



## Modeling of thermal gradient effect on reverse osmosis process

Mohsen Zhyianey Bakhsh, Ehsan Abedini <sup>ib</sup>\*, Saeed Niazi, Younes Bakhshan, Pouyan Adibi <sup>ib</sup>

Department of Mechanical Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

**ABSTRACT:** In the present study modeling and formulation of the thermal gradient effect on reverse osmosis process for evaluation treated water penetration and water production are studied. Modeling is done by MATLAB using the Solution-Diffusion model. At present work, the effect of two different parameters (temperature difference gradient and salt concentration) on different parameters is studied. Studying important parameters for temperature-driven reverse osmosis shows the direct effect of the temperature difference between the permeate-water part and the saline water part on different parameters. On temperature-driven reverse osmosis, the temperature difference between the permeate-water part and the saline-water part acts as a driving force. The penetration rate at each salt concentration rises by increasing the temperature difference between the permeate-water part and the saline-water part. The variations of different parameters versus temperature differences for two different saline water part concentrations (1 gr/lit and 0.35 gr/lit) are presented. For 1 gr/lit salt concentration and 1.5, 2.5, and 10.8 °C temperature difference between the permeate-water part and saline-water part, treated water penetrations are obtained 0.9, 0.9545, and 1.3118 l/m<sup>2</sup>.h.bar respectively. Also, for 0.35 gr/lit salt concentration and 1.5 and 9.3 °C temperature difference between the permeate-water part and saline-water part, treated water penetrations are obtained at 0.917 and 1.167 l/m<sup>2</sup>.h.bar respectively.

### Review History:

Received: Feb. 10, 2024

Revised: Nov. 03, 2024

Accepted: Nov. 04, 2024

Available Online: Nov. 17, 2024

### Keywords:

Modeling

Reverse Osmosis

Temperature Difference

MATLAB Program

Solution-Diffusion Model

### 1- Introduction

Problems related to water sources such as pollution, lack of purified water sources, and increasing water consumption have caused great problems in societies [1]. Desalination processes require energy. Due to the difference in energy costs, different countries use different sweetening methods [2]. Currently, reverse osmosis is one of the important methods to perform the sweetening process. In this method, purified water is produced from sea water or other polluted water sources.

Desalination methods are divided based on two important factors. These two factors are energy sources and the type of desalinating process. Energy sources include thermal, mechanical, electrical and chemical energy.

Osmosis is a process in which the purified water is separated from the impure solution after passing through the membrane [3]. The osmotic process depends on three factors: pressure, temperature, and concentration.

In the temperature reverse osmosis process, the temperature difference between the purified water and the salt water is used. By creating a temperature difference, a driving force is created.

The principle that states the use of a small temperature difference to create permeation properties along a membrane

has been studied by Lee et al. [4] Lee and colleagues have expressed this principle with permeation properties.

The osmotic process depends on three factors: temperature, pressure and chemical potential. In Figure 1, it shows the three states that occur in the osmotic process.

### 2- Methodology

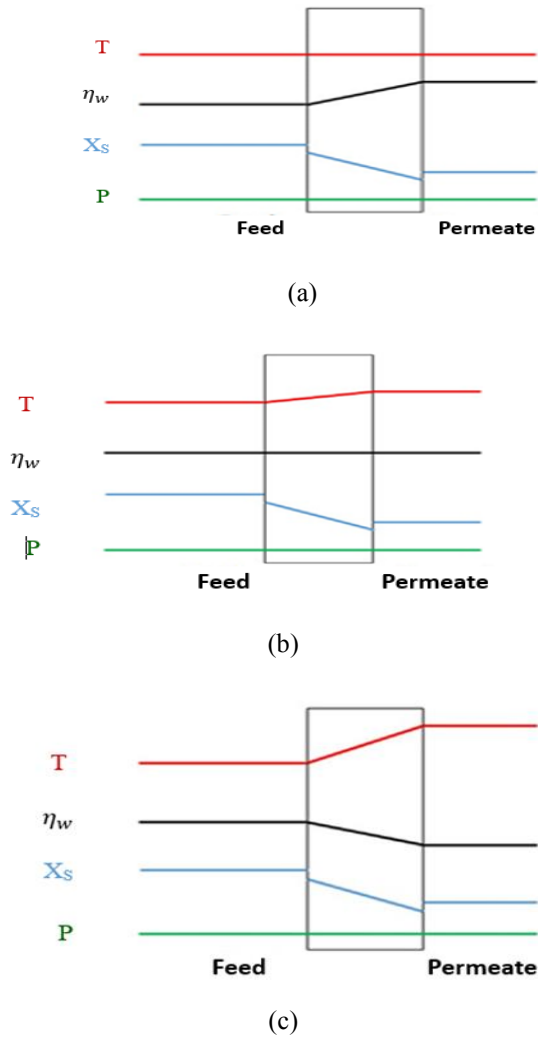
To compare the results of experiments and modeling, proper modeling should be done considering the effective parameters of the system. In this research work, the modeling of the temperature reverse osmosis process is presented. The models that express the performance of reverse osmosis membranes are very important for the design of reverse osmosis processes. There are many mechanical and mathematical models to model the reverse osmosis process [5].

These models are divided into the following three categories:

- Irreversible thermodynamic models (such as Codem - Katchalski and Spiegler Codem models)
- Non-porous or homogeneous models (such as solution-permeation models)
- Models based on pore dimensions (such as fine pore model, capillary flow gradual absorption model, surface

\*Corresponding author's email: abedini@hormozgan.ac.ir





**Fig. 1. Membrane systems based on the temperature gradient stimulus against systems based on the pressure difference stimulus[9] (a) forward osmosis, (b) osmotic equilibrium, (c) reverse osmosis**

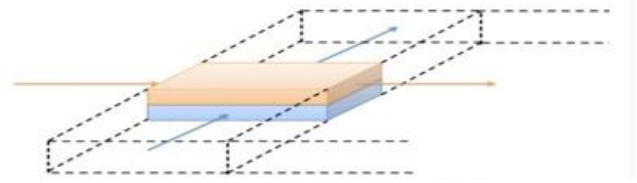
force pore flow model)

The solution-diffusion model is widely used to model the mass transfer process in reverse osmosis, dialysis, gas permeation and evaporation systems. In the solution-diffusion model, diffusion is considered.

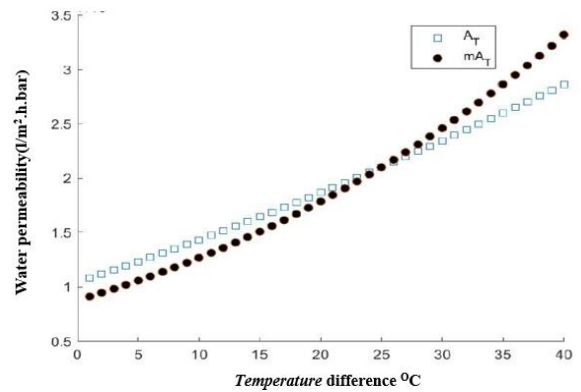
In the present research work, the aim is to model the performance of a spiral type membrane in the reverse osmosis process. To simplify the modeling of pre-treatment, post-treatment and multi-membrane systems are not considered.

### 3- Results and Discussion

In Figures 3 and 4, the results of water penetration for a concentration of one and 0.35 gr/lit for different temperature differences are drawn. Based on this figure, it can be seen that with the increase in the temperature difference between the purified water and salt water, the driving force increases.



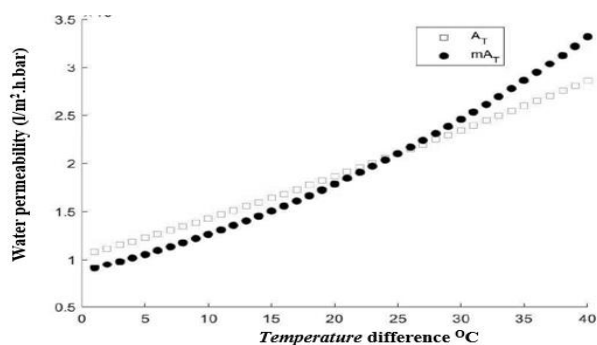
**Fig. 2. Simplified Model of Spiral Wound Reverse Osmosis**



**Fig. 3. Changes in the amount of water penetration per concentration of one 1 gr/lit of salt water concentration for different temperature gradient**

By examining the graphs related to the changes of different parameters in the study of the effect of temperature gradient on the reverse osmosis process, we find that the increase in concentration and temperature difference between the salt water and the purified water has a direct effect on the increase in the permeation rate of the purified water, the diffusion coefficient, and the mass transfer coefficient. Therefore, we find that the two factors of increasing the concentration of the salt water part and the temperature gradient as the driving force in performing the temperature reverse osmosis process have a direct effect on increasing the parameters related to infiltration and mass transfer. In any given concentration, increasing the temperature difference between the purified water and the salt water causes an increase in the parameters related to the infiltration. As a result of the increase of filtered water infiltration rate, the amount of salinity in the brackish water part increases, and the amount of purified water in the purified water part increases.

In this research work, the process of reverse osmosis under the effect of temperature gradient has been investigated. In the absence of pressure force, as a driving force, the effect of two factors, the concentration of the salt water part and the temperature difference between the purified water part and the salt water part, has been investigated on the reverse



**Fig. 4. Changes in the amount of water penetration per concentration of one 0.35 gr/lit of salt water concentration for different temperature gradient**

osmosis process. To investigate this process, solution-permeation model has been used.

The results of this research show that the solution-permeation model is a suitable match for the reverse osmosis process under the effect of temperature gradient. The comparison between the modeling results and the experimental data shows a good agreement between the results.

#### 4- Conclusions

In this research work, the process of reverse osmosis under the effect of temperature gradient has been investigated. In the absence of pressure force, as a driving force, the effect

of two factors, the concentration of the salt water part and the temperature difference between the purified water part and the salt water part, has been investigated in the reverse osmosis process. To investigate this process, a solution-permeation model has been used.

The results of this research show that the solution-permeation model is a suitable match for the reverse osmosis process under the effect of temperature gradient. The comparison between the modeling results and the experimental data shows a good agreement between the results.

Considering these results, it is concluded that the increase in temperature difference and salinity has a direct effect on the penetration rate. It can be seen that in the absence of pressure as a driving force, the infiltration rate at a given salinity level increases with the increase in the temperature difference between the purified water part and the salt water part.

#### References

- [1] N. Lior, *Advances in water desalination*, A John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [2] A. Alkaisy, R. Mossad, A. Sharifian-Barforoush, A Review of the Water Desalination Systems Integrated with Renewable Energy, *Energy Procedia*, 110(1876-6102) (2017) 268-274.
- [3] M. Mulder, *Basic Principles of Membrane Technology*, Springer Dordrecht, 1996.
- [4] G.F.C. Rogers, Y.R. Mayhew, *Thermodynamic and Transport Properties of Fluids*, Blackwell, Oxford., 1995.
- [5] O.R. Al-Jayyousi, Greywater reuse, towards sustainable water management, *Desalination*, 156(1-3) (2003) 181-192.



## مدل سازی اثر گرادیان دمایی بر فرایند اسمز معکوس

محسن ژبانی بخش، احسان عابدینی<sup>ID\*</sup>، سعید نیازی، یونس بخشان، پویان ادیبی<sup>ID</sup>

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۱  
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۱۳  
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۸/۲۷

### کلمات کلیدی:

مدل سازی  
اسمز معکوس  
اختلاف دما  
برنامه متلب  
مدل محلول - نفوذ

**خلاصه:** در کار حاضر، مدل سازی و فرمولاسیون اثر گرادیان دمایی بر فرایند اسمز معکوس برای تعیین میزان نفوذ آب تصفیه شده و تولید آب تحت تأثیر دو عامل اختلاف دما و میزان غلظت نمک بررسی می گردد. مدل سازی توسط برنامه نویسی با متلب با استفاده از مدل محلول - نفوذ انجام می گردد. بررسی پارامترهای مهم در اسمز معکوس دمایی، بیانگر تأثیر مستقیم اختلاف دمای بین قسمت آب تصفیه شده و آب شور بر پارامترها مربوطه می باشد. در هر غلظت نمک افزایش اختلاف دمای بین قسمت آب تصفیه شده و آب شور، به عنوان نیروی محرک، سبب افزایش نفوذ آب تصفیه شده می گردد. در این کار تحقیقی، تأثیر غلظت قسمت آب شور و اختلاف دمای بین قسمت آب تصفیه شده و آب شور بر پارامترهای مختلف اسمز معکوس دمایی بررسی شده است. نمودارهای پارامترهای مختلف بر اساس دما در غلظت های یک و ۰/۳۵ گرم بر لیتر ارائه گردیده است. در غلظت یک گرم بر لیتر برای اختلاف دماهای ۱/۵، ۲/۵ و ۱۰/۸ درجه سلسیوس مقادیر نفوذ آب تصفیه شده به ترتیب ۰/۹، ۰/۹۵۴۵ و ۱/۳۱۱۸ بر حسب لیتر بر مترمربع ساعت بار و در غلظت ۰/۳۵ گرم بر لیتر برای اختلاف دماهای ۱/۵ و ۹/۳ درجه سلسیوس مقادیر نفوذ آب تصفیه شده به ترتیب ۰/۹۱۷ و ۱/۱۶۷ بر حسب لیتر بر مترمربع ساعت بار به دست می آیند.

### ۱- مقدمه

مشکلات مربوط به منابع آب مانند آلودگی، کمبود منابع آب تصفیه شده و افزایش روزافزون مصرف آب، سبب ایجاد مشکلات بزرگی در جوامع گردیده است [۱]. فرایندهای شیرین سازی نیاز به انرژی دارد. باتوجه به تفاوت هزینه های انرژی، کشورهای مختلف از روش های مختلف شیرین سازی استفاده می نمایند [۲]. در حال حاضر، اسمز معکوس یکی از روش های مهم جهت انجام فرایند شیرین سازی می باشد. در این روش آب تصفیه شده از آب دریا یا سایر منابع آب آلوده تولید می گردد [۳].

### ۲- سیستم های شیرین سازی

#### ۲-۱- تقسیم بندی روش های شیرین سازی آب

روش های شیرین سازی بر اساس دو عامل مهم تقسیم بندی می گردند. این دو عامل منابع انرژی و نوع فرایند شیرین سازی می باشد. منابع انرژی شامل انرژی های حرارتی، مکانیکی، الکتریکی و شیمیایی می باشد. همچنین فرایندهای شیرین سازی شامل تبخیر - چگالش، فیلتراسیون، و روش های

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: abedini@hormozgan.ac.ir

کریستالیزاسیون می باشند [۲]. روش اسمز معکوس ۳/۵ تا ۵ کیلووات ساعت به ازای هر مترمکعب تولید آب در دمای محیط انرژی مصرف می نماید [۴].  
۲-۲- شیرین سازی به روش اسمز معکوس: مفاهیم و ملاحظات  
اسمز فرایندی می باشد که در آن آب تصفیه شده از محلول ناخالص پس از عبور از غشا جداسازی می گردد [۵]. فرایند اسمزی وابسته به سه عامل فشار، دما و غلظت می باشد. (شکل ۱). با ایجاد اختلاف فشار حدود ۵۵ تا ۸۵ بار، آب تصفیه شده از قسمت آب تغذیه به قسمت آب تصفیه شده نفوذ می کند. این فرایند به عنوان اسمز معکوس شناخته می گردد [۶].  
اسمز معکوس یکی از رایج ترین روش های شیرین سازی می باشد که جهت فرایند تصفیه آب جهت مصارف صنعتی، آشامیدنی، کشاورزی و... به کار برده می شود [۷]. با پیشرفت در تولید مواد غشاهای، هزینه شیرین سازی آب کاهش می یابد [۸].

### ۳- اسمز معکوس دمایی

#### ۳-۱- مفاهیم و تعاریف

در فرایند اسمز معکوس دمایی، اختلاف دمای بین قسمت آب تصفیه



مناسب با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر سیستم انجام گردد. در این کار تحقیقی مدل سازی فرایند اسمز معکوس دمایی ارائه می گردد. مدل هایی که عملکرد غشاهای اسمز معکوس را بیان می نمایند، برای طراحی فرایندهای اسمز معکوس بسیار مهم می باشند. مدل های مکانیکی و ریاضی متعددی جهت مدل سازی فرایند اسمز معکوس وجود دارند. این مدل ها در سه دسته زیر تقسیم بندی می گردند:

- مدل های ترمودینامیکی برگشت ناپذیر<sup>۱</sup> (نظیر مدل های کدم - کاتچالسکی<sup>۲</sup> و اسپیگلر کدم<sup>۳</sup>)

- مدل های غیر متخلخل یا همگن<sup>۴</sup> (نظیر مدل های محلول - نفوذ)  
- مدل های مبتنی بر ابعاد منفذ<sup>۵</sup> (نظیر مدل منافذ ریز، مدل جذب تدریجی جریان مویرگی، مدل جریان منفذ نیروی سطحی)

مدل های ترمودینامیکی برگشت ناپذیر، فرایند انتقال مایع در غشا اسمز معکوس را شرح می دهند. عدم بیان مکانیسم فرایند انتقال از معایب این مدل ها می باشد. مدل های همگن تنها از دو یا سه پارامتر جهت مدل سازی سیستم های اسمز معکوس استفاده می نمایند؛ بنابراین این مدل ها جهت مدل سازی طیف وسیعی از سیستم های غشایی اسمز معکوس کاربرد دارند. مدل های متخلخل پارامترهایی نظیر اندازه منفذ، تداخل بین محلول و ممبرین و مؤلفه توزیع محلول را بیان می نمایند. کلیه مدل های ترمودینامیک برگشت ناپذیر و مدل های متخلخل جهت مدل سازی فرایند اسمز معکوس دستاوردهایی داشته اند. مدل های همگن و مدل های متخلخل تفاوت های اساسی در مفروضات دارند که هنوز قابل بحث می باشند [۱۱].

مدل محلول - نفوذ<sup>۶</sup> به صورت گسترده جهت مدل سازی فرایند انتقال جرم در سیستم های اسمز معکوس، دیالیز، نفوذ گاز و تبخیر به کار برده می شود. در مدل محلول - نفوذ، نفوذ در نظر گرفته می شود. بر اساس مدل محلول - نفوذ، شار جز  $i$ ،  $J_i$  متناسب با تغییرات پتانسیل شیمیایی جز  $\frac{d\eta_i}{dx}$  به صورت زیر بیان می گردد [۱۲]:

$$J_i = L \frac{d\eta_i}{dx} \quad (1)$$

شده و آب شور به کار برده می شود. با ایجاد اختلاف دما، نیروی محرک ایجاد می گردد. این نیروی محرک بر فشار اسمزی غلبه می نماید. در نتیجه آب تصفیه شده از قسمت آب شور به قسمت آب تصفیه شده نفوذ می نماید [۹].

### ۳-۲- فرضیات

اصلی که کاربرد اختلاف دمای کم را جهت ایجاد خواص نفوذ در طول یک غشا را بیان می کند، توسط لی و همکاران مطالعه شده است [۱۰]. لی و همکاران این اصل را با خواص نفوذ بیان نموده اند. کاربرد این اثر در فرایند شیرین سازی در شکل ۱ نشان داده شده است. در شکل ۱ [۹]، دما  $T$ ، پتانسیل شیمیایی  $(\eta_w)$ ، غلظت محلول  $\eta_w$  و فشار  $(P)$  برای سه حالت مختلف در ممبرین نشان داده شده است.

فرایند اسمزی وابسته به سه عامل دما، فشار و پتانسیل شیمیایی می باشد. در شکل ۱، سه حالت که در فرایند اسمزی به وقوع می پیوندد را نشان می دهد. در این شکل، سامانه های غشایی بر اساس محرک گرادیان دمایی در برابر سامانه ها بر اساس محرک اختلاف فشار مقایسه گردیده است. در شرایطی که دما و فشار ثابت باشد (شکل ۱-الف)، اختلاف پتانسیل شیمیایی بین قسمت آب تصفیه شده و آب شور سبب نفوذ آب تصفیه شده به وسیله فرایند اسمزی می گردد. در شرایطی که قسمت آب تصفیه شده نسبت به قسمت آب شور دارای دمای بالاتری باشد، پتانسیل شیمیایی برای جریان آب کاهش می یابد. این اثر سبب کاهش میزان نفوذ آب می گردد.

حالت اسمز متعادل در دمای آستانه به وقوع می پیوندد. در این حالت پتانسیل شیمیایی آب در دو سمت غشا یکسان می باشد. (شکل ۱-ب)  
در حالتی که دما در قسمت آب تصفیه شده به اندازه ای افزایش یابد که بر گرادیان ناشی از پتانسیل شیمیایی غلبه نماید، سبب ایجاد جریان معکوس می گردد. در این حالت اسمز معکوس به وقوع می پیوندد. (شکل ۱-پ)

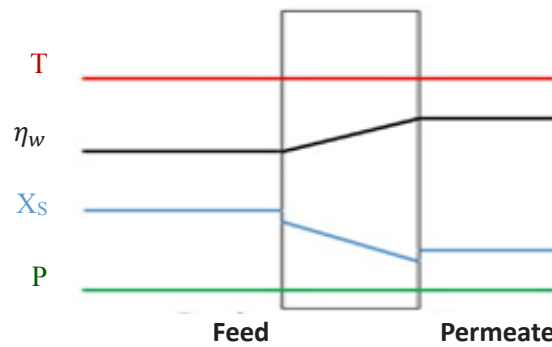
### ۳-۳- ملاحظات شرایط اختلاف دمایی

حالت ب در شکل ۱ اثر تغییرات دما در طول غشا را بیان می نماید. در این شکل اثر گرادیان دما بر فشار اسمزی بیان شده است. اختلاف دما همانند اختلاف فشار عمل می نماید. هنگامی که فشار ثابت باشد تغییرات دما سبب تغییر در میزان ترکیب می گردد.

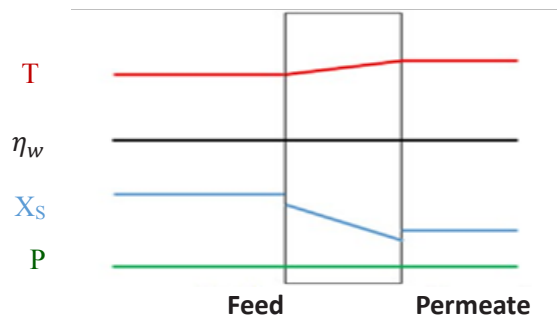
### ۴- مدل سازی

برای مقایسه نتایج آزمایش ها و مدل سازی، می بایستی مدل سازی

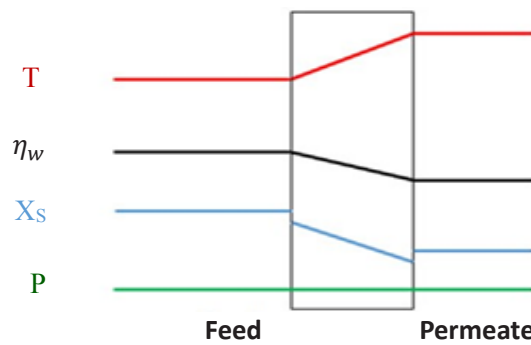
- 1 Irreversible thermodynamics models
- 2 Kedem-Katchalsky
- 3 Spiegler-Kedem
- 4 Nonporous or homogeneous models
- 5 Pore models
- 6 Solution-diffusion Model



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۱. سامانه‌های غشایی بر اساس محرک گرادیان دمایی در برابر سامانه‌ها بر اساس محرک اختلاف فشار [۹]. (الف) اسمز مستقیم (ب) اسمز متعادل (پ) اسمز معکوس

Fig. 1. Membrane systems based on the temperature gradient stimulus against systems based on the pressure difference stimulus [9]. (a) forward osmosis, (b) osmotic equilibrium, (c) reverse osmosis



می‌باشد. چهار نمونه رایج غشاها شامل صفحه‌ای<sup>۱</sup>، لوله‌ای<sup>۲</sup>، مارپیچی<sup>۳</sup> و رشته توخالی<sup>۴</sup> می‌باشد. متداول‌ترین نوع ممبرین شامل مارپیچی می‌باشد [۱۴].

#### ۴-۳- سیستم

سیستم اسمز معکوس شامل مجموعه‌ای از المان‌های غشایی که در یک محفظه قرار گرفته‌اند، می‌باشد. لوله‌های جریان تغذیه، جریان آب تصفیه شده و جریان خروجی می‌باشد. در محفظه‌های غشا، غشاها تا هشت عدد به صورت سری پشت‌سرهم قرار می‌گیرند [۱۵].

در کار تحقیقی حاضر از غشا نوع پلی‌آمیدی از نوع (DOW Filmtec SW30HR) استفاده گردیده است.

#### ۴-۴- روابط اثرات دمایی

ویسکوزیته آب  $\mu_w$  و ویسکوزیته آب دریا  $\mu_{sw}$  در هر دمایی از روابط زیر به دست می‌آید [۱۶].

$$\mu_w = 4/2844 \times 10^{-5} + (0/157(T + 64/993))^2 - 91/926^{-1} \quad (4)$$

$$0 \leq T \leq 18.0$$

$$\mu_{sw} = \mu_w (1 + AS + BS^2) \quad (5)$$

$$A = 1/541 + 1/998 \times 10^{-2} T - 9/52 \times 10^{-5} T^2 \quad (6)$$

$$B = 7/974 - 7/561 \times 10^{-2} T + 4/724 \times 10^{-4} T^2 \quad (7)$$

$$0 \leq T \leq 18.0, 0 < S < 0/15 \text{ kg/kg}$$

در رابطه (۴)،  $\mu_w$ ، خواص آب تصفیه شده در هر دمایی می‌باشد. میزان نفوذ محلول آب‌نمک در دمای ۲۵ درجه سلسیوس برابر با  $1/161 \times 10^{-6}$  متر مربع بر ثانیه می‌باشد. میزان نفوذ آب در هر دمای دلخواه از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۷].

در رابطه (۱)،  $L_i$  ضریب مرتبط با جز  $i$  می‌باشد. ضریب  $L_i$  متناسب با مجذور سرعت نفوذ ذرات می‌باشد. سرعت نفوذ ذرات بر اساس معادله استوکس-انیشتین به دما، ویسکوزیته سیال و اندازه ذرات وابسته می‌باشد. در محلولهای آبی رقیق، ضریب نفوذ بیشتر یونها نزدیک هم و در دمای اتاق در محدوده  $10^{-9} \times 0/2$  تا  $10^{-6} \times 6$  متر مربع بر ثانیه می‌باشد. پتانسیل شیمیایی جز  $i$  به صورت زیر بیان می‌گردد [۱۲]:

$$d\eta_i = RTd(\ln(\gamma_i c_i)) + v_i dp \quad (2)$$

در معادله فوق  $R$  ثابت جهانی گازها،  $T$  دما،  $\gamma_i$  ضریب فعالیت مرتبط با غلظت جز  $i$ ،  $c_i$  غلظت مولی جز  $p$  (مول بر لیتر)،  $v_i$  حجم مولی جز  $i$  و  $p$  فشار می‌باشد. در مدل محلول-نفوذ فشار در طول ممبرین ثابت فرض می‌گردد. با جاگذاری رابطه (۲) در رابطه (۱) و مشتق گیری داریم:

$$J_i = \frac{D_i K_i c_{io} v_i (\Delta p - \Delta \pi)}{lRT} \quad (3)$$

در رابطه فوق  $D_i = RTL / c_i$  می‌باشد (ضریب نفوذ جز بر اساس قانون نفوذ فیک)،  $K_i = \frac{\gamma_{io}}{\gamma_{io(m)}}$  ضریب جذب فاز مایع نسبت به ضریب جذب فاز ممبرین جز  $i$  می‌باشد.  $\gamma_{io}$  ضریب فعالیت جز  $i$  در سمت تغذیه و  $\gamma_{io(m)}$  ضریب فعالیت جز  $i$  در ممبرین در سمت تغذیه می‌باشد.  $c_{io}$  غلظت مولی جز  $i$  در سمت تغذیه می‌باشد.  $v_i$  حجم مولی جز  $i$ ،  $\Delta p$  فشار هیدرودینامیک در ممبرین،  $\Delta \pi$  اختلاف فشار اسمزی در ممبرین می‌باشد. همچنین،  $l$  ضخامت ممبرین می‌باشد.

#### ۴-۱- اثرات دمایی

اثرات دمایی تأثیر مشخصی بر شار نفوذ در فرآیند اسمز معکوس دارد. این اثرات نتایج متوسطی در فرآیند جداسازی دارند. افزایش دما سبب کاهش ویسکوزیته و سایر اثرات می‌گردد [۱۳].

#### ۴-۲- مدول

کوچک‌ترین قسمت دارای توان تولید در سیستم‌های اسمز معکوس، غشا

- 1 Plate and frame
- 2 Tubular
- 3 Spiral-wound
- 4 Hollow-fiber

محلول آب نمک در غشا از روابط زیر به دست می آیند [۱۷].

$$mA_T = A_{r_5} \exp \left[ K_{wt} \left( \frac{1}{(273/15 + T)} - \frac{1}{298/15} \right) \right] \quad (12)$$

$$mB_T = B_{r_5} \exp \left[ K_{st} \left( \frac{1}{(273/15 + T)} - \frac{1}{298/15} \right) \right] \quad (13)$$

ضریب دمایی برای انتقال آب،  $K_{wt}$ ، و ضریب دمایی برای انتقال محلول آب نمک،  $K_{st}$ ، از منابع به ترتیب  $-2894$  و  $-3281$  در نظر گرفته می شوند [۱۵]. با توجه به موارد ذکر شده فوق ضریب پلاریزاسیون غلظت،  $CP$ ، و میزان خروجی نمک،  $x_s$ ، در هر دمایی طبق روابط زیر به دست می آیند [۱۷].

$$CP = \frac{C_m}{C_f} = 1 - x_s + x_s \times \exp \left( \frac{J_w}{k_{cp}} \right) \quad (14)$$

$$x_s = 1 - \frac{C_p}{C_f} = 1 - \frac{CP \times B_T}{J_w} \times \frac{J_w}{B_T + J_w} \quad (15)$$

در روابط فوق،  $C_m$  غلظت اصلاح شده در ورودی ممبرین،  $C_f$  غلظت ورودی در ممبرین،  $J_w$  شار نفوذ آب تصفیه شده،  $k_{cp}$  ضریب انتقال جرم می باشد.

با استفاده از روابط فوق میزان فشار معادل ایجاد شده ناشی از اختلاف دما طبق رابطه زیر به دست می آید [۱۷]:

$$\Delta p_a = 2RT \times CP \times \left( \frac{J_w}{J_w + B_T} \right) \times C_f + \frac{J_w}{A_T} \quad (16)$$

میزان شوری قسمت آب تصفیه شده از فرمول های زیر به دست می آید [۱۷]:

$$D_T = D_{r_5} \frac{\mu_{r_5} T}{\mu_T 298/15} \quad (8)$$

در رابطه (۸)،  $D_T$  میزان نفوذ آب در هر دمای دلخواه،  $D_{r_5}$  میزان نفوذ آب در دمای ۲۵ درجه سلسیوس،  $\mu_{r_5}$  میزان ویسکوزیته آب در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و  $\mu_T$  میزان ویسکوزیته آب در هر دمای دلخواه می باشد. ضریب انتقال جرم،  $k_{cp}$ ، در هر دمایی با توجه به میزان نفوذ محلول آب نمک از رابطه زیر به دست می آید [۱۷].

$$k_{cp} = 0.18 \cdot \left( \frac{\gamma_w D^r}{L} \right)^{1/3} \quad (9)$$

در رابطه (۹)،  $\gamma_w$  میزان تنش برشی دیوار،  $D$  میزان نفوذ و  $L$  ضریب تناسب می باشند.

میزان نفوذ غشا ( $A_T$ ) و میزان نفوذ محلول ( $B_T$ ) در هر دمایی از روابط زیر به دست می آیند [۱۷]. مقادیر  $A_{r_5}$  و  $B_{r_5}$  پارامترها در دمای ۲۵ درجه سلسیوس می باشند.

$$A_T = A_{r_5} \frac{\mu_{r_5}}{\mu_T} \quad (10)$$

$$B_T = B_{r_5} \frac{D_T}{D_{r_5}} \quad (11)$$

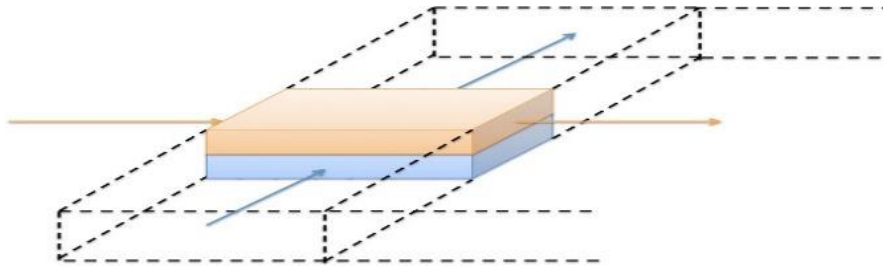
در رابطه (۱۰)،  $\mu_{r_5}$  و  $\mu_T$  به ترتیب مقادیر ویسکوزیته در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و در دمای  $T$  می باشند.

در رابطه (۱۱)،  $D_{r_5}$  و  $D_T$  به ترتیب مقادیر ضریب نفوذ در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و در دمای  $T$  می باشند.

با در نظر گرفتن خواص نفوذ آب غشا در دمای ۲۵ درجه سلسیوس برابر با  $10^{-11} \times 2/1$  متر بر ثانیه پاسکال<sup>۱</sup> و نفوذ نمک در غشا برابر با  $10^{-11} \times 0/25$  متر بر ثانیه پاسکال روابط تجربی برای نفوذ آب در غشا ( $mA_T$ ) و نفوذ

1 m/(s.pa)





شکل ۲. مدل ساده شده سیستم اسمز معکوس با غشا مارپیچ

Fig. 2. Simplified Model of Spiral Membrane Reverse Osmosis System

می‌گردد. ارتفاع کانال، سرعت تغذیه آب شور و عرض کانال باتوجه به تعداد محفظه‌ها در هر مرحله طراحی می‌گردد. سایر پارامترهای طراحی نیز مطابق مقادیر جدول یک در نظر گرفته می‌شود. مدل مربوطه بر اساس مدل مدول و موارد ذکر شده فوق انجام می‌گردد. پارامترها و شرایط طراحی بر اساس مدل سیستم متغیر می‌باشد. مقادیر مربوطه جهت مدل سازی مطابق شکل ۲ و جدول ۱ در مدل سازی محلول - نفوذ وارد می‌گردد.

### ۶- نتایج و توضیحات

نتایج برای اختلاف دماهای متفاوت بین قسمت آب تصفیه شده و آب شور به دست می‌آید. نتایج به دست آمده با کار تحقیقی رایبسون و همکاران [۹] مقایسه شده است و تطابق مناسبی را نشان می‌دهد. برای مدلسازی نفوذ از قسمت آب شور به قسمت آب تصفیه شده، اثرات دمایی فرآیند اسمز معکوس در مدلسازی محلول-نفوذ در نظر گرفته شده است. مقادیر پارامترها و ضرایب به کار رفته در مدلسازی فرآیند نفوذ در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول، ضریب نفوذ آب ممبرین بر اساس نفوذ آب تصفیه شده در نظر گرفته شده است. همچنین موارد ارتفاع، طول و عرض کانال با توجه به ممبرین به کار رفته، در نظر گرفته شده است.

در جدول ۲ نتایج مربوط به نفوذ برای غلظت ۱ g/l و سه مقدار مختلف اختلاف دما بین قسمت آب شور و آب تصفیه شده ارائه شده است. بر اساس اطلاعات جدول ۲ مشاهده می‌گردد که نتایج مدلسازی محلول-نفوذ تطابق مناسبی با داده های کار تحقیقی رایبسون [۹] دارد.

در شکل ۳، نتایج نفوذ آب برای غلظت یک گرم بر لیتر برای اختلاف دماهای متفاوت ترسیم گردیده است. براساس این شکل مشاهده می‌گردد که با افزایش اختلاف دما بین قسمت آب تصفیه شده و آب شور، نیروی

$$C_p = \frac{J_s}{J_w} \quad (17)$$

$$J_w = A_w (\Delta P_a - \Delta \pi_m) \quad (18)$$

$$J_s = B_s (\Delta P_a - \Delta \pi_m) \quad (19)$$

$$A_{\tau_5} = 2/1 \times 10^{-11} \text{ m/s.pa} \quad (20)$$

$$B_{\tau_5} = 0/25 \times 10^{-11} \text{ m/s.pa} \quad (21)$$

در فرمول های فوق  $C_p$ ، میزان شوری قسمت آب تصفیه شده،  $J_w$  و  $J_s$  به ترتیب مقادیر نفوذ آب تصفیه شده و نمک و  $A_{\tau_5}$  و  $B_{\tau_5}$  مقادیر مبنا برای نفوذ در دمای ۲۵ درجه سلسیوس می باشند.

### ۵- مدل سیستم

در کار تحقیقی حاضر، هدف مدل سازی عملکرد یک غشا از نوع مارپیچ<sup>۱</sup> در فرآیند اسمز معکوس می‌باشد. برای ساده سازی مدل سازی فرایندهای پیش تصفیه، پس تصفیه و سیستم های چند غشایی در نظر گرفته نشده اند.

باتوجه به موارد ذکر شده فوق، مدل به صورت یک یا دو کانال تخت با طول و عرض متفاوت که به صورت سری به هم متصل شده اند، ساده سازی

1 Spiral-wound Reverse Osmosis

جدول ۱. مقادیر پارامترها و ضرایب در فرآیند مدلسازی

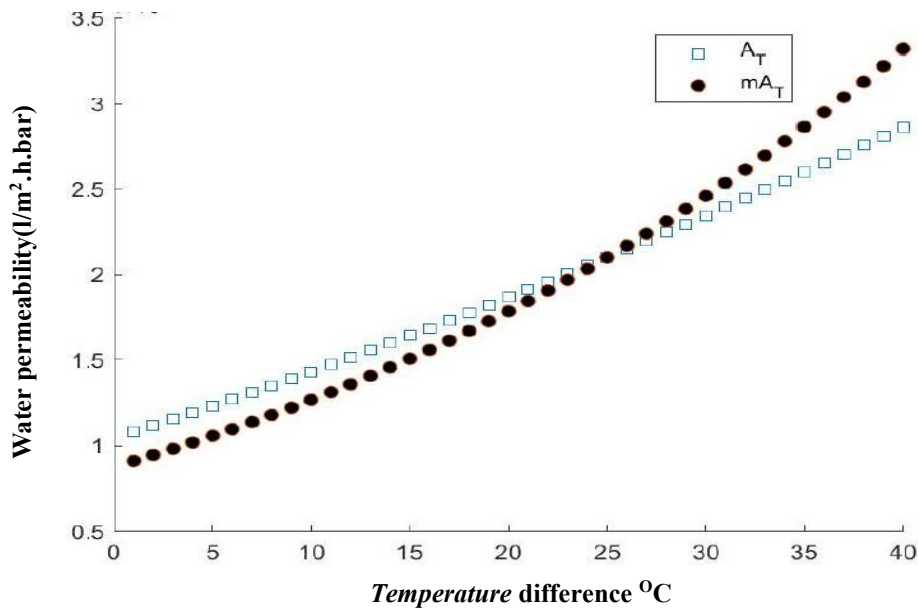
Table 1. Parameters and Coefficients on Modelling process

مقدار	واحد	ضریب
۵۸/۵	g/mol	جرم مولی
۱۷/۱۲-۵۰	Mol/L	مول نمک
$۸۵۰ \times 10^{-3}$ جرم مولی	g/l NaCl	غلظت نمک
$۲/1 \times 10^{-11}$	-	ضریب نفوذ آب ممبرین
$۰/۲۵ \times 10^{-11}$	-	ضریب نفوذ نمک ممبرین
۰/۱۷۳	cm	ارتفاع کانال
۱۴/۶	cm	طول کانال
۹/۵	cm	عرض کانال
$۸/۳۱۴۴۶۲ \times 10^{-3}$	-	ثابت جهانی گازها
$۱ \times 10^{-9}$	-	مقدار همگرایی

جدول ۲. مقایسه بین نتایج نفوذ: داده های تجربی [۹] و مدلسازی محلول-نفوذ (کار تحقیقی حاضر) (غلظت ۱ g/l و اختلاف دماهای متفاوت)

Table 2. Comparison between diffusion results: experimental data [9] and solution-diffusion modeling (present research work)

نتایج مدل سازی محلول - نفوذ (کار تحقیقی حاضر)	مقادیر تجربی	اختلاف دمای میانگین (درجه سلسیوس)
l/m <sup>2</sup> .h.bar	l/m <sup>2</sup> .h.bar	°C
۰/۸۷۴	۰/۸۹۵	۰
۰/۹	۱/۱۳۹	۱/۵
۰/۹۵۴۵	۰/۹۵۸	۲/۵
۱/۳۱۱۸	۰/۹۷۳	۱۰/۸



شکل ۳. تغییرات میزان نفوذ آب به ازای غلظت یک گرم بر لیتر قسمت آب شور برای اختلاف دماهای متفاوت

Fig. 3. Changes in the amount of water penetration per concentration of one 1 gr/lit of salt water concentration for different temperatures gradient

میزان نفوذ آب تصفیه شده و محلول نسبت به میزان نفوذ آب و محلول در دمای ۲۵ درجه سلسیوس نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که با افزایش دما، مقدار نفوذ افزایش می‌یابد.

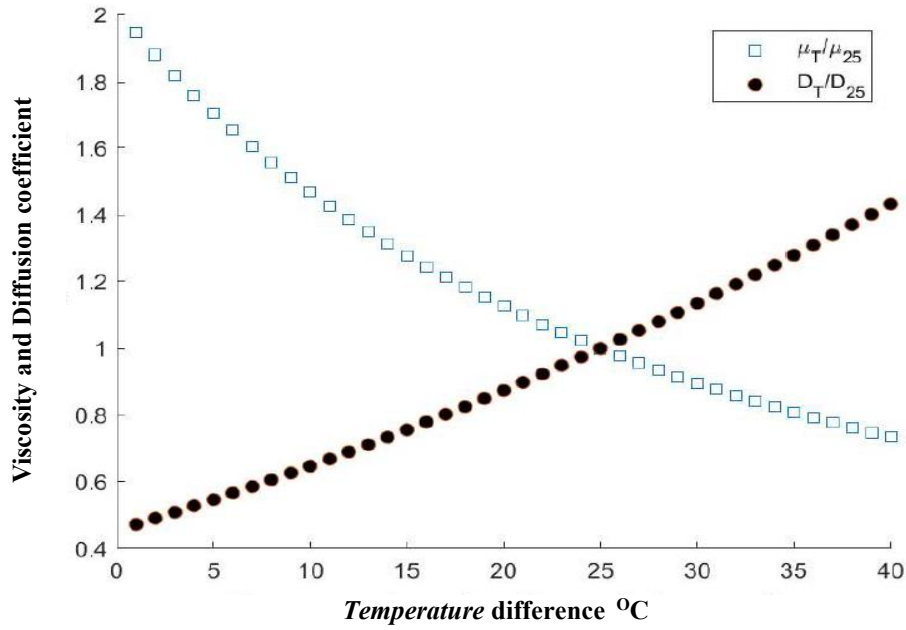
در شکل ۶ تغییرات میزان ضریب انتقال جرم و ضریب پلاریزاسیون غلظت به ازای غلظت یک گرم بر لیتر قسمت آب شور برای اختلاف دماهای متفاوت نشان داده شده است. ضرایب انتقال جرم و پلاریزاسیون غلظت نسبت به مقادیر ۲۵ درجه سلسیوس نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که با افزایش دما میزان ضریب پلاریزاسیون غلظت کاهش می‌یابد. با کاهش ضریب پلاریزاسیون غلظت میزان ضریب انتقال جرم افزایش می‌یابد. در شکل ۷، تغییرات میزان نفوذ محلول به ازای غلظت یک گرم بر لیتر قسمت آب شور برای اختلاف دماهای متفاوت نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که افزایش اختلاف دمای بین قسمت آب شور و آب تصفیه شده، تاثیر مستقیمی بر میزان نفوذ دارد.

باتوجه به روابط (۱۷) تا (۲۱) و شکل ۵، میزان شوری قسمت آب تصفیه شده برای غلظت یک گرم بر لیتر برای اختلاف دماهای متفاوت مطابق جدول ۳ به دست می‌آید:

محرك افزایش می‌یابد. با افزایش این نیروی محرک، میزان نفوذ آب افزایش می‌یابد. در شکل های ۴ تا ۷، نتایج برای بررسی اثر اختلاف دمای بین قسمت آب تصفیه شده و قسمت آب شور به ازای غلظت قسمت آب شور یک گرم بر لیتر ترسیم گردیده است. در این شکلها میزان ویسکوزیته، ضریب نفوذ، ضریب انتقال جرم، میزان Cp و میزان نفوذ نمک ترسیم گردیده است. با بررسی این شکلها مشاهده می‌گردد که با افزایش اختلاف دما بین قسمت آب تصفیه شده و آب شور، نیروی محرک افزایش می‌یابد. با افزایش این نیروی محرک، میزان نفوذ آب افزایش می‌یابد.

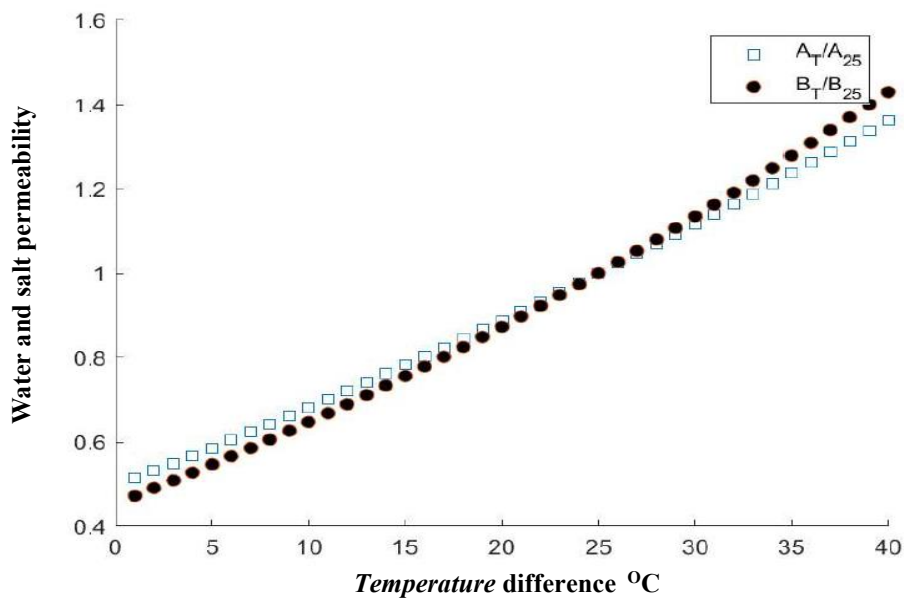
در شکل ۴، تغییرات میزان ویسکوزیته و ضریب نفوذ به ازای غلظت یک گرم بر لیتر قسمت آب شور برای اختلاف دماهای متفاوت نشان داده شده است. در این نمودار مقادیر ویسکوزیته و ضریب نفوذ به صورت بدون بعد (تقسیم بر مقادیر مبنا در دمای ۲۵ درجه سلسیوس) ترسیم گردیده اند. مشاهده می‌گردد که با افزایش دما میزان ویسکوزیته کاهش می‌یابد. با کاهش میزان ویسکوزیته، مقدار نفوذ افزایش می‌یابد.

در شکل ۵، تغییرات میزان نفوذ آب و محلول به ازای غلظت یک گرم بر لیتر قسمت آب شور برای اختلاف دماهای متفاوت نشان داده شده است.



شکل ۴. تغییرات میزان ویسکوزیته و ضریب نفوذ به ازای غلظت یک گرم بر لیتر قسمت آب شور برای اختلاف دماهای متفاوت

Fig. 4. Changes in the amount of viscosity and diffusivity coefficient per concentration of 1 gr/lit of salt water concentration for different temperatures gradient



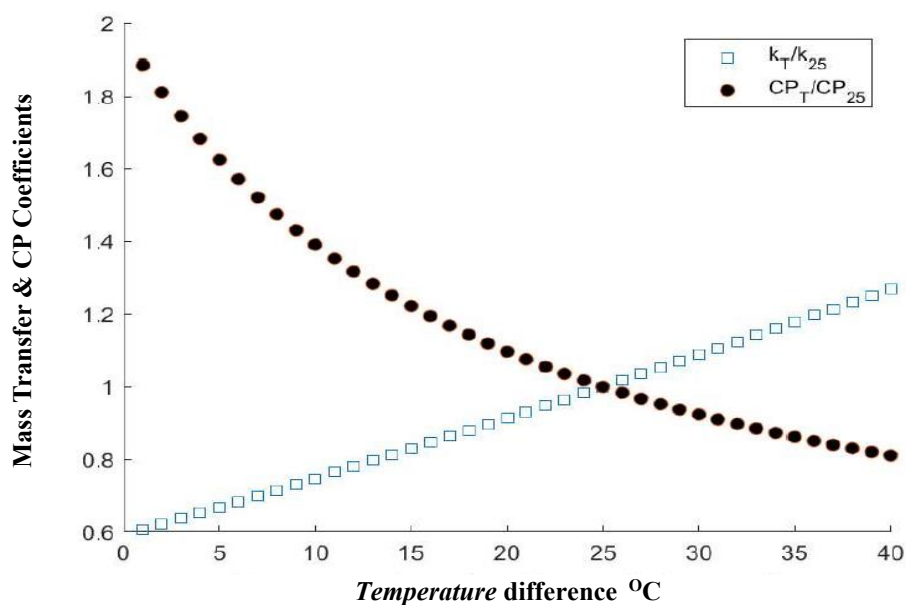
شکل ۵. تغییرات میزان نفوذ آب و محلول به ازای غلظت یک گرم بر لیتر قسمت آب شور برای اختلاف دماهای متفاوت

Fig. 5. Changes in the amount of water and salt permeability coefficient per concentration of 1 gr/lit of salt water concentration for different temperatures gradient

جدول ۳. میزان شوری قسمت آب تصفیه شده برای غلظت یک گرم بر لیتر برای اختلاف دماهای متفاوت

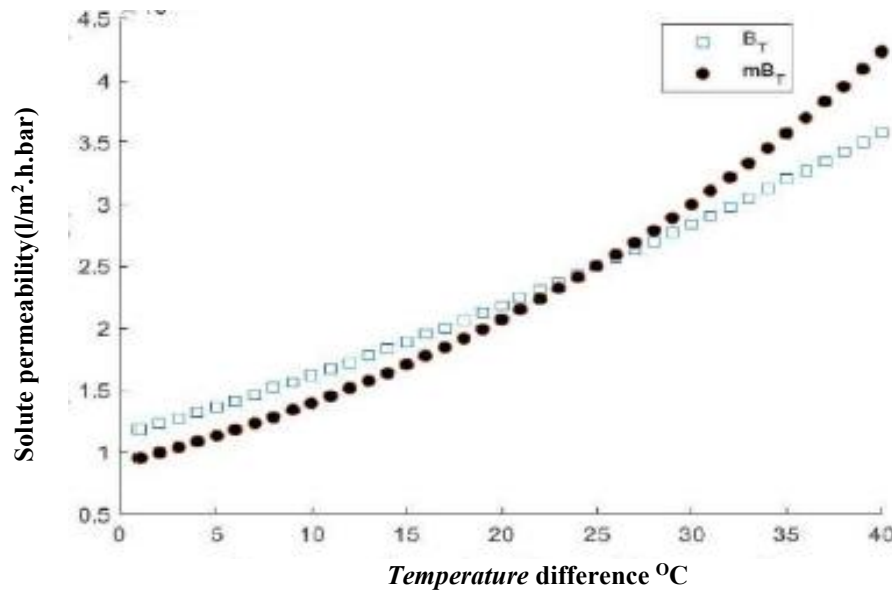
Table 3. The salinity of the treated water for a concentration of one gram per liter for different temperatures

میزان شوری قسمت آب تصفیه شده gr/lit	اختلاف دمای میانگین (درجه سلسیوس) °C
۰/۱۰۵	۱/۵
۰/۱۰۴	۲/۵
۰/۰۹۷	۱۰/۸



شکل ۶. تغییرات میزان ضریب انتقال جرم و ضریب پلاریزاسیون غلظت به ازای غلظت یک گرم بر لیتر قسمت آب شور برای اختلاف دماهای متفاوت

Fig. 6. Changes in the amount of Mass Transfer & CP Coefficient per concentration of 1 gr/ lit of salt water concentration for different temperatures gradient



شکل ۷. تغییرات میزان نفوذ محلول به ازای غلظت یک گرم بر لیتر قسمت آب شور برای اختلاف دماهای متفاوت

Fig. 7. Changes in the amount of Solute permeability per concentration of 1 gr/lit of salt water concentration for different temperatures gradient

غلظت به صورت بدون بعد؛ تقسیم بر مقدار مبنا در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، به ازای غلظت ۰/۳۵ گرم بر لیتر قسمت آب شور برای اختلاف دماهای متفاوت نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که با افزایش دما میزان ضریب پلاریزاسیون غلظت کاهش می‌یابد. با کاهش ضریب پلاریزاسیون غلظت، میزان ضریب انتقال جرم افزایش می‌یابد. در شکل ۱۲، تغییرات ضریب نفوذ محلول به ازای غلظت ۰/۳۵ گرم بر لیتر قسمت آب شور برای اختلاف دماهای متفاوت نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که افزایش اختلاف دمای بین قسمت آب شور و آب تصفیه شده، تأثیر مستقیمی بر ضریب نفوذ دارد.

باتوجه به روابط (۱۷) تا (۲۱) و شکل ۱۰، میزان شوری قسمت آب تصفیه شده برای غلظت ۰/۳۵ گرم بر لیتر برای اختلاف دماهای متفاوت مطابق جدول ۴ به دست می‌آید.

با بررسی نمودارهای مربوط به تغییرات پارامترهای مختلف در مطالعه اثر گرادیان دمایی بر فرایند اسمز معکوس، درمی‌یابیم که افزایش غلظت و اختلاف دمای بین قسمت آب شور و آب تصفیه شده تأثیر مستقیمی بر

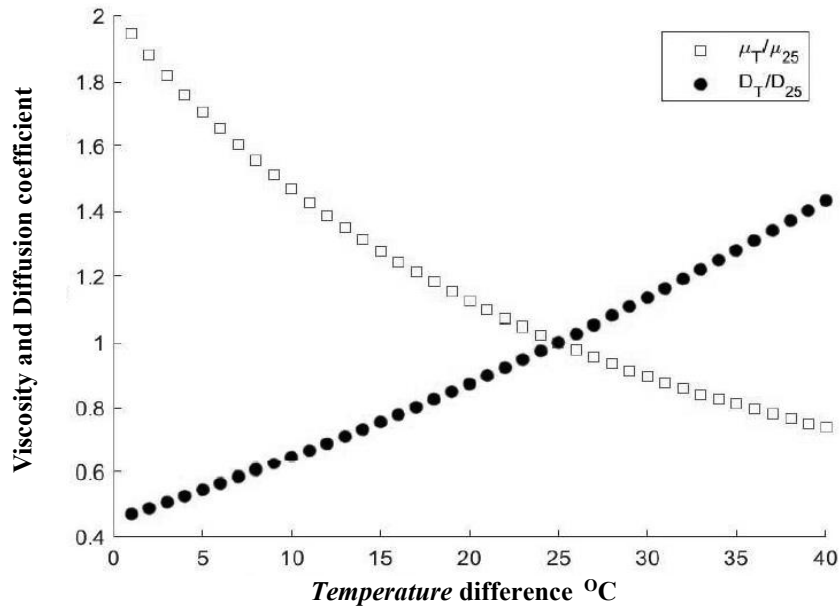
بر اساس شکل ۷ در غلظت ۰/۳۵ گرم بر لیتر برای اختلاف دماهای ۱/۵ و ۹/۳ درجه سلسیوس مقادیر نفوذ آب تصفیه شده به ترتیب ۰/۹۱۷ و ۱/۱۶۷ بر حسب  $h.bar.l/m^2$  به دست می‌آید.

در شکل ۸، تغییرات میزان ویسکوزیته و ضریب نفوذ آب به صورت بدون بعد؛ تقسیم بر مقدار مبنا در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، برای غلظت ۰/۳۵ گرم بر لیتر برای اختلاف دماهای متفاوت ترسیم گردیده است. براساس این شکل مشاهده می‌گردد که با افزایش اختلاف دما بین قسمت آب تصفیه شده و آب شور، نیروی محرک افزایش می‌یابد. با افزایش این نیروی محرک، ضریب نفوذ آب افزایش می‌یابد.

در شکل ۹، تغییرات میزان نفوذ آب به ازای غلظت ۰/۳۵ گرم بر لیتر قسمت آب شور برای اختلاف دماهای متفاوت نشان داده شده است. در شکل ۱۰، میزان نفوذ آب و محلول نسبت به میزان نفوذ آب و محلول در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که با افزایش دما، مقدار نفوذ افزایش می‌یابد.

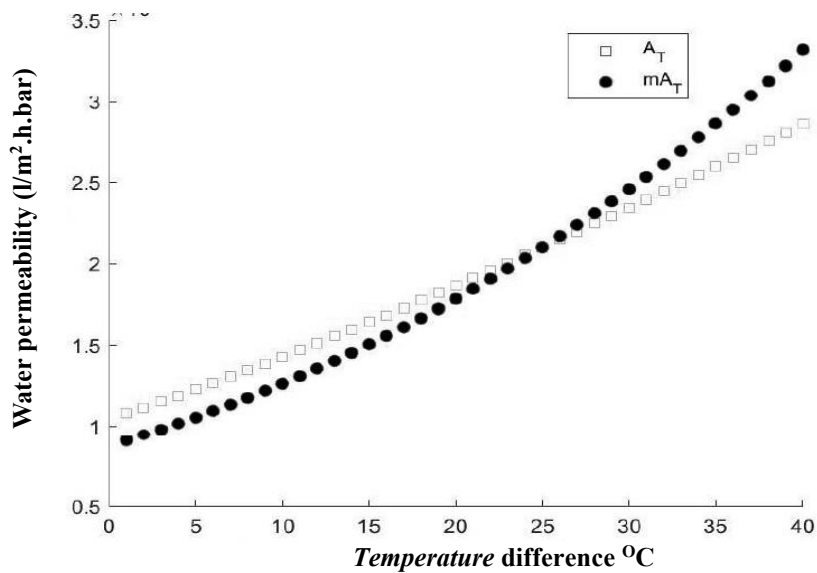
در شکل ۱۱، تغییرات میزان ضریب انتقال جرم و ضریب پلاریزاسیون





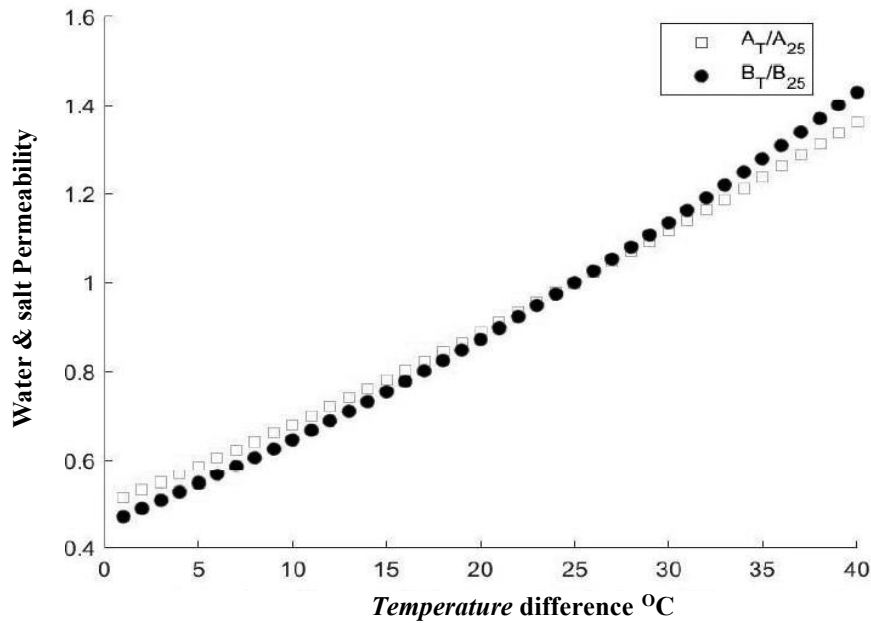
شکل ۸. تغییرات میزان ویسکوزیته و ضریب نفوذ به ازای غلظت ۰/۳۵ گرم بر لیتر قسمت آب شور برای اختلاف دماهای متفاوت

Fig. 8. Changes in the amount of viscosity and diffusion coefficient per concentration of 0.35 gr/lit of salt water concentration for different temperatures gradient



شکل ۹. تغییرات میزان نفوذ آب به ازای غلظت ۰/۳۵ گرم بر لیتر قسمت آب شور برای اختلاف دماهای متفاوت

Fig. 9. Changes in the amount of water permeability per concentration of 0.35 gr/lit of salt water concentration for different temperatures gradient



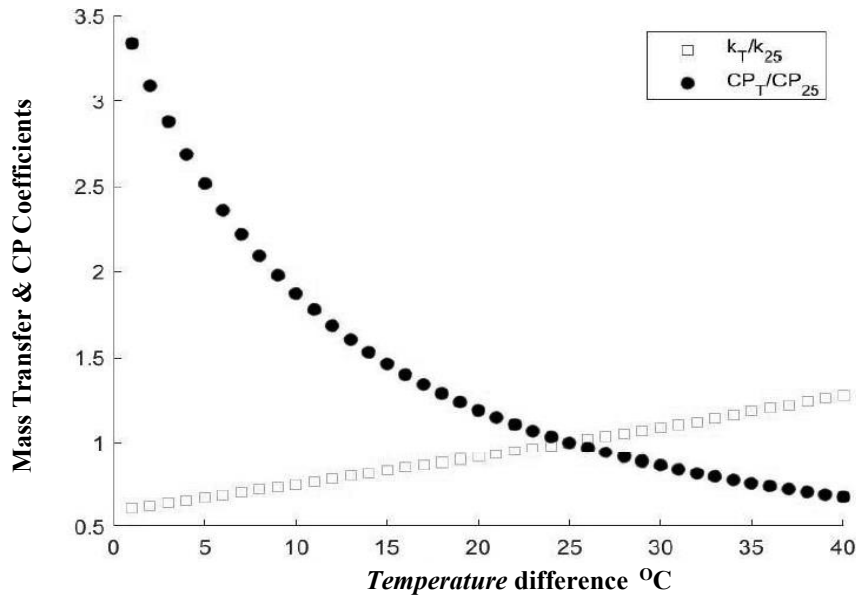
شکل ۱۰. تغییرات میزان نفوذ آب و محلول به ازای غلظت ۰/۳۵ گرم بر لیتر قسمت آب شور برای اختلاف دماهای متفاوت

Fig. 10. Changes in the amount of water and salt permeability per concentration of 0.35 gr/lit of salt water concentration for different temperatures gradient

جدول ۴. میزان شوری قسمت آب تصفیه شده برای غلظت ۰/۳۵ گرم بر لیتر برای اختلاف دماهای متفاوت

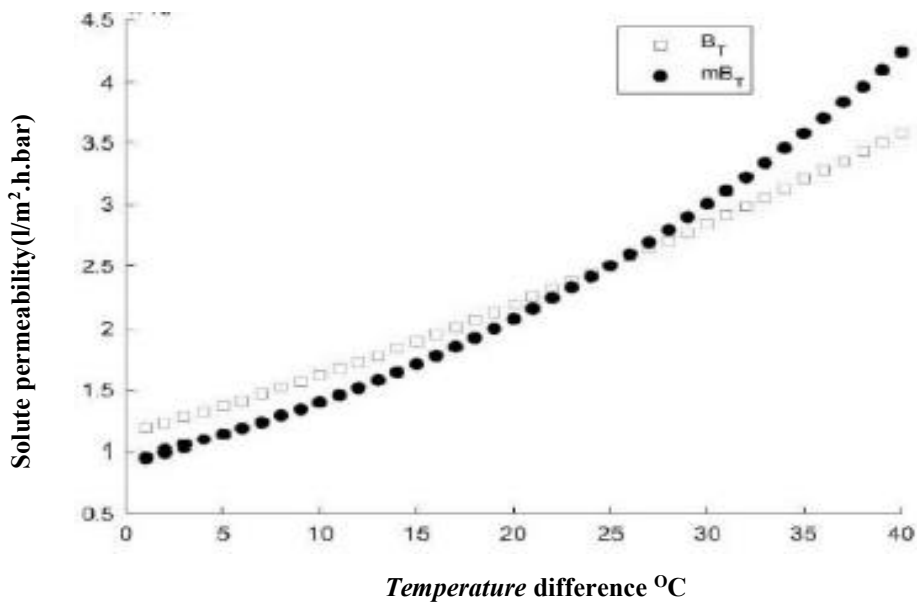
Table 4. The salinity of the treated water for a concentration of 0.35 gr/lit for different temperatures

میزان شوری قسمت آب تصفیه شده گرم بر لیتر gr/lit	اختلاف دمای میانگین (درجه سلسیوس) °C
۰/۱۰۵	۱/۵
۰/۱۰۴	۹/۳



شکل ۱۱. تغییرات میزان ضریب انتقال جرم و ضریب پلاریزاسیون غلظت به ازای غلظت  $+/۳۵$  گرم بر لیتر قسمت آب شور برای اختلاف دماهای متفاوت

Fig. 11. Changes in the amount of Mass Transfer and CP Coefficients per concentration of 0.35 gr/lit of salt water concentration for different temperatures gradient



شکل ۱۲. تغییرات میزان نفوذ محلول به ازای غلظت  $+/۳۵$  گرم بر لیتر قسمت آب شور برای اختلاف دماهای متفاوت

Fig. 12. Changes in the amount of Mass Solute permeability per concentration of 0.35 gr/lit of salt water concentration for different temperatures gradient

باشند. میزان نفوذ آب تصفیه شده با افزایش اختلاف دما از صفر تا ۴۰ درجه سلسیوس تا حدود ۳/۵ برابر افزایش می‌یابد. تغییرات ضریب پلاریزاسیون غلظت در غلظت ۰/۳۵ گرم بر لیتر از غلظت ۱ گرم بر لیتر کمتر می‌باشد. تغییرات ضریب پلاریزاسیون غلظت و ضریب انتقال جرم عکس یکدیگر می‌باشند. به ازای غلظت ۱ گرم بر لیتر با تغییر اختلاف دما از صفر تا ۴۰ درجه سلسیوس، ضریب پلاریزاسیون غلظت از ۱/۹ تا ۰/۸ و ضریب انتقال جرم از ۰/۶ تا ۱/۳۲ تغییر می‌یابند. همچنین به ازای غلظت ۰/۳۵ گرم بر لیتر با تغییر اختلاف دما از صفر تا ۴۰ درجه سلسیوس، ضریب پلاریزاسیون غلظت از ۳/۵ تا ۰/۷۲ و ضریب انتقال جرم از ۰/۶ تا ۱/۲۹ تغییر می‌یابند. ضریب پلاریزاسیون غلظت بیان کننده میزان گرفتگی غشا به واسطه تجمع یونها و ناخالصی‌های موجود در آب می‌باشد. بنابراین با افزایش دما میزان نفوذ بیشتر و سبب کاهش ضریب پلاریزاسیون می‌گردد.

قابل ذکر است که تحقیقات بیشتری در خصوص فرایند اسمز معکوس بر اساس گرادیان دما، در خصوص هزینه تولید آب و میزان مصرف انرژی در مقایسه با روش‌های رایج می‌بایستی انجام گردد. روش‌های گرمایی (نظیر گرمایش به وسیله انرژی الکتریسته و انرژی خورشیدی و...) برای ایجاد اختلاف دما در کارهای تحقیقی آینده قابل انجام می‌باشد. ممبرین‌های جدید متشکل از مواد نانو برای تحقیق این فرایند قابل بررسی می‌باشد.

## ۸- فهرست علائم

### علائم انگلیسی

a	ضریب فعالیت، بدون واحد
A	میزان نفوذ آب در ممبرین، m/s.pa
B	میزان نفوذ محلول در ممبرین، m/s.pa
C	غلظت مولی، mol/l
C <sub>b</sub>	غلظت نمک، g/l NaCl
C <sub>f</sub>	غلظت ورودی در ممبرین، g/l
C <sub>m</sub>	غلظت اصلاح شده در ورودی ممبرین، g/l
CP	ضریب پلاریزاسیون، بدون واحد
D	ضریب نفوذ، m <sup>2</sup> /s
DELTA	مقدار همگرایی، بدون واحد
H	ارتفاع کانال، cm
J	میزان نفوذ، lb/m <sup>2</sup> .h.bar و m/s.pa
K	ضریب دمایی، بدون واحد
L	طول کانال، cm
Mb	تعداد مول نمک، بدون واحد

افزایش میزان نفوذ آب تصفیه شده، ضریب نفوذ، ضریب انتقال جرم دارد؛ بنابراین درمی‌یابیم دو عامل افزایش غلظت قسمت آب‌شور و گرادیان دمایی به‌عنوان نیروی محرک در انجام فرایند اسمز معکوس دمایی تأثیر مستقیمی بر افزایش پارامترهای مرتبط بانفوذ و انتقال جرم دارد. در هر غلظت مشخص، افزایش اختلاف دما بین قسمت آب تصفیه شده و آب‌شور سبب افزایش پارامترهای مرتبط بانفوذ می‌گردد. در اثر افزایش میزان نفوذ آب تصفیه شده، میزان شوری در قسمت آب‌شور افزایش و میزان آب تصفیه شده در قسمت آب تصفیه شده افزایش می‌یابد. ساخت و راه‌اندازی دستگاه در مقیاس صنعتی چالش‌های خاص خود را دارد. ایجاد اختلاف دمایی در دو طرف غشا در مقیاس صنعتی کار آسانی نیست، به‌ویژه که در مقیاس صنعتی از تعداد ممبرین‌های بیشتری برای شیرین‌سازی آب استفاده می‌شود. همچنین حرارتی که از طریق آب خروجی از سیستم خارج می‌گردد، سبب ایجاد اتلاف حرارتی در سیستم می‌گردد. بنابراین صنعتی‌سازی فرایند مربوطه، نیاز به انجام کار تحقیقی بیشتری دارد.

## ۷- جمع بندی

در این کار تحقیقی، فرایند اسمز معکوس تحت اثر گرادیان دما بررسی شده است. در غیاب نیروی فشار، به‌عنوان نیروی محرک، اثر دو عامل غلظت قسمت آب‌شور و اختلاف دمایی بین قسمت آب تصفیه شده و آب‌شور بر فرایند اسمز معکوس بررسی شده است. برای بررسی این فرایند مدل محلول - نفوذ به کار برده شده است. نتایج این کار تحقیقی نشان می‌دهد که مدل محلول - نفوذ تطابق مناسبی برای فرایند اسمز معکوس تحت اثر گرادیان دما دارد. مقایسه بین نتایج مدل‌سازی و داده‌های تجربی تطابق مناسبی بین نتایج را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن این نتایج، نتیجه گرفته می‌شود که افزایش اختلاف دما و میزان شوری، اثر مستقیمی بر میزان نفوذ دارد. مشاهده می‌گردد که در غیاب فشار به‌عنوان نیروی محرک، میزان نفوذ در میزان شوری مشخص با افزایش اختلاف دمایی بین قسمت آب تصفیه شده و قسمت آب‌شور، افزایش می‌یابد.

نتایج مدل‌سازی برای غلظت‌های یک و ۰/۳۵ گرم بر لیتر و اختلاف دمایی بین ۰ تا ۴۰ درجه سلسیوس بیان گردیده است. میزان نفوذ آب تصفیه شده و پارامترهای موثر بر آن در نمودارهای مختلف بیان گردیده است. بر اساس نتایج مدل‌سازی میزان نفوذ آب تصفیه شده برای غلظت ۱ گرم بر لیتر از ۰/۸۷۴ تا ۱/۳۱۱۸ بر حسب h.bar.l/m<sup>۲</sup> تغییر می‌کند. همچنین مشاهده می‌گردد که تغییرات ضرایب نفوذ و ویسکوزیته عکس یکدیگر می‌

Springer Dordrecht, 1996.

- [6] K.P. Lee, et al., A review of reverse osmosis membrane materials for desalination—Development to date and future potential, *Journal of Membrane Science*, 370 (2011) 1-22.
- [7] N. Hilal, G.J. Kim, C. Somerfield, Boron removal from saline water: A comprehensive review, *Desalination*, 273 (2011) 23-35.
- [8] J.H. Redondo, A new concept for two-pass SWRO at low O&M cost using the new high-flow FILMTEC SW30-380, *Desalination*, 138 (2001) 231-236.
- [9] J. Robinson, J. Meehan, A. Taqi, E. Binner, B. Tokay, Water desalination using a temperature gradient, *Desalination*, 464 (2019) 1-7.
- [10] G.F.C. Rogers, Y.R. Mayhew, *Thermodynamic and Transport Properties of Fluids*, Blackwell, Oxford., 1995.
- [11] O.R. Al-Jayyousi, Greywater reuse, towards sustainable water management, *Desalination*, 156(1-3) (2003) 181-192.
- [12] R.W. Baker, *Membrane Technology and Applications*, John Wiley & Sons Ltd., 2004.
- [13] P. Taylor, H. Mehdizadeh, J.M. Dickson, Modeling of temperature effects on the performance of reverse osmosis membranes, *Chemical Engineering Communication*, 103 (1991) 99-117.
- [14] K.P. Lee, T.C. Arnot, D. Mattia, A review of reverse osmosis membrane materials for desalination Development to date and future potential, *Journal of Membrane Science*, 370(1-2)(2011) 1-22.
- [15] S. El-Manharawy, A. Hafez, Water type and guidelines for RO system design, *Desalination*, 139(1-3)(2001) 97-113.
- [16] M.H. Sharqawy, S.M. Zubair, The thermophysical properties of seawater: A review of existing correlations and data, *Desalination and Water Treatment*, 16 (2010) 354-380.
- [17] X. Jin, A. Jawor, S. Kim, E.M.V. Hoek, Effects of feed water temperature on separation performance and organic fouling of brackish water RO membranes, *Desalination*, 239(1-3) (2009) 346–359.

جرم مولی،	g/mol	MW
فشار،	pa	P
ثابت جهانی گازها،	J /K.mol	R
آنتروپی،	J /K	S
درجه سلسیوس،	°C	T
حجم مولی،	l/mol	v
عرض کانال،	cm	W
میزان فرضی خروج نمک،	g/lit	X

#### علائم یونانی

ضریب فعالیت	$\gamma$
پتانسیل شیمیایی	$\eta$
ویسکوزیته	$\mu$
فشار اسمزی	$\pi$

#### زیرنویس

در دمای ۲۵ درجه سلسیوس	25
اعمال شده	a
جز در یک محلول	i
سیال	f
نمک	S
آب شور	SW
انتقال آب شور	ST
در هر دمایی	T
انتقال آب	WT

#### منابع

- [1] N. Lior, *Advances in water desalination*, A John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [2] A. Alkaiasi, R. Mossad, A. Sharifian-Barforoush, A Review of the Water Desalination Systems Integrated with Renewable Energy, *Energy Procedia*, 110(1876-6102) (2017) 268-274.
- [3] L.F. Greenlee, D.F. Lawler, B.D. Freeman, B. Marrot, P. Moulin, Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges, *Water Research*, 43(9) (2009) 2317-2348.
- [4] *Desalination of Seawater (M61): AWWA Manual of Water Supply Practice*, American Water Works Association, 201.
- [5] M. Mulder, *Basic Principles of Membrane Technology*,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. Zhyaney Bakhsh, E. Abedini, S. Niazi, Y. Bakhshan, P. Adibi, Modeling of thermal gradient effect on reverse osmosis process, Amirkabir J. Mech Eng., 56(7) (2024) 911-930.*

DOI: [10.22060/mej.2024.22950.7699](https://doi.org/10.22060/mej.2024.22950.7699)

