

## شبیه سازی عددی و مطالعه نظری تأثیر پارامترهای عملیاتی در تقطیر غشایی در خلأ

مر تزی اصغری<sup>۱\*</sup>، شیرین قربان لوینه<sup>۲</sup> و مجتبی راجی<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۹/۰۶	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۲۶	
<b>واژگان کلیدی:</b>	
تقطیر غشایی،	
شبیه سازی عددی،	
انتقال جرم،	
شار تراوش شده،	
قطبش دمایی.	

خلیج فارس و مناطق ساحلی آن، بزرگ ترین منبع نفت خام در جهان محسوب می شوند. از طرفی، گرمای هدررفته از صنایع پالایش و پتروشیمی که در محدوده اطراف خلیج فارس قرار گرفته اند، می تواند بر اساس شرایط ساده خوراک ورودی در تقطیر غشایی، مورد استفاده قرار بگیرد. از این رو، به منظور بهبود عملکرد این سیستم در نمک زدایی از آب خلیج فارس و افزایش شار خروجی، مدل انتقال جرم و حرارت به طور هم زمان در یک سیستم تقطیر غشایی در خلأ ارائه و با داده های تجربی اعتبارسنجی شده است. تأثیر شرایط عملیاتی مختلف، نظیر دمای خوراک، فشار خلأ در سمت تراویده، غلظت خوراک و ضریب انتقال حرارت بر شار تراوش شده مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، اثر دمای خوراک بر پدیده قطبش دمایی مطالعه شده است. نتایج نشان دادند که شار تراوش شده با افزایش دمای خوراک و ضریب انتقال حرارت افزایش و با افزایش فشار خلأ و غلظت خوراک کاهش پیدا می کند. همچنین مشخص شد که افزایش دما اثر نامطلوب پدیده قطبش دمایی را افزایش خواهد داد.

### ۱- مقدمه

زمین گرمایی یا گرمای هدررفته و قابل دستیابی در ایستگاه های برق یا کارخانه های شیمیایی به کار گرفته شود، به یک روش نمک زدایی بالقوه تجاری تبدیل خواهد شد. در تقطیر غشایی، محفظه خوراک و تراوش شده توسط یک غشای آب گریز از هم جدا می شوند. اختلاف دمای بین دو محفظه، منجر به اختلاف فشار بخار آب و در نتیجه، انتقال مولکول های بخار آب از میان غشا می شود. انتقال بخار از محفظه گرم، بخار آب تقطیر شده در محفظه سرد را تولید می کند. از آنجایی که گرم کردن محفظه خوراک، تنها تا زیر دمای جوش آن، مورد نیاز فرایند است، استفاده از انرژی گرمایی سطح پایین برای رساندن دمای خوراک به حد نیاز، به راحتی ممکن خواهد بود. در بسیاری از موارد، این انرژی با کمترین هزینه در دسترس است. بنابراین، تقطیر غشایی، مانند فرایندهای نمک زدایی معمولی که انرژی بیشتری هم نیاز دارند، هزینه زیادی به خود اختصاص نمی دهد.

اخیراً فرایندهای غشایی در طیف گسترده ای از کاربردهای نظیر تقطیر، با روش های جداسازی مرسوم رقابت کرده و به عنوان یک فرایند جداسازی مطلوب و مناسب، به یکی از موضوعات مطالعه آکادمیک جهانی تبدیل شده است. تقطیر غشایی یک تکنولوژی غشایی غیرهم دما برای جداسازی است که عمدتاً برای کاربردهایی که در آن ها آب بخش عمده ای از خوراک تصفیه نشده را تشکیل می دهد، به کار گرفته شده، بر اساس انتقال نیروی حرارتی بخار از غشا عمل می کند. به عبارت دیگر، نیروی محرکه برای انجام فرایند، اختلاف فشار جزئی بین دو سمت غشا است. در تقطیر غشایی، به دلیل اینکه فشار بخار آب تا حد زیادی تحت تأثیر شوری موجود در آب تصفیه نشده نیست، غلظت نمک در خوراک، تأثیر ناچیزی بر روی شار خروجی دارد. بنابراین، اگر این سیستم همراه با انرژی خورشیدی، انرژی

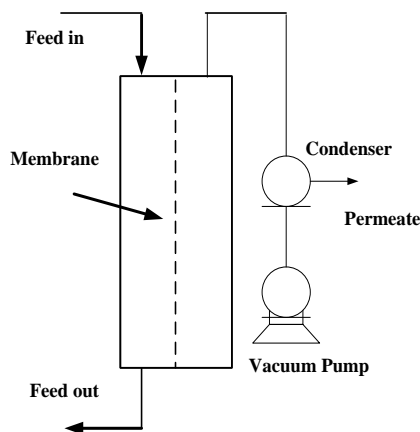
\* پست الکترونیک نویسنده مسئول asghari@kashanu.ac.ir

۱. دانشیار مهندسی شیمی، آزمایشگاه پژوهشی فرایندهای جداسازی (SPRG)، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان

۲. آزمایشگاه پژوهشی فرایندهای جداسازی (SPRG)، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان

۳. آزمایشگاه پژوهشی فرایندهای جداسازی (SPRG)، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان

را با سیستم تقطیر غشایی در خلأ مورد مطالعه قرار می‌دهد. به‌منظور بهبود عملکرد فرایند تقطیر غشایی در خلأ برای نمک‌زدایی آب خلیج فارس و افزایش شار خروجی، یک مدل هم‌زمان انتقال جرم و حرارت برای این سیستم ارائه و با داده‌های تجربی، اعتبارسنجی شده است.



شکل ۱: نمایی از فرایند تقطیر غشایی در خلأ

## ۲- تئوری

در بیشتر سیستم‌های تقطیر غشایی در خلأ، اندازه حفرات غشا در مقایسه با میانگین مسیر آزاد نفوذ مولکولی، بسیار کوچک است. بنابراین، تعداد برخوردهای مولکول-مولکول در مقایسه با تعداد برخوردهای مولکول-دیواره حفره ناچیز بوده، مقاومت نفوذ مولکولی، قابل حذف خواهد بود. در این شرایط، معمولاً مکانیزم نفوذ نادرست<sup>۶</sup> برای انتقال جرم از غشا غالب بوده که در تحقیقات قبلی توسط عده‌ای از محققان مورد بررسی و تأیید قرار گرفته است [۵،۶]. در نتیجه، شار جرمی آب ( $J$ )، به‌صورت خطی با گرادیان فشار جزئی ( $\Delta P$ ) رابطه دارد:

$$J = \frac{K_m}{\sqrt{M}} (P_I - P_V) \quad (1)$$

که  $M$  جرم مولکولی آب ( $\text{kg.mol}^{-1}$ ) در جریان تراوش شده،  $P_V$  (Pa) فشار در سمت خلأ و  $P_I$  (Pa) فشار جزئی آب در سطح غشا است.  $K_m$  قابلیت نفوذ غشا است که به مشخصات غشا و دمای خوراک بستگی دارد. با استفاده از نظریه جنبشی گاز اعمال شده برای نفوذ مایع

فرایند تقطیر غشایی را می‌توان در بسیاری از کاربردهای صنعتی مورد توجه، برای مثال، تغلیظ محلول‌های آبی نظیر آمیوه‌ها [۴-۱]، حذف اجزای آلی فرار<sup>۱</sup> از آب آشامیدنی آلوده [۹-۵]، تصفیه آب هدررفته در خروجی‌های آلوده صنعتی در صنایع نساجی و داروسازی [۱۰، ۱۱] و بازیافت اتانول [۱۲-۱۹] به کار گرفت. همچنین تقطیر غشایی برای تصفیه ضایعات رادیواکتیو و اطمینان از ایمنی بازگشت آن به محیط، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۰]. از طرفی، کاربرد تقطیر غشایی در نمک‌زدایی، توسط برخی از محققان، بررسی شده است [۲۱-۲۵].

بر اساس پیکربندی فرایند، چهار سیستم مختلف تقطیر غشایی معرفی می‌شوند: تقطیر غشایی تماس مستقیم<sup>۲</sup>، تقطیر غشایی با فاصله هوایی<sup>۳</sup>، تقطیر غشایی در خلأ<sup>۴</sup> و تقطیر غشایی با گاز حامل<sup>۵</sup>. یک راه آسان و ممکن برای افزایش تراوش‌پذیری غشا در تقطیر غشایی، حذف هوا از حفرات آن با هواگیری یا اعمال خلأ دائم تا زیر فشار بخار تعادلی، در سمت تراویده توسط پمپ خلأ است. این نوع پیکربندی در تقطیر غشایی که در صنایع مطلوب بوده و ثابت شده که می‌تواند امیدوار کننده باشد، تقطیر غشایی در خلأ نام دارد.

تراویده به‌صورت بخار از مدول غشایی خارج شده، میعان آن در یک کندانسور یا محفظه نیتروژن مایع، خارج از مدول صورت می‌گیرد [۲۶]. نحوه انجام این فرایند (اعمال خلأ)، ایجاد گرادیان فشار جزئی بالاتر و بهبود عملکرد غشا را در مقایسه با دیگر انواع تقطیر غشایی ممکن می‌سازد که نتیجه آن افزایش شار خروجی خواهد بود (شکل ۱).

خلیج فارس قطعاً یکی از حیاتی‌ترین منابع آب در روی زمین است و به‌دلیل وجود منابع نفت و گاز، بسیاری از نیازهای انرژی جهان را نیز تأمین می‌کند. پالایشگاه‌ها و صنایع پتروشیمی که در نزدیکی خلیج فارس قرار گرفته‌اند و مقدار زیادی گرمای تلف شده در جریان‌های خروجی دارند، می‌توانند از این فرایند بهبودیافته برای تولید آب مقطر از آب دریا استفاده کنند.

کاربرد وسیع‌تر از فرایند نمک‌زدایی می‌تواند توسط شرکت‌های تولیدکننده آب مقطر برای فرایندهای صنعتی به کار گرفته شود. این پژوهش، نمک‌زدایی آب خلیج فارس

<sup>۴</sup>. Vacuum Membrane Distillation (VMD)

<sup>۵</sup>. Sweep Gas Membrane Distillation (SGMD)

<sup>۶</sup>. Knudsen

<sup>۱</sup>. VOCs

<sup>۲</sup>. Direct Contact Membrane Distillation (DCMD)

<sup>۳</sup>. Air Gap Membrane Distillation (AGMD)

مایع در درون حفره‌ها و کاهش کارآیی غشا وجود دارد، به‌منظور بررسی بهتر این پدیده می‌توان از معادله کلونین استفاده کرد [۳۰]. معادله کلونین، تغییر فشار بخار یک سطح (همانند سطح یک قطره) را بیان می‌کند و وابسته به اصول ترمودینامیکی است و به خواص ویژه مواد اشاره نمی‌کند. معادله کلونین معمولاً به‌منظور مشخص کردن توزیع اندازه ذرات در محیط متخلخل به کار گرفته می‌شود. این معادله می‌تواند به شکل زیر نشان داده شود:

$$\ln \frac{p}{p_0} = \frac{2\gamma V_m}{rRT} \quad (6)$$

که در آن،  $p$  فشار بخار واقعی،  $p_0$  فشار بخار اشباع،  $\gamma$  کشش سطحی،  $V_m$  حجم مولی مایع،  $R$  ثابت جهانی گازها،  $r$  شعاع قطره و  $T$  دما است.

تغییر فشار بخار می‌تواند به تغییرات فشار لاپلاس نسبت داده شود. هنگامی که فشار لاپلاس در یک قطره افزایش می‌یابد، قطره به‌راحتی تبخیر می‌شود. فشار بخار تعادلی به قطر قطره بستگی دارد؛ اگر سطح منحنی فشار بخار محدب باشد،  $p > p_0$  و اگر سطح منحنی مقعر باشد،  $p < p_0$  (که در اینجا  $p_0$  فشار بخار برای حالتی است که سطح مدنظر، تخت باشد).

به‌منظور بررسی اثر غلظت نمک خلیج فارس بر عملکرد فرایند تقطیر غشایی، داده‌های اندازه‌گیری شده لازم برای مثال ضریب اکتیویته در مطالعات قبلی قابل‌دستیابی است [۳۱]. همچنین آنالیز آب دریا در جدول ۱ ارائه شده است.

گرمای موردنیاز برای تبخیر سطحی از جریان گرم خوراک تأمین می‌شود. یک موازنه ساده در سطحی که تبخیر اتفاق می‌افتد، رابطه زیر را نتیجه می‌دهد:

$$\sum J \lambda = h(T_b - T_l) \quad (7)$$

زمانی که  $T_b$  دمای توده خوراک و  $T_l$  دما در سطح مشترک بخار-مایع است. گرمای نهان تبخیر مولی  $\lambda$  (J.mol<sup>-1</sup>) را که در جداول ترمودینامیکی موجود است [۱۲]، می‌توان از معادله زیر به دست آورد (محدوده اعتبار ۲۷۳-۳۷۳ K):

$$\lambda(T) = 1.7535T + 2024.3 \quad (8)$$

زمانی که  $T$  در واحد کلونین و  $\lambda$  در واحد (kJ.kg<sup>-1</sup>) محاسبه می‌شوند،  $h$  نیز ضریب انتقال حرارت در فاز مایع است که از رابطه عدد بدون بعد ناسلت و برای دو روند هیدرودینامیکی، قابل محاسبه است [۱۳، ۱۴]:

درون حفرات جامد [۲۷]، ضریب تراوایی  $K_m$  (s.mol<sup>1/2</sup>.m<sup>-1</sup>.kg<sup>-1/2</sup>)، از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$K_m = \frac{4\epsilon d_p}{3x \delta (2\pi RT)^{1/2}} \quad (2)$$

همان‌طور که دیده می‌شود، ضریب تراوایی، به دما و برخی خصوصیات غشا نظیر توزیع اندازه حفرات ( $m$ )  $dp$ ، ضخامت ( $m$ )  $\delta$ ، ضریب تخلخل  $\epsilon$  و ضریب پیچش  $\chi$  بستگی دارد.  $R$  (J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>) نیز ثابت عمومی گازها است. ضریب پیچش که از رابطه ۳ به دست می‌آید، به این دلیل بیان می‌شود که فاصله واقعی طی شده در غشا توسط یک مولکول، به دلیل پیچ‌وخم‌های موجود در مسیر حرکت از بین حفرات، از ضخامت غشا بیشتر است [۱۰].

$$\tau = \frac{(2-\epsilon)2}{\epsilon} \quad (3)$$

تخلخل غشایی، به کسر حجم آزاد غشا مرتبط است. غشاهای با تخلخل بیشتر، دارای سطح تبخیر بالاتری نیز هستند. به‌طور کلی غشاهای با تخلخل بیشتر، نرخ نفوذی بالاتری دارند [۲۸]. معادله ۳ به‌منظور مشخص کردن ضریب پیچش پایه متخلخل مرتبط با غشاهای اسمز معکوس که با روش تبدیل فاز ساخته می‌شوند، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۹]. برای ساختارهای پلیمری از خوشه‌های تصادفی، نظریه‌های فراکتال مسیرهای تصادفی، معادله‌ای برای ضریب پیچش ارائه می‌دهد.

$$\tau = \frac{1}{\epsilon} \quad (4)$$

طبق معادله ۴ ضریب پیچش با میزان تخلخل رابطه عکس دارد که میزان تخلخل بیشتر، ضریب پیچش کمتری را نتیجه می‌دهد.

در مخلوط‌های غیرایده‌آل، تعادل مایع-بخار به‌صورت ریاضی و با استفاده از فشار جزئی ( $P_i$ )، فشار بخار جزء خالص (آب) ( $p_i^0$ )، ضریب اکتیویته ( $\xi_i$ ) و ضریب مولی مایع (آب) ( $x_i$ )، بر اساس رابطه ترمودینامیکی زیر، قابل محاسبه است:

$$P_i = p_i^0 x_i \xi_i \quad (5)$$

وابستگی تابعی فشار بخار جزء خالص ( $p_i^0$ ) با دما نیز در رابطه آنتوان قابل دستیابی است.

از آنجایی‌که، رابطه فشار بخار آنتوان برای درون حفره‌ها به‌ویژه حفره‌های نانومتری و میکرومتری، پاسخ دقیق نمی‌دهد و احتمال پدیده میعان موئینگی تبدیل بخار به

در فرایند تقطیر غشایی در خلأ، انتقال حرارت توسط دو مکانیزم اصلی اتفاق می‌افتد [۳۲]:

۱. انتقال گرمای نهان همراه با شار عبوری از غشا؛

۲. انتقال گرما توسط جابه‌جایی از ماتریس غشایی.

در نتیجه، به‌دلیل حضور یک لایه مرزی مخلوط‌نشده در سطح غشا (سمت خوراک) رابطه‌ای پیچیده بین انتقال جرم و حرارت در طول فرایند به وجود می‌آید. دما در سطح غشا کمتر از مقدار متناظر در فاز توده خوراک بوده که باعث ایجاد گرادیان دما در فیلم مایع مجاور غشا می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، این گرادیان دما ناشی از شار حرارتی در لایه مایع است که گرمای موردنیاز را برای تبخیر در سطح غشا فراهم می‌کند (شکل ۲). این پدیده، قطبش دمایی نام دارد [۳۳-۳۵].

$$Nu = 0.13 Re^{0.64} Pr^{0.38} (Re < 2100)$$

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.33} (Re > 2100)$$

$$Re = \frac{\rho v d h}{\mu} \quad (9)$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k_l}$$

که  $\rho$ ،  $\mu$ ،  $v$  و  $dh$  به ترتیب دانسیته، ویسکوزیته، سرعت متوسط جریان و قطر هیدرودینامیکی مدول غشایی هستند و  $k_l$  هدایت حرارتی مایع است. ضریب انتقال حرارت خوراک نیز توسط عدد ناسلت قابل دستیابی است:

$$h = \frac{Nuk_l}{dh} \quad (10)$$

### ۳- قطبش دمایی

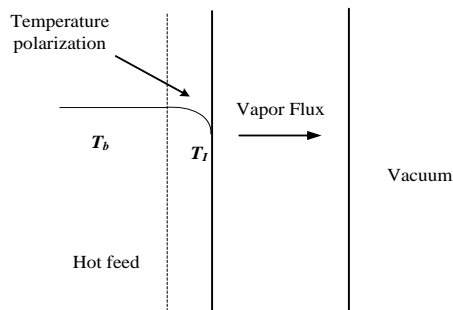
جدول ۱: آنالیز آب خلیج فارس

Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ba <sup>2+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Sr <sup>2+</sup>	یون‌ها
۲۳۰۰۰	۳۳۵۰	۱۶۶	۲۹۹۶	۲۶۷	۱۱۷۵۰	۰.۰۹	۰.۴۲	۳.۴	غلظت در آب دریا (mg.l <sup>-1</sup> )
1.17e <sup>-2</sup>	6.3e <sup>-4</sup>	0.2e <sup>-3</sup>	2.3e <sup>-3</sup>	1.2e <sup>-4</sup>	9.2e <sup>-3</sup>	1.18e <sup>-8</sup>	1.35e <sup>-7</sup>	6.95e <sup>-7</sup>	9.2e <sup>-3</sup>

می‌شود، به‌دلیل اینکه دمای سطح غشا به دمای توده خوراک نزدیک می‌گردد، تأثیر این پدیده، ناچیز خواهد شد.

### ۴- آنالیز عددی مدل شبیه‌سازی شده تقطیر غشایی در خلأ

سیستم تقطیر غشایی در خلأ، یک فرایند ترکیبی غشای تبخیری است که در زمینه کاربرد نمک‌زدایی آب دریا مورد توجه قرار گرفته است. به‌منظور افزایش عملکرد این سیستم در فرایند نمک‌زدایی، یک مدل انتقال جرم و حرارت هم‌زمان انجام گرفته و با داده‌های تجربی اعتبارسنجی شده است. مدل‌سازی به‌طور عددی و در محیط نرم‌افزار MATLAB انجام گرفته است. محاسبات برای غشای پلی‌پروپیلن (PP)<sup>۱</sup> و برخی مواقع پلی‌تترافلورواتیلن (PTFE)<sup>۲</sup> یا پلی‌وینیلیدن‌دی‌فلورید (PVDF)<sup>۳</sup>، با ضریب تخلخل ۰.۷، ضخامت ۴۰۰ μm، میانگین اندازه حفره ۰.۲ μm، سرعت خوراک ۱.۷۵ gr.l<sup>-1</sup>، دمای خوراک ۶۰°C و فشار خلأ ۲۰۰۰ Pa، انجام شده



شکل ۲: پروفایل دمایی در تقطیر غشایی در خلأ

این تغییر دما در سمت خوراک غشا، توسط ضریب قطبش دمایی (TPC) و با استفاده از رابطه زیر نشان داده می‌شود:

$$TPC = \frac{T_l - T_v}{T_b - T_v} \quad (11)$$

بر اساس معادله ۱۱، هرچه ضریب قطبش دمایی کوچک‌تر باشد، تأثیر منفی پدیده قطبش دمایی به‌دلیل کوچک‌تر شدن دمای سطح غشا از دمای توده خوراک، بیشتر است. در مقابل، زمانی که ضریب قطبش دمایی به ۱ نزدیک

<sup>۳</sup>. Polyvinylidenedifluoride

<sup>۱</sup>. Polypropylene

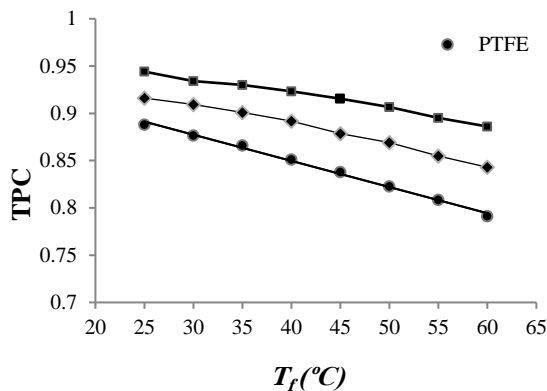
<sup>۲</sup>. Polytetrafluoroethylene

می‌شود (PP دارای کمترین هدایت حرارتی است).

است.

#### ۴-۱- فرضیات مدل

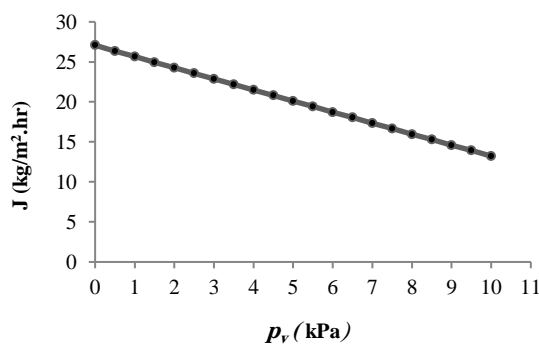
- یک مقدار میانگین برای اندازه حفرات و ضریب تخلخل در غشا فرض شده است.
- یک ضخامت ثابت برای کل غشا در طول آن فرض شده است.
- فشار در طول غشا ثابت فرض شده و موازنه مومنوم در نظر گرفته نشده است.
- تولید یا مصرف جرم در طول فرایند وجود ندارد.
- در نتیجه ایجاد خلأ، هیچ گرادیان دمایی در سمت تراویده در غشا وجود ندارد.



شکل ۳: اثر دمای خوراک بر قطبش دمایی

#### ۵-۲- اثر فشار خلأ بر شار تراوش شده

همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، هنگامی که فشار خلأ افزایش پیدا می‌کند، شار جرمی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، افزایش اختلاف بین فشار خلأ و فشار بخار اشباع آب در دمای سیستم، باعث افزایش نیروی محرکه در فرایند تقطیر غشایی می‌شود. به دلیل اینکه تبخیر آب، پدیده اصلی در فرایند تقطیر غشایی به شمار می‌آید، شار تراوش شده از غشا، در خلأ قوی‌تر نیز بیشتر خواهد بود.



شکل ۴: شار جرمی بر حسب فشار خلأ برای غشای PP

#### ۵-۳- اثر غلظت نمک آب دریا بر شار تراوش شده

همان‌طور که در شکل (۵) مشخص است، زمانی که غلظت حل‌شونده غیرفرآر (نمک‌های آب دریا) که در جدول ۱ نیز نشان داده شده است، افزایش یابد، کاهش مختصری در شار تراوش شده در تقطیر غشایی دیده می‌شود.

بر اساس قانون راولت<sup>۱</sup> این نتیجه را می‌توان مربوط به کاهش فشار بخار جزئی آب، افزایش ناخالصی و در نتیجه کاهش نیروی محرکه فرایند دانست. از طرفی، ضریب انتقال

#### ۵- نتایج شبیه‌سازی و بحث

در این مقاله، مدل‌سازی ارائه شده برای توصیف عملکرد فرایند تقطیر غشایی در خلأ انجام گرفته است. بر این اساس، تأثیر دمای خوراک، فشار خلأ اعمال شده در سمت تراویده، ضریب انتقال حرارت و غلظت خوراک بر روی رفتار انتقالی غشا و همچنین اثر دما بر روی قطبش دمایی، مورد بررسی قرار گرفته است. قابل توجه است که غشاهای پلیمری مورد استفاده در تقطیر غشایی که در این مقاله به منظور مقایسه به کار گرفته شده است، به‌طور عمده از PP، PTFE و PVDF ساخته می‌شوند [۳۶] که ضریب هدایت حرارتی در دمای ۲۹۶°C برای این پلیمرهای آب‌گریز، اندازه‌گیری شده است [۳۷]:

PP: 0.11–0.16 (W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>)

PVDF: 0.17–0.19 (W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>)

PTFE: 0.25–0.27 (W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>)

#### ۵-۱- اثر دمای خوراک بر قطبش دمایی

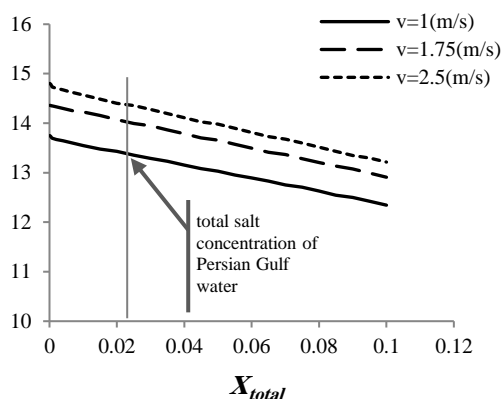
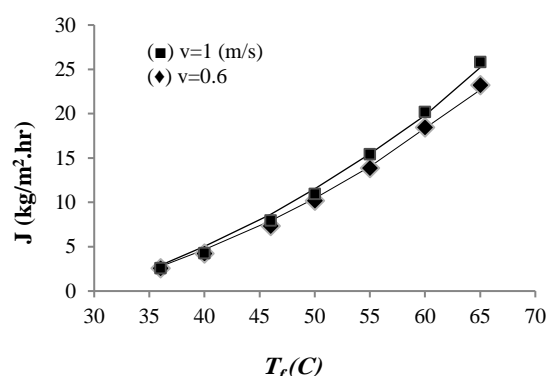
اثر دمای خوراک بر قطبش دمایی برای غشاهای مورد استفاده در تقطیر غشایی در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، با افزایش دمای خوراک، اثر پدیده قطبش دمایی نیز افزایش پیدا کرده است (TPC کاهش یافته است). این واقعیت را می‌توان به مصرف بالاتر انرژی ناشی از تبخیر (گرمای نهان تبخیر) در دمای بالاتر نسبت داد. از طرف دیگر، با کاهش هدایت حرارتی غشا، اثر قطبش دمایی کاهش پیدا کرده است. در ضرایب هدایت حرارتی کوچک‌تر برای مواد غشایی، اثر قطبش دمایی به دلیل کاهش اتلاف گرما توسط سطح غشا کمتر

<sup>۱</sup>.Raoult's law

در پایان، به منظور اعتبارسنجی، پیش‌بینی‌های مدل ارائه شده با نتایج تجربی، مورد مقایسه قرار گرفته است. به این منظور، مجموعه‌ای از محاسبات، بر اساس پارامترهای متناظر در مرجع مشخص شده [۳۸] که در جدول ۲ نشان داده شده، انجام گرفته است تا با مقایسه آن‌ها دقت نتایج مدل مشخص شود. نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل با به‌کارگیری غشای پلی‌پروپیلن به دست آمد. همچنین، آب خالص (آب یون‌زدایی شده و مقطر) به‌عنوان خوراک ورودی مورد استفاده قرار گرفت. همان‌طور که در شکل (۷) مشخص است، داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل، موافقت خوبی با داده‌های تجربی نشان می‌دهد.

جدول ۲: پارامترهای متناظر در آزمایش‌های مرجع [۳۸]

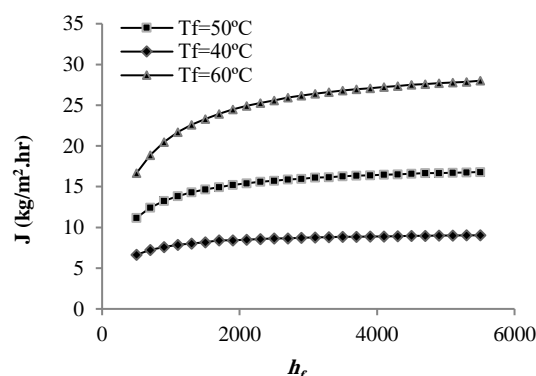
فشار خلأ (Pa)	قطر هیدرولیکی (m)	توزیع اندازه حفرات (μm)	ضخامت (μm)	تخلخل
۴۰۰۰	۰,۰۰۱۸	۰,۲	۴۰۰	۰,۷



شکل ۵: اثر افزایش غلظت حل‌شونده بر شار گرمی

#### ۵-۴- اثر ضریب انتقال حرارت بر شار تراوش شده

شکل (۶) نشان می‌دهد که شار گرمی با افزایش ضریب انتقال حرارت خوراک، افزایش می‌یابد. ضریب انتقال حرارت بالا به معنای کاهش مقاومت در برابر انتقال حرارت و در نتیجه، کاهش گرادیان درجه حرارت در محفظه خوراک است. به عبارت دیگر، در این حالت دمای سطح غشا در سمت خوراک به دمای توده خوراک نزدیک می‌شود. فشار بخار اشباع آب در این حالت (دمای بالاتر در سطح غشا) بزرگ‌تر بوده، در نتیجه نیروی محرکه و به دنبال آن، شار خروجی افزایش می‌یابد.



شکل ۶: شار گرمی بر حسب ضریب انتقال حرارت خوراک

همچنین با افزایش دمای خوراک ورودی، اثر مطلوب افزایش ضریب انتقال حرارت بر شار خروجی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، در دماهای بالاتر، افزایش ضریب انتقال حرارت برای افزایش شار، مؤثرتر خواهد بود.

#### ۶- اعتبارسنجی مدل (اثر دمای خوراک بر شار تراوش شده)

شکل ۷: مقایسه شار گرمی مدل و شار گرمی تجربی بر حسب دمای خوراک برای غشای PP. خطوط: داده‌های پیش‌بینی شده، نقاط: داده‌های تجربی.

همان‌گونه که در معادلات (۱) و (۲) دیده می‌شود، شار تراوش شده، به دو عامل مربوط به دما بستگی دارد: نیروی محرکه (گرادیان فشار جزئی) و ضریب انتقال جرم. بر اساس معادله (۲)، ضریب انتقال جرم و در نتیجه شار تراوش شده با ریشه دوم دمای خوراک کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، فشار اشباع در نیروی محرکه بر اساس رابطه آنتوان، به صورت نمایی با دما افزایش می‌یابد. با مقایسه این دو اثر، مشخص می‌شود که پدیده دوم غالب بوده (اثر افزایش فشار بر کاهش ضریب انتقال حرارت غالب است)، در نتیجه،

مشاهده شد که عملکرد این سیستم با افزایش دمای خوراک و ضریب انتقال حرارت و کاهش فشار خلأ و غلظت خوراک ورودی، افزایش می‌یابد. همچنین اثر نامطلوب پدیده قطبش دمایی با افزایش دمای خوراک افزایش یافت. از طرفی، با مقایسه نتایج بررسی‌های انجام‌شده بر روی ضریب انتقال حرارت، مشخص شد که در دماهای بالاتر، اثر افزایش ضریب انتقال حرارت در افزایش شار مؤثرتر خواهد بود.

#### تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از حمایت پژوهشکده انرژی دانشگاه کاشان، کمال تشکر و امتنان را دارند.

افزایش دمای خوراک ورودی، افزایش نمایی شار را نتیجه می‌دهد.

#### ۷- نتیجه‌گیری

به‌منظور افزایش عملکرد سیستم تقطیر غشایی در خلأ برای نمک‌زدایی آب خلیج فارس و افزایش شار خروجی آن، مطالعه تئوری بر روی این فرایند صورت گرفته است. تأثیر پارامترهای عملیاتی نظیر دمای خوراک، میزان فشار خلأ در سمت تراویده، غلظت خوراک ورودی و ضریب انتقال حرارت بر روی شار جرمی خروجی موردبررسی قرار گرفته است. همچنین اثر دمای خوراک بر روی پدیده قطبش دمایی نیز مطالعه شده است.

#### مراجع

- [1] K. Bélafi-Bakó and B. Koroknai, "Enhanced water flux in fruit juice concentration: Coupled operation of osmotic evaporation and membrane distillation", *Journal of Membrane Science*, 269, 2006, pp. 187-193.
- [2] V. Calabro, B.L. Jiao and E. Drioli, "Theoretical and experimental study on membrane distillation in the concentration of orange juice", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 33, 1994, pp. 1803-1808.
- [3] A. Hasanoğlu, F. Rebolledo, A. Plaza and et al., "Effect of the operating variables on the extraction and recovery of aroma compounds in an osmotic distillation process coupled to a vacuum membrane distillation system", *Journal food Engineering*, 111, 2012, pp. 632-641.
- [4] S. Kimura, S.-I. Nakao and S.-I. Shimatani, "Transport phenomena in membrane distillation", *Journal of Membrane Science*, 33, 1987, pp. 285-98.
- [5] R. Bagger-Jørgensen, A.S. Meyer, C. Varming and et al., "Recovery of volatile aroma compounds from black currant juice by vacuum membrane distillation", *Journal food Engineering*, 64, 2004, pp. 23-31.
- [6] F.A. Banat and J. Simandl, "Removal of benzene traces from contaminated water by vacuum membrane distillation", *Chemical Engineering Science*, 51, 1996, pp. 1257-1265.
- [7] N. Couffin, C. Cabassud and V. Lahoussine-Turcaud, "A new process to remove halogenated VOCs for drinking water production: vacuum membrane distillation", *Desalination*, 117, 1998, pp. 233-245.
- [8] A. Urtiaga, E. Gorri, G. Ruiz and et al., "Parallelism and differences of pervaporation and vacuum membrane distillation in the removal of VOCs from aqueous streams", *Separation and Purification Technology*, 22, 2001, pp. 327-337.
- [9] B. Wu, X. Tan, K. Li and et al., "Removal of 1, 1, 1-trichloroethane from water using a polyvinylidene fluoride hollow fiber membrane module: Vacuum membrane distillation operation", *Separation and Purification Technology*, 52, 2006, pp. 301-309.
- [10] V. Calabro, E. Drioli and F. Matera, "Membrane distillation in the textile wastewater treatment", *Desalination*, 83, 1991, pp. 209-224.
- [11] Y. Wu, Y. Kong, J. Liu and et al., "An experimental study on membrane distillation-crystallization for treating waste water in taurine production", *Desalination*, 80, 1991, pp. 235-242.

- [12] F.A. Banat and J. Simandl, "Membrane distillation for dilute ethanol: separation from aqueous streams", *Journal of Membrane Science*, 163, 1999, pp. 333-348.
- [13] M. Gryta, "The fermentation process integrated with membrane distillation", *Separation and Purification Technology*, 24, 2001, pp. 283-296.
- [14] M. Izquierdo-Gil and G. Jonsson, "Factors affecting flux and ethanol separation performance in vacuum membrane distillation (VMD)", *Separation and Purification Technology*, 214, 2003, pp. 113-130.
- [15] M. Khayet, "Membrane distillation", *Advanced membrane technology and applications*, 2008, p. 297-369.
- [16] R.W. Baker, "Overview of membrane science and technology", *Membrane Technology and Applications*, Second Edition, 2004, p. 1-14.
- [17] F.A. Banat, F.A. Al-Rub and M. Shannag, "Modeling of dilute ethanol–water mixture separation by membrane distillation", *Separation and Purification Technology*, 16, 1999, pp. 119-131.
- [18] A. Franken, J. Nolten, M. Mulder and et al., "Wetting criteria for the applicability of membrane distillation", *Journal of Membrane Science*, 33, 1987, pp. 315-328.
- [19] G. Lewandowicz, W. Białas, B. Marczewski and et al., "Application of membrane distillation for ethanol recovery during fuel ethanol production", *Journal of Membrane Science*, 375, 2011, pp. 209-212.
- [20] G. Zakrzewska-Trznadel, M. Harasimowicz and A.G.Chmielewski, "Concentration of radioactive components in liquid low-level radioactive waste by membrane distillation" *Journal of Membrane Science*, 163, 1999, pp. 257-264.
- [21] E. Drioli and Y. Wu, "Membrane distillation: an experimental study", *Desalination*, 53, 1985, pp. 339-346.
- [22] P. Wang and T.S. Chung, "Recent advances in membrane distillation processes: membrane development, configuration design and application exploring", *Journal of Membrane Science*, 474, 2015, p. 39-56.
- [23] E. Drioli, A. Ali and F. Macedonio, "Membrane distillation: recent developments and perspectives", *Desalination*, 356, 2015, pp. 56-84.
- [24] A. Khalifa, H. Ahmad, M. Antar and et al., "Experimental and theoretical investigations on water desalination using direct contact membrane distillation", *Desalination*, 404, 2017, pp. 22-34.
- [25] C. Boo, J. Lee and M. Elimelech, "Engineering surface energy and nanostructure of microporous films for expanded membrane distillation applications", *Environmental Science & Technology*, 50, 2016, pp. 8112-8119.
- [26] M.A.E.-R. Abu-Zeid, Y. Zhang, H. Dong and et al., "A comprehensive review of vacuum membrane distillation technique", *Desalination*, 356, 2015, pp. 1-14.
- [27] F.A. Dullien, *Porous media: fluid transport and pore structure*, Academic press, 2012.
- [28] A.Alkudhiri, N. Darwis and N. Hilal, "Membrane distillation: a comprehensive review", *Desalination*, 287, 2012, pp. 2-18.
- [29] S. Iversen, V. Bhatia, K. Dam-Johansen and et al., "Characterization of microporous membranes for use in membrane contactors", *Journal of Membrane Science*, 130, 1997, pp. 205-217.
- [30] L. Skinner and J. Sambles, "The Kelvin equation—a review", *Journal of Aerosol Science*, 3, 1972, pp. 199-210.



- [31] J. Kielland, "Individual activity coefficients of ions in aqueous solutions", *Journal of the American Chemical Society*, 59, 1937, pp. 1675-1678.
- [32] K.W. Lawso and D.R. Lloyd, "Membrane distillation", *Journal of Membrane Science*, 124, 1997, pp. 1-25.
- [33] C.-K. Chiam and R. Sarbatly, "Vacuum membrane distillation processes for aqueous solution treatment—A review", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 74, 2013, pp. 27-54.
- [34] S. Bandini, A. Saavedra and G.C. Sarti, "Vacuum membrane distillation: experiments and modeling", *AIChE Journal*, 43, 1997, pp. 398-408.
- [35] J.-P. Mericq, S. Laborie and C. Cabassud, "Vacuum membrane distillation of seawater reverse osmosis brines", *Water Research*, 44, 2010, pp. 5260-2573.
- [36] E. Curcio and E. Drioli, "Membrane distillation and related operations—a review", *Separation and Purification Technology*, 34, 2005, pp. 35-86.
- [37] J. Brandup and E. Immergut, *Polymer handbook*, 3rd edn, Wiley, New York, 1989.
- [38] J. Mengual, M. Khayet and M. Godino, "Heat and mass transfer in vacuum membrane distillation", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 2004, pp. 865-875.