و خم منافذ غشاء
۰.۱۷۸	۰.۱۷۸	ضریب هدایت حرارتی غشاء (W/m.K)

۳-۲- تاثیر سرعت جریان بر ضریب انتقال جرم

در این بخش اثر سرعت جریان را روی ضریب انتقال جرم در دمای ورودی خوراک ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی گراد بررسی می کنیم. نتایج در شکل ۷ نشان داده شده است.

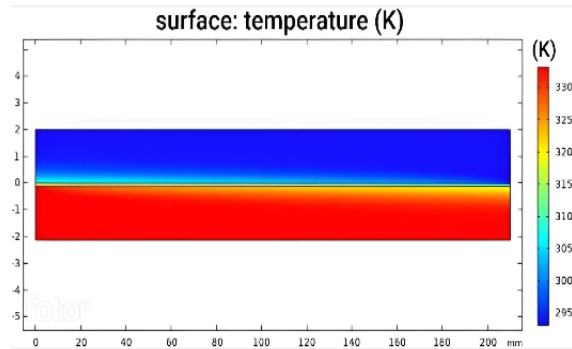


شکل ۱۰. نمای بزرگ شده توزیع فشار بخار و بردارهای شارهای پراکنده بخار آب در سمت چپ ماژول تقطیر غشایی
Figure 10. Magnified view of vapor pressure distribution and water vapor dispersion flux vectors on the left side of the membrane distillation module.

(کانال گرم، کانال سرد و غشاء) را دارد. در شکل ۹ توزیع دما در هر ناحیه مشاهده می شود که با حل عددی معادله انرژی بدست می آید. همانطور که این شکل نشان می دهد، آب دریا با دمای اولیه (از سمت چپ قسمت پایین) وارد کانال گرم می شود، منطقه ای که گرم ترین ناحیه نشان داده شده در شکل است. آب خالص هم (از سمت راست قسمت بالا) در حالت جریان مخالف وارد کانال سرد می شود، منطقه ای که سردترین منطقه نشان داده شده در شکل است. همانطور که مشخص است، در نزدیکی مرزهای غشاء اختلاف دما نسبت به دمای توده جریان ها بسیار کمتر است و هر چه این اختلاف دما در دو طرف غشاء کمتر باشد ضریب قطبش دما کمتر خواهد بود و شار خروجی سیستم نیز کمتر می شود.

۳-۶- بررسی شرایط عملیاتی بر عملکرد سیستم

در تحلیل عددی، عملکرد سیستم شبیه سازی شده مرجع تجربی چن و همکاران [۲۲] را طبق پارامترهای ذکر شده در جدول ۳ و با شرایط عملیاتی دمای جریان نفوذ ۲۰ درجه سانتی گراد و دمای جریان خوراک ورودی ۶۰ درجه سانتی گراد و غلظت نمک ۳.۵ درصد وزنی و سرعت ۰.۲ متر بر ثانیه را با تغییر دادن کمیتهای تاثیرگذار در شار خروجی شامل دمای ورودی ناحیه خوراک و نفوذ، درصد وزنی نمک محلول در آب و سایر کمیتهای بررسی می کنیم.



شکل ۹. توزیع دما در ماژول تقطیر غشایی برای حالت دمای ورودی گرم و سرد به ترتیب ۶۰ و ۲۰ درجه سانتی گراد
Figure 9. Temperature distribution in the membrane distillation module for hot and cold inlet temperatures of 60 and 20 degrees Celsius, respectively.

۳-۶-۱- بررسی اثر دمای ورودی ناحیه خوراک

جهت بررسی دمای خوراک ورودی، این متغیر را از ۴۲ تا ۷۸ درجه سانتی گراد در ۷ سطح، تغییر دادیم و اثر آن را روی شار خروجی بررسی کردیم. همچنین تغییرات پلاریزاسیون دمایی نیز در شکل ۱۱ قابل مشاهده است.

۳-۵- توزیع فشار بخار جزئی در غشاء

شکل ۱۰ بردارهای شارهای پراکنده بخار آب را در داخل غشاء که نشان دهنده تغییرات شار در طول کانال است را نشان می دهد. همچنین توزیع فشار (سطح رنگی) بخار آب در داخل منافذ غشاء قابل مشاهده است. همانطور که مشاهده می شود، شار انتشاری بخار آب در طول ماژول کاهش می یابد. این به دلیل کاهش اختلاف دما و در نتیجه کاهش اختلاف فشار جزئی از ابتدا تا انتهای طول کانال خوراک است که منجر به کاهش نیروی محرکه برای انتقال جرم بخار آب و کاهش تولید بخار و شار خروجی در طول کانال از طریق منافذ غشایی می شود.



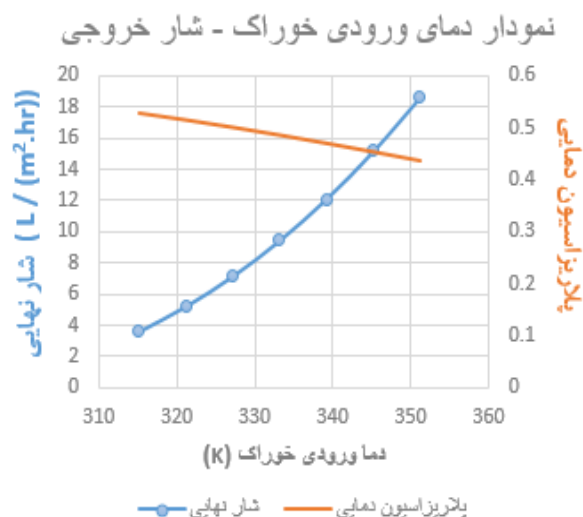
شکل ۱۲. بررسی اثر دمای ورودی نفوذ بر عملکرد فرآیند تقطیر غشایی تماس مستقیم

Figure 12. Investigating the effect of permeate inlet temperature on the performance of the direct contact membrane distillation process

طبق شکل ۱۲ با افزایش دمای ورودی جریان نفوذ، شار خروجی سیستم کاهش می‌یابد. طبق رابطه آنتوان (۱۳) با افزایش دمای ورودی جریان نفوذ، فشار بخار سمت جریان نفوذ افزایش می‌یابد و باعث کاهش اختلاف فشار بخار بین دو طرف غشاء می‌شود و به تبع آن نیرو محرکه سیستم و شار خروجی آن کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشخص است تاثیر دمای ورودی جریان خوراک از تاثیر دمای ورودی جریان نفوذ بسیار بیشتر است، زیرا مطابق رابطه آنتوان دما با فشار بخار رابطه نمایی دارد و هر چقدر دما بالاتر باشد، تغییر دما تاثیر بیشتری بر فشار بخار خواهد گذاشت.

۳-۶-۳. بررسی اثر سرعت جریان در کانال‌ها

برای بررسی تاثیر سرعت ورودی جریان‌ها در سیستم تقطیر غشایی تماس مستقیم، سرعت هر دو جریان خوراک و نفوذ را از ۰.۱۴ تا ۰.۲۶ متر بر ثانیه در ۵ سطح تغییر دادیم. تغییرات شار خروجی سیستم در شکل ۱۳ عرضه شده است.



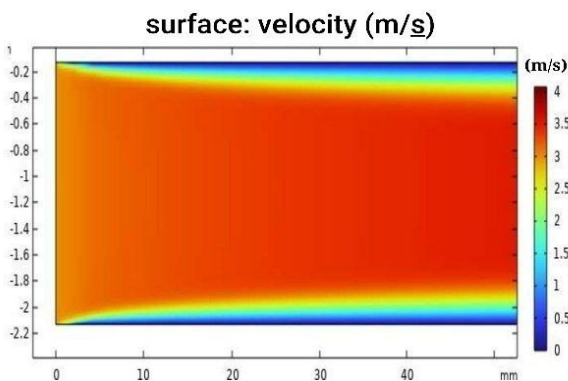
شکل ۱۱. بررسی اثر دمای ورودی خوراک بر عملکرد فرآیند تقطیر غشایی تماس مستقیم

Figure 11. Investigating the effect of feed inlet temperature on the performance of direct contact membrane distillation process

با توجه به شکل ۱۱ درمی‌یابیم با افزایش دمای ورودی خوراک، مقدار شار به شکل نمایی افزایش پیدا کرده است. شار خروجی در فرآیند تقطیر غشایی، طبق رابطه (۲۴) تابع اختلاف فشار بخار در طرفین غشاء است و فشار بخار طبق رابطه آنتوان (۱۳) با دما رابطه نمایی دارد. افزایش دمای خوراک، نیازمند مصرف انرژی و به تبع آن هزینه بالاتر است.

۳-۶-۲. بررسی اثر دمای ورودی ناحیه نفوذ

جهت بررسی دمای ورودی ناحیه نفوذ، این متغیر را از ۱۴ تا ۲۶ درجه سانتی‌گراد در ۵ سطح تغییر دادیم و اثر آن را روی شار بررسی کردیم. روند تغییرات شار و ضریب پلاریزاسیون دمایی در شکل ۱۲ آمده است.



شکل ۱۵. توزیع سرعت جریان در قسمت ورودی خوراک در حالتی که سرعت جریانها ۳ متر بر ثانیه باشد
Figure 14. Flow velocity distribution in the feed inlet in the case that the flow velocity is 3 m/s.

همان طور که مشخص است افزایش سرعت موجب کاهش ضخامت لایه مرزی شده است. با این حال نمی توان سرعت جریان ها را بیش از حد بالا برد. افزایش بیش از حد سرعت موجب کاهش ماند سیال در کانال شده و طبیعتاً سیال فرصت کمتری برای انتقال جرم خواهد داشت.

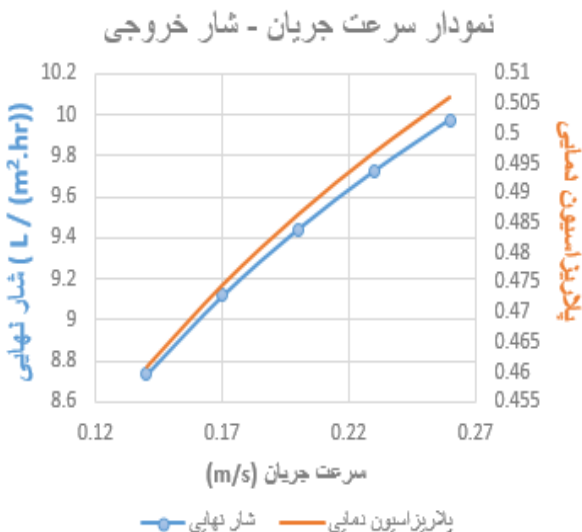
۳-۶-۴. بررسی اثر غلظت نمک محلول در ورودی

خوراک

جهت تاثیر غلظت نمک خوراک بر شار خروجی فرآیند، غلظت نمک محلول در ورودی خوراک را از ۲.۴۵٪ وزنی تا ۴.۴۵٪ وزنی در ۵ سطح تغییر داده شده و نتیجه در شکل ۱۶ رسم شده است.

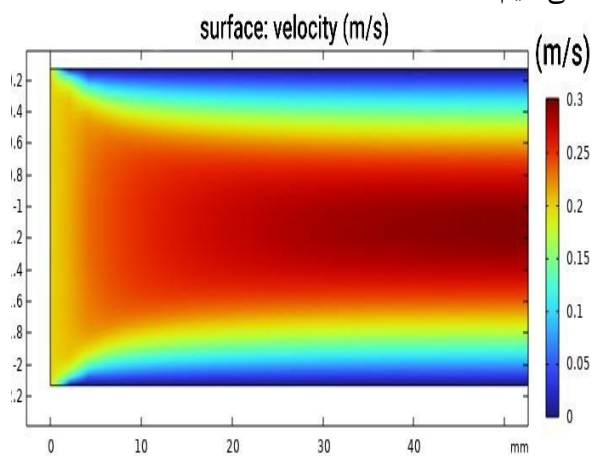


شکل ۱۶. بررسی اثر غلظت نمک خوراک ورودی بر عملکرد فرآیند تقطیر غشایی تماس مستقیم
Figure 16. Investigating the effect of salt concentration of the incoming feed on the performance of the direct contact membrane distillation process



شکل ۱۳. بررسی اثر سرعت ورودی جریان در کانال ها بر عملکرد فرآیند تقطیر غشایی تماس مستقیم
Figure 13. Investigating the effect of flow inlet velocity in the channels on the performance of the direct contact membrane distillation process

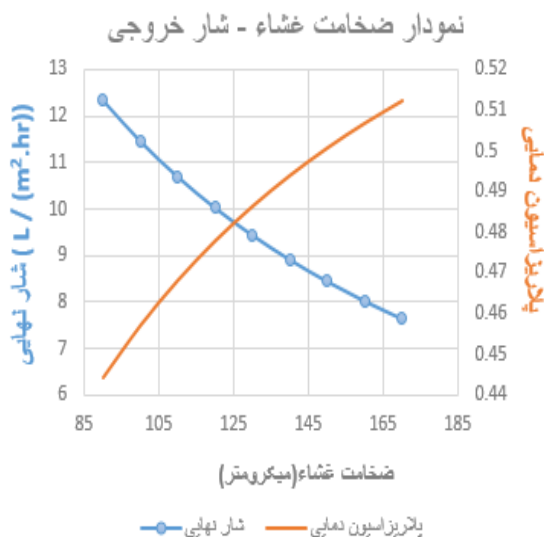
طبق شکل ۱۳ با افزایش سرعت جریانها، شار افزایش می یابد. دلیل این موضوع این است با افزایش سرعت جریانها، ضخامت و مقاومت لایه مرزی کم شده و ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد که موجب نزدیک شدن دمای سطح طرفین غشاء به دمای توده جریانها می شود که باعث می شود اختلاف دما و به تبع آن اختلاف فشار بخار و شار خروجی سیستم هم افزایش پیدا کند. نزدیک شدن دمای سطح دو طرف غشاء به دمای توده موجب افزایش ضریب پلاریزاسیون نیز می شود. در تصاویر ۱۴ و ۱۵ اثر تغییرات سرعت بر ضخامت لایه مرزی را به ترتیب در سرعت های ورودی جریان ۰.۲ و ۳ متر بر ثانیه مشاهده می کنیم.



شکل ۱۴. توزیع سرعت جریان در قسمت ورودی خوراک در حالتی که سرعت جریانها ۰.۲ متر بر ثانیه باشد.
Figure 14. Flow velocity distribution in the feed inlet in the case that the flow velocity is 0.2 m/s.

۳-۶-۶. بررسی اثر ضخامت غشاء

در این بخش تاثیر ضخامت غشاء را بر میزان شار خروجی سیستم بررسی می‌کنیم. برای این کار ضخامت غشاء را از ۹۰ تا ۱۷۰ میکرومتر در ۹ سطح تغییر دادیم و نتیجه در شکل ۱۸ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱۸. بررسی اثر ضخامت غشاء بر عملکرد فرآیند تقطیر غشایی تماس مستقیم

Figure 18. Investigating the effect of membrane thickness on the performance of the direct contact membrane distillation process

همان طور که قابل پیش بینی بود افزایش ضخامت غشاء موجب کاهش شار سیستم می‌شود. طبق روابط (۲۰) تا (۲۲) ضخامت به طور معکوس متناسب با میزان انتقال جرم و انتقال حرارت از طریق غشا است.

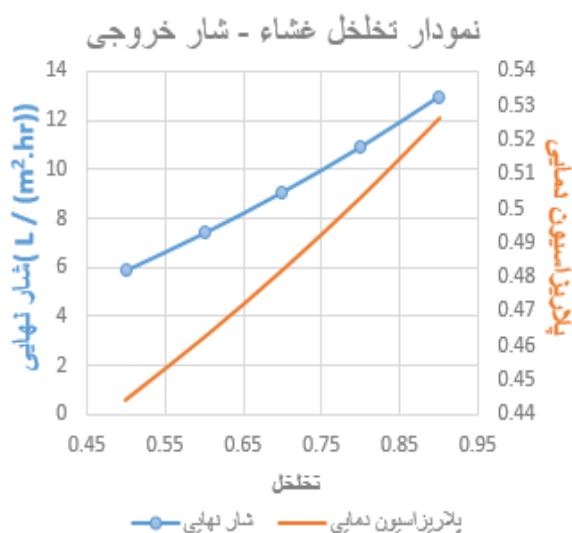
۳-۶-۷. بررسی اثر ضریب هدایت حرارتی غشاء

جهت بررسی تاثیر ضریب هدایت گرمایی غشاء بر عملکرد سیستم تقطیر غشایی، این ضریب را از $0.12 \text{ L.m}^{-2}.\text{hr}^{-1}$ تا $0.24 \text{ L.m}^{-2}.\text{hr}^{-1}$ در ۵ سطح تغییر دادیم. نتایج بررسی را در شکل ۱۹ مشاهده می‌کنیم.

با توجه به شکل ۱۶ با افزایش غلظت نمک ورودی خوراک، شار کاهش می‌یابد. با افزایش غلظت نمک ورودی خوراک، فعالیت محلول آب - نمک که از قانون راتولت اصلاح شده (۱۵) محاسبه می‌شود، کاهش می‌یابد و همچنین موجب کم شدن نسبت مولی آب در محلول آب - نمک می‌شود که این دو اتفاق منجر به کاهش فشار بخار جزئی آب در ناحیه خوراک و پیرو آن کاهش شار خروجی سیستم می‌شود.

۳-۶-۵. بررسی اثر تخلخل غشاء

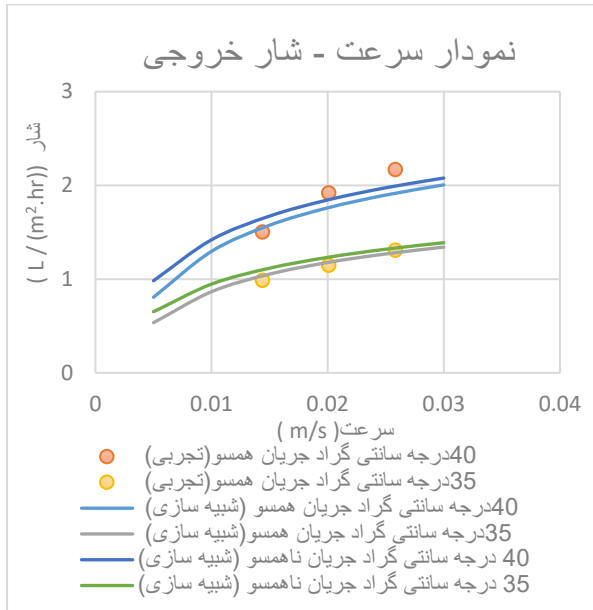
میزان تخلخل غشاء تاثیر زیادی بر شار خروجی سیستم خواهد داشت. جهت اطلاع از میزان این تاثیر، تخلخل غشاء را از ۰.۵ تا ۰.۹ تغییر دادیم. نتیجه این تغییرات در شکل ۱۷ قابل مشاهده است.



شکل ۱۷. بررسی اثر میزان تخلخل غشاء بر عملکرد فرآیند تقطیر غشایی تماس مستقیم

Figure 17. Investigating the effect of membrane porosity on the performance of the direct contact membrane distillation process

طبق شکل ۱۷ افزایش تخلخل همان طور که طبق روابط (۲۰) تا (۲۲) قابل پیش بینی بود موجب افزایش شار خروجی سیستم می‌شود. این ضریب با نفوذ پذیری غشاء متناسب است. هر چه تخلخل غشاء بالاتر باشد فضای بزرگتری برای تبخیر ایجاد می‌کند که این خود دلیلی برای افزایش شار خروجی سیستم است. بنابراین، به طور کلی می‌توان گفت که میزان تخلخل غشای بالاتر منجر به نفوذ پذیری بیشتر و اتلاف گرمایی کمتر می‌شود که این موضوع پلاریزاسیون دمایی را نیز افزایش می‌دهد.



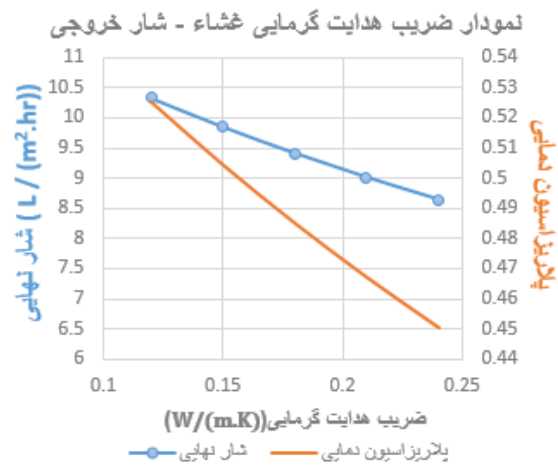
شکل ۲۰. بررسی اثر همسو و ناهمسو بودن جریان‌ها بر عملکرد فرآیند تقطیر غشایی تماس مستقیم

Figure 20. Investigating the effect of parallel and counter currents on the performance of the direct contact membrane distillation process

همان‌طور که مشاهده می‌شود زمانی که جریان‌های خوراک و نفوذ ناهمسو هستند و بر خلاف جهت یکدیگر جریان دارند شار نهایی سیستم با اختلاف اندکی بیشتر از زمانی است که جریان‌ها همسو هستند.

۴- نتیجه گیری

شار فرآیند تقطیر غشایی تماس مستقیم با افزایش دمای خوراک ورودی به طور نمایی افزایش می‌یابد و بیشترین تأثیر را در بین تغییر شرایط عملیاتی دیگر دارد. به طوری که در سرعت جریان ثابت ۰.۲ متر بر ثانیه و در دمای ۴۲ °C شار خروجی سیستم تقطیر غشایی $3.59 \text{ L.m}^{-2}.\text{hr}^{-1}$ و در دمای ۷۸ °C شار خروجی سیستم $18.64 \text{ L.m}^{-2}.\text{hr}^{-1}$ می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که شار فرآیند تقطیر غشایی تماس مستقیم، با سرعت جریان‌ها و تخلخل غشاء، رابطه مستقیم و با غلظت نمک خوراک ورودی، دمای ورودی جریان نفوذ، ضخامت غشاء و ضریب انتقال حرارت هدایتی غشاء، رابطه عکس دارد.



شکل ۱۹. بررسی اثر ضریب هدایت حرارتی غشاء بر عملکرد فرآیند تقطیر غشایی تماس مستقیم

Figure 19. Investigating the effect of thermal conductivity coefficient of the membrane on the performance of the direct contact membrane distillation process

افزایش ضریب انتقال حرارت هدایت موجب اتلاف حرارتی بیشتر و متعاقباً کاهش شار سیستم می‌شود. همچنین هنگامی که ضریب هدایت گرمایی افزایش می‌یابد، موجب افزایش اختلاف دمای طرفین غشاء با توده جریان‌ها می‌شود که ضریب پلاریزاسیون را نیز کاهش می‌دهد. به طور کلی، غشاء مستقر در فرآیندهای تقطیر غشایی باید رسانایی حرارتی پایینی جهت جلوگیری از اتلاف حرارت از طریق غشاء و مقاومت کم در برابر انتقال جرم داشته باشد.

۳-۶-۸. بررسی اثر همسو و ناهمسو بودن جریان

برای بررسی تأثیر ناهمسو و همسو بودن جریان، مدل سازی را با همان شرایط عملیاتی که در اعتبارسنجی مرجع تجربی چن و همکاران [۲۲] در نظر گرفته شده بود، این بار با هر دو نوع جریان تکرار کردیم. اختلاف شار خروجی در شرایط همسو و ناهمسو بودن جریان در شکل ۲۰ قابل مشاهده است.

References

- [1] E. Hameeteman, "Future water (In) security: Facts, figures, and predictions," *Glob. Water Inst.*, vol. 1, pp. 1–16, 2013.
- [2] M. Qasim, M. Badrelzaman, N. N. Darwish, N. A. Darwish, and N. Hilal, "Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review," *Desalination*, vol. 459, no. December 2018, pp. 59–104, 2019, doi: 10.1016/j.desal.2019.02.008.
- [3] M. Shatat, M. Worall, and S. Riffat, "Opportunities for solar water desalination worldwide: Review," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 9, pp. 67–80, 2013, doi: 10.1016/j.scs.2013.03.004.
- [4] J. Krukowski, "Opening the 'black box': Regulations and recycling drive use of membrane technologies," *Pollut. Eng.*, vol. 33, no. 6, p. 20, 2001.
- [5] T. Younos and K. E. Tulou, "Overview of desalination techniques," *J. Contemp. Water Res. Educ.*, vol. 132, no. 1, pp. 3–10, 2005.
- [6] B. B. Ashoor, S. Mansour, A. Giwa, V. Dufour, and S. W. Hasan, "Principles and applications of direct contact membrane distillation (DCMD): A comprehensive review," *Desalination*, vol. 398, pp. 222–246, 2016, doi: 10.1016/j.desal.2016.07.043.
- [7] M. Ghadiri, S. Fakhri, and S. Shirazian, "Modeling and CFD simulation of water desalination using nanoporous membrane contactors," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 52, no. 9, pp. 3490–3498, 2013, doi: 10.1021/ie400188q.
- [8] A. Bahmanyar, M. Asghari, and N. Khoobi, "Numerical simulation and theoretical study on simultaneously effects of operating parameters in direct contact membrane distillation," *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 61, pp. 42–50, 2012, doi: 10.1016/j.ccep.2012.06.012.
- [9] S. G. Lovineh, M. Asghari, and B. Rajaei, "Numerical simulation and theoretical study on simultaneous effects of operating parameters in vacuum membrane distillation," *Desalination*, vol. 314, pp. 59–66, 2013.
- [10] F. Eleiwi, N. Ghaffour, A. S. Alsaadi, L. Francis, and T. M. Laleg-Kirati, "Dynamic modeling and experimental validation for direct contact membrane distillation (DCMD) process," *Desalination*, vol. 384, pp. 1–11, 2016, doi: 10.1016/j.desal.2016.01.004.
- [11] A. Khalifa, H. Ahmad, M. Antar, T. Laoui, and M. Khayet, "Experimental and theoretical investigations on water desalination using direct contact membrane distillation," *Desalination*, vol. 404, pp. 22–34, 2017, doi: 10.1016/j.desal.2016.10.009.
- [12] H. J. Hwang, K. He, S. Gray, J. Zhang, and I. S. Moon, "Direct contact membrane distillation (DCMD): Experimental study on the commercial PTFE membrane and modeling," *J. Memb. Sci.*, vol. 371, no. 1–2, pp. 90–98, 2011, doi: 10.1016/j.memsci.2011.01.020.
- [13] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of heat and mass transfer*, vol. 6. Wiley New York, 1996.
- [14] H. B. Harandi, A. Asadi, H. Fathi, and P. C. Sui, "Combined macroscopic and pore scale modeling of direct contact membrane distillation with microporous hydrophobic membranes," *Desalination*, vol. 514, no. June, p. 115171, 2021, doi: 10.1016/j.desal.2021.115171.
- [15] A. Esfandiari, A. Hosseini Monjezi, M. Rezakazemi, and M. Younas, "Computational fluid dynamic modeling of water desalination using low-energy continuous direct contact membrane distillation process," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 163, no. September, p. 114391, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114391.
- [16] J. M. Prausnitz, R. N. Lichtenthaler, and E. G. De Azevedo, *Molecular thermodynamics of fluid-phase equilibria*. Pearson Education, 1998.
- [17] K. W. Lawson and D. R. Lloyd, "Membrane distillation," vol. 124, 1997.
- [18] M. Qtaishat, T. Matsuura, B. Kruczek, and M. Khayet, "Heat and mass transfer analysis in direct contact membrane distillation," *Desalination*, vol. 219, no. 1–3, pp. 272–292, 2008, doi: 10.1016/j.desal.2007.05.019.
- [19] A. O. Imdakm and T. Matsuura, "A Monte Carlo simulation model for membrane distillation processes: Direct contact (MD)," *J. Memb. Sci.*, vol. 237, no. 1–2, pp. 51–59, 2004, doi: 10.1016/j.memsci.2004.03.005.
- [20] P. Chang and C. R. Wilke, "Correlation of diffusion coefficients in dilute solutions," *AIChE J.*, pp. 264–270, 1955.
- [21] Z. Kuang, R. Long, Z. Liu, and W. Liu, "Analysis of temperature and concentration polarizations for performance improvement in direct contact membrane distillation," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 145, p. 118724, 2019, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118724.
- [22] T.-C. Chen, C.-D. Ho, and H.-M. Yeh, "Theoretical modeling and experimental analysis of direct contact membrane distillation," *J. Memb. Sci.*, vol. 330, no. 1–2, pp. 279–287, 2009.