

Journal of Water and Wastewater, Vol. 30, No.3, pp: 17-27

# Optimizing Direct Contact Membrane Distillation by RSM for Water Reclamation from Effluent of the RO Unit at Esfahan Refinery

M. Ebadi<sup>1</sup>, M. R. Mozdianfard<sup>2</sup>, M. Aliabadi<sup>3</sup>

1. PhD Student, Dept. of Chemical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran
2. Assoc. Prof., Dept. of Chemical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran  
(Corresponding Author) mozdianfard@kashanu.ac.ir
3. Assist. Prof., Dept. of Chemical Engineering, Islamic Azad University, Birjand Branch, Birjand, Iran

(Received Nov. 12, 2017 Accepted March 13, 2018)

#### To cite this article :

Ebadi, M., Mozdianfard, M. R., Aliabadi, M., 2019, "Optimizing direct contact membrane distillation by RSM for water reclamation from effluent of the RO unit at Esfahan refinery." Journal of Water and Wastewater, 30(3), 17-27. Doi: 10.22093/wwj.2018.105519.2538. (In Persian)

#### Abstract

Considering the challenges faced and emphases being put in the last two decades on the water consumption at Esfahan Oil Refining Company (EORC), substantial efforts were made on its optimization and recovery of effluent from various unit operations. The effluent re-use from the Reverse Osmosis (RO) unit, collected at the evaporating pools was considered in this research, using membrane distillation, as a modern desalination approach to recover water. In this study, RSM modelling was employed for optimization and prediction of membrane distillation operating conditions on the brackish effluent output from the RO unit at EORC. Tests were carried out on a flat module with 80cm<sup>2</sup> effective surface area using micro porous commercial PTFE membranes based on PP. Effects of three parameters of feed temperature, and flow rate as well as permeate temperature on the permeate flux were investigated using the Design Expert software. Software modelling results indicated that feed temperature had the largest influence in increasing the permeate flux (almost twice the effect of permeate temperature and feed flow rate). The maximum optimized permeate flux in the test range investigated was 59.67 L/m<sup>2</sup>h with 0.9570 desirability at feed temperature of 70°C, permeate temperature of 15°C and feed flow rate of 2L/min. This research showed that direct contact membrane distillation (DCMD) could successfully be employed for water recovery from the RO outlet effluent at EORC. Optimization of operating condition at Esfahan climatic condition can be achieved using software modelling.

**Keywords:** Membrane Distillation, RSM, Polytetrafluoroethylene, Optimization, Reverse Osmosis.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۰، شماره ۳، صفحه: ۱۷-۲۷

## بهینه‌سازی تقطیر غشایی تماس مستقیم به وسیله RSM در باز یافت پساب واحد RO پالایشگاه اصفهان

محمد عبادی<sup>۱</sup>، محمدرضا مزدیان فرد<sup>۲</sup>، مجید علی آبادی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

(نویسنده مسئول) mozdianfard@kashanu.ac.ir

۳- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بیرجند، بیرجند، ایران

(دریافت ۹۶۸/۲۱ پذیرش ۹۶۷/۲۲)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

عبادی، م.، مزدیان فرد، م.ر.، علی آبادی، م.، ۱۳۹۸، "بهینه‌سازی تقطیر غشایی تماس مستقیم به وسیله RSM در باز یافت پساب واحد RO پالایشگاه اصفهان" مجله آب و فاضلاب، ۳۰(۳)، ۱۷-۲۷. Doi: 10.22093/wwj.2018.105519.2538

### چکیده

با توجه به اهمیت و حساسیت آب در پالایشگاه اصفهان در دو دهه گذشته، تلاشی مستمر در بهینه‌سازی مصرف آب، باز یافت و احیای پساب‌های حاصل از واحدهای مختلف عملیاتی صورت گرفته است. پساب واحد اسمز معکوس، که به استخرهای تبخیری پالایشگاه می‌ریزد، در کانون توجه پژوهشگران برای باز یافت آب قرار گرفته است. یکی از روش‌های مدرن برای افزایش بهره‌وری در باز یافت آب شور، روش تقطیر غشایی است که در این پژوهش به منظور باز یافت پساب شور مورد توجه قرار گرفت. در این پژوهش، مدل‌سازی RSM به منظور بهینه‌سازی و پیش‌بینی شرایط عملیاتی تقطیر غشایی پساب لب شور خروجی واحد RO پالایشگاه اصفهان مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش‌ها با استفاده از غشای میکرومخلخل تجاری پلی‌تترافلرواتیلن بر پایه پلی‌پروپیلن و با ماژول غشایی صفحه تخت با سطح مؤثر غشایی هشتاد سانتی‌متر مربع انجام شد. در این پژوهش اثر سه فاکتور دمای خوراک، دبی خوراک و دمای تراویده، بر شار تراویده با استفاده از نرم‌افزار Design Expert مطالعه شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی نرم‌افزاری نشان داد که دمای خوراک بیشترین تأثیر را در افزایش شار تراویده دارد به طوری که میزان تأثیر آن بیش از دو برابر اثر دمای تراویده و دبی خوراک است. مقدار بیشینه شار تراویده بهینه در محدوده آزمایش‌ها  $59/67 \text{ L/m}^2\text{h}$  با درجه مطلوبیت  $0/957$  در شرایط عملیاتی دمای خوراک  $70$  درجه سلسیوس، دمای تراویده  $15$  درجه سلسیوس و دبی خوراک  $2$  لیتر بر دقیقه تعیین شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد روش تقطیر غشایی تماس مستقیم می‌تواند با موفقیت به منظور باز یافت پساب خروجی RO پالایشگاه اصفهان به کار گرفته شود. بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی در شرایط اقلیمی گرم و سرد اصفهان نیز با استفاده از مدل‌سازی نرم‌افزاری قابل محاسبه است.

**واژه‌های کلیدی:** تقطیر غشایی، روش سطح پاسخ، پلی‌تترافلرواتیلن، بهینه‌سازی، اسمز معکوس

### ۱- مقدمه

شرایط عملیاتی شود. با توجه به اهمیت و حساسیت آب در استان اصفهان، در دو دهه گذشته تلاشی مستمر در بهینه‌سازی مصرف آب، باز یافت و احیای پساب حاصل از واحدهای مختلف

در این پژوهش پیرو مطالعات آزمایشگاهی در استفاده از DCMD برای نمک‌زدایی پساب RO در پالایشگاه اصفهان، سعی شد با شناسایی پارامترهای عملیاتی اقدام به پیش‌بینی و بهینه‌سازی



عملیاتی این پالایشگاه انجام شده است.

اسمز معکوس<sup>۱</sup> واحدی با پساب فراوان است که با ظرفیت تولید آب شیرین ۳۵۰ مترمکعب در ساعت و TDS کمتر از ۹۰ میلی‌گرم در لیتر، سال‌هاست با متوسط دبی پساب آب شور ۴۰ مترمکعب در ساعت به استخرهای تبخیری ۵ و ۶ پالایشگاه می‌ریزد.

یکی از روش‌های مدرن برای افزایش بهره‌وری در بازیافت آب شور، روش تقطیر غشایی<sup>۲</sup> است که در پالایشگاه اصفهان برای اولین بار در ایران در مقیاس صنعتی مورد توجه قرار گرفت.

تقطیر غشایی، فناوری بر پایه نیروی محرکه حرارتی است که مبنای آن قابلیت انتخابی عبور مولکول‌های بخار از حفره‌های غشایی میکرومتخلخل آبریز است. نیروی محرکه تقطیر غشایی، اختلاف فشار بخاری است که در نتیجه گرادیان دمایی در طرف‌های پساب ورودی و تراویده<sup>۳</sup> غشا ایجاد می‌شود. قابلیت‌های کاربردی تقطیر غشایی عبارت‌اند از: تولید آب با خلوص بالا، جداسازی ترکیبات فرار آلی از پساب‌ها، تغلیظ محلول‌های یونی، کلوئیدی و آبی غیر فرار دیگر. یکی از مهم‌ترین مزایای تقطیر غشایی در مقایسه با دیگر فرایندهای تجاری و مرسوم دیگر، کار کردن در شرایط عملیاتی متعادل است. با توجه به چهار روش ممکن برای ایجاد اختلاف فشار بخار در بخش تراویده، چهار طبقه‌بندی برای ساختار تقطیر غشایی تعریف شده که عبارت‌اند از: تقطیر غشایی تماس مستقیم<sup>۴</sup>، تقطیر غشایی با محفظه هوا<sup>۵</sup>، تقطیر غشایی با گاز جاروکننده<sup>۶</sup> و تقطیر غشایی در خلأ<sup>۷</sup> (Koros et al., 1996).

در DCMD، پساب ورودی داغ در یک طرف غشای متخلخل آبریز در جریان است، در حالی که سیال سردتر در قسمت تراویده جریان دارد. جزء بخار شده (در اغلب موارد آب) از میان حفره‌های غشا عبور کرده و در قسمت تراویده کندانس می‌شود. DCMD در زمینه‌های مختلفی از جمله نمک‌زدایی از آب شور و آب دریا (Gryta, 2002, Hsu et al., 2002, Adham et al., 2013); Drioli et al., 2012, Quist-Jensen et al., 2016); زیست‌فناوری (Udriot et al., 1989, Gryta et al., 2000); صنایع

غذایی (El-Abbassi et al., 2013; Jonsson, 2012, Lin et al., 2015)، نساجی (Calabrò et al., 1991)، و شیمیایی (Tomaszewska et al., 1995, Tomaszewska and Lapin, 2012) کاربرد دارد ولی بیشترین کاربرد آن، به دلیل انجام مرحله کندانس در داخل ماژول غشایی، در نمک‌زدایی و تصفیه فاضلاب است (Khayet, 2011).

پارامترهای زیادی بر عملکرد تقطیر غشایی اثرگذار است. مطالعه این فاکتورها به روش‌های مرسوم، که در آن متغیری مستقل تغییر می‌کند و بقیه متغیرها ثابت می‌ماند، معایبی چون تعداد زیاد آزمایش، صرف وقت زیاد و هزینه بالا را به همراه دارد. به علاوه، در روش‌های مرسوم از اثرات درون‌کنشی بین پارامترهای حاکم که بر عملکرد فرایند تقطیر غشایی مؤثر است، صرف نظر می‌شود. در مقابل روش‌های علمی و آماری جدیدی ارائه شده‌اند که در تعیین مهم‌ترین فاکتورهای اثرگذار بر یک فرایند و پیش‌بینی معادلات حاکم بسیار قدرتمند بوده و معایب روش‌های سنتی را ندارند. از میان آن‌ها می‌توان به روش‌های طراحی آزمایش<sup>۸</sup> و روش سطح پاسخ<sup>۹</sup> اشاره نمود. در طراحی آزمایش و روش شناسی سطح پاسخ، کلیه پارامترهای مهم و تأثیرگذار در آزمایش‌های تجربی به‌طور هم‌زمان تغییر می‌کند.

RSM در بهینه‌سازی و پیش‌بینی شار تراویده فرایندهای تقطیر غشایی SGMD، DCMD و AGMD به‌کار رفته است. از این روش در سال ۲۰۰۷ برای بهینه‌سازی شرایط عملیاتی و پیش‌بینی شار تراویده DCMD استفاده کرده‌اند (Khayet et al., 2007). پساب ورودی فرایند حاوی کلرید سدیم بود و فاکتورهای غلظت کلرید سدیم، دمای پساب ورودی و سرعت هم‌زدن مورد مطالعه قرار گرفت. دستاورد این پژوهش تطابق خوب بین شارهای تراویده تجربی و پیش‌بینی شده با RSM بود. در پژوهش دیگری روش سطح پاسخ برای بهینه‌سازی فرایند DCMD با محلول کلرید سدیم به‌عنوان پساب ورودی، استفاده شد (Boubakri et al., 2014).

برای بهینه‌سازی فرایند DCMD، فاکتورهای اختلاف فشار بخار، دبی پساب ورودی، دبی تراویده و قدرت یونی پساب ورودی در پنج تراز در روش سطح پاسخ به‌کار رفت. انحراف میانگین

<sup>1</sup> Reverse Osmosis (RO)

<sup>2</sup> Membrane Distillation (MD)

<sup>3</sup> Permeate

<sup>4</sup> Direct Contact Membrane Distillation (DCMD)

<sup>5</sup> Air Gap Membrane Distillation (AGMD)

<sup>6</sup> Sweeping Gas Membrane Distillation (SGMD)

<sup>7</sup> Vacuum Membrane Distillation

<sup>8</sup> Design of Experiments (DoE)

<sup>9</sup> Response Surface Methodology (RSM)



جدول ۱- مشخصات پساب لب شور

Table 1. Specification of RO brackish water

Parameters	Units	Value
pH	-	7.25
TDS	mg/L	4700
Conductivity	μs/cm	8400
Total hardness	mg/L	3200
Total alkalinity	mg/L	100
Chlorides	mg/L	780
Calcium	mg/L	1940
Magnesium	mg/L	1260
Sodium	mg/L	1020

پلی تترافلرواتیلن (PTFE) بر پایه پلی پروپیلن تهیه شده از شرکت ایران غشا با مشخصات جدول ۲ استفاده شد. شماتیکی از نمودار جریان دستگاه DCMD مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. طراحی، ساخت و آزمون دستگاه DCMD طبق مقالات علمی انجام شده (Duong et al., 2015, Lee et al., 2015, Cath et al., 2004). در این دستگاه، دو پمپ پرستالتیک (ساخت و مدل)، چهار ترموکوپل دیجیتالی دقیق (ساخت و مدل)، یک سختی سنج در هر خط و سیستم گرم کننده و سرد کننده در سیکل های پساب ورودی و تراویده مورد استفاده قرار گرفت. مازول غشایی صفحه تخت با سطح مؤثر غشایی هشتاد سانتی متر مربع طراحی شد و توسط شرکت تقطیران از جنس فولاد ضد زنگ ۳۱۶ ساخته شد.

جدول ۲- مشخصات غشای PTFE تجاری

Table 2. Characteristics of commercial membrane

Item	Unit	Value
Membrane	-	PTFE
Substrate	-	PP
Pore Size	(μm)	0.45
Thickness	(μm)	180±10
Bubble point in IPA	(MPa)	0.08-0.14
Air Perm	(m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .h)	500-800

## ۲-۲- طراحی آزمایش و انتخاب مدل برای RSM

در این پژوهش، از نرم افزار Design Expert 7.1.5 (DE) برای مدل سازی داده های موجود استفاده شد. در این بخش سه فاکتور دمای پساب ورودی ( $T_f$ )، دبی پساب ورودی ( $Q_f$ ) و دمای تراویده ( $T_p$ ) به عنوان متغیرهای مستقل در سه تراز و شار تراویده به عنوان پاسخ معرفی شد و تعداد ۲۷ آزمایش توسط نرم افزار تعیین شد. با توجه به این که پارامترها و برآوردسازهای

مقادیر تجربی و پیش بینی شده ۳/۹ درصد بود که اعتبار مدل را در بهینه سازی فرایند DCMD تأیید نمود.

مدل های چند جمله ای درجه دو به عنوان تابعی از فاکتورهای در نظر گرفته شده در پیش بینی شار تراویده غلظت ساکروز در SGMD بررسی شده است (Cojocar and Khayet, 2011). در پژوهش دیگری، خایت و همکاران برای مدل سازی و بهینه سازی فرایند SGMD از طراحی آزمایش و روش سطح پاسخ استفاده نمودند (Khayet et al., 2012). متغیرهای مستقل دما و دبی مایع و گاز، در این پژوهش به عنوان متغیرهای کنترل کننده شار تراویده در نظر گرفته شدند و در نقطه بهینه شار تراویده انحراف از مقدار پیش بینی فقط دو درصد بود.

در پژوهشی در سال ۲۰۱۲ با استفاده از طراحی آزمایش آماری و روش سطح پاسخ در فرایند AGMD تحت شرایط بهینه، شار تراویده بیشینه برابر ۴۸/۱۸۹ kg/m<sup>2</sup>.h به دست آمد (Khayet and Cojocar, 2012).

هدف اصلی این پژوهش مدل سازی و بهینه سازی نمک زدایی از پساب خروجی واحد RO پالایشگاه اصفهان با استفاده از فرایند DCMD بود.

سه راهکار در استفاده از RSM در این پژوهش دنبال شد: ۱- ارائه رابطه ریاضی بین دمای پساب ورودی، دبی پساب ورودی و دمای تراویده با شار تراویده DCMD؛ ۲- اعتبارسنجی و تعیین دقت مدل با مقایسه نتایج تجربی و مقادیر پیش بینی شده توسط مدل؛ ۳- بهینه سازی شرایط عملیاتی.

در این راستا، ابتدا با استفاده از داده های تجربی و کاربرد روش سطح پاسخ در نرم افزار Design Expert 7.1.5، مدل سازی صورت گرفت. سپس نتایج خروجی از نرم افزار تجزیه و تحلیل شد و بهینه سازی در شرایط مختلف عملیاتی صورت گرفت.

## ۲- مواد و روش ها

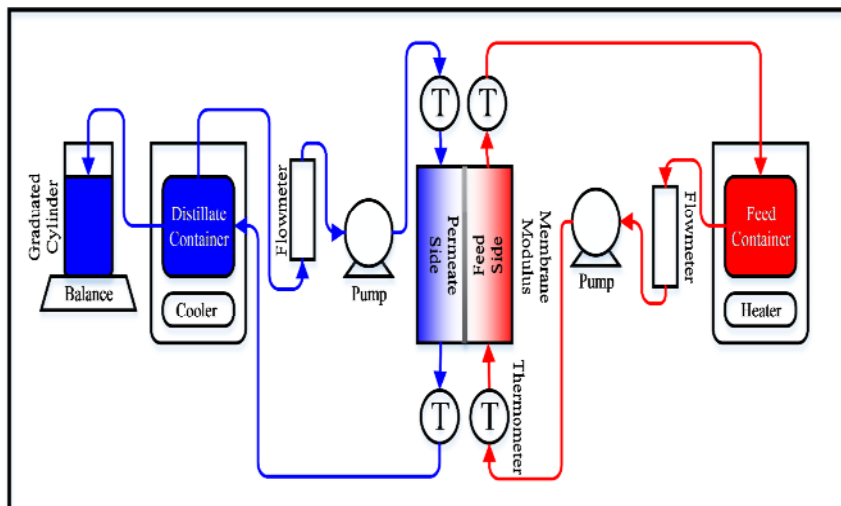
### ۲-۱- مواد و تجهیزات آزمایشگاهی DCMD

پساب لب شور مورد بررسی از خروجی واحد RO پالایشگاه اصفهان تأمین شد.

در جدول ۱ مشخصات این پساب که به عنوان پساب ورودی در تجهیزات آزمایشگاهی به کار رفته، نشان داده شده است.

در آزمایش ها، از غشای میکرومخلخل تجاری





شکل ۱- فلوچارت دستگاه DCMD  
 Fig. 1. Schematic flow chart of DCMD set up

برای اعتبارسنجی مدل، از معیارهای مهم  $p$ ،  $F$  و منحنی‌های تشخیص استفاده شد. به منظور بررسی کیفیت تطبیق معادله چندجمله‌ای با داده‌های تجربی، از معیارهای آماری ضریب تعیین  $R^2$  و ضریب تعیین تعدیل شده  $(adj R^2)$  استفاده شد. برای بهینه‌سازی از گزینه Optimization در نرم‌افزار DE استفاده شد.

آماري در مدل SR معنی‌دارتر بود، این مدل انتخاب شد. مدل SR با معادله ۱، پاسخ را به متغیرهای مستقل مرتبط می‌کند

$$\sqrt{Y} = b_0 + \sum_i b_i X_i \quad (1)$$

که حالت خاصی از معادله چندجمله‌ای درجه ۲ با شکل کلی زیر است

$$Y = b_0 + \sum_i b_i X_i + \sum_i b_{ii} X_i^2 + \sum_{ij} b_{ij} X_i X_j \quad (2)$$

که در این معادلات

$Y$  متغیر پاسخ،  $b_0$  ضریب ثابت،  $b_i$  ضرایب خطی،  $b_{ii}$  ضرایب درجه ۲،  $b_{ij}$  ضرایب برهم‌کنش و  $X_i$  و  $X_j$  مقادیر کد شده متغیرهای مستقل است. با توجه به اینکه در این مطالعه سه متغیر مستقل و یک پاسخ در نظر گرفته شده، معادله بالا به معادله ۳ تبدیل می‌شود

$$\sqrt{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 \quad (3)$$

متغیرهای کد شده  $X_1$  برای دبی پساب ورودی،  $X_2$  برای دمای تراویده و  $X_3$  برای دمای پساب ورودی در نظر گرفته شد.  $Y$  تابع پاسخ، که در این مطالعه همان شار تراویده است. محدوده آزمایش و تراز متغیرهای مستقل در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- مشخصات متغیرهای مستقل

Table 3. Levels and symbols of independent variables

Factor	Symbol	Actual value of coded level		
		-1	0	1
Feed Temperature (°C)	$X_1$	50	60	70
Permeate temperature (°C)	$X_2$	15	25	35
Feed Flow Rate (L/min)	$X_3$	1	1.5	2

۳- نتایج و بحث

۳-۱- معادلات مدل RSM

جدول ۴ شار تراویده DCMD تجربی و پیش‌بینی شده توسط مدل را نشان می‌دهد. داده‌های جدول نشان می‌دهند بین مقادیر تجربی و

<sup>1</sup> Coefficient of determination (R-Squared)  
<sup>2</sup> Adjusted R-Squared



## ۳-۲- تحلیل واریانس

برای اعتبارسنجی فاکتورهای تأثیرگذار بر مشاهدات آزمایشگاهی، آنالیز واریانس (ANOVA) انجام شد و معیارهای آماری مدل SR در جدول ۵ ارائه شدند.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود  $p < 0.05$  و  $F = 325/81$  که این نشانگر معنادار بودن مدل برنامه است. به عبارتی، شار تراویده پیش‌بینی شده انطباق زیادی با داده‌های تجربی دارد. علاوه بر آن، برای متغیرهای مستقل نشان می‌دهد که فاکتورهای معنادار مدل به ترتیب اولویت عبارت‌اند از  $X_1$ ،  $X_2$  و  $X_3$ . ضریب تعیین  $R^2$  بر حسب درصد نشان دهنده میزان نزدیکی داده‌های تجربی با نتایج برازش شده با مدل رگرسیون است و در واقع بازتابی است از چگونگی قرار گرفتن نقاط داده‌های تجربی در اطراف خط تشکیل شده با معادله رگرسیون.  $R^2 = 0.9733$  در مدل، معرف آن است که بیش از  $97/33$  درصد از تغییرات تابع پاسخ با مدل SR قابل توجیه است، به عبارتی مدل رگرسیون در اینجا به لحاظ آماری کاملاً معنی‌دار است. از سویی،  $R^2$  تعدیل شده ضمن برآورد اکتفای مدل، هنگامی که همه متغیرهای مستقل بر متغیر تابع تأثیر بگذارند، می‌تواند نشان‌دهنده درصد تغییر باشد. مقدار  $R^2$  تعدیل شده  $96/53$  درصد بود که نشان‌دهنده وجود رابطه اساسی بین متغیرها و پاسخ است.

در شکل ۲ پاسخ شار تراویده محاسبه شده با مدل و نتایج تجربی، مقایسه شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود، پاسخ برآورد

## جدول ۵- آنالیز واریانس مدل SR

Table 5. Variance analysis (ANOVA) of SR model

Source	Sum of squares	df	Mean square	F value	p-value prob > F
Model	36.85	3	12.28	325.81	<0.0001 significant
$X_1$ -FFR	5.22	1	5.22	138.44	<0.0001
$X_2$ -PT	4.94	1	4.94	131.08	<0.0001
$X_3$ -FT	26.69	1	26.69	707.91	<0.0001
Residual	0.87	23	0.038		
Cor Total	37.72	26			
Std. Dev.		0.19		R-Squared=	0.977
Mean		5.44		Adj R-Squared=	0.974
C.V. %		3.57		Pred R-Squared=	0.9686
PRESS		1.19		Adeq Precision=	61.019

مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل SR انطباق نزدیک وجود دارد. شار تراویده بر حسب متغیرهای کد شده در معادله ۴ ارائه شده است

$$\sqrt{J_w} = 5.44 + 0.54X_1 - 0.52X_2 + 1.22X_3 \quad (4)$$

معادله ۴ براساس متغیرهای واقعی به صورت زیر نوشته می‌شود

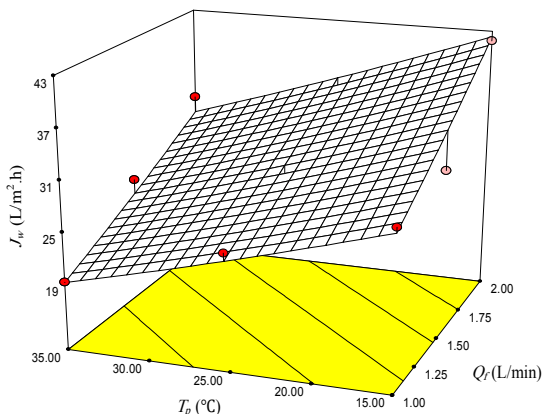
$$\sqrt{J_w} = -2.16705 + 1.07701Q_f - 0.052399T_p + 0.12177T_f \quad (5)$$

## جدول ۴- مقادیر تجربی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل SR

Table 4. Actual and predicted value of SR model

Run	Actual value	Predicted value
1	19.06	17.72
2	30.13	29.48
3	42.69	44.22
4	14.19	13.62
5	25	24.11
6	40.56	37.45
7	8.88	9.99
8	19.25	19.18
9	29.75	31.36
10	22.06	22.56
11	30.94	35.64
12	51.5	51.70
13	20.56	17.89
14	27.56	29.59
15	42	44.36
16	14.13	13.69
17	25.94	24.21
18	36.94	37.70
19	27.81	27.98
20	41.88	42.38
21	63	59.75
22	24.69	22.75
23	33.69	35.76
24	52.69	51.84
25	14.88	17.98
26	31.75	29.81
27	46.69	44.62



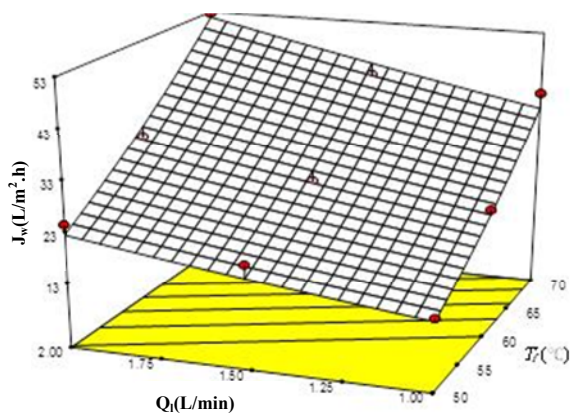


**Fig. 3.** Response plot of permeate flux vs. feed flow rate and permeate temperature at constant feed temperature

شکل ۳- نمودار سه بعدی شار تراویده بر حسب دبی پساب ورودی و دمای تراویده در دمای پساب ورودی ثابت

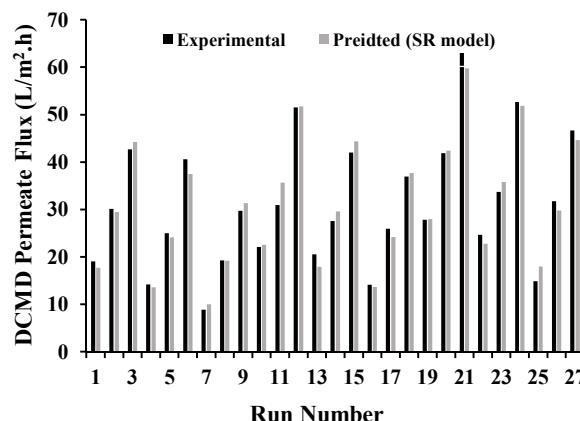
تراویده در مدل SR برابر  $51/84 \text{ L/m}^2\text{h}$  تخمین زده شده است. تأثیر دمای پساب ورودی و دمای تراویده بر شار تراویده در دبی پساب ورودی ثابت نیز در شکل ۵ ارائه شده است. در مدل SR با افزایش دمای پساب ورودی و کاهش دمای تراویده، شار تراویده تا میزان بیشینه  $51/70 \text{ L/m}^2\text{h}$  افزایش می‌یابد.

با توجه به شکل‌های ۳ تا ۵ و معادله ۴ می‌توان گفت که دمای پساب ورودی بیشترین تأثیر را در افزایش شار دارد. اثر دمای پساب ورودی ( $b_3 = 1.22$ ) بیش از دو برابر اثر دمای تراویده ( $b_1 = -0.52$ ) و یا دبی پساب ورودی ( $b_2 = 0.54$ ) است.



**Fig. 4.** Response plot of permeate flux vs. feed flow rate and feed temperature at constant permeate temperature

شکل ۴- نمودار سه بعدی شار تراویده بر حسب دبی پساب ورودی و دمای پساب ورودی در دمای تراویده ثابت



**Fig. 2.** Bar diagram for comparison of empirical and estimated permeate flux

شکل ۲- نمودار مقایسه‌ای شار تراویده محاسباتی و تجربی

شده با داده‌های تجربی نزدیک است. با توجه به اندیس‌ها و گراف‌های آماری، می‌توان نتیجه گرفت که این مدل پاسخ، برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی فرایند DCMD با استفاده از غشای PTFE در تمام محدوده در نظر گرفته شده برای این آزمایش‌ها، به‌طور رضایت‌بخشی معتبر است.

### ۳-۳- نمودارهای سه بعدی RSM

منحنی‌های سه بعدی RSM برای تعیین برهم‌کنش متغیرها و تعیین تراز بهینه هر متغیر در پاسخ بیشینه با استفاده از معادله مدل رگرسیون برای شار تراویده، در شکل‌های ۳ تا ۵ رسم شده‌اند. سطوح پاسخ شار تراویده به‌عنوان تابعی از دو متغیر در حالی که یک متغیر دیگر در تراز صفر (مقدار مرکزی محدوده آزمایش‌ها) ثابت در نظر گرفته می‌شود، به نمایش گذاشته شده است.

شکل ۳ اثر دمای تراویده و دبی پساب ورودی را بر شار تراویده در دمای پساب ورودی ثابت نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش دبی پساب ورودی، شار تراویده افزایش می‌یابد در حالی که با افزایش دمای تراویده، شار تراویده روند نزولی دارد. بیشینه شار تراویده  $42/38 \text{ L/m}^2\text{h}$  در مدل SR برآورد شده است.

تأثیرپذیری شار تراویده از دو پارامتر عملیاتی دمای پساب ورودی و دبی پساب ورودی در دمای تراویده معین در شکل ۴ نشان داده شده است. نمودار شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش دبی و دمای پساب ورودی، شار تراویده افزایش یافته و بیشترین شار



سلسیوس و دبی پساب ورودی ۲ لیتر بر دقیقه حاصل شد. مقدار خطای بیشینه واقعی و محاسبه شده در روش SR برابر ۵/۳ درصد به دست آمد. ضمناً شار کمینه محاسباتی در مدل نیز  $L/m^2h$  ۱۰/۰۱ با درجه مطلوبیت ۰/۹۶۳ بود که در شرایط دمای پساب ورودی ۵۰ درجه سلسیوس، دمای تراویده ۳۵ درجه سلسیوس و دبی پساب ورودی ۱ لیتر بر دقیقه حاصل شد.

یکی از مهم‌ترین جنبه‌های مدل‌سازی با نرم‌افزار، برآورد هدف است که برای تعیین شرایط عملیاتی مفید است. اگر با توجه به شرایط اقلیمی و مصرف بهینه انرژی، هدف پالایشگاه، رسیدن به شاری معین یا در محدوده‌ای مشخص باشد، نرم‌افزار می‌تواند شرایط عملیاتی متنوعی را پیشنهاد دهد.

یکی از هدف‌های مطلوب عملیاتی، دستیابی مداوم و پایدار به شار تراویده ۳۰ درصد بالای محدوده توصیه شده، یعنی از  $45 L/m^2h$  تا  $60 L/m^2h$  است، در این صورت، شرایط عملیاتی خاصی وجود ندارد، بلکه مجموعه‌ای از نواحی جواب برای شرایط عملیاتی حاصل می‌شود که بر اساس آن، و با توجه به محدودیت‌های عملیاتی، شرایط محیطی، مصرف انرژی و اقتصاد، یکی از شرایط انتخاب می‌شود.

در این پژوهش، بهینه‌سازی این شرایط در مدل SR انجام شد و منتخبی از نتایج در جدول ۶ ارائه شد. باید در نظر داشت که با توجه به شرایط حاکم بر DCMD، می‌توان متغیرهای عملیاتی را انتخاب کرد یا تغییر داد.

یکی از عوامل اثرگذار بر انتخاب شرایط عملیاتی، آب و هوا و اقلیم است. در تابستان که استان اصفهان روزها و شب‌های بسیار گرم را تجربه می‌کند، کار کردن در بیشینه دمای پساب ورودی و بیشینه دمای تراویده مطلوب خواهد بود.

با اعمال این شرایط و انتخاب دبی پساب ورودی در تمام محدوده عملیاتی، حداکثر شار تراویده در مدل SR برابر  $L/m^2h$  ۴۴/۵۸ با درجه مطلوبیت ۰/۹۱۹ است. این نقطه در شرایط دمای پساب ورودی ۷۰ درجه سلسیوس، دمای تراویده ۳۵ درجه سلسیوس و دبی پساب ورودی ۲ لیتر بر دقیقه حاصل خواهد شد. برعکس، در زمستان که اصفهان آب و هوای معتدل و نسبتاً سرد کویری دارد،

با توجه به مصرف انرژی، کمینه دماهای پساب ورودی و تراویده، مطلوب خواهند بود. بهینه‌سازی در این شرایط و در تمام

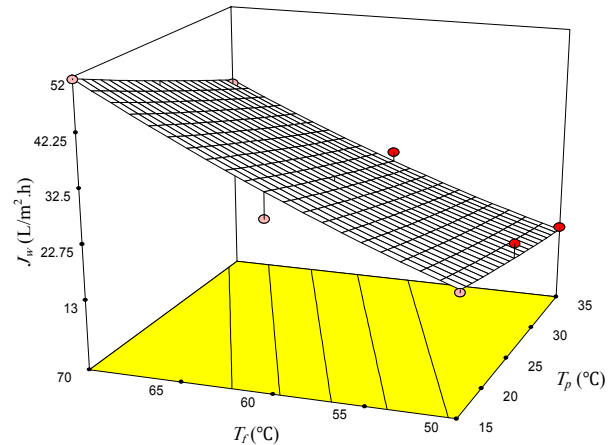


Fig.5. Response plot of permeate flux vs. permeate temperature and feed temperature at constant feed flow rate

شکل ۵- نمودار سه بعدی شار تراویده بر حسب دمای پساب ورودی و دمای تراویده در دبی پساب ورودی ثابت

اثر دمای پساب ورودی توسط خایت و همکاران در سطوح دمایی ۲۵، ۳۷/۵ و ۵۰ درجه سلسیوس بررسی شده است؛ مطابق پژوهش ایشان افزایش دمای پساب ورودی بیشترین اثر را در افزایش شار تراویده دارد (Khayet et al., 2007). پژوهش حاضر نیز مؤید همین موضوع است.

همچنین در رابطه با اثر دبی پساب ورودی، مطالعات بوبکری و همکاران با دبی  $L/m^2h$  ۶۲/۴-۷۳/۶ در پنج سطح نشان داد که افزایش دبی پساب ورودی نیز باعث افزایش شار تراویده می‌شود ولی تأثیر آن به اندازه دمای پساب ورودی نیست (Boubakri et al., 2014). در این پژوهش نیز در محدوده دبی‌های بیشتر، همین نتیجه تأیید شد.

#### ۳-۴- بهینه‌سازی DCMD و پیش‌بینی شرایط عملیاتی

آخرین مرحله روش سطح پاسخ تعیین شرایط بهینه نمک‌زدایی از محلول پساب ورودی در قالب شار تولیدی با فرایند DCMD با استفاده از غشای تجاری PTFE است. نرم‌افزار برای بهینه‌سازی، اطلاعات کلی مدل را در قالب سطوح پاسخ، اثرات اصلی و متغیرهای برهم‌کنش دار، جستجو نموده تا بهترین شرایط عملیاتی به دست آید. مقدار بهینه بر اساس بیشینه شار تراویده در مدل SR برابر  $L/m^2h$  ۵۹/۶۸ با درجه مطلوبیت ۰/۹۵۷ در شرایط دمای پساب ورودی ۷۰ درجه سلسیوس، دمای تراویده ۱۵ درجه





جدول ۶- شرایط عملیاتی و میزان شار تراویده در محدوده ۴۵ L/m<sup>2</sup>h تا ۶۰ L/m<sup>2</sup>h

Table 6. Operational conditions and permeate flux at 45 L/m<sup>2</sup>h to 60 L/m<sup>2</sup>h

Number	Feed rate (L/min)	Permeate temperature (°C)	Feed temperature (°C)	Permeate flux (L/m <sup>2</sup> h)	Desirability
1	1.16	15.96	69.88	45.66	1.00
2	1.59	24.08	69.44	45.39	1.00
3	1.90	15.26	64.08	47.41	1.00
4	1.90	29.56	69.57	46.25	1.00
5	1.86	16.34	66.42	49.94	1.00
6	1.40	17.32	68.53	45.97	1.00
7	1.27	17.02	69.57	46.00	1.00
8	1.78	15.09	63.64	45.05	1.00
9	1.92	20.89	65.22	45.50	1.00
10	1.98	15.62	62.12	45.01	1.00
11	1.65	23.87	69.57	46.68	1.00
12	1.63	19.75	67.75	46.28	1.00
13	1.70	16.09	69.77	53.57	1.00
14	1.89	31.34	69.91	45.36	1.00
15	2.00	15.00	70.00	59.68	1.00
16	1.94	26.27	68.64	47.62	1.00
17	1.88	27.26	67.95	45.01	1.00
18	1.98	32.63	69.86	45.69	1.00
19	1.43	21.92	69.73	45.13	1.00
20	1.65	18.83	67.05	46.05	1.00

نشان‌دهنده دقت و کفایت مدل ارائه شده و در محدوده سایر مدل‌هاست. شکل مدل ریشه دوم بررسی شده در این پژوهش نیز نسبت به مدل‌های چندجمله‌ای درجه دوم، ساده‌تر (معادلات ۱ و ۲) و برای مقاصد محاسباتی مناسب‌تر است. شار تراویده پژوهش حاضر نسبت به بقیه پژوهش‌ها بالاتر بوده و اختلاف مقادیر پیش‌بینی شده و تجربی با درصد خطا در محدوده پژوهش‌های مشابه است.

که در شرایط دمای پساب ورودی ۵۰/۴۹ درجه سلسیوس دمای تراویده ۱۵ درجه سلسیوس و دبی پساب ورودی ۲ لیتر بر دقیقه حاصل می‌شود.

مقایسه شرایط عملیاتی در روزهای گرم و سرد سال به‌خوبی تأثیر دما در شار تراویده را مشخص می‌کند.

بر اساس نتایج به‌دست آمده از این پژوهش و مدل‌سازی ارائه شده، در شرایط بهینه و بیشینه شار تراویده پالایشگاه اصفهان، با ۴۰ m<sup>3</sup>/h متوسط پساب خروجی واحد RO و با فرض بازیابی ۹۰ درصد آن، به ۶۰۰ مترمربع سطح غشا نیاز است. به‌همین ترتیب می‌توان اذعان داشت که برای انجام فرایند در شرایط بهینه تابستان و زمستان، به ترتیب ۸۱۰ و ۱۲۱۰ متر مربع غشا نیاز است.

نتایج حاصل از این پژوهش و پژوهش‌های مشابه در جدول ۷ مقایسه شده‌اند. ضرایب تعیین معمولی و تعدیل شده جدول ۷



جدول ۷- مقایسه نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش‌های مرتبط دیگر

Table 7. Comparison between this research and other related research results

References	MD configuration	Membrane	Model	R <sup>2</sup>	Adj R <sup>2</sup>	Predicted optimize permeate flux	Actual permeate flux
Khayet et al., 2007	DCMD	TF200*	Quadratic	0.994	0.988	$3.021 \times 10^{-6}$ m/s	$2.897 \times 10^{-6}$ m/s
		TF450*		0.995	0.990	$4.193 \times 10^{-6}$ m/s	$4.343 \times 10^{-6}$ m/s
		M12*		0.974	0.952	$3.687 \times 10^{-6}$ m/s	$3.642 \times 10^{-6}$ m/s
		GVHP*		0.903	0.819	$0.839 \times 10^{-6}$ m/s	$0.889 \times 10^{-6}$ m/s
Boubakri et al., 2014	DCMD	PP	Quadratic	0.989	0.979	4.362 L/m <sup>2</sup> h	4.192 L/m <sup>2</sup> h
Khayet et al., 2012	SGMD	TF450*	Quadratic	0.947	0.916	$2.846 \times 10^{-3}$ kg/m <sup>2</sup> s	$2.789 \times 10^{-3}$ kg/m <sup>2</sup> s
Khayet and Cojocaru, 2012	AGMD	PTFE supported by PP	Quadratic	0.991	0.983	185.86 kg/kWh	188.70 kg/kWh
This Study	DCMD	PTFE supported by PP	Square Roots	0.977	0.974	59.68 L/m <sup>2</sup> h	63.0 L/m <sup>2</sup> h

آنالیز واریانس قرار گرفت که به واسطه آن  $R^2 = 0.9733$  و  $adj R^2 = 0.9653$  مشخص شد، که مؤید نزدیکی انطباق خط رگرسیون با داده‌های تجربی و تأثیرگذاری کلیه فاکتورهای انتخاب شده در شار تراویده است. همچنین معادلات تابع پاسخ یا همان شار تراویده بر حسب متغیرهای مستقل به دست آمد. مقدار بیشینه شار تراویده بهینه در محدوده آزمایش‌ها  $59.67 \text{ L/m}^2\text{h}$  با درجه مطلوبیت  $0.9570$  در شرایط عملیاتی دمای پساب ورودی  $70^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس، دمای تراویده  $15^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس و دبی پساب ورودی  $2$  لیتر بر دقیقه به دست آمد. مقدار خطای بیشینه تجربی و محاسبه شده در روش SR برابر  $5/3$  درصد حاصل شد. ضمناً بهینه شرایط عملیاتی در شرایط اقلیمی گرم و سرد اصفهان نیز مشخص شد.

محدوده دبی پساب ورودی، نشان می‌دهد که حداکثر شار تراویده در مدل SR برابر  $28/62 \text{ L/m}^2\text{h}$  با درجه مطلوبیت  $0.786$  است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدل‌سازی RSM به منظور بهینه‌سازی و پیش‌بینی شرایط عملیاتی در صورت استفاده از DCMD در پساب خروجی واحد RO پالایشگاه اصفهان ارائه شد. این مدل‌سازی با استفاده از داده‌های حاصل از انجام  $27$  آزمایش و نرم‌افزار DE صورت گرفت. مدل SR توسط نرم‌افزار (بخش Diagnostics قسمت Box Cox) پیشنهاد و اجرا شد.

برای ارزیابی معیارهای معنی‌داری آماری و تطابق نزدیک‌تر مقادیر تجربی و محاسبه شده در روش SR، نتایج مدل مورد تحلیل

#### References

- Adham, S., Hussain, A., Matar, J. M., Dores, R. & Janson, A. 2013. Application of membrane distillation for desalting brines from thermal desalination plants. *Desalination*, 314, 101-108.
- Boubakri, A., Hafiane, A. & Bouguecha, S. A. T. 2014. Application of response surface methodology for modeling and optimization of membrane distillation desalination process. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20, 3163-3169.
- Calabrò, V., Drioli, E. & Matera, F. 1991. Membrane distillation in the textile wastewater treatment. *Desalination*, 83, 209-224.



- Cath, T. Y., Adams, V. D. & Childress, A. E. 2004. Experimental study of desalination using direct contact membrane distillation: A new approach to flux enhancement. *Journal of Membrane Science*, 228, 5-16.
- Cojocaru, C. & Khayet, M. 2011. Sweeping gas membrane distillation of sucrose aqueous solutions: Response surface modeling and optimization. *Separation and Purification Technology*, 81, 12-24.
- Drioli, E., Di Profio, G. & Curcio, E. 2012. Progress in membrane crystallization. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 1, 178-182.
- Duong, H. C., Cooper, P., Nelemans, B., Cath, T. Y. & Nghiem, L. D. 2015. Optimising thermal efficiency of direct contact membrane distillation by brine recycling for small-scale seawater desalination. *Desalination*, 374, 1-9.
- El-Abbassi, A., Hafidi, A., Khayet, M. & García-Payo, M. C. 2013. Integrated direct contact membrane distillation for olive mill wastewater treatment. *Desalination*, 323, 31-38.
- Ghorbani, F., Molavi, H., Fathi, S. & Piri, F. 2017. Application of response surface methodology to optimize malachite green removal by Cl-nZVI nanocomposites. *Journal of Water and Wastewater*, 28, 79-92. (In Persian)
- Gryta, M. 2002. Concentration of NaCl solution by membrane distillation integrated with crystallization. *Separation Science and Technology*, 37, 3535-3558.
- Gryta, M., Morawski, A. W. & Tomaszewska, M. 2000. Ethanol production in membrane distillation bioreactor. *Catalysis Today*, 56, 159-165.
- Hsu, S., Cheng, K. & Chiou, J.-S. 2002. Seawater desalination by direct contact membrane distillation. *Desalination*, 143, 279-287.
- Jonsson, G., 2012. Aroma stripping under various forms of membrane distillation processes: Experiments and modeling. *Procedia Engineering*, 44, 293.
- Khayet, M. & Cojocaru, C. 2012. Air gap membrane distillation: Desalination, modeling and optimization. *Desalination*, 287, 138-145.
- Khayet, M., Cojocaru, C. & Baroudi, A. 2012. Modeling and optimization of sweeping gas membrane distillation. *Desalination*, 287, 159-166.
- Khayet, M., Cojocaru, C. & García-Payo, C. 2007. Application of response surface methodology and experimental design in direct contact membrane distillation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 46, 5673-5685.
- Koros, W., Ma, Y. & Shimidzu, T., 1996. Terminology for membranes and membrane processes. *Journal of Membrane Science*, 120, 149-159.
- Lee, J. G., Kim, Y. D., Kim, W. S., Francis, L., Amy, G. & Ghaffour, N. 2015. Performance modeling of direct contact membrane distillation (DCMD) seawater desalination process using a commercial composite membrane. *Journal of Membrane Science*, 478, 85-95.
- Lin, D. S., Yen, H. W., Kao, W. C., Cheng, C. L., Chen, W. M. Huang, C. C., et al., 2015. Bio-butanol production from glycerol with *Clostridium pasteurianum* CH<sub>4</sub>: The effects of butyrate addition and in situ butanol removal via membrane distillation. *Biotechnology for Biofuels*, 8, 168.
- Quist-Jensen, C. A., Macedonio, F. & Drioli, E. 2016. Membrane crystallization for salts recovery from brine—an experimental and theoretical analysis. *Desalination and Water Treatment*, 57, 7593-7603.
- Tomaszewska, M., Gryta, M. & Morawski, A. W. 1995. Study on the concentration of acids by membrane distillation. *Journal of Membrane Science*, 102, 113-122.
- Tomaszewska, M. & Lapin, A. 2012. The influence of feed temperature and composition on the conversion of KCl into KHSO<sub>4</sub> in a membrane reactor combined with direct contact membrane distillation. *Separation and Purification Technology*, 100, 59-65.
- Udriot, H., Ampuero, S., Marison, I. W. & Von Stockar, U. 1989. Extractive fermentation of ethanol using membrane distillation. *Biotechnology Letters*, 11, 509-514.

