

مدل سازی دینامیکی تقطیر غشایی تماس مستقیم در هندسه صفحه تخت

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
 morteza.mohammadi@urmia.ac.ir
 استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
 i.mirzaee@urmia.ac.ir
 استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
 m.khalilian@urmia.ac.ir

مرتضی محمدی

ایرج میرزایی *

مرتضی خلیلیان

چکیده

در این مقاله، مطالعات مدل سازی دینامیکی سیستم تقطیر غشایی تماس مستقیم در هندسه صفحه تخت ارائه شده است. ابتدا با اعمال موازنه های جرم و انرژی، معادلات توصیف کننده رفتار دینامیکی فرآیند تقطیر غشایی تماس مستقیم در هندسه تخت محقق گردیده است. در ادامه به منظور حل عددی این معادلات در بستر نرم افزار MATLAB، از روش خطوط استفاده شده است. جهت اطمینان از نتایج حاصل از مدل سازی عددی، نتایج بدست آمده از مدل سازی با نتایج تجربی موجود در مقالات با زمینه تحقیقاتی مرتبط، مقایسه و صحت سنجی شده است. نتایج حاصل از صحت سنجی، نشان دهنده حداکثر خطای میانگین ۴/۰۵ درصد بین مدل سازی و نتایج تجربی است. همچنین نتایج بدست آمده از مدل سازی مفروض (برای پارامترهای موثر بر عملکرد سیستم تقطیر غشایی تماس مستقیم)، نشان می دهد که تغییرات دمای جریان گرم غشاء بیشترین تاثیر را بر روی شار نفوذی به سمت سرد غشاء را دارد. به نحوی که افزایش ۱۰٪ در دمای جریان گرم غشاء شار نفوذی از غشاء را ۴۹/۸٪ درصد افزایش می دهد.

واژه های کلیدی: تقطیر غشایی تماس مستقیم، شیرین سازی آب، مدل سازی دینامیکی، بازده انرژی، انتقال حرارت، انتقال جرم

Dynamic modeling of direct contact membrane distillation in flat-sheet geometry

M. Mohammadi
 I. Mirzaee
 M. Khalilian

Faculty of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
 Faculty of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
 Faculty of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

Abstract

This paper presents dynamic modeling studies of a direct contact membrane distillation (DCMD) system with a flat-sheet geometry. first, the mass and energy balances are applied to derive the equations characterizing the dynamic behavior of the DCMD process in flat-sheet geometry. Subsequently, these equations are solved numerically using the method of lines within the MATLAB environment. To ensure the reliability of the numerical modeling results, a comparative validation is performed against experimental data from relevant research literature. Validation results indicate a maximum error of the mean 4.05% between the model predictions and experimental findings. Additionally, the modeling results, considering parameters affecting the DCMD system's performance, reveal that variations in the hot-side feed temperature significantly impact the permeate flux toward the cold-side membrane. Specifically, a 10% increase in the hot feed temperature enhances the permeate flux by 49.8%.

Keywords: Direct contact membrane distillation, Water desalination, Dynamic modeling, Energy efficiency, Heat transfer, Mass transfer

۱- مقدمه

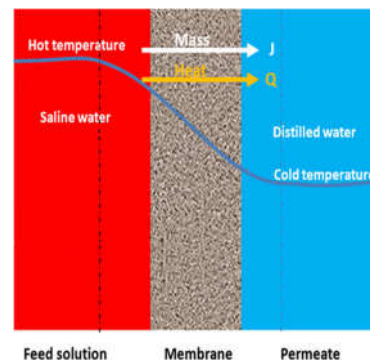
فناوری های جداسازی غشایی تکنیک های امیدوارکننده ای هستند که می توانند طیف وسیعی از یون ها و میکروارگانیسم های تک ظرفیتی و چند ظرفیتی را از آب آلوده حذف کنند. در مقایسه با روش های مرسوم، مانند انعقاد لخته سازی، جذب، تقطیر، تبخیر و تبادل یونی، فرآیندهای جداسازی مبتنی بر غشاء، از مزایای بسیاری بهره می برند از جمله: بازده جداسازی بالاتر، عملیات ساده تر و اثرات جانبی کمتر [۱-۳]. در حال حاضر در میان تمام فرآیندهای نمک زدایی، غشای اسمز معکوس (RO) بیشتر از سایر روش ها مورد استفاده قرار گرفته است؛ بطوری که ۵۰ درصد آب شیرین کن های فعال در تمام دنیا از فناوری غشای اسمز معکوس استفاده می نمایند. در ۵۰ درصد باقیمانده آب شیرین کن ها فناوری هایی همچون فرآیندهای گرمایی مرسوم مانند تقطیر ناگهانی چند مرحله ای (MSF)، نمک زدایی چند اثره (MED) و

تقطیر تراکمی بخار (VCD) مورد استفاده قرار گرفته است [۴-۷]. تقطیر غشایی (MD) مبنای جداسازی غشایی رسانش گرمایی است فرآیند مذکور در دمای خوراک نسبتاً پایین (۵۰-۸۰°C) و فشار اتمسفر به انجام می رسد. در این فرآیند، آب گرم به عنوان خوراک وارد غشاء می گردد (معمولاً آب شور) و در تماس با یک غشاء قرار می گیرد، در حالی که جریان آب سرد در طرف دیگر غشاء در جریان است [۸]. اختلاف دما بین خوراک و آب سرد در آن سوی غشاء منجر به یک گرادیان فشار بخار در سراسر غشاء می شود، که همین عامل پتانسیل لازم جهت حرکت مولکول های آب در حفره های داخل غشاء و انتقال آنها از سمت سیال گرم به سیال سرد را فراهم می سازد. مولکول های آب در فاز گاز از غشاء عبور نموده و در سمت سیال سرد دچار فرآیند میعان می گردند [۵، ۶]. فرآیند MD از مزایایی همچون عدم نفوذ تمامی ناخالصی های غیر فرار موجود در آب برخوردار است علاوه بر آن فرآیند مذکور در فشار اتمسفر به انجام رسیده و پتانسیل ایحاد رسوب

در آن ناچیز می‌باشد [۹-۱۱]. با توجه به ویژگی‌های ذکر شده از فناوری MD می‌توان به منظور جداسازی نمک‌هایی همچون NaCl، KCl و LiBr از آب استفاده نمود [۱۲-۱۵]. با وجود مزایای ذکر شده در بالا برخی از محدودیت‌ها مانع بکارگیری فرآیند MD در فرآیندهای صنعتی گردیده است [۱۶-۱۹]. اثر منفی پلاریزاسیون دمایی مهم‌ترین مشکل در فرآیند MD می‌باشد چرا که پلاریزاسیون دمایی شار عبوری را بصورت قابل ملاحظه‌ای کاهش خواهد داد. از دیگر معایب فرآیند MD مرطوب شدن منافذ غشاء، وجود مشکلات متعدد در طراحی ماژول غشاء و همچنین مشخص نبودن انرژی مصرفی در فرآیند و همچنین ابهام در هزینه‌های بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری می‌باشد [۷، ۱۶-۱۷].

مدل‌های مکانیکی کلاسیک همچنان پایه‌ی اصلی تحلیل‌ها هستند و شار بخار را بر اساس اختلاف فشار بخار دو سوی غشاء توصیف می‌کنند، در حالی که پژوهش‌های جدید با اصلاح ضرایب ناسلت و شروود، لحاظ کردن خواص متغیر سیال و اثرات قطبش دمایی و غلظتی، کارایی پیش‌بینی این مدل‌ها را ارتقا داده‌اند [۲۰-۲۲]. در کنار آن، مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای تحلیل میدان‌های دما و غلظت درون کانال‌ها و بررسی تأثیر هندسه و فاصله‌ی جداکننده‌ها بر انتقال حرارت و جرم به کار گرفته شده‌اند [۲۳-۲۵]. مدل‌سازی دینامیکی نیز امکان بررسی عملکرد لحظه‌ای DCMD را فراهم کرده و در مطالعات فنی-اقتصادی، پتانسیل بالای این فناوری برای نمک‌زدایی پایدار و کم‌مصرف گزارش شده است [۲۹-۲۶]. به طور کلی، تحقیقات اخیر بیانگر گذار از مدل‌های ساده‌ی تحلیلی به چارچوب‌های چند فیزیکی و ترکیبی هستند که ضمن افزایش دقت شبیه‌سازی، چالش‌های باقی‌مانده مانند ترشوندگی، اعتبارسنجی در مقیاس بزرگ و استانداردسازی داده‌ها را برجسته کرده‌اند [۲۲، ۲۵، ۳۰-۳۲].

تاکنون چندین مدل ریاضی برای فرآیند MD توسعه یافته و گزارش شده است [۳۳-۴۲]. علی و همکاران [۳۹] اثرات هیدرودینامیک شرایط حرارتی متفاوت را بر روی پدیده‌های انتقال جرم و گرما در فرآیند تقطیر غشایی تماس مستقیم مورد بررسی قرار داده و اثرات پلاریزاسیون حرارتی را بررسی نمودند. ایشان با نصب حسگرهای زیاد بر روی سطح غشاء اثرات دمای خوراک را بر روی پلاریزاسیون غشاء مورد مطالعه قرار دادند [۳۴]. علاوه بر آن حساسیت فرآیند



شکل ۱- طرحواره پدیده‌های انتقال جرم و گرما در فرآیند تقطیر غشایی تماس مستقیم

نسبت پارامترهای عملیاتی دما، سرعت جریان و شوری خوراک مورد به بررسی قرار گرفت. خلیفه و همکاران [۵] اثر پارامترهای عملیاتی مختلف همچون دمای خوراک، سرعت سیال و غلظت نمک بر روی میزان شار عبوری از غشاء مورد بررسی قرار دادند. سوامیناتان و همکاران [۴۳] و ایکس یو و همکاران [۴۴] از نظریه مبادله‌کن‌های گرمایی (E-NTU) به منظور مدل‌سازی فرآیند MD استفاده نمودند. در اکثر مدل‌های ارائه شده تغییرات دما در یک بعد و در راستای طول غشاء در نظر گرفته شده است [۳۳، ۳۹، ۴۵].

در این مطالعه، یک مدل جدید بر اساس موازنه‌های جرم و انرژی برای فرآیند تقطیر غشایی تماس مستقیم در هندسه تخت توسعه یافته است. هدف از این مدل، ارائه چارچوبی جامع برای بررسی رفتار کل ماژول غشایی و تحلیل دقیق پدیده‌های انتقال جرم و انرژی درون آن می‌باشد. همچنین شبیه‌سازی دوبعدی امکان بررسی توزیع فضایی دما و غلظت در کل سطح غشاء را فراهم می‌کند و اثرات غیر یکنواختی جریان و انتقال جرم را نشان می‌دهد. این مدل همچنین امکان پیش‌بینی دقیق‌تر عملکرد غشاء و شناسایی نقاط ضعف هندسه ماژول را نسبت به مدل یک‌بعدی فراهم می‌سازد. مضافاً این مدل قادر است تأثیر تغییرات شرایط عملیاتی، از جمله دما و مشخصات جریان‌ها، بر عملکرد غشاء را پیش‌بینی کرده و امکان شبیه‌سازی شرایط متعدد بهره‌برداری را فراهم کند. به این ترتیب، می‌توان با استفاده از این مدل، طراحی بهینه و ارزیابی عملکرد سیستم‌های تقطیر غشایی را به صورت دقیق و کارآمد انجام داد.

۲- مدل سازی ریاضی

شکل ۱ نمایی از فرآیند تقطیر غشایی مستقیم را ارائه می‌نماید. مدل‌سازی فرآیند در دو بخش انتقال جرم و انتقال گرما صورت گرفته است. جزییات ابعادی و فرضیات مورد استفاده برای انتخاب بازه عملکرد دماها و دبی جریان‌های گرم و سرد در جدول ۱ ارائه شده است. همانطور که در شکل ۱ قابل مشاهده است، دو جریان ناهمسو که در بخش گرم و سرد غشاء جریان دارند، خوراک ابتدا گرم شده و سپس به دلیل تفاوت فشار بخار در دو طرف غشاء که در اثر اختلاف دما ایجاد شده است، جریان عبوری به صورت بخار از بین منافذ غشاء متخلخل و آب گریز نفوذ کرده و در طرف دیگر غشاء فرایند میعان پدیدار شده و جمع‌آوری می‌شود.

در این مطالعه، معادلات حاکم بر فرآیند مورد نظر به صورت معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی (PDEs) فرموله شده‌اند. برای حل این معادلات، از روش خطوط (Method of Lines, MOL) استفاده شده است. در این روش، بخش‌های مکانی معادلات با استفاده از تفاضلات محدود گسسته‌سازی شده و در نتیجه دستگاهی از معادلات دیفرانسیل معمولی (ODEs) در زمان به‌دست می‌آید. سپس دستگاه ODE حاصل با استفاده از نرم‌افزار MATLAB حل گردیده است. پارامترهای هندسی، شرایط مرزی و سایر داده‌های ورودی مدل از طریق یک فرآیند بهینه‌سازی عددی تعیین شده‌اند. بهینه‌سازی با استفاده از تابع fmincon در نرم‌افزار MATLAB انجام شده است تا بهترین تطابق بین نتایج مدل‌سازی و داده‌های تجربی حاصل شود. این رویکرد سبب

قانون اول فیک مطابق رابطه (۷) می‌باشد. C_w غلظت جرمی آب (کیلوگرم بر متر مکعب) بوده و D_{AB} ضریب نفوذ آب از غشاء و dz ضخامت غشاء می‌باشد.

$$J = -D_{AB} \frac{dC_w}{dz} = -D_{AB} \frac{1 - C_w}{dz} \quad (7)$$

با جایگذاری رابطه (۷) در رابطه (۶)، رابطه (۸) بدست آمده است.

$$w \times h \times \frac{dC_w}{dt} = -m \frac{dC_w}{dL} + D_{AB} \frac{1 - C_w}{dz} \quad (8)$$

۲-۲- انتقال گرما

$$\text{input} - \text{output} + \text{gen} - \text{con} = \text{Acc} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، «input» به انرژی ورودی به جز و «output» به انرژی خروجی از آن اشاره دارد، که علاوه بر آن شامل مقداری انرژی است که همراه با جریان آبی که از غشاء عبور می‌کند، از آن جز خارج می‌گردد. انرژی عبوری از دیواره غشاء مطابق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود. در این رابطه، A مساحت سطح داخلی غشاء، J نرخ نفوذ آب از غشاء، و h_{fg} گرمای نهان تبخیر آب است. این تعریف امکان ارزیابی دقیق انتقال انرژی همراه با جریان نفوذی آب و پیش‌بینی تغییرات دما و انرژی در طول ماژول را فراهم می‌آورد.

$$J \times A \times h_{fg} = \text{انرژی عبوری از غشاء} \quad (10)$$

$$\text{gen} = 0, \text{con} = 0 \quad (11)$$

$$\text{Acc} = (\rho \times w \times h \times dL \times C_p \times T)^{t+\Delta t} - (\rho \times w \times h \times dL \times C_p \times T)^t \quad (12)$$

میزان تجمع انرژی در داخل جز در نظر گرفته شده در بازه زمانی t تا $t+\Delta t$ ، مطابق با رابطه (۱۲) محاسبه می‌گردد. در رابطه (۱۲) h ارتفاع کانال، w عرض کانال، L طول کانال، C_p گرمای ویژه آب ورودی به غشاء (خوراک)، ρ دانسیته سیال بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، T دما بر حسب درجه سلسیوس می‌باشند.

$$= w \times dL \times A \quad (13)$$

$$(\rho \times w \times h \times dL \times C_p \times T)^{t+\Delta t} - (\rho \times w \times h \times dL \times C_p \times T)^t \quad (14)$$

$$= mC_p \times T|_L \times \Delta t - mC_p \times T|_{L+dL} \times \Delta t - J \times w \times dL \times h_{fg} \times \Delta t$$

با تقسیم طرفین رابطه (۱۴) بر $dL \times \Delta t$ رابطه (۱۵) به دست می‌آید.

$$\rho \times w \times h \times C_p \times \frac{dT}{dt} = -mC_p \frac{dT}{dL} - J \times w \times h_{fg} \quad (15)$$

$$J = -D_{AB} \frac{dC_w}{dz} = -D_{AB} \frac{1 - C_w}{dz} \quad (16)$$

در رابطه (۱۶) D_{AB} ضریب نفوذ آب از غشاء و dz ضخامت غشاء می‌باشد. با جایگذاری رابطه (۱۶) در رابطه (۱۵) رابطه (۱۷) محقق می‌گردد.

$$\rho \times w \times h \times C_p \times \frac{dT}{dt} = -mC_p \frac{dT}{dL} + J \times w \times D_{AB} \frac{1 - C_w}{dz} \times h_{fg} \quad (17)$$

در رابطه (۱۷) C_p گرمای ویژه آب ورودی به غشاء (خوراک) می‌باشد.

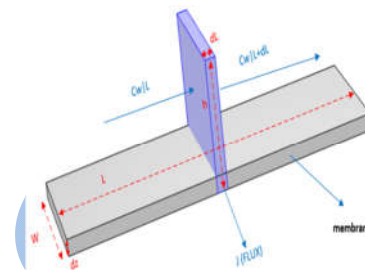
۲-۳- ضریب انتقال جرم

D_{AB} یا B_M ضریب انتقال جرم غشاء می‌باشد. ضریب انتقال جرم

می‌شود مقادیر ورودی مدل (از جمله مشخصات هندسه و شرایط مرزی) به صورت بهینه و منطبق بر شرایط واقعی آزمایش انتخاب شوند.

جدول ۱- فرضیات و ابعاد ورودی حل معادلات مدل سازی

طول غشاء	۱ متر
ارتفاع دیواره سمت گرم غشاء	۱۰ سانتی‌متر
ارتفاع دیواره سمت سرد غشاء	۴۰ سانتی‌متر
عرض غشاء	۳۰ سانتی‌متر
دمای ورودی سمت گرم غشاء	۸۰ درجه سلسیوس
دمای ورودی سمت سرد غشاء	۵ درجه سلسیوس
دبی جرمی سمت گرم غشاء	۰/۱ کیلوگرم بر ثانیه
دبی جرمی سمت سرد غشاء	۰/۵ کیلوگرم بر ثانیه



شکل ۲- نمایی سه بعدی از المان در نظر گرفته شده غشای مورد مطالعه در هندسه تخت

۲-۱- انتقال جرم

$$\text{input} - \text{output} + \text{gen} - \text{con} = \text{Acc} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، «input» به سیال ورودی به جز و «output» به سیال خروجی از آن اشاره دارد. خروجی شامل بخشی از جریان اصلی سیال است که از طریق دیواره غشاء نفوذ کرده و تحت فرآیند تقطیر غشایی، شیرین شده است. این تعریف امکان مدل‌سازی دقیق انتقال جرم بین جریان‌ها و دیواره غشاء را فراهم می‌آورد و پایه لازم برای محاسبه تغییرات غلظت و نرخ تولید محصول شیرین را ایجاد می‌کند.

$$= w \times dL \times A \quad (2)$$

$$\text{gen} = 0, \text{con} = 0 \quad (3)$$

$$\text{Acc} = (w \times h \times dL \times C_w)^{t+\Delta t} - (w \times h \times dL \times C_w)^t \quad (4)$$

$$(w \times h \times dL \times C_w)^{t+\Delta t} - (w \times h \times dL \times C_w)^t = mC_w|_L \times \Delta t - mC_w|_{L+dL} \times \Delta t - J \times w \times dL \times \Delta t \quad (5)$$

میزان تجمع جرم در داخل المان در نظر گرفته شده در بازه زمانی t تا $t+\Delta t$ مطابق با رابطه (۵) محاسبه می‌گردد. در رابطه (۵) h ارتفاع کانال و w عرض کانال می‌باشد. با تقسیم طرفین رابطه (۵) بر $dL \times \Delta t$ رابطه (۶) محقق می‌گردد (dL طول المان می‌باشد).

$$w \times h \times \frac{dC_w}{dt} = -m \frac{dC_w}{dL} - J \times w \quad (6)$$

در رابطه (۶) پارامتر J شار جرم عبوری از غشاء بوده و بر مبنای

غشاء به خواص غشاء همچون اندازه منافذ، تخلخل، ضخامت، میانگین دمای سیال در دو طرف غشاء و نوع نفوذ وابسته است [۳۵، ۱۶، ۳۵]. سه نوع نفوذ در غشاهای رخ می دهد که عبارتند از ۱- نفوذ نادرین، ۲- نفوذ مولکولی، ۳- نفوذ بر مبنای مکانیسم انتقال (ترکیبی از مکانیسم نفوذ نادرین و نفوذ مولکولی). نوع نفوذ بر اساس مقدار عدد نادرین مشخص می گردد. عدد نادرین طبق معادله (۱۸) قابل محاسبه است.

$$K_n = \frac{\lambda}{d_{pore}} \quad (18)$$

$$\lambda = \frac{K_B T_m}{\sqrt{2} P_m \sigma^2} \quad (19)$$

در رابطه (۱۹) λ میانگین مسیر طی شده توسط مولکولهای منتقل شونده بوده و d اندازه منافذ غشاء می باشد. K_B ثابت بولتزمن $(1.380649 \times 10^{-23} \text{ J/K})$ و P_m میانگین فشار در حفرات غشاء است (در این تحقیق برابر با فشار اتمسفر) و سیگما نشان دهنده قطر برخورد مولکولهای آب می باشد $(2.641 \times 10^{-10} \text{ m})$.

در صورتی که مقدار ضریب نادرین (K_n) بزرگتر از یک باشد مکانیسم نفوذ، نادرین می باشد. در صورتی که ضریب نادرین کمتر از ۰/۱ باشد مکانیسم نفوذ، مولکولی می باشد. در صورتی که ضریب نادرین بین ۰/۱ و ۱ باشد مکانیسم نفوذ، انتقال می باشد (ترکیبی از نفوذ مولکولی و نادرین). نحوه محاسبه ضریب انتقال جرم به ازای مقادیر متفاوت ضریب نادرین طی رابطه های (۲۰)، (۲۱) و (۲۲) ارائه می گردد [۴۶، ۳۷].

$$K_n > 1: B_M = B_K = \left(\frac{2\epsilon r}{3\delta t} \right) \left(\frac{8MW_w}{\pi RT_{avg,m}} \right)^{0.5} \quad (20)$$

$$K_n < 0.01: B_M = B_m = \frac{MW_w \epsilon PD}{RT_{avg,m} \delta t P_{air,pore}} \quad (21)$$

$$0.01 < K_n < 1:$$

$$B_M = B_T = \left\{ \left[\left(\frac{2\epsilon r}{3\delta t} \right) \left(\frac{8MW_w}{\pi RT_{avg,m}} \right)^{0.5} \right]^{-1} + \left[\frac{MW_w \epsilon PD}{RT_{avg,m} \delta t P_{air,pore}} \right]^{-1} \right\}^{-1} \quad (22)$$

در رابطه (۲۲)، $P_{air,pore}$ فشار هوا در منافذ غشاء است. همچنین پارامترهای PD و $P_{air,pore}$ با استفاده از رابطه های (۲۳) و (۲۴) محاسبه می گردند [۴۷].

$$PD = 1.895 \times 10^{-5} T_{avg,m}^{2.072} \quad (23)$$

$$P_{air,pore} = P - \exp(23.1964 - \frac{3816.44}{T_{avg,m} - 46.13}) \quad (24)$$

۲-۴- ضریب پلاریزاسیون دمایی

مقاومت گرمایی بر مبنای لایه های مرزی مجاور قسمت های خوراک و پرمیت (آب خالص) در بخش تست غشاء گرا دیان دمایی بین سطح غشاء و سیال بالک ایجاد می کند (پروفایل دمایی غشاء در شکل ۱ را ببینید). این پدیده، پلاریزاسیون دمایی نامیده می شود که باعث کاهش قابل توجهی در نیروی محرکه گرمایی و در نتیجه آن شار نفوذ (آب خالص) کاهش می یابد. برای بررسی اثر پلاریزاسیون دما بر عملکرد DCMD، ضریب پلاریزاسیون دمایی (TPC) به صورت معادله

زیر برای این فرآیند تعریف می شود [۴۸، ۳۸، ۱۶، ۷]. هرچه TPC کمتر باشد تاثیر پلاریزاسیون دمایی بر عملکرد DCMD بیشتر است.

$$TPC = \frac{T_{mf} - T_{mp}}{T_{bf} - T_{bp}} \quad (25)$$

۲-۵- بازده انرژی

برای درک بازده انرژی فرآیند DCMD، بازده گرمایی و بازده انرژی کلی سیستم عوامل مهمی هستند که باید در نظر گرفته شوند. جزئی از انرژی که با مولکول های بخار از میان غشاء و شکاف هوا انتقال می یابد، به صورت بازده گرمایی سیستم تعریف می شود. بازده کلی انرژی سیستم DCMD نسبت گرمای منتقل شده توسط مولکول های بخار از میان بخش تست غشاء به انرژی مصرف شده برای گرم کردن محلول خوراک تعریف می شود و با نسبت خروجی به دست آمده ارزیابی می شود. Q_H نیز انرژی مصرف شده برای گرمادهی به محلول خوراک می باشد. GOR بزرگتر به این معنی است که سیستم MD مجهز به بازایی گرما است که این ویژگی نشان دهنده عملکرد بالا خواهد بود [۳۴، ۳۶، ۴۹].

$$GOR = \frac{Q_v}{Q_H} \quad (26)$$

۳- نتایج

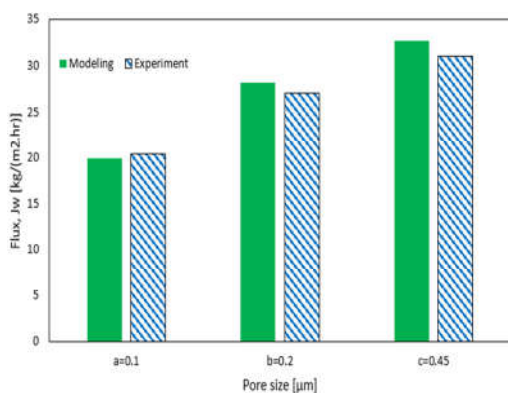
در این بخش، ابتدا نتایج مدل ریاضی ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده و سپس تاثیر هرکدام از پارامترهای طراحی (دمای جریان گرم، دبی جریان گرم، قطر منافذ غشاء و تخلخل غشاء) بر عملکرد سیستم DCMD، در جملات شار نفوذی از غشاء، TPC و GOR با استفاده از نتایج مدل سازی آنالیز شده است. در این بخش اثرات این پارامترها بر افزایش شار نفوذی از غشاء مورد بررسی قرار خواهد گرفت که نتایج در این بخش ارائه می گردد.

۳-۱- بررسی استقلال حل از شبکه

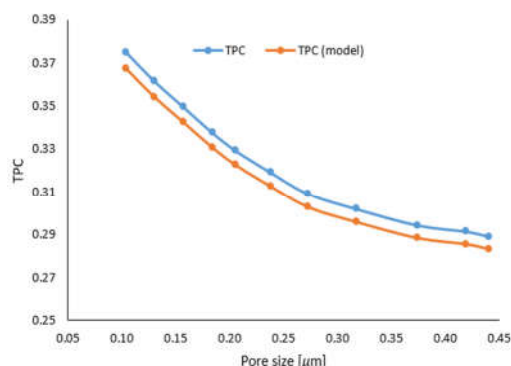
برای بررسی استقلال از شبکه در مدل ارائه شده، با در نظر گرفتن طول غشا ($L=1\text{m}$) و عرض غشا ($w=30\text{cm}$)، شار نفوذی از غشاء محاسبه شده، با داده های تجربی مقایسه گردید و برای شبکه های با تعداد تقسیم بندی های مکانی ۵۰۰، ۷۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ خطای نسبی نسبت به داده های تجربی برای دمای خوراک ورودی ۸۰ درجه سلسیوس استخراج شده است. جدول ۲ نتایج بررسی استقلال از شبکه را نشان می دهد. از آنجا که خطا پس از ریزتر شدن شبکه به طور قابل توجهی کاهش نمی یابد و حول یک مقدار ثابت تثبیت شده است، می توان نتیجه گرفت که پاسخ عددی نسبت به شبکه تقریباً مستقل شده است.

جدول ۲- نتایج بررسی استقلال از شبکه

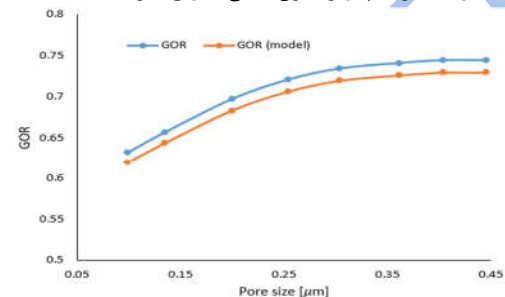
تعداد تقسیم بندی (N)	اختلاف نسبت به دقیق ترین شبکه (%) (۱۵۰۰)	خطای نسبی نسبت به داده های تجربی (%)
۵۰۰	۰/۰۳٪ کمتر	۱/۵۲٪
۷۵۰	۰/۰۲٪ کمتر	۱/۵۳٪
۱۰۰۰	۰/۰۰٪ (برابر تقریبی)	۱/۵۵٪
۱۵۰۰	۰/۰۰٪ (مرجع)	۱/۵۵٪



شکل ۳- شار نفوذی از غشاء به ازای قطر منافذ مختلف



شکل ۴- ضریب پلاریزاسیون دمایی به ازای قطر منافذ مختلف



شکل ۵- بازده انرژی به ازای قطر منافذ مختلف

۳-۲-۲- نتایج به ازای تخلخل غشاء

مقایسه نتایج حاصل از مدل و نتایج تجربی به ازای تخلخل غشاء نشان می‌دهد بر اساس شکل (۶) با افزایش تخلخل از ۷۰٪ به ۸۵٪ شار نفوذی ۲۹٪ افزایش می‌یابد. شکل (۷) و (۸) نشان می‌دهد در همین بازه GOR، ۱۹/۸٪ افزایش می‌یابد. در واقع وقتی تخلخل غشاء افزایش می‌یابد، قابلیت نفوذ بیشتری (B_M) بر مبنای معادلات ۲۰ تا ۲۲ حاصل می‌شود. شار نفوذی و Q_v بالاتر منجر به GOR بیشتر می‌شود. همچنین در همین بازه، به دلیل تغییر کم دماهای سطح غشاء با تخلخل، TPC ۱۱/۶٪ کاهش می‌یابد. با دقت در اطلاعات ارائه شده در شکل (۶) مشاهده می‌گردد نتایج بدست آمده از مدل با خطای ۱/۵۵ درصد به نتایج تجربی همگرا می‌گردد.

۳-۲-۳- اعتبارسنجی

برای اطمینان از صحت نتایج عددی، مقایسه‌ای با نتایج تجربی و عددی حاصل از شبیه‌سازی نوامانی و همکاران [۵۱] انجام گرفت. در جدول ۳ نتایج مربوط به شار نفوذی از غشاء به ازای دبی جرمی جریان-ها ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد نتایج به دست آمده با خطای میانگین کمتر از ۱/۲٪ نسبت به داده‌های عددی و ۴/۰۵٪ نسبت به داده‌های تجربی بدست آمده است که دلیلی بر اعتبار مناسب شبیه‌سازی انجام شده است.

جدول ۳- نتایج مدل حاضر و مدل تجربی و عددی نوامانی و همکاران [۵۱]

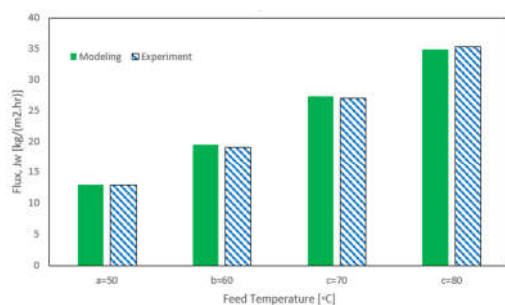
دبی جریان (LPM)	شار عبوری از غشاء برای نتایج تجربی (kg/m ² .hr)	شار عبوری از غشاء برای نتایج مطالعه حاضر (kg/m ² .hr)	شار عبوری از غشاء برای نتایج عددی (kg/m ² .hr)
۰/۲	۲/۳۶	۱۹/۹۱	۲۰/۱۱
۰/۴	۲۷/۰۳	۲۸/۲۱	۲۷/۹۳
۰/۶	۳۰/۹۶	۳۲/۶۹	۳۲/۱۳

۳-۲-۳-۱- تاثیر خصوصیات غشاء بر عملکرد DCMD

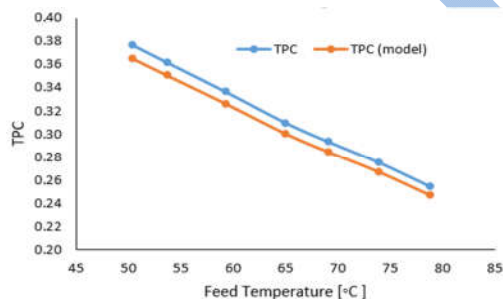
۳-۳-۱- نتایج به ازای قطر منافذ غشاء

برای نشان دادن تاثیر اندازه حفره بر شار نفوذی، غشاهای تجاری PTFE با اندازه حفره‌های مختلف (۰/۲، ۰/۴ و ۰/۴۵ میکرومتر) تست شده اند. حفره‌های غشاء PTFE به طور یکنواخت نیستند و لذا ترکیب نادسن و نفوذ مولکولی اتفاق می‌افتد که منجر به شار نفوذی کمتر در آزمایش و انحراف بیشتر بین نتایج آزمایشگاهی و محاسبات ریاضی می‌شود. به منظور تعیین تاثیر واقعی قطر منافذ غشاء بر عملکرد DCMD مدل‌سازی عددی استفاده شده است. بر مبنای نتایج نظری برای غشاهایی که قطر منافذ مختلفی دارند؛ بر اساس شکل (۳)، شار نفوذی از غشاء با افزایش قطر منافذ غشاء به دلیل کاهش مقاومت انتقال جرم، افزایش می‌یابد. نتایج ما نشان داده است که غشایی که قطر منافذ بزرگتری دارد، عملکرد بهتری در شار نفوذی دارا خواهد بود. با این حال، غشاهای DCMD با قطر منافذ بزرگتر بیشتر تمایل به ترشدگی حفره داشته و بنابراین ممکن است کاملاً طی فرآیند فیلتراسیون به دلیل کاهش قابل توجه دفع نمک، کارایی خود را از دست بدهند. بنابراین، رابطه تبدیلی بین شار نفوذی و دفع نمک، برای انتخاب غشایی که قطر منافذ بهینه دارد، باید در نظر گرفته شود. تاثیر قطر منافذ بر ضریب پلاریزاسیون دمایی و بازده انرژی در شکل‌های (۴) و (۵) قابل مشاهده است. افزایش اندازه حفره از ۰/۱ به ۰/۴۵ میکرومتر بازده انرژی را بر مبنای افزایش شار نفوذی، ۱۷/۷٪ افزایش می‌دهد. گذشته از آن، به دلیل اینکه اختلاف دمای سطح بین دو قسمت غشاء در اندازه حفره‌های بزرگتر، کاهش می‌یابد؛ TPC ۲۲/۸٪ کاهش نشان داده است. با دقت در اطلاعات ارائه شده در شکل (۳) مشاهده می‌گردد نتایج بدست آمده از مدل با خطای ۲/۰۵ درصد به نتایج تجربی همگرا می‌گردد.

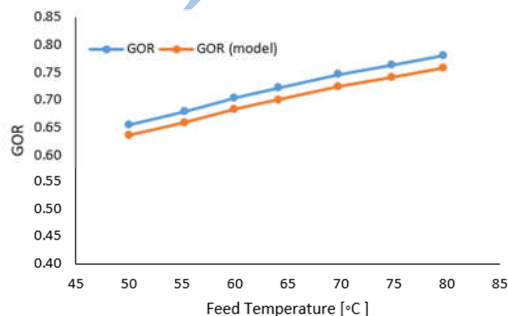
مقدار بازده انرژی ایجاد می کند (شکل ۱۱)؛ چرا که دمای خوراک بالاتر منجر به شار نفوذی و Q_v بالاتر می شود که متعاقباً بازده انرژی را بالا می برد. شکل (۱۰) تاثیر دمای خوراک را بر TPC نشان می دهد. TCP نشان دهنده تغییرات گرمایی است که بین سطح غشاء و محلول بالک اتفاق می افتد. بر اساس معادله ۲۵، بیشترین اختلاف دما بین دو بخش غشاء هنگامی به وجود می آید که TPC به یک میل کند. بر اساس شکل (۱۰)، همانطور که دمای خوراک افزایش می یابد، دماهای سطح در هر دو طرف غشاء بر مبنای افزایش می یابد. در نتیجه، افزایش اختلاف دما بین دو بخش غشاء کمتر از افزایش اختلاف دمای بالک است، که متعاقباً TPC را کاهش می دهد. با افزایش دمای خوراک از ۵۰ به ۸۰ درجه سلسیوس، TPC ۳۲/۴ کاهش می یابد. به علاوه، با افزایش دمای خوراک، شار نفوذی افزایش یافته و غلظت نمک بالاتری را در سطح غشاء ایجاد می کند. با دقت در اطلاعات ارائه شده در شکل (۹) مشاهده می گردد نتایج بدست آمده از مدل با دقت ۱/۵۲ درصد به نتایج تجربی همگرا می گردد.



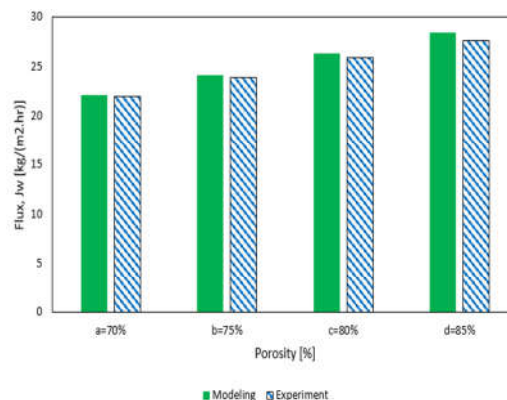
شکل ۹- شار نفوذی از غشاء به ازای دمای جریان گرم



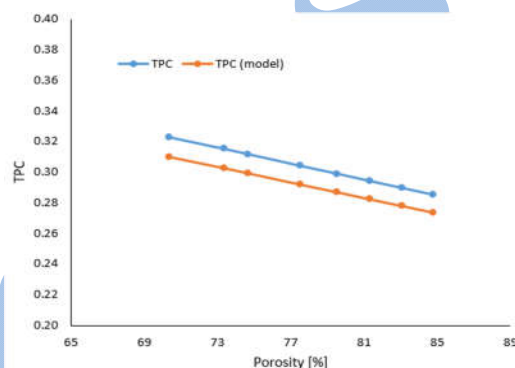
شکل ۱۰- ضریب پلاریزاسیون دمایی به ازای دمای جریان گرم



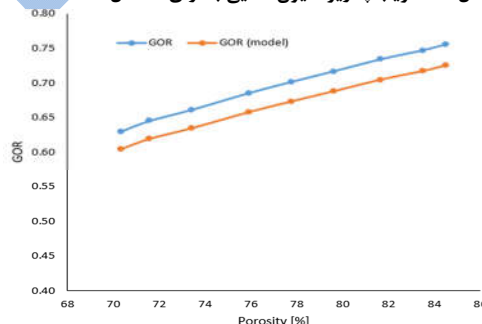
شکل ۱۱- بازده انرژی به ازای دمای جریان گرم



شکل ۶- شار نفوذی از غشاء به ازای تخلخل غشاء مختلف



شکل ۷- ضریب پلاریزاسیون دمایی به ازای تخلخل غشاء مختلف

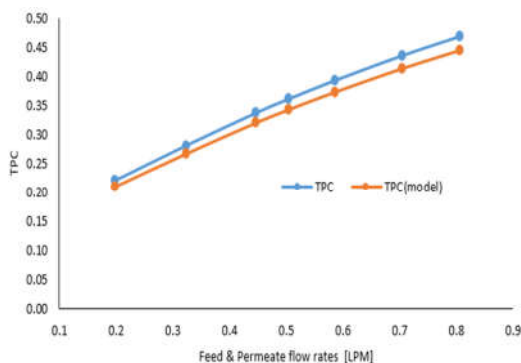


شکل ۸- بازده انرژی به ازای تخلخل غشاء مختلف

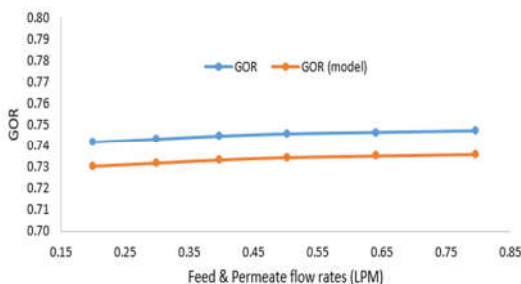
۳-۴- تاثیر شرایط عملیاتی غشاء بر عملکرد DCMD

۳-۴-۱- نتایج به ازای دمای جریان گرم (خوراک ورودی)

تاثیر دمای خوراک بر شار نفوذی هم برای مدل سازی و هم نتایج تجربی در شکل (۹) به تصویر درآمده است. همانطور که مشاهده می شود، پیش بینی حاصل از مدل تئوری، تطابق قابل قبولی با مقادیر اندازه گیری شده با آزمایش در دماهای مختلف دارد. به علاوه، با افزایش دمای خوراک، شار نفوذی افزایش قابل توجهی پیدا می کند. ۲۰٪ افزایش در دمای خوراک (از ۵۰ به ۶۰ درجه سلسیوس) منجر به ۴۹/۸٪ افزایش در شار نفوذی می شود. دمای خوراک بالاتر، گرادین فشار بخار بیشتری را در غشاء ایجاد می کند که در نتیجه نیروی محرکه بیشتری برای انتقال آب تولید می شود. علاوه بر آن، افزایش دمای خوراک از ۵۰ به ۸۰ درجه سلسیوس، افزایشی در حدود ۱۹٪ در



شکل ۱۳- ضریب پلاریزاسیون دمایی به ازای دبی جریان‌ها



شکل ۱۴- بازده انرژی به ازای دبی جریان‌ها

از طرف دیگر، در دبی جریان‌های بالاتر، Q_H در مخرج بزرگتر می‌شود که تاثیر افزایش Q_v را بر GOR جبران می‌کند (معادله ۲۶). شکل (۱۴) هم تاثیر دبی جریان بر بازده انرژی فرایند DCMD را نشان می‌دهد که قابل اغماض است که می‌تواند مربوط به اثر کم دبی جریان‌های خوراک و پرمیت (آب خالص) بر شار نفوذی آب باشد. با این حال، همانطور که در شکل (۱۳) مشخص است، افزایش به تدریج دبی‌های جریان تاثیر مثبتی بر TPC دارد و آن را افزایش می‌دهد. ضرایب انتقال حرارت بزرگتر در نرخ جریان‌های بالاتر، باعث می‌شود که دماهای سطح تقریباً برابر با دماهای بالک سیال شوند. با دقت در اطلاعات ارائه شده در شکل (۱۲) مشاهده می‌گردد نتایج حاصل از مدل با دقت ۴/۰۵ درصد به نتایج تجربی همگرا می‌گردد.

۴- نتیجه گیری

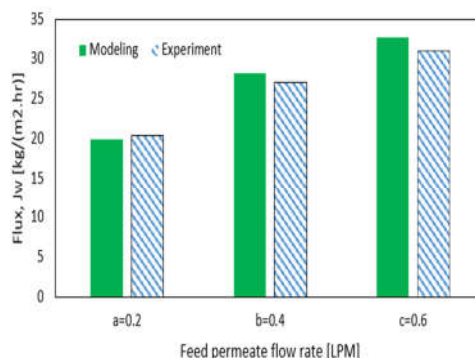
در مطالعه حاضر، یک مدل ریاضی دو بعدی برای پیش بینی عملکرد DCMD از نظر شار نفوذی از غشاء، بازده انرژی و اثرات پلاریزاسیون دمایی ارائه شده است. از مدل ریاضی پیشنهاد شده، یک مدل طراحی برای رسیدن به عملکرد بهینه سیستم DCMD با تنظیم مناسب شرایط عملیاتی (دمای جریان گرم و دبی جریان‌ها) و خصوصیات غشاء (قطر منافذ و تخلخل) معرفی شده است.

به جهت تاکید بر نتایج بدست آمده، مهم‌ترین آنها بشرح زیر است:

- نتایج مدل‌سازی با انحراف میانگینی در حدود ۴/۰۵٪ (در بیشترین حالت)، تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی دارند. دلیل محتمل انحراف نتایج مدل‌سازی و تجربی، اتلاف گرما از سیستم DCMD می‌باشد. بنابراین دمای خوراک واقعی در سطح

۳-۴-۲- نتایج به ازای دبی جریان‌ها

تاثیر دبی‌های جریان برای خوراک و پرمیت (آب خالص) بر شار خروجی آب در شکل (۱۲) قابل مشاهده است. نتایج مدل‌سازی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان داده است. دبی‌های جریان بالاتر یا عدد رینولدز بیشتر، در مقاومت‌های انتقال گرما پایین تر و ضخامت کمتر لایه مرزی حرارتی اتفاق می‌افتد، که در نهایت به دمای سطح غشاء بالاتر و شار خروجی آب بیشتر می‌انجامد. قابل ذکر است که تاثیر دبی جریان بر شار نفوذی به اندازه دمای خوراک قابل توجه نیست. همانطور که در شکل (۱۲) قابل مشاهده است، افزایش ۳۰٪ دبی جریان شار نفوذی را ۶۴/۱۹٪ افزایش می‌دهد، در حالی که ۲۰٪ افزایش در دمای خوراک منجر به ۴۹/۸٪ افزایش در شار نفوذی می‌شود. از این گذشته، با افزایش سرعت گردش، شار خروجی آب مجانب با بیشترین مقدار خودش می‌شود. دلیلش می‌تواند کاهش لایه مرزی گرمایی باشد که ممکن است در نتیجه افزایش در سرعت گردش تا رسیدن به مقدار ثابت اتفاق افتد. پس از آن، شار نفوذی تغییر قابل توجهی نمی‌کند. شکل (۱۴) نشان می‌دهد که دبی‌های جریان بالاتر نتیجه بازده انرژی‌های بیشتر هستند. Q_v مستقیماً به شار نفوذی و آنتالپی تبخیر وابسته است. شار نفوذی برای دبی جریان‌های بالاتر، همانطور که قبلاً اشاره شد، بیشتر است. به علاوه، بر مبنای ضرایب انتقال گرمایی همرفتی در دبی جریان‌های بالاتر، دماهای سطح به دماهای بالک سیال میل کرده و مقادیر آنتالپی تبخیر را بالا می‌برد. همچنین، دبی‌های جریان بالاتر، زمان ماند تبادل حرارت بین سیال گرم و سرد را کاهش داده که در نتیجه آن اختلاف دمای بین خروجی جریان‌های پرمیت (آب خالص) و خوراک با دماهای ورودی را نیز کاهش می‌دهد. ΔT در مبادله‌کن گرمایی در دبی‌های جریان بالاتر کاهش می‌یابد.



شکل ۱۲- شار نفوذی از غشاء به ازای دبی جریان‌ها

ضریب انتشار آب (m^2/s)	D
تقطیر غشایی تماس مستقیم	DCMC
قطر هیدرولیک کانال جریان (m)	Dh
قطر منافذ غشاء (μm)	dpore
انتشار	E
اثر بخشی - تعداد واحدهای انتقالی	ϵ -NTU
شتاب گرانشی (m/s^2)	g
تولید	gen
بازده انرژی	GOR
عدد گراش	Gr
ضریب انتقال گرما ($W/(m^2K)$)	h
آنتالپی یا گرمای نهان تبخیر آب (kJ/kg)	$\Delta H - h_{fg}$
شار گرمی ($kg/(m^2s)$)	J_w
رسانایی گرمایی (W/mK)	k
ضریب انتقال جرم کلی یون های نمک (m/s)	K
ثابت بولتزمن ($1.380649 \times 10^{-23} J/K$)	KB
کلرید پتاسیم	KCL
رسانایی گرمایی موثر غشاء (W/mK)	KM
عدد نادسن	Kn
لیتیم - بروماید	LiBr
نمک زدایی چند اثره	MED
تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای	MSF
تقطیر غشایی	MD
روش خطوط	MOL
وزن مولکولی آب (kg/mol)	MW_w
سطح غشاء در سمت خوراک	m_f
سطح غشاء در سمت نفوذ	mp
دبی جریان (kg/s)	$\dot{m}$
جرم (kg)	Δm
عدد ناسلت	Nu
فشار کل در منافذ غشاء (Pa)	P
آبی که از غشاء عبور کرده و تصفیه شده (آب خالص)	Permeate
عدد پراوتل	Pr
شار گرمایی (W/m^2)	Q
انرژی که برای گرم کردن محلول خوراک مصرف شد (W)	Q_H
انتقال گرما از طریق غشاء (W/m^2)	Q_M
رسانش گرما از طریق مواد غشایی (W/m^2)	Q_{cm}
المان‌هایی با اندازه منافذ غشاء (μm)	r
ثابت گاز جهانی ($8.314 J/(mol.K)$)	R
عدد رینولدز	Re
اسمز معکوس	RO
غلظت نمک (gr/L)	S
عدد شروود	Sh
دما (K)	T
زمان (hour)	t
ضریب پلاریزاسیون دمایی	TPC

غشاء کمتر از خوراکی است که در مدل استفاده شده و منجر به شار نفوذی تجربی کمتری خواهد شد. دلیل دیگر ممکن، می‌تواند دقیق نبودن اندازه‌گیری خصوصیات غشاء مانند تخلخل و ضخامت باشد. این پارامترها تاثیر زیادی بر نتایج شار نفوذی دارد و حتی کمی عدم قطعیت در اندازه‌گیری این خصوصیات می‌تواند تاثیر قابل توجهی در پیش بینی‌ها بگذارد.

- بر اساس نتایج بدست آمده دمای خوراک ورودی، تخلخل غشاء و قطر منافذ غشاء بیشترین تاثیر را بر شار نفوذی از غشاء و بازده انرژی DCMC داشته‌اند. برای رسیدن به شار نفوذی، بازده انرژی بیشتر در فرآیند DCMC، پیشنهاد شده است که دمای خوراک ورودی، دبی‌های جریان و تخلخل غشاء در بیشترین مقدارشان تنظیم شوند. با این حال، انتخاب قطر منافذ و ضخامت مناسب غشاء بهتر است با احتیاط بیشتری انجام پذیرد، چرا که تغییر در این دو پارامتر منجر به تبادلی بین شار نفوذی، بازده انرژی و دفع نمک می‌شود.
- یک پیشنهاد کاربردی برای رسیدن به بازده انرژی بیشتر، بازیابی گرما از جریان خوراک (آب خالص) خروجی از مدول غشاء است. با این حال، جنبه‌های صرفه‌جویی در مصرف انرژی نیاز به طراحی سلول غشاء با مقیاس بالاتر دارد که دمای بالای خوراک (آب خالص) خروجی را نزدیک به دمای خوراک ورودی می‌کند.

به طور خلاصه، نتایج بدست‌آمده نشان می‌دهد که از بین تمام شرایط عملیاتی و خصوصیات غشاء دمای جریان گرم، تخلخل غشاء، اندازه حفره و ضخامت تاثیرگذارترین پارامترها بر شار نفوذی و بازده انرژی هستند. با این حال، شار نفوذی به طور قابل توجهی با افزایش ضخامت غشاء کاهش می‌یابد. با افزایش تمام پارامترها به جز ضخامت غشاء و دبی جریان، TPC کاهش یافته که برای فرآیند DCMC مطلوب است. برای دستیابی به TPC بالاتر (تا جایی که ممکن است نزدیک به ۱) لازم است اتلاف گرما از سطح غشاء به محیط کاهش یابد. تنظیم دبی‌های جریان در مقادیر بالاتر، به عنوان روش اصلی کاهش تاثیرات پلاریزاسیون دمایی بدون فدا کردن شار نفوذی از غشاء پیشنهاد می‌شود. لازم به ذکر است که نتایج این مطالعه، برای سلول‌های DCMC با مقیاس کوچک و آزمایشگاهی به دست آمده است. برای مدول‌های با مقیاس بالاتر، دمای جریان خروجی سرد به دمای جریان ورودی داغ نزدیک‌تر می‌شود. بنابراین، عامل بازده گرمایی هم می‌تواند به فرآیند DCMC اضافه شود. در این حالت، مساحت غشاء به پارامتر موثری بدل می‌شود.

۵- نمادها و اختصارات

A	مساحت (m^2)
ACC	عدد ثابت
B_M	ضریب انتقال جرم کل ($kg/(m^2.s.Pa)$)
C	رسانایی ($\mu S/cm$)
con	مصرف
c_p	گرمای ویژه آب ورودی به غشاء ($J/kg.K$)
C_w	غلظت جرمی آب (kg/m^3)

- DCMD. Chem Eng Res Des. 2018. doi:10.1016/j.cherd.2018.08.032.
- [14] Hashim NA, Alsathy QF, Das R, Mjalli FS. Embedded high-hydrophobic CNMs prepared by CVD technique with PVDF-co-HFP membrane for application in water desalination by DCMD. Desal Water Treat. 2019;142:23431. doi:10.5004/dwt.2019.23431.
- [15] Lee J, Kim Y, Francis L, Amy G. Performance modeling of direct contact membrane distillation (DCMD) seawater desalination process using a commercial composite membrane. J Membr Sci. 2014. doi:10.1016/j.memsci.2014.12.053.
- [16] Khayet M. Membranes and theoretical modeling of membrane distillation: A review. Adv Colloid Interface Sci. 2011;164:56–88. doi:10.1016/j.cis.2010.09.005.
- [17] El-Bourawi MS, Ding Z, Ma R, Khayet M. A framework for better understanding membrane distillation separation process. J Membr Sci. 2006;285:4–29. doi:10.1016/j.memsci.2006.08.002.
- [18] Bouchrit R, Boubakri A, Ha A, Bouguecha SA. Direct contact membrane distillation: Capability to treat hyper-saline solution. Desalination. 2015;376:117–29. doi:10.1016/j.desal.2015.08.014.
- [19] Eykens L, De Sitter K, Dotremont C, Pinoy L, Van Der Bruggen B. Membrane synthesis for membrane distillation: A review. Sep Purif Technol. 2017;182:36–51. doi:10.1016/j.seppur.2017.03.035.
- [20] Abrofarakh M, Sadeghi M, Khayet M. Investigation of direct contact membrane distillation (DCMD) performance using CFD and machine learning approaches. Chemosphere. 2024;1(1):1–15. doi:10.1016/j.chemosphere.2024.137560.
- [21] Khayet M, Cococar C, Garcia-Payo MC. Mechanistic analysis of heat and mass transfer in direct contact membrane distillation. Desalination. 2023;1(1):1–15. doi:10.1016/j.desal.2023.115736.
- [22] Lee HJ, Kim YS, Lee YM, Lee HS. Improved transport correlations for direct contact membrane distillation modeling. Desalination. 2023;1(1):1–15. doi:10.1016/j.desal.2023.115736.
- [23] Zhao Y, Zhang X, Zhang L, Liu Y, Wang L. CFD simulation of spacer-filled direct contact membrane distillation channels. Desalination. 2023;1(1):1–15. doi:10.1016/j.desal.2023.115736.
- [24] Chen XB, Zhang L, Liu Y, Wang L, Zhao Y. Local hydrodynamics and flux distribution in direct contact membrane distillation: Experimental and numerical study. Energy. 2022;1(1):1–15. doi:10.1016/j.energy.2022.123456.
- [25] Nasr A, Zhang X, Liu Y, Wang L, Zhao Y. Multi-channel module CFD optimization for direct contact membrane distillation. Desalination. 2024;1(1):1–15. doi:10.1016/j.desal.2023.115736.
- [26] Khalifa AE, Zhang X, Liu Y, Wang L, Zhao Y. Transient modeling of solar-assisted direct contact membrane distillation with heat recovery. Energy. 2024;1(1):1–15. doi:10.1016/j.energy.2024.123456.
- [27] Gupta D, Kumar P, Sharma P, Singh RK, Yadav S. Dynamic response of direct contact membrane distillation under variable thermal inputs. Energy Convers Manag. 2025;1(1):1–15. doi:10.1016/j.enconman.2025.123456.
- [28] Al-Harathi S, Al-Mansoori M, Al-Mazroei A, Al-Shamsi A, Al-Suwaidi A. Techno-economic assessment of direct contact membrane distillation–solar hybrid desalination systems. Desalination. 2025;1(1):1–15. doi:10.1016/j.desal.2025.115736.
- [29] Shanmugan S, Kumar P, Gupta R, Yadav S, Singh RK. System-scale modeling and optimization of direct contact membrane distillation integrated with
- ضرب انتقال گرما کلی U (W/(m²K))
تقطیر تراکمی بخار VCD
کسر مول x
تخلخل غشاء ϵ
- ۶- مراجع:
- [1] Noamani S, Niroomand S, Rastgar M. Carbon-based polymer nanocomposite membranes for oily wastewater treatment. NPJ Clean Water. 2019;2:1–14. doi:10.1038/s41545-019-0044-z.
- [2] Sadrzadeh M, Hajinasiri J, Bhattacharjee S, Pernitsky D. Nanofiltration of oil sands boiler feed water: Effect of pH on water flux and organic and dissolved solid rejection. Sep Purif Technol. 2015;141:339–53. doi:10.1016/j.seppur.2014.12.011.
- [3] Hayatbakhsh M, Sadrzadeh M, Pernitsky D, Bhattacharjee S, Hajinasiri J. Treatment of an in situ oil sands produced water by polymeric membranes. Desal Water Treat. 2016;57:14869–87. doi:10.1080/19443994.2015.1069216.
- [4] Camacho LM, Dumée L, Zhang J, Li J, Duke M. Advances in membrane distillation for water desalination and purification applications. 2013;94–196. doi:10.3390/w5010094.
- [5] Khalifa A, Ahmad H, Antar M, Laoui T, Khayet M. Experimental and theoretical investigations on water desalination using direct contact membrane distillation. Desalination. 2017;404:22–34. doi:10.1016/j.desal.2016.10.009.
- [6] Ruiz-Aguirre A, Andrés-Mañas JA, Fernández-Sevilla JM, Zaragoza G. Modeling and optimization of a commercial permeate gap spiral wound membrane distillation module for seawater desalination. Desalination. 2017;419:160–8. doi:10.1016/j.desal.2017.06.019.
- [7] Olatunji SO, Camacho LM. Heat and mass transport in modeling membrane distillation configurations: A review. Front Energy Res. 2018;6:1–18. doi:10.3389/fenrg.2018.00130.
- [8] Noamani S, Sadrzadeh M, Tehrani-Bagha AR. Prospects of nanocomposite membranes for water treatment by membrane distillation. In: Sadrzadeh M, Mohammadi T, editors. Nanocomposite Membranes for Water and Gas Separation. Elsevier; 2020. p. 299–320. doi:10.1016/B978-0-12-816710-6.00012-2.
- [9] Duong HC, Cooper P, Nelemans B, Cath TY, Nghiem LD. Evaluating energy consumption of air gap membrane distillation for seawater desalination at pilot scale level. Sep Purif Technol. 2016;166:55–62. doi:10.1016/j.seppur.2016.04.014.
- [10] Eykens L, Hitsov I, De Sitter K, Dotremont C, Pinoy L, Van der Bruggen B. Direct contact and air gap membrane distillation: Differences and similarities between lab and pilot scale. Desalination. 2017;422:91–100. doi:10.1016/j.desal.2017.08.018.
- [11] Shahu VT, Thombre SB. Air gap membrane distillation: A review. J Renew Sustain Energy. 2019;11. doi:10.1063/1.5063766.
- [12] Fadhil S, Alsathy QF, Makki HF, Ruby-Figueroa R, Marino T, Criscuoli A, et al. Seawater desalination using PVDF-HFP membrane in DCMD process: assessment of operating condition by response surface method. Chem Eng Commun. 2018;1–10. doi:10.1080/00986445.2018.1483349.
- [13] Mustafa A, Aljumaily M, Alsaadi A, Hashim NA, Alsathy QF, Mjalli FS, et al. PVDF-co-HFP/superhydrophobic acetylene-based nanocarbon hybrid membrane for seawater desalination via

- [46] Tehrani-Bagha AR. Waterproof breathable layers – A review. *Adv Colloid Interface Sci.* 2020;268:114–35. doi:10.1016/j.cis.2019.03.006.
- [47] Phattaranawik J, Jiratananon R, Fane AG. Effect of pore size distribution and air flux on mass transport in direct contact membrane distillation. *J Membr Sci.* 2003;215:75–85. doi:10.1016/S0376-7388(02)00603-8.
- [48] Va MI. Temperature and concentration polarization in membrane distillation of aqueous salt solutions. *J Membr Sci.* 1999;156.
- [49] Zuo G, Wang R, Field R, Fane AG. Energy efficiency evaluation and economic analyses of direct contact membrane distillation system using Aspen Plus. *Desalination.* 2011;283:237–44. doi:10.1016/j.desal.2011.04.048.
- [50] Swaminathan J, Chung HW, Warsinger DM, Lienhard JH. Membrane distillation model based on heat exchanger theory and configuration comparison. *Appl Energy.* 2016;184:491–505. doi:10.1016/j.apenergy.2016.09.090.
- [51] Noamani S, Niroomand S, Rastgar M, McDonald A, Sadrzadeh M. Development of a self-sustained model to predict the performance of direct contact membrane distillation. *Sep Purif Technol.* 2021;118407. doi:10.1016/j.seppur.2021.118407.
- renewable energy. *Energy Rep.* 2024;1(1):1–15. doi:10.1016/j.egyr.2024.123456.
- [30] Choubani K, Sammoudi M, Ennetta R. Performance modelling of direct contact membrane distillation for flat-sheet modules. *Desal Water Treat.* 2022;265:1–13. doi:10.5004/dwt.2022.28553.
- [31] Khatab MZ, Abdelsamie MM, Arafat HA, Hassan Ali MI. A novel planar module design for improved DCMD: Experimental and CFD insights. *Int J Thermofluids.* 2025;1(1):1–15. doi:10.1016/j.ijft.2025.101391.
- [32] Zhang T, Liu Y, Wang L, Zhao Y, Zhang X. Capillary intrusion and wetting transition modeling in direct contact membrane distillation membranes. *Desalination.* 2023;1(1):1–15. doi:10.1016/j.desal.2023.115736.
- [33] Lee J, Lee E, Jeong S, Guo J, Kyoungjin A. Theoretical modeling and experimental validation of transport and separation properties of carbon nanotube electrospun membrane distillation. *J Membr Sci.* 2017;526:395–408. doi:10.1016/j.memsci.2016.12.045.
- [34] Winter D. Membrane distillation, a thermodynamic, technological and economic analysis. 2015.
- [35] Rao G, Hiibel SR, Childress AE. Simplified flux prediction in direct contact membrane distillation using a membrane structural parameter. *Desalination.* 2014;351:151–62. doi:10.1016/j.desal.2014.07.006.
- [36] Hitsov I. Model based analysis and optimization of membrane distillation. 2017.
- [37] Khayet TM. Membrane distillation principles and applications. 2011.
- [38] Hitsov I, Eykens L, De Schepper W, De Sitter K, Dotremont C, Nopens I. Full scale direct contact membrane distillation (DCMD) model including membrane compaction effects. *J Membr Sci.* 2017;524:245–56. doi:10.1016/j.memsci.2016.11.044.
- [39] Ali A, Macedonio F, Drioli E, Aljlil S, Alharbi OA. Experimental and theoretical evaluation of temperature polarization phenomenon in direct contact membrane. *Chem Eng Res Des.* 2013;1–12. doi:10.1016/j.cherd.2013.06.030.
- [40] Manawi YM, Khraisheh M, Kayvani A, Benyahia F, Adham S. Effect of operational parameters on distillate flux in direct contact membrane distillation (DCMD): Comparison between experimental and model predicted performance. *Desalination.* 2014;336:110–20. doi:10.1016/j.desal.2014.01.003.
- [41] Jung H, He K, Gray S, Zhang J, Shik I. Direct contact membrane distillation (DCMD): Experimental study on the commercial PTFE membrane and modeling. *J Membr Sci.* 2011;371:90–8. doi:10.1016/j.memsci.2011.01.020.
- [42] Andriessdóttir O, Lee C, Nabavi M, Paredes S, Khalil ASG, Michel B. An experimentally optimized model for heat and mass transfer in direct contact membrane distillation. *Int J Heat Mass Transf.* 2013;66:855–67. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.07.051.
- [43] Swaminathan J, Chung HW, Warsinger DM, Lienhard JH. Energy efficiency of membrane distillation up to high salinity: Evaluating critical system size and optimal membrane thickness. *Appl Energy.* 2018;211:715–34. doi:10.1016/j.apenergy.2017.11.043.
- [44] Xu L, Xu S, Wu X, Wang P, Jin D, Hu J, et al. Heat and mass transfer evaluation of air-gap diffusion distillation by e-NTU method. *Desalination.* 2020;478. doi:10.1016/j.desal.2019.114281.
- [45] Gryta M, Tomaszewska M, Morawski AW. Membrane distillation with laminar flow. *Sep Purif Technol.* 1997;11:93–101. doi:10.1016/S1383-5866(97)00002-6.