

Modeling of thermal gradient effect on reverse osmosis process

Mohsen Zhyianey Bakhsh, Ehsan Abedini*, Saeed Niazi, Pouyan Adibi, Younes Bakhshan

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

ABSTRACT

In the present study modeling and formulation of thermal gradient effect on reverse osmosis process for evaluation treated water penetration and water production are studied. modeling is done by MATLAB using Solution-Diffusion model. At present work the effect of two different parameters (temperature difference gradient and salt concentration) on different parameters is studied. Studying on important parameters for temperature driven reverse osmosis, shows the direct effect of temperature difference between permeate-water part and saline water part on different parameters. On temperature driven reverse osmosis, temperature difference between permeate-water part and saline-water part acts as a driving force. penetration rate at each salt concentration rises by increasing temperature difference between permeate-water part and saline-water part. The variations of different parameters versus temperature difference 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 permeate-water part and saline-water part, treated water penetrations are obtained 0.9, 0.9545 and 1.3118 l/m².h.bar respectively. Also, for 0.35 gr/lit salt concentration and 1.5 and 9.3 °C temperature difference between permeate-water part and saline-water part, treated water penetrations are obtained 0.917 and 1.167 l/m².h.bar respectively.

KEYWORDS

Modelling, 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

* Corresponding Author, Email: abedini@hormozgan.ac.ir

sweetening process. In this method, purified water is produced from sea water or other polluted water sources

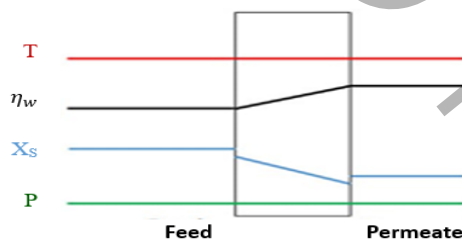
Desalination methods are divided based on two important factors. These two factors are energy sources and the type of desalinating process. Energy sources include thermal, mechanical, electrical and chemical energy.

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.

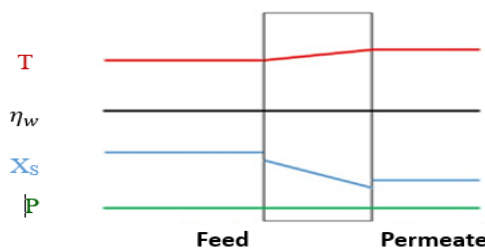
In the temperature reverse osmosis process, the temperature difference between the purified water and the salt water is used. By creating a temperature difference, a driving force is created.

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.

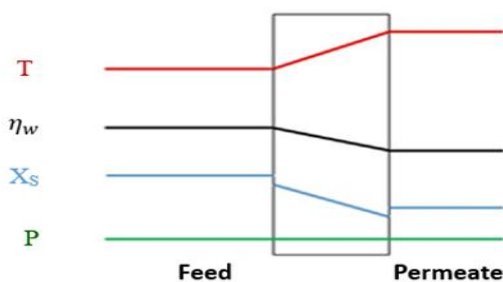
The osmotic process depends on three factors: temperature, pressure and chemical potential. In Figure 1, it shows the three states that occur in the osmotic process.



(a)



(b)



(c)

Figure 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

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 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 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.

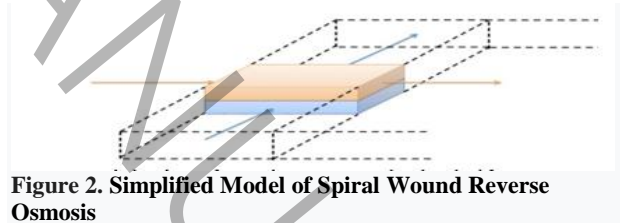


Figure 2. Simplified Model of Spiral Wound Reverse Osmosis

3. Results and Discussion

In Figure 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.

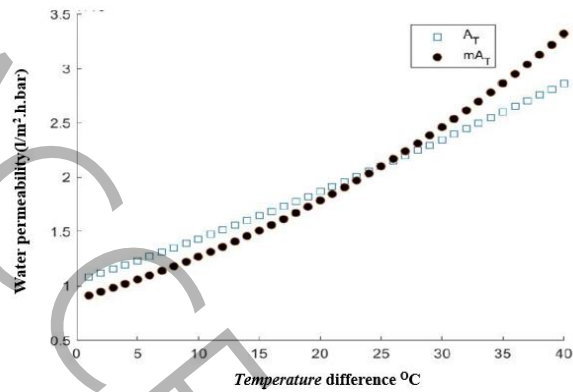


Figure 3. Changes in the amount of water penetration per concentration of one 1 gr/lit of salt water concentration for different temperatures gradient

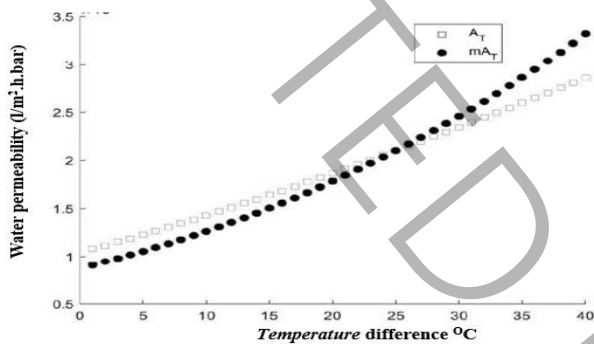


Figure 3. Changes in the amount of water penetration per concentration of one 0.35 gr/lit of salt water concentration for different temperatures gradient

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 osmosis process. To

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

The results of this research show that the solution-permeation model has 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 on the reverse osmosis process. To investigate this process, solution-permeation model has been used.

The results of this research show that the solution-permeation model has 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.

5. References

- [1] N. Lior, Advances in water desalination, A John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [2] A. Alkaisi, 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.

مدل‌سازی اثر گرادیان دمایی بر فرایند اسمز معکوس

محسن ژبانی بخش^۱، احسان عابدینی^{۲*}، سعید نیازی^۳، یونس بخشان^۴، پویان ادیبی^۵

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

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: abedini@hormozgan.ac.ir

چکیده

در کار حاضر، مدل‌سازی و فرمولاسیون اثر گرادیان دمایی بر فرایند اسمز معکوس برای تعیین میزان نفوذ آب تصفیه شده و تولید آب تحت‌تأثیر دو عامل اختلاف دما و میزان غلظت نمک بررسی می‌گردد. مدل‌سازی توسط برنامه‌نویسی با متلب با استفاده از مدل محلول - نفوذ انجام می‌گردد. بررسی پارامترهای مهم در اسمز معکوس دمایی، بیانگر تأثیر مستقیم اختلاف دمای بین قسمت آب تصفیه شده و آب شور بر پارامترها مربوطه می‌باشد. در هر غلظت نمک افزایش اختلاف دمای بین قسمت آب تصفیه شده و آب شور، به‌عنوان نیروی محرک، سبب افزایش نفوذ آب تصفیه شده می‌گردد. 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 غلظت‌های 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 می‌آیند.

کلمات کلیدی

مدل‌سازی، اسمز معکوس، اختلاف دما، برنامه متلب، مدل محلول - نفوذ

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 شیرین‌سازی نیاز به انرژی دارد. باتوجه به تفاوت هزینه‌های انرژی، کشورهای مختلف از روش‌های مختلف شیرین‌سازی استفاده می‌نمایند [۲]. در حال حاضر، اسمز معکوس یکی از روش‌های مهم جهت انجام فرایند شیرین‌سازی می‌باشد. در این روش آب تصفیه شده از آب دریا یا سایر منابع آب آلوده تولید می‌گردد [۳].

۲- سیستم‌های شیرین‌سازی

۲-۱- تقسیم بندی روش‌های شیرین‌سازی آب

روش‌های شیرین‌سازی بر اساس دو عامل مهم تقسیم‌بندی می‌گردند. این دو عامل منابع انرژی و نوع فرایند شیرین‌سازی می‌باشد. منابع انرژی شامل انرژی‌های حرارتی، مکانیکی، الکتریکی و شیمیایی می‌باشد. همچنین فرایندهای شیرین‌سازی شامل تبخیر - چگالش، فیلتراسیون، و روش‌های کریستالیزاسیون می‌باشند [۲]. روش اسمز معکوس ۳/۵ تا ۵ کیلووات ساعت به ازای هر مترمکعب تولید آب در دمای محیط انرژی مصرف می‌نماید [۴].

۲-۲- شیرین‌سازی به روش اسمز معکوس: مفاهیم و ملاحظات

اسمز فرایندی می‌باشد که در آن آب تصفیه شده از محلول ناخالص پس از عبور از غشا جداسازی می‌گردد [۵]. فرایند اسمزی وابسته به سه عامل فشار، دما و غلظت می‌باشد. (شکل ۱). با ایجاد اختلاف فشار حدود ۵۵ تا ۸۵ بار، آب تصفیه شده از قسمت آب تغذیه به قسمت آب تصفیه شده نفوذ می‌کند. این فرایند به عنوان اسمز معکوس شناخته می‌گردد [۶]. اسمز معکوس یکی از رایج‌ترین روش‌های شیرین‌سازی می‌باشد که جهت فرایند تصفیه آب جهت مصارف صنعتی، آشامیدنی، کشاورزی و... به کار برده می‌شود [۷]. با پیشرفت در تولید مواد غشاهای، هزینه شیرین‌سازی آب کاهش می‌یابد [۸].

۳- اسمز معکوس دمایی

۳-۱- مفاهیم و تعاریف

در فرایند اسمز معکوس دمایی، اختلاف دمای بین قسمت آب تصفیه شده و آب شور به کار برده می‌شود. با ایجاد اختلاف دما، نیروی محرک ایجاد می‌گردد. این نیروی محرک بر فشار اسمزی غلبه می‌نماید. در نتیجه آب تصفیه شده از قسمت آب شور به قسمت آب تصفیه شده نفوذ می‌نماید [۹].

۳-۲- فرضیات

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

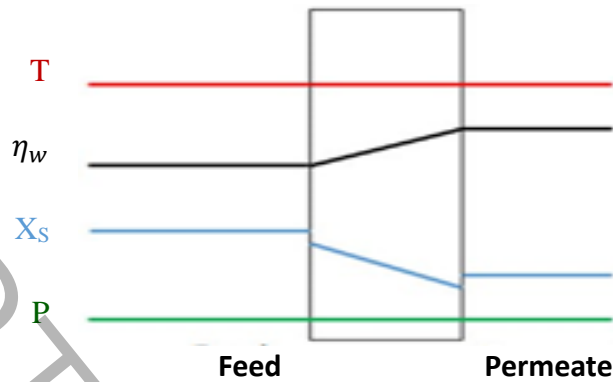
فرایند اسمزی وابسته به سه عامل دما، فشار و پتانسیل شیمیایی می‌باشد. در شکل ۱، سه حالت که در فرایند اسمزی به وقوع می‌پیوندد را نشان می‌دهد. در این شکل، سامانه‌های غشایی بر اساس محرک گرادیان دمایی در برابر سامانه‌ها بر اساس محرک اختلاف فشار مقایسه گردیده است.

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 می‌گردد. در شرایطی که قسمت آب تصفیه شده نسبت به قسمت آب شور دارای دمای بالاتری باشد، پتانسیل شیمیایی برای جریان آب کاهش می‌یابد. این اثر سبب کاهش میزان نفوذ آب می‌گردد.

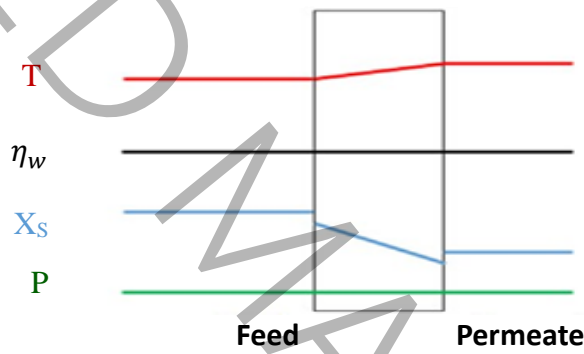
حالت اسمز متعادل در دمای آستانه به وقوع می‌پیوندد. در این حالت پتانسیل شیمیایی آب در دو سمت غشا یکسان می‌باشد. (شکل

(ب-۱)

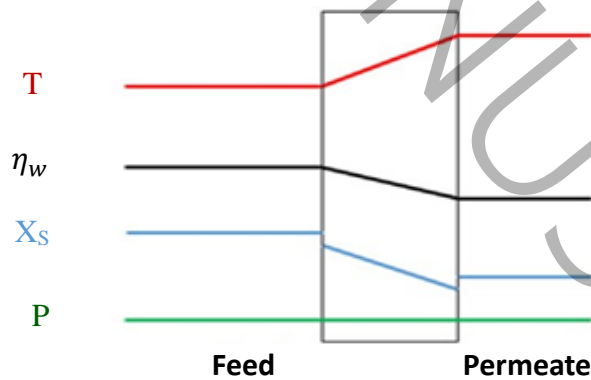
در حالی که دما در قسمت آب تصفیه شده به اندازه‌ای افزایش یابد که بر گرادیان ناشی از پتانسیل شیمیایی غلبه نماید، سبب ایجاد جریان معکوس می‌گردد. در این حالت اسمز معکوس به وقوع می‌پیوندد. (شکل ۱- پ)



(الف)



(ب)



(پ)

سامانه‌های غشایی بر اساس محرک گرادیان دمایی در برابر سامانه‌ها بر اساس محرک اختلاف فشار [۹]

شکل ۱: 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

۳-۳- ملاحظات شرایط اختلاف دمایی

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

۴- مدل سازی

برای مقایسه نتایج آزمایش‌ها و مدل‌سازی، می‌بایستی مدل‌سازی مناسب با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر سیستم انجام گردد. در این کار تحقیقی مدل‌سازی فرایند اسمز معکوس دمایی ارائه می‌گردد. مدل‌هایی که عملکرد غشاهای اسمز معکوس را بیان می‌نمایند، برای طراحی فرایندهای اسمز معکوس بسیار مهم می‌باشند. مدل‌های مکانیکی و ریاضی متعددی جهت مدل‌سازی فرایند اسمز معکوس وجود دارند. این مدل‌ها در سه دسته زیر تقسیم‌بندی می‌گردند:

-مدل‌های ترمودینامیکی برگشت‌ناپذیر^۱ (نظیر مدل‌های کدم - کاتچالسکی^۲ و اسپینگلر کدم^۳)

-مدل‌های غیرمتخلخل یا همگن^۴ (نظیر مدل‌های محلول - نفوذ)

-مدل‌های مبتنی بر ابعاد منفذ^۵ (نظیر مدل منافذ ریز، مدل جذب تدریجی جریان مویرگی، مدل جریان منفذ نیروی سطحی)

مدل‌های ترمودینامیکی برگشت‌ناپذیر، فرایند انتقال مایع در غشا اسمز معکوس را شرح می‌دهند. عدم بیان مکانیسم فرایند انتقال از معایب این مدل‌ها می‌باشد. مدل‌های همگن تنها از دو یا سه پارامتر جهت مدل‌سازی سیستم‌های اسمز معکوس استفاده می‌نمایند؛ بنابراین این مدل‌ها جهت مدل‌سازی طیف وسیعی از سیستم‌های غشایی اسمز معکوس کاربرد دارند. مدل‌های متخلخل پارامترهایی نظیر اندازه منفذ، تداخل بین محلول و ممبرین و مؤلفه توزیع محلول را بیان می‌نمایند. کلیه مدل‌های ترمودینامیک برگشت‌ناپذیر و مدل‌های متخلخل جهت مدل‌سازی فرایند اسمز معکوس دستاوردهایی داشته‌اند. مدل‌های همگن و مدل‌های متخلخل تفاوت‌های اساسی در مفروضات دارند که هنوز قابل‌بحث می‌باشند [۱۱].

مدل محلول - نفوذ^۶ به صورت گسترده جهت مدل‌سازی فرایند انتقال جرم در سیستم‌های اسمز معکوس، دیالیز، نفوذ گاز و تبخیر به کار برده می‌شود. در مدل محلول - نفوذ، نفوذ در نظر گرفته می‌شود. بر اساس مدل محلول - نفوذ، شار جز J_i ، متناسب با تغییرات

پتانسیل شیمیایی جز $\frac{d\eta_i}{dx}$ به صورت زیر بیان می‌گردد [۱۲]:

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

در رابطه (۱)، 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} تا 10^{-6} متر مربع بر ثانیه می‌باشد. پتانسیل شیمیایی جز i به صورت زیر بیان می‌گردد [۱۲]:

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

¹ Irreversible thermodynamics models

² Kedem-Katchalsky

³ Spiegler-Kedem

⁴ Nonporous or homogeneous models

⁵ Pore models

⁶ Solution-diffusion Model

در معادله فوق R ثابت جهانی گازها، T دما، γ_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 می باشد. در مدل محلول- نفوذ فشار در طول ممبرین ثابت فرض می گردد. با جاگذاری رابطه (۲) در رابطه (۱) و مشتق گیری داریم:

$$J_i = \frac{D_i K_i c_{io} v_i (\Delta p - \Delta \pi)}{lRT} \quad (۳)$$

در رابطه فوق $D_i = RTl / c_i$ می باشد (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 می باشد. γ_{io} ضریب فعالیت جز i در سمت تغذیه و $\gamma_{io(m)}$ ضریب فعالیت جز i در ممبرین در سمت تغذیه می باشد. c_{io} غلظت مولی جز i در سمت تغذیه می باشد. v_i حجم مولی جز i ، Δp فشار هیدرودینامیک در ممبرین، $\Delta \pi$ اختلاف فشار اسمزی در ممبرین می باشد. همچنین l ضخامت ممبرین می باشد.

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 می گردد [۱۳].

۴-۲- مدول

کوچکترین قسمت دارای توان تولید در سیستم‌های اسمز معکوس، غشا می باشد. چهار نمونه رایج غشاها شامل صفحه‌ای^۱، لوله‌ای^۲، مارپیچی^۳ و رشته توخالی^۴ می باشد. متداولترین نوع ممبرین شامل مارپیچی می باشد [۱۴].

۴-۳- سیستم

سیستم اسمز معکوس شامل مجموعه‌ای از المان‌های غشایی که در یک محفظه قرار گرفته‌اند، می باشد. لوله‌های جریان تغذیه، جریان آب تصفیه شده و جریان خروجی می باشد. در محفظه‌های غشا، غشاها تا هشت عدد به صورت سری پشت سرهم قرار می گیرند [۱۵]. در کار تحقیقی حاضر از غشا نوع پلی آمیدی از نوع (DOW Filmtec SW30HR) استفاده گردیده است.

۴-۴- روابط اثرات دمایی

ویسکوزیته آب μ_w و ویسکوزیته آب دریا μ_{sw} در هر دمایی از روابط زیر به دست می آید [۱۶].

$$\mu_w = 4/2844 \times 10^{-5} + (0/157(T + 64/993))^2 - 91/926)^{-1} \quad (۴)$$

$$0 \leq T \leq 18.0$$

$$\mu_{sw} = \mu_w (1 + AS + BS^2) \quad (۵)$$

¹ Plate and frame

² Tubular

³ Spiral-wound

⁴ Hollow-fiber

$$A = 1/541 + 1/998 \times 10^{-3} T - 9/52 \times 10^{-5} T^2 \quad (6)$$

$$B = 7/974 - 7/561 \times 10^{-3} T + 4/724 \times 10^{-5} T^2 \quad (7)$$

$$0 \leq T \leq 18, 0 < S < 0.15 \text{ kg/kg}$$

در رابطه (۴)، μ_w ، خواص آب تصفیه شده در هر دمایی می باشد.

میزان نفوذ محلول آب نمک در دمای ۲۵ درجه سلسیوس برابر با $1/611 \times 10^{-9}$ متر مربع بر ثانیه می باشد. میزان نفوذ آب در هر دمای دلخواه از رابطه زیر به دست می آید [۱۷].

$$D_T = D_{25} \frac{\mu_{25}}{\mu_T} \frac{T}{298/15} \quad (8)$$

در رابطه (۸)، D_T میزان نفوذ آب در هر دمای دلخواه، D_{25} میزان نفوذ آب در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، μ_{25} میزان ویسکوزیته آب در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و μ_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].

$$k_{CP} = 0.18 \cdot \left(\frac{\gamma_w D^2}{L} \right)^{1/3} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، γ_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 آید [۱۷]. مقادیر B_{25} و A_{25} مقادیر پارامترها در دمای ۲۵ درجه سلسیوس می باشند.

$$A_T = A_{25} \frac{\mu_{25}}{\mu_T} \quad (10)$$

$$B_T = B_{25} \frac{D_T}{D_{25}} \quad (11)$$

در رابطه (۱۰)، μ_{25} و μ_T به ترتیب مقادیر ویسکوزیته در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و در دمای T می باشند.

در رابطه (۱۱)، D_{25} 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 $2/1 \times 10^{-11}$ متر بر ثانیه پاسکال^۱ و نفوذ نمک در غشا برابر با 0.25×10^{-11} متر بر ثانیه پاسکال روابط تجربی برای نفوذ آب در غشا (nA_T) و نفوذ محلول آب نمک در غشا از روابط زیر به دست می آید [۱۷].

$$nA_T = A_{25} \exp \left[K_{wT} \left(\frac{1}{(273/15 + T)} - \frac{1}{298/15} \right) \right] \quad (12)$$

$$nB_T = B_{25} \exp \left[K_{sT} \left(\frac{1}{(273/15 + T)} - \frac{1}{298/15} \right) \right] \quad (13)$$

¹ m/(s.pa)

ضریب دمایی برای انتقال آب، K_{wT} ، و ضریب دمایی برای انتقال محلول آب نمک، K_{sT} ، از منابع به ترتیب ۲۸۹۴- و ۳۲۸۱- 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]:

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

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

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

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

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

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

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

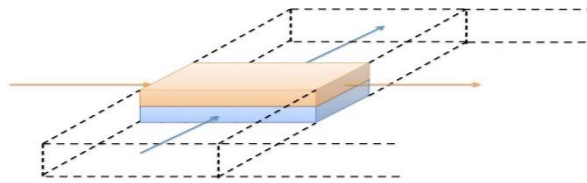
در فرمول های فوق c_p ، میزان شوری قسمت آب تصفیه شده، J_w و J_s به ترتیب مقادیر نفوذ آب تصفیه شده و نمک و $A_{\gamma\delta}$ و $B_{\gamma\delta}$ مقادیر مبنا برای نفوذ در دمای ۲۵ درجه سلسیوس می باشند.

۵- مدل سیستم

در کار تحقیقی حاضر، هدف مدل سازی عملکرد یک غشا از نوع ماریچ^۱ در فرایند اسمز معکوس می باشد. 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 می گردد. ارتفاع کانال، سرعت تغذیه آب شور و عرض کانال باتوجه به تعداد محفظه ها در هر مرحله طراحی می گردد. سایر پارامترهای طراحی نیز مطابق مقادیر جدول یک در نظر گرفته می شود. مدل مربوطه بر اساس مدل مدول و موارد ذکر شده فوق انجام می گردد. پارامترها و شرایط طراحی بر اساس مدل سیستم متغیر می باشد. مقادیر مربوطه جهت مدل سازی مطابق شکل ۲ و جدول ۱ در مدل سازی محلول - نفوذ وارد می گردد.

¹ Spiral-wound Reverse Osmosis



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

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

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 رابینسون 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.

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
۵۰×۱۰^{-۳} جرم مولی	g/l NaCl	غلظت نمک
$۲/۱ \times ۱۰^{-۱۱}$	-	ضریب نفوذ آب ممبرین
$۰/۲۵ \times ۱۰^{-۱۱}$	-	ضریب نفوذ نمک ممبرین
۰/۱۷۳	cm	ارتفاع کانال
۱۴/۶	cm	طول کانال
۹/۵	cm	عرض کانال
$۸/۳۱۴۴۶۲۱ \times ۱۰^{-۳}$	-	ثابت جهانی گازها
۱×۱۰^{-۹}	-	مقدار همگرایی

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 داده‌های کار تحقیقی رابینسون [۹] دارد.

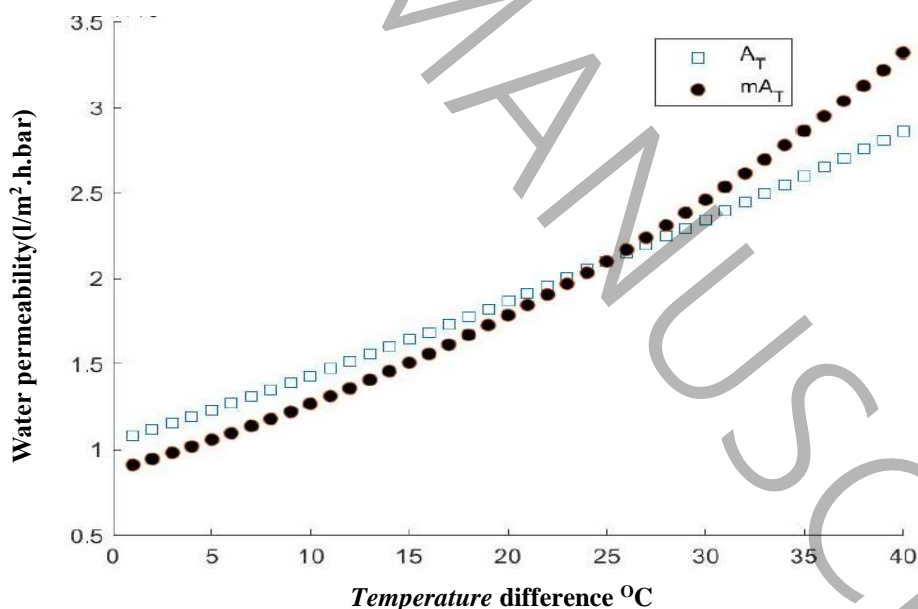
جدول ۲: مقایسه بین نتایج نفوذ: داده های تجربی [۹] و مدل سازی محلول-نفوذ (کار تحقیقی حاضر)

(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)
$l/m^2.h.bar$	$l/m^2.h.bar$	$^{\circ}C$
۰/۸۷۴	۰/۸۹۵	۰
۰/۹	۱/۱۳۹	۱/۵
۰/۹۵۴۵	۰/۹۵۸	۲/۵
۱/۳۱۱۸	۰/۹۷۳	۱۰/۸

در شکل ۳، نتایج نفوذ آب برای غلظت یک گرم بر لیتر برای اختلاف دماهای متفاوت ترسیم گردیده است. براساس این شکل مشاهده می گردد که با افزایش اختلاف دما بین قسمت آب تصفیه شده و آب شور، نیروی محرک افزایش می یابد. با افزایش این نیروی محرک، میزان نفوذ آب افزایش می یابد. 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 C_p و میزان نفوذ نمک ترسیم گردیده است. با بررسی این شکلها مشاهده می گردد که با افزایش اختلاف دما بین قسمت آب تصفیه شده و آب شور، نیروی محرک افزایش می یابد. با افزایش این نیروی محرک، میزان نفوذ آب افزایش می یابد.



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

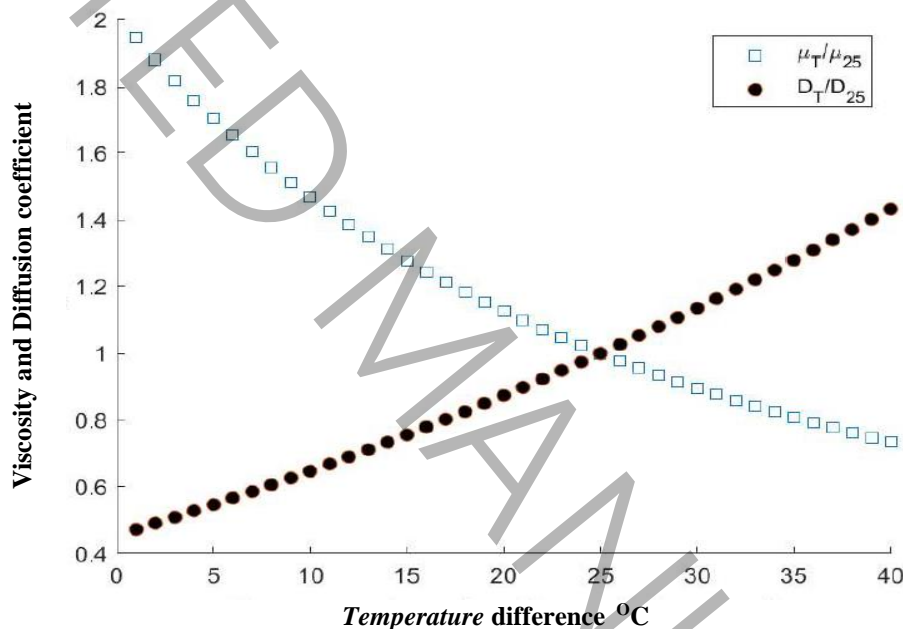
Fig. 3. Changes in the amount of water penetration per concentration of one 1 gr/lit of salt water concentration for different temperatures gradient

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 می گردد که با افزایش دما میزان ویسکوزیته کاهش می یابد. با کاهش میزان ویسکوزیته، مقدار نفوذ افزایش می یابد.

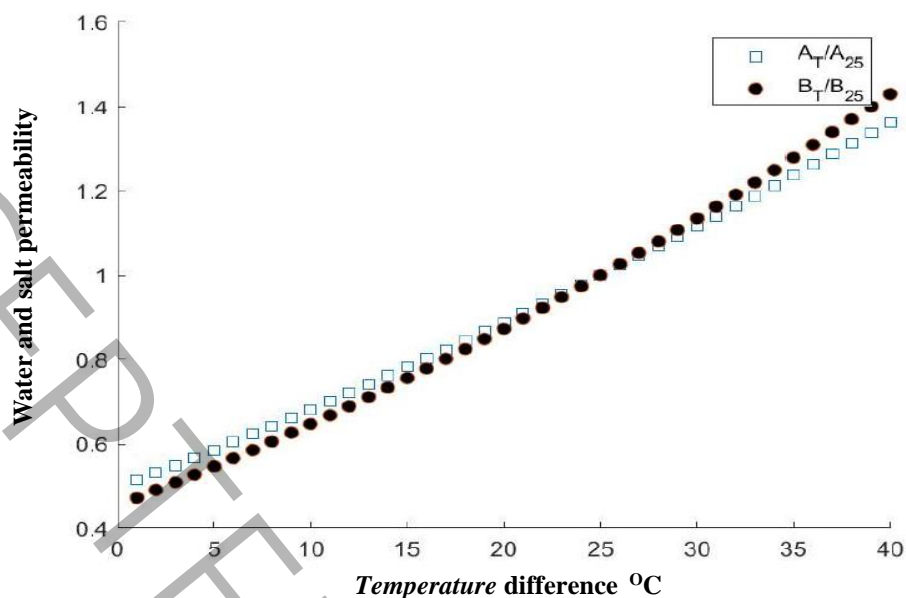
در شکل ۵، تغییرات میزان نفوذ آب و محلول به ازای غلظت یک گرم بر لیتر قسمت آب شور برای اختلاف دماهای متفاوت نشان داده شده است. میزان نفوذ آب تصفیه شده و محلول نسبت به میزان نفوذ آب و محلول در دمای ۲۵ درجه سلسیوس نشان داده شده است. مشاهده می گردد که با افزایش دما، مقدار نفوذ افزایش می یابد.

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 می گردد که با افزایش دما میزان ضریب پلاریزاسیون غلظت کاهش می یابد. با کاهش ضریب پلاریزاسیون غلظت میزان ضریب انتقال جرم افزایش می یابد. 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 می گردد که افزایش اختلاف دمای بین قسمت آب شور و آب تصفیه شده، تاثیر مستقیمی بر میزان نفوذ دارد.



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



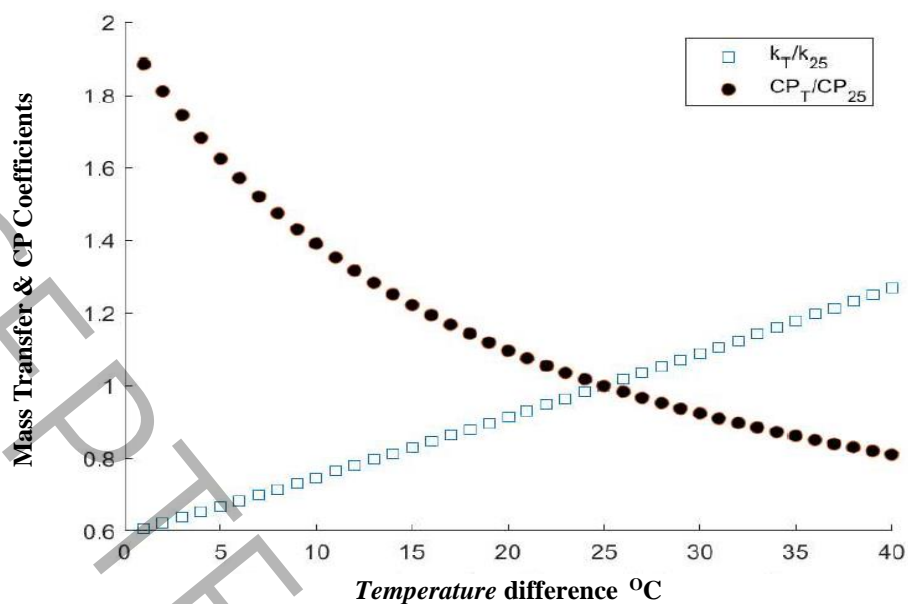
شکل ۵: تغییرات میزان نفوذ آب و محلول به ازای غلظت یک گرم بر لیتر قسمت آب شور برای اختلاف دماهای متفاوت
Fig. 5. Changes in the amount of water and salt permeability coefficient per concentration of 1 gr/lit of salt water concentration for different temperatures gradient

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 می آید:

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

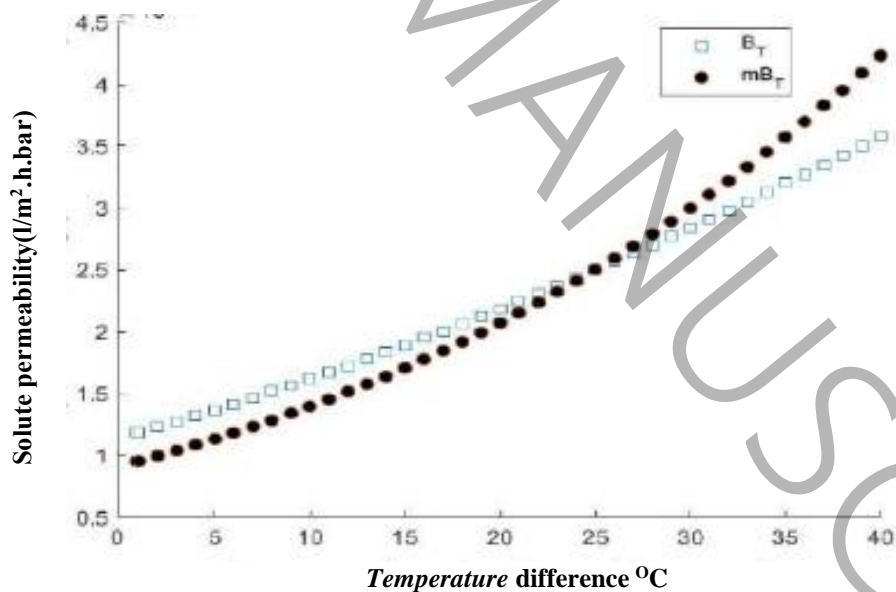
جدول ۳: میزان شوری قسمت آب تصفیه شده برای غلظت یک گرم بر لیتر برای اختلاف دماهای متفاوت

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

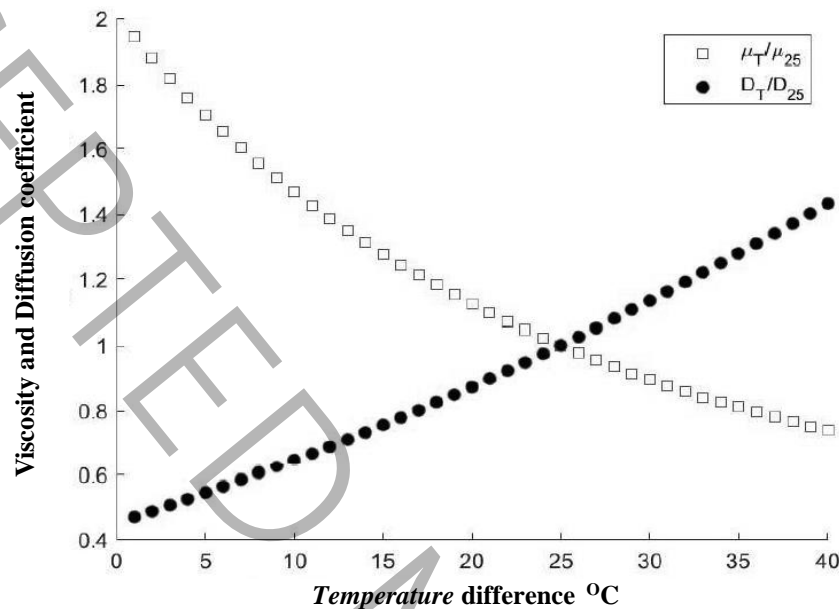


شکل ۷: تغییرات میزان نفوذ محلول به ازای غلظت یک گرم بر لیتر قسمت آب شور برای اختلاف دماهای متفاوت

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

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 $l/m^2.h.bar$ به دست می آید.

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 می گردد که با افزایش اختلاف دما بین قسمت آب تصفیه شده و آب شور، نیروی محرک افزایش می یابد. با افزایش این نیروی محرک، ضریب نفوذ آب افزایش می یابد.

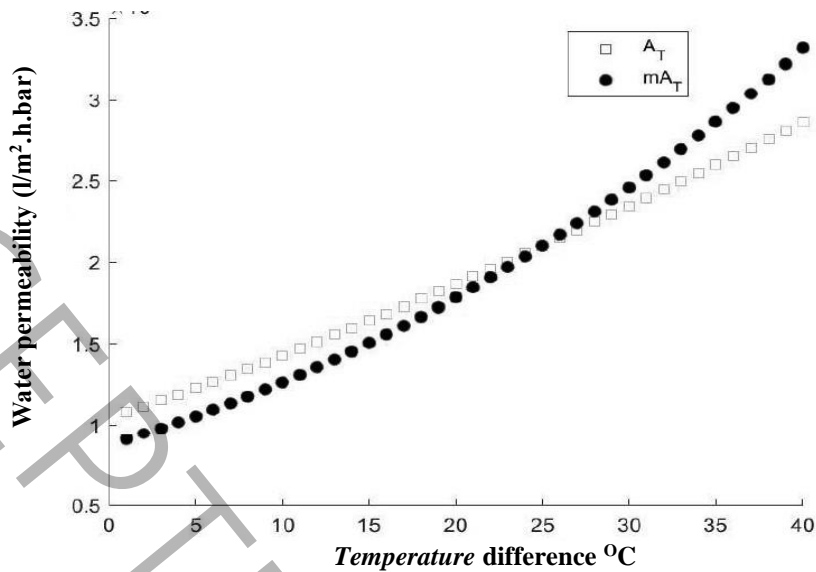


شکل ۸: تغییرات میزان ویسکوزیته و ضریب نفوذ آب به ازای غلظت ۰/۳۵ گرم بر لیتر قسمت آب شور برای اختلاف دماهای متفاوت

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

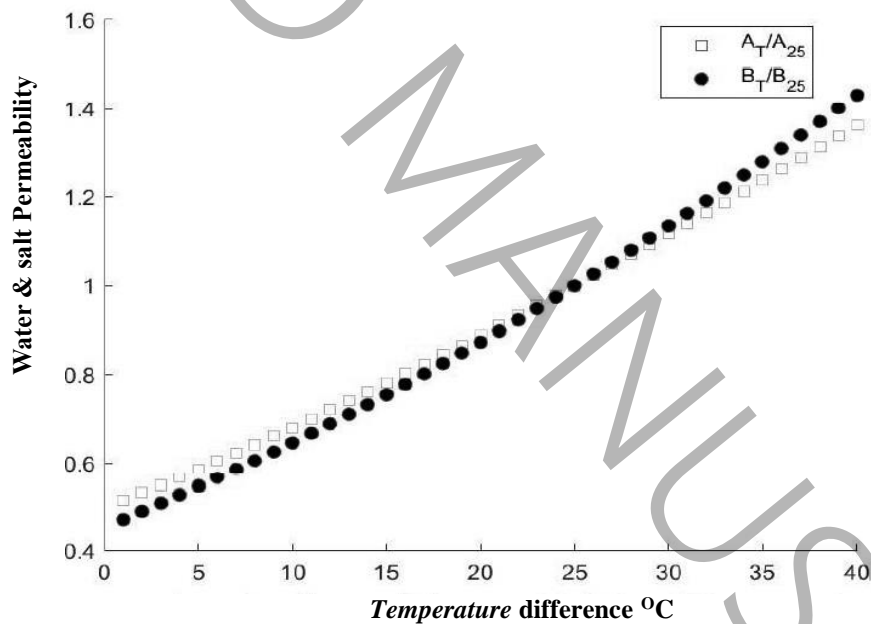
در شکل ۹، تغییرات میزان نفوذ آب به ازای غلظت ۰/۳۵ گرم بر لیتر قسمت آب شور برای اختلاف دماهای متفاوت نشان داده شده است. در شکل ۱۰، میزان نفوذ آب و محلول نسبت به میزان نفوذ آب و محلول در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، نشان داده شده است. مشاهده می گردد که با افزایش دما، مقدار نفوذ افزایش می یابد.

در شکل ۱۱، تغییرات میزان ضریب انتقال جرم و ضریب پلاریزاسیون 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 می گردد که با افزایش دما میزان ضریب پلاریزاسیون غلظت کاهش می یابد. با کاهش ضریب پلاریزاسیون غلظت، میزان ضریب انتقال جرم افزایش می یابد. 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 می گردد که افزایش اختلاف دمای بین قسمت آب شور و آب تصفیه شده، تاثیر مستقیمی بر ضریب نفوذ دارد.



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

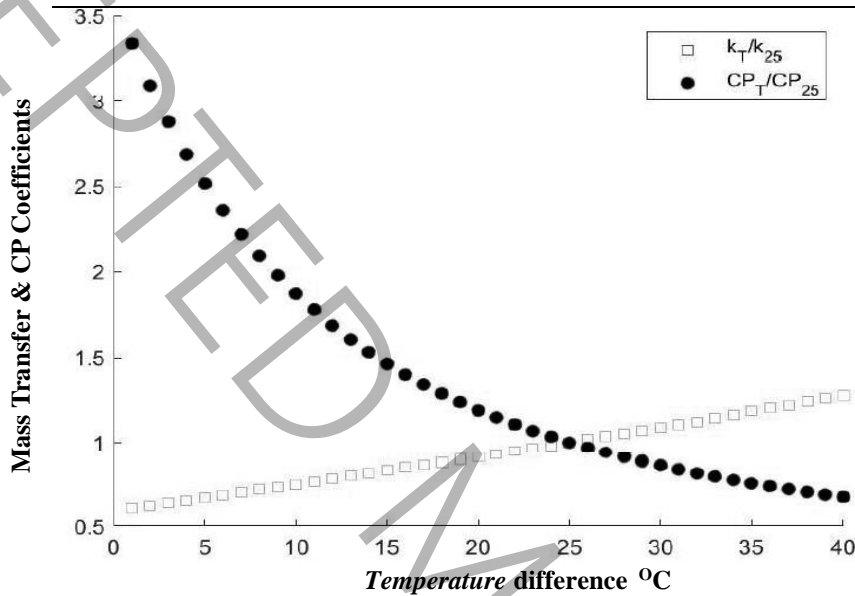
Fig. 10. Changes in the amount of water and salt permeability per concentration of 0.35 gr/lit of salt water concentration for different temperatures gradient

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 زیر به دست می آید:

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

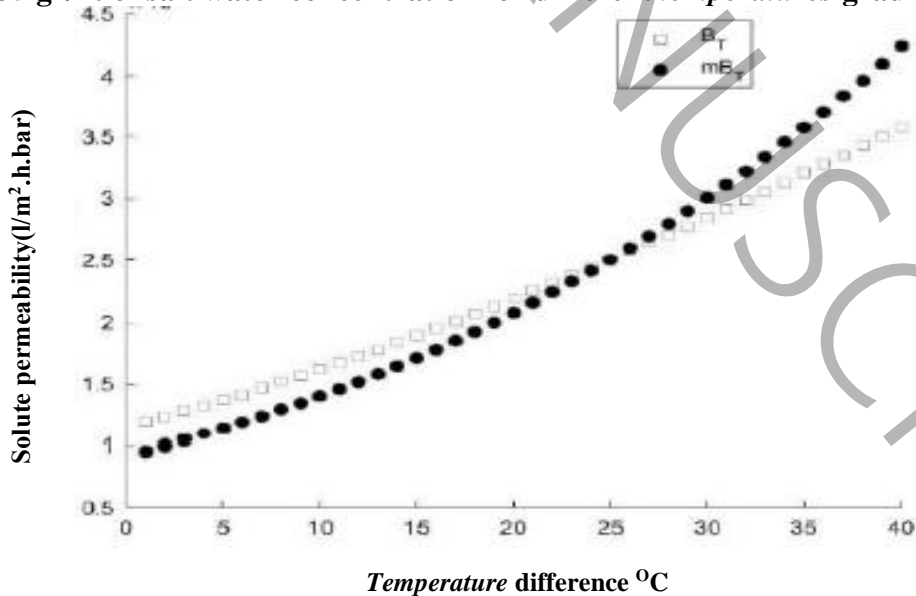
Table 4. The salinity of the treated water for a concentration of 0.35 gr/lit for different temperatures

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 ۰/۳۵ 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 ۰/۳۵ 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

با بررسی نمودارهای مربوط به تغییرات پارامترهای مختلف در مطالعه اثر گرادیان دمایی بر فرایند اسمز معکوس، درمی یابیم که افزایش غلظت و اختلاف دمای بین قسمت آب شور و آب تصفیه شده تأثیر مستقیمی بر افزایش میزان نفوذ آب تصفیه شده، ضریب نفوذ، ضریب انتقال جرم دارد؛ بنابراین درمی یابیم دو عامل افزایش غلظت قسمت آب شور و گرادیان دمایی به عنوان 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 آب شور سبب افزایش پارامترهای مرتبط بانفوذ می گردد. در اثر افزایش میزان نفوذ آب تصفیه شده، میزان شوری در قسمت آب شور افزایش و میزان آب تصفیه شده در قسمت آب تصفیه شده افزایش می یابد. ساخت و راه اندازی دستگاه در مقیاس صنعتی چالش های خاص خود را دارد. ایجاد اختلاف دمای معین در دو طرف غشا در مقیاس صنعتی کار آسانی نیست، به ویژه که در مقیاس صنعتی از تعداد ممبرین های بیشتری برای شیرین سازی آب استفاده می شود. همچنین حرارتی که از طریق آب خروجی از سیستم خارج می گردد، سبب ایجاد اتلاف حرارتی در سیستم می گردد. بنابراین صنعتی سازی 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، به عنوان نیروی محرک، اثر دو عامل غلظت قسمت آب شور و اختلاف دمای بین قسمت آب تصفیه شده و آب شور بر فرایند اسمز معکوس بررسی شده است. برای بررسی این فرایند مدل محلول - نفوذ به کار برده شده است. نتایج این کار تحقیقی نشان می دهد که مدل محلول - نفوذ تطابق مناسبی برای فرایند اسمز معکوس تحت اثر گرادیان دما دارد. مقایسه بین نتایج مدل سازی و داده های تجربی تطابق مناسبی بین نتایج را نشان می دهد. با در نظر گرفتن این نتایج، نتیجه گرفته می شود که افزایش اختلاف دما و میزان شوری، اثر مستقیمی بر میزان نفوذ دارد. مشاهده می گردد که در غیاب فشار به عنوان نیروی محرک، میزان نفوذ در میزان شوری مشخص با افزایش اختلاف دمای بین قسمت آب تصفیه شده و قسمت آب شور، افزایش می یابد.

نتایج مدل سازی برای غلظت های یک و ۰/۳۵ گرم بر لیتر و اختلاف دمای 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 مدل سازی میزان نفوذ آب تصفیه شده برای غلظت ۱ گرم بر لیتر از ۰/۸۷۴ تا ۱/۳۱۱۸ بر حسب $l/m^2.h.bar$ تغییر می کند. همچنین مشاهده می گردد که تغییرات ضرایب نفوذ و ویسکوزیته عکس یکدیگر می باشند. میزان نفوذ آب تصفیه شده با افزایش اختلاف دما از صفر تا ۴۰ درجه سلسیوس تا حدود ۳/۵ برابر افزایش می یابد. تغییرات ضریب پلاریزاسیون غلظت در غلظت ۰/۳۵ گرم بر لیتر از غلظت ۱ گرم بر لیتر کمتر می باشد. تغییرات ضریب پلاریزاسیون غلظت و ضریب انتقال جرم عکس یکدیگر می باشند. 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 می یابند. 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 ۰/۷ و ضریب انتقال جرم از ۰/۶ تا ۱/۲۹ تغییر می یابند. ضریب پلاریزاسیون غلظت بیان کننده میزان گرفتگی غشا به واسطه تجمع یونها و ناخالصی های موجود در آب می باشد. بنابراین با افزایش دما میزان نفوذ بیشتر و سبب کاهش ضریب پلاریزاسیون می گردد.

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 روش های رایج می بایستی انجام گردد. روش های گرمایی (نظیر گرمایش به وسیله انرژی الکتریسیته و انرژی خورشیدی و...) برای ایجاد اختلاف دما در کارهای تحقیقی آینده قابل انجام می باشد. ممبرین های جدید متشکل از مواد نانو برای تحقیق این فرایند قابل بررسی می باشد.

۱۱- 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 _b	غلظت نمک، g/l NaCl
C _f	غلظت ورودی در ممبرین، g/l
C _m	غلظت اصلاح شده در ورودی ممبرین، g/l
CP	ضریب پلاریزاسیون، بدون واحد
D	ضریب نفوذ، m ² /s
DELTA	مقدار همگرایی، بدون واحد
H	ارتفاع کانال، cm
J	میزان نفوذ، m/s.pa و lb/m ² .h.bar
K	ضریب دمایی، بدون واحد
L	طول کانال، cm
M _b	تعداد مول نمک، بدون واحد
MW	جرم مولی، g/mol
P	فشار، pa
R	ثابت جهانی گازها، J /K.mol
S	انتروپی، J /K
T	درجه سلسیوس، °C
v	حجم مولی، l/mol
W	عرض کانال، cm
X	میزان فرضی خروج نمک، g/lit

علائم یونانی

γ	ضریب فعالیت
η	پتانسیل شیمیایی
μ	ویسکوزیته
π	فشار اسمزی

زیرنویس

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

بالانویس

- [1] N. Lior, *Advances in water desalination*, A John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [2] A. Alkaisi, 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*, 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.

Modeling of thermal gradient effect on reverse osmosis process

Mohsen Zhyianey Bakhsh, Ehsan Abedini¹, Saeed Niazi^c, Pouyan Adibi, Younes Bakhshan

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

ABSTRACT

In the present study modeling and formulation of thermal gradient effect on reverse osmosis process for evaluation treated water penetration and water production are studied. modeling is done by MATLAB using Solution-Diffusion model. Studying on important parameters for temperature driven reverse osmosis, shows the direct effect of temperature difference between permeate-water part and saline water part on different parameters. On temperature driven reverse osmosis, temperature difference between permeate-water part and saline-water part acts as a driving force. penetration rate at each salt concentration rises by increasing temperature difference between permeate-water part and saline-water part. The variations of different parameters versus temperature difference 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 permeate-water part and saline-water part, treated water penetrations are obtained 0.9, 0.9545 and 1.3118 l/m².h.bar respectively. Also, for 0.35 gr/lit salt concentration and 1.5 and 9.3 °C temperature difference between permeate-water part and saline-water part, treated water penetrations are obtained 0.917 and 1.167 l/m².h.bar respectively.

KEYWORDS

Modelling, reverse osmosis, temperature difference, MATLAB program, solution-diffusion model.

¹ Corresponding Author, Email: abedini@hormozgan.ac.ir