

اثر پلاریزاسیون غلظتی در فرآیند شیرین سازی آب به روش اسمز مستقیم (مروری)

محسن باهوش^۱

اسلام کاشی^۲

سهیلا شکرالله زاده^{۳*}

Shokrollahzadeh@irost.ir

تاریخ پذیرش: ۹۵/۸/۴

تاریخ دریافت: ۹۵/۴/۱۲

چکیده

زمینه و هدف: انرژی و آب دو عامل از مهم ترین عوامل چالش برانگیز هستند که بشر در هزاره سوم با آن ها مواجه است. در این میان روش های مختلفی برای نمک زدایی آب به کار برده شده که ضمانت اجرایی و صنعتی شدن این روش ها، بهینه بودن آن ها از لحاظ مصرف انرژی و داشتن بازده مناسب است. یکی از این روش ها، استفاده از فرآیند اسمزی است که خود به دو بخش اسمز معکوس و اسمز مستقیم تقسیم می شود. در حال حاضر، فرآیند اسمز معکوس به صورت وسیع در مقیاس صنعتی به کار برده می شود. فرآیند اسمز مستقیم طی دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته و در راه تجاری شدن با چالش های جدی مواجه است. از جمله عوامل تأثیرگذار در فرآیند اسمز مستقیم می توان به: خواص محلول خوراک و محلول کُشنده (اسمزی)، پلاریزاسیون غلظتی، جهت غشا، گزینش پذیری و توانایی غشا در عدم عبور حل شونده های موجود در محلول های دو طرف غشا، ایجاد اختلاف فشار اسمزی بالا و قابلیت بازیابی آسان محلول کُشنده، اشاره کرد.

روش بررسی: در این مقاله پدیده پلاریزاسیون غلظتی، مدل های ریاضی حاکم بر آن و روش های کاهش آن به صورت مروری مورد مطالعه قرار گرفته است.

یافته ها: راهکارهای مهمی برای کاهش پلاریزاسیون غلظتی، تغییر ساختار غشاء و بهینه سازی شرایط فرایندی و محلول کُشنده توسط پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته اند.

نتیجه گیری: با این که پلاریزاسیون غلظتی تأثیر مهمی بر کاهش شار آب عبوری از غشا دارد، به طوری که پلاریزاسیون غلظتی داخلی می تواند شار آب را تا حدود ۸۰٪ شار آب عبوری اولیه کاهش دهد، ولی می توان با اتخاذ شرایط عملیاتی مناسب و بهینه سازی ساختار غشا آثار منفی آن را کاهش داد.

واژه های کلیدی: نمک زدایی، غشا، اسمز مستقیم، پلاریزاسیون غلظتی داخلی، پلاریزاسیون غلظتی خارجی.

۱- دکتری مهندسی شیمی، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران.

۲- استادیار پژوهشکده فناوری های شیمیایی، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران.

۳- دانشیار پژوهشکده فناوری های شیمیایی، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران. * (مسئول مکاتبات)

The Effect of Concentration Polarization in the Process of Water Desalination by Forward Osmosis Method (Review)

Mohsen Bahoosh¹

Eslam Kashi²

Soheila Shokrollahzadeh^{3*}

Shokrollahzadeh@irost.ir

Admission Date: October 25, 2016

Date Received: July 4, 2016

Abstract

Background and Objective: Energy and water are two of the most important challenging factors which human faces in the third millennium. Various methods of water desalination were employed that the applicability and industrialization of these methods are dependent on the optimization of the energy consumption and the appropriate efficiency. One of these methods is osmosis process that is divided into two sections: reverse osmosis and forward osmosis. Now, the reverse osmosis process is extensively used on industrial scale. The reverse osmosis process has more industrial applications than the forward osmosis. Currently, the forward osmosis process in commercialization path faces serious challenges. The factors that effect on the forward osmosis process include: properties of feed and draw solutions, concentration polarization, membrane orientation, selectivity and membrane ability to the rejection of solute on both sides of the membrane, creating a high osmotic pressure difference and easy regeneration capability of draw solution.

Method: In this article an overview of concentration polarization, its mathematical models and its reduction methods are studied.

Findings: The most important strategies proposed by researchers for reducing concentration polarization is changing the membrane structure and optimizing process conditions and draw solution.

Discussion and Conclusion: Although the concentration polarization has a significant influence on the control and reduction of the water flux to pass through the membrane, it can reduce the water flux up to 80% of the initial water flux but with using appropriate operating conditions and optimizing membrane structure, the neglect results of it can reduce.

Keywords: Desalination, Membrane; Forward Osmosis, Internal Concentration Polarization, External Concentration Polarization.

1- Ph.D., Student in Chemical Engineering, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Tehran, Iran

2- Assistant Prof., Department of Chemical Technologies, (IROST), Tehran, Iran.

3- Associate Prof., Department of Chemical Technologies, (IROST), Tehran, Iran. *(Corresponding Author)

مقدمه

کمبود آب و انرژی جوامع زیادی را در سرتاسر جهان با مشکل مواجه کرده است. با توجه به گزارش سازمان ملل (۱) و گزارش موسسه بین‌المللی مدیریت آب (۲، ۳) کشور ما هم از این قاعده مستثنی نبوده و در سال‌های آینده با مشکل کمبود آب مواجه خواهد بود. از این رو توسعه روش‌هایی برای افزایش ظرفیت آب و استفاده بهینه از آب موجود از اهمیت خاصی برخوردار است. یکی از این روش‌ها، فرآیند نمک‌زدایی و شیرین‌سازی آب است. طبق یک طبقه‌بندی خاص، فرآیند شیرین‌سازی شامل دو گروه روش‌های اسمزی (مانند اسمز معکوس^۱ و اسمز مستقیم^۲) و روش‌های حرارتی (مانند متراکم‌سازی مکانیکی بخار آب و روش تقطیر چندمرحله‌ای) می‌باشد. اسمز به صورت حرکت خالص آب از درون یک غشای نیمه‌تراوای گزینش‌پذیر، به دلیل وجود اختلاف فشار اسمزی در دو طرف غشا، تعریف می‌شود. فرآیند اسمز مستقیم یا اسمز پیش‌رو برخلاف فرآیند اسمز معکوس بدون دخالت فشار خارجی انجام می‌شود و از فواید اصلی آن می‌توان به عملکرد در فشار هیدرولیکی کم یا صفر، انرژی ورودی کم (۴)، توانایی زیاد غشا برای عدم پذیرش دامنه زیادی از حل‌شونده‌ها و تمایل کم‌تر غشا برای رسوب‌گرفتگی و حذف آسان‌تر رسوب‌ها (۵، ۶) نسبت به فرآیندهایی که نیرومحرکه آن‌ها فشار خارجی است (مانند اسمز معکوس، نانوفیلتراسیون و اولترافیلتراسیون)، اشاره کرد (۷). عوامل مختلفی در بهبود عملکرد اسمز مستقیم نقش دارند از جمله: خواص محلول آب خوراک و محلول کِشنده (دما، فشار، ویسکوزیته و میزان ناخالصی و غیره)، پلاریزاسیون غلظتی^۳ (داخل و خارج غشا)، ساختار و جهت غشا و غیره. در این مقاله ابتدا پلاریزاسیون غلظتی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در فرآیند اسمز مستقیم بررسی شده سپس معادله‌های مختلف برای مدل کردن آن ارائه شده است.

پلاریزاسیون غلظتی

پلاریزاسیون غلظتی یک پدیده شایع و غیرقابل اجتناب در فرآیندهای غشایی که نیرومحرکه آن‌ها اختلاف فشار خارجی یا اختلاف فشار اسمزی است، می‌باشد (۸). در سامانه‌های اسمز محور، این پدیده ناشی از اختلاف غلظت در محلول آب خوراک و محلول کِشنده، در دو طرف غشا است (۹، ۱۰).

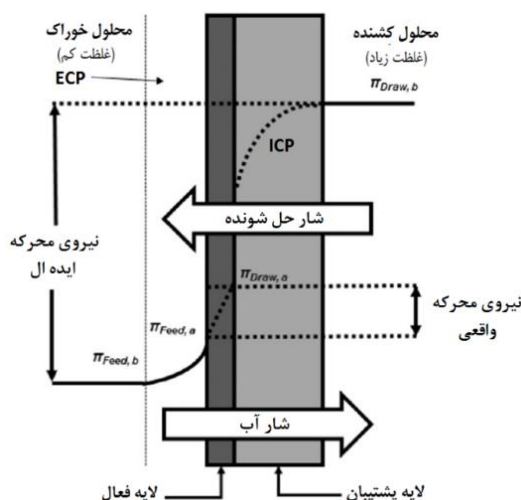
معادله (۱)، فرمول کلی است که شار آب را در فرآیندهایی مثل اسمز مستقیم و اسمز معکوس نشان می‌دهد (۱۱، ۱۲):

$$J_w = A(\sigma\Delta\pi - \Delta P) \quad (1)$$

در این معادله J_w شار آب عبوری از غشا، A ضریب تراوش‌پذیری آب خالص، $\Delta\pi$ اختلاف فشار اسمزی در عرض لایه فعال غشا، ΔP اختلاف فشار خارجی و σ ضریب انعکاسی می‌باشد. در فرآیند اسمز مستقیم اختلاف فشار خارجی را ناچیز در نظر می‌گیرند ($\Delta P = 0$) و در فرآیند اسمز معکوس اختلاف فشار خارجی بیش‌تر از اختلاف فشار اسمزی ($\Delta P < \Delta\pi$) است. از نتایج تجربی مشخص شده، اختلاف فشار اسمزی در عرض لایه فعال غشا بسیار کم‌تر از اختلاف فشار اسمزی بالک دو محلول موجود در دو طرف غشا است و این خود باعث می‌شود شار آب عبوری بسیار پایین‌تر از میزان شار آب عبوری مورد انتظار باشد (۱۳، ۱۴). این نتیجه ناشی از اثرات چندین پدیده انتقال در غشا است. پلاریزاسیون غلظتی داخلی (ICP)^۴ و پلاریزاسیون غلظتی خارجی (ECP)^۵ دو مورد از مهم‌ترین این پدیده‌ها هستند (۱۱). ICP در داخل لایه پشتیبان (SL) و ECP در خارج از بدنه غشا رخ می‌دهد. در شکل (۱) محل وقوع این دو پدیده نمایش داده شده است:

4- Internal Concentration Polarization (ICP)
5- External Concentration Polarization (ECP)

1- Reversed Osmosis (RO)
2- Forward Osmosis (FO)
3- Concentration Polarization (CP)



شکل ۱- نمایشی از غشای فرآیند اسمز مستقیم و نیروی محرکه شار (۱۵، ۱۶)

Figure 1. A diagram of forward osmosis membrane and flux driving force (15, 16).

مستقیم مقدار DECP را صفر در نظر می‌گیرند (۱۹). ECP نیروی محرکه خالص فرآیند را به دلیل افزایش فشار اسمزی، زمانی که لایه فعال در سمت محلول خوراک قرار دارد، یا به دلیل کاهش فشار اسمزی، زمانی که لایه فعال در سمت محلول کُشنده قرار دارد، کاهش می‌دهد. با این وجود، اثر منفی آن را می‌توان با افزایش اغتشاش یا سرعت جریان و یا بهینه کردن شار آب، کاهش داد (۱۲، ۲۰). البته، از آنجاکه شار آب در فرآیند اسمز مستقیم پایین است، کاهش ECP با کم کردن شار محدود می‌شود. برای مدل کردن پدیده ECP در فرآیند اسمز مستقیم، می‌توان از معادلاتی که برای محاسبه پلاریزاسیون غلظتی در فرآیندهای فشار محور به کار برده شده، استفاده کرد (۱۷، ۲۱).

مک‌چن و الیمیلک، ECP را با استفاده از تئوری فیلم لایه‌ای در فرآیند اسمز مستقیم مدل کرده‌اند (۸، ۲۲). معادله کلی برای مدل پلاریزاسیون غلظتی در غشاهای فشار محور به صورت معادله (۲) می‌باشد (۲۳):

$$\frac{C_m}{C_b} = \exp\left(\frac{J_w}{k}\right) \quad (2)$$

در این معادله k معرف ضریب انتقال جرم، C_m و C_b به ترتیب، غلظت‌های محلول خوراک در سطح غشا و داخل بالک هستند.

پلاریزاسیون غلظتی خارجی و مدل‌های ریاضی آن

در فرآیندهای غشایی فشار محور، جریان نفوذی باعث تشکیل لایه‌ای از حل‌شونده‌ها روی سطح لایه فعال غشا می‌شود، این پدیده باعث کاهش شار آب عبوری ناشی از افزایش فشار اسمزی برای غلبه بر فشار هیدرولیکی می‌شود (۱۷، ۱۸). مشابه سامانه‌های فشار محور، ECP در فرآیند اسمز مستقیم نیز در روی سطح لایه فعال غشا اتفاق می‌افتد. تنها تفاوت در این است که در سامانه‌های فشار محور فقط پلاریزاسیون غلظتی خارجی غلیظ (CECP) رخ می‌دهد ولی بسته به جهت‌گیری غشا در سامانه‌های اسمز محور هر دو نوع پلاریزاسیون خارجی رقیق (DECP) و غلیظ می‌تواند اتفاق بیفتد. معمولاً زمانی که لایه پش‌تیبیان در سمت محلول کُشنده قرار دارد، CECP و زمانی که در سمت محلول خوراک قرار دارد DECP غالب است (۱۲). در فرآیند اسمز مستقیم که لایه پش‌تیبیان در سمت محلول کُشنده قرار دارد علاوه بر CECP، پلاریزاسیون غلظتی خارجی رقیق نیز داریم ولی در کاربردهای صنعتی که سرعت جریان در دو سمت غشا بیش‌تر از 1 m/s است، مقدار آن بسیار ناچیز است به طوری که در شبیه‌سازی فرآیند اسمز

- 1- Concentrative ECP (CECP)
- 2- Dilutive ECP (DECP)

$$\frac{\pi_{m-draw}}{\pi_{b-draw}} = \exp\left(-\frac{J_w}{k_{draw}}\right) \quad (5)$$

k_{draw} ضریب انتقال جرم در سمت محلول کشنده، π_{m-draw} و π_{b-draw} ، به ترتیب، فشار اسمزی محلول کشنده در سطح غشا و داخل بالک هستند.

ترم $(\sigma\Delta\pi - \Delta P)$ در معادله (۱) برآیند نیروی محرکه مؤثر در فرآیند است. در اسمز مستقیم، نیروی محرکه برابر است با اختلاف فشار اسمزی بین محلول کشنده و محلول خوراک؛ بنابراین معادله (۱) باید به صورت معادله (۶) نمایش داده شود:

$$J_w = A(\pi_{m-draw} - \pi_{m-feed}) \quad (6)$$

که در این معادله فشار اسمزی خالص در سطح غشا در محلول های خوراک و کشنده لحاظ شده است. جایگذاری معادلات (۴) و (۵) در معادله (۶)، معادله (۷) را به وجود می آورد:

$$J_w = A(\pi_{b-draw} \times \exp\left(-\frac{J_w}{k_{draw}}\right) - \pi_{b-feed} \times \exp\left(\frac{J_w}{k_{feed}}\right)) \quad (7)$$

پلاریزاسیون غلظتی داخلی و مدل های ریاضی آن

این پدیده یکی از مهم ترین پدیده های موجود در فرآیندهایی است که با نیروی محرکه اسمزی کار می کنند. مشاهده شده که شار آب به میزان زیادی در فرآیند اسمز مستقیم به وسیله ICP کاهش یافته است (۲۵، ۲۶). بسته به جهت گیری غشا و نحوه قرار گرفتن لایه پشتیبان دو نوع ICP می تواند اتفاق بیفتد (۲۷). همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، اگر لایه پشتیبان در سمت محلول کشنده باشد، DICP و اگر لایه پشتیبان در سمت محلول خوراک باشد، CICIP رخ می دهد. باید توجه داشت از آنجایی که ICP داخل لایه پشتیبان رخ می دهد نمی توان آن را با تغییر شرایط هیدرودینامیکی مانند افزایش سرعت جریان یا اغتشاش به طور مستقیم کاهش داد.

ضریب انتقال جرم (k) طبق فرمول (۳) از عدد شروود (Sh) به دست می آید:

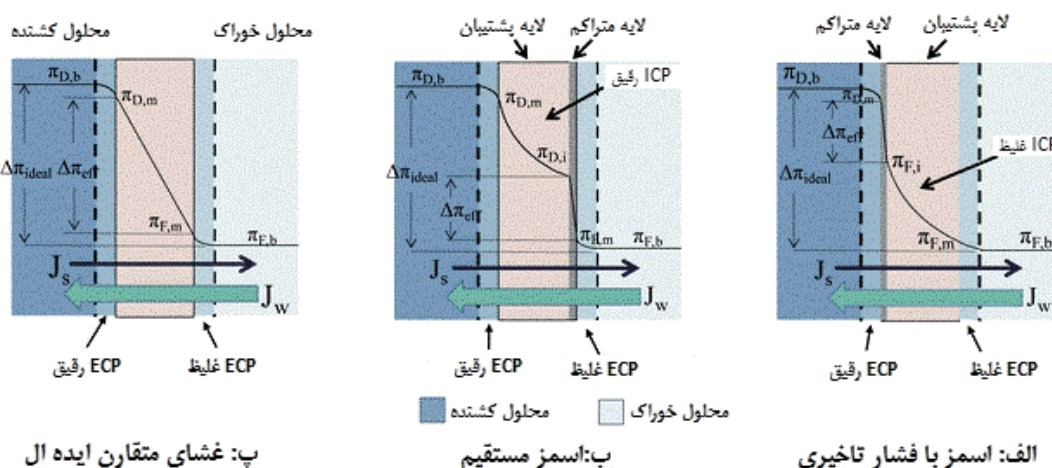
$$k = \frac{Sh \times D}{D_h} \quad (3)$$

D نماد ضریب نفوذ حل شونده ها و D_h قطر هیدرولیکی است. در فرآیند اسمز مستقیم، زمانی که غلظت محلول خوراک نسبتاً کم باشد، غلظت در معادله (۲) می تواند با فشار اسمزی جایگزین شود بنابراین مدل CECP را می توان به صورت معادله (۴) بیان کرد:

$$\frac{\pi_{m-feed}}{\pi_{b-feed}} = \exp\left(\frac{J_w}{k_{feed}}\right) \quad (4)$$

k_{feed} ضریب انتقال جرم در سمت خوراک، π_{m-feed} و π_{b-feed} ، به ترتیب، فشار اسمزی محلول خوراک در سطح غشا و داخل بالک هستند. به طور مشابه DECP در فرآیند اسمز مستقیم به صورت معادله (۵) تعریف می شود:

در این معادله هم CECP و هم DECP لحاظ شده است (۱۲، ۲۲). با این وجود، باید چندین جنبه مهم در این معادله لحاظ شود. اولاً، ضریب انتقال جرم در محلول های خوراک و کشنده، به علت وجود گرادیان غلظت، یکسان نیست. ثانیاً، مدل با این فرض است که ضریب تراوش حل شونده برابر صفر است (ضریب انعکاس برابر یک می باشد $\sigma = 1$) (۲۴). ثالثاً، غلظت های محلول کشنده و محلول خوراک نسبتاً کم هستند تا بتوان فرض کرد که غلظت با فشار اسمزی رابطه خطی دارند. به طور کلی، این مدل بیش تر برای یک فیلم متراکم متقارن کاربرد دارد تا یک غشای نامتقارن؛ بنابراین کاربرد این مدل به نسبت پایین است. غشای اسمز مستقیم به صورت نامتقارن بوده و اثرات ICP در آن اهمیت بیش تری دارد. بررسی ها نشان داده که ECP نقش کمی در فرآیندهای اسمز محور ایفا می کند و می توان با ایجاد اغتشاش مناسب، آن را حذف نمود و علت اصلی برای کم بودن شار آب واقعی نسبت به شار آب ECP نیست (۱۲، ۱۴).



شکل ۲- محل وقوع انواع مختلف ECP و ICP: (الف) فشار تأخیری، (ب) اسمز مستقیم و (پ) غشای متقارن ایده‌ال (۲۸)
 Figure 2. Occurrence location of different Types of ECP and ICP: (a) Pressure retarded osmosis (b) Forward Osmosis (c) Ideal symmetric membrane (28)

گرفته و تعیین می‌شود (۳۲، ۳۳). با این وجود، در یک غشا، فرآیندهای ICP و ECP نه به‌طور جدا از هم بلکه به‌صورت هم‌زمان رخ می‌دهد. مکاچن و الیمیلک (۸، ۲۲) مدل‌هایی برای در نظر گرفتن اثر ICP و ECP به‌طور هم‌زمان ارائه کرده‌اند. در جهت‌گیری غشا FO این مدل به‌صورت معادله (۱۱) نشان داده شده است:

$$(11)$$

$$J_w = A(\pi_{draw} \exp(-J_w K) - \pi_{feed} \exp(\frac{J_w}{K}))$$

بر اساس معادله (۱۰)، به نظر می‌رسد که ICP در لایه پشتیبان غشا با خواص غشا (ضخامت، پیچ‌وخم و تخلخل) و خواص نفوذ حل‌شونده (ضریب نفوذ حل‌شونده) تعیین شده است. اخیراً چندین روش مدل‌سازی شامل: روش المان محدود^۳ (۳۴، ۳۵)، دینامیک سیالات محاسباتی^۴ (۳۶، ۳۷) و شبیه‌سازی عددی^۵ (۳۸) برای بررسی پدیده پلاریزاسیون غلظتی به کار گرفته شده است.

راهکارهای کاهش پلاریزاسیون غلظتی

در ادامه برخی پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه روش‌های کاهش پلاریزاسیون غلظتی مورد بررسی قرار گرفته است.

اثر ICP روی اسمز مستقیم با به‌کارگیری تئوری انحلال-نفوذ^۱ مدل شده است (۲۹، ۳۰). زمانی که محلول کشنده در سمت لایه پشتیبان غشا قرار دارد (مانند حالت جهت‌گیری FO غشا)، رابطه DICP و جریان آب را می‌توان به‌صورت معادله (۸) بیان کرد (۳۰):

$$J_w = \frac{1}{K} \ln \frac{A \pi_{draw} + B}{A \pi_{feed} + B + J_w} \quad (8)$$

در این معادله B ضریب تراوش‌پذیری حل‌شونده‌ها در غشاست که از آزمایش‌های فرآیند RO محاسبه می‌شود (۱۶) و K مقاومت حل‌شونده نامیده می‌شود که معیاری برای انتقال حل‌شونده‌ها در لایه پشتیبان است. مقدار کم K نشان‌دهنده ICP کم و در نتیجه افزایش جریان آب عبوری است. K به‌صورت معادله (۱۰) تعریف می‌شود (۱۹، ۳۱):

$$K = \frac{\tau t}{\epsilon D} = \frac{S}{D} \quad (10)$$

که τ ، ϵ و S به ترتیب نشان‌دهنده ضخامت، پیچ‌وخم^۲، تخلخل و پارامتر ساختاری غشا و D ضریب نفوذ حل‌شونده‌ها است. S یک پارامتر مهم ذاتی غشاست زیرا میزان ICP لایه پشتیبان غشا را با ضخامت، پیچ‌وخم و تخلخل غشا تعیین می‌کند، بنابراین، در غشاهای جدید مقدار S مورد توجه قرار

3- Finite Element Method (FEM)

4- Computational Fluid Dynamics (CFD)

5- Numerical Simulation

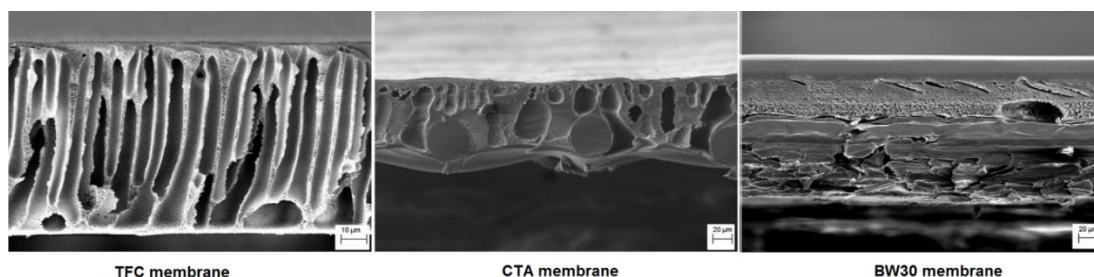
1- Solution-Diffusion Theory

2- Tortuosity

ساخت غشاهای جدید

در غشای TFC بهینه سازی شده کم تر است در نتیجه ICP آن نیز از دو غشای دیگر کم تر می باشد. نتایج نشان داد که شار آب در غشای TFC بهینه سازی شده در حالت جهت گیری غشایی PRO حدود ۵۰٪ بیش تر از غشای تجاری CTA اسمز مستقیم باشد.

وی و همکاران (۳۹) غشای پلی آمید TFC را با افزودن زیرلایه پلی سولفون متخلخل بهینه سازی نموده و عملکرد آن را با دو غشای تجاری CTA اسمز مستقیم و BW30 اسمز معکوس در فرآیند اسمز مستقیم مقایسه کردند. همان طور که در شکل (۳) پیداست به علت وجود تخلخل زیاد، پارامتر ساختاری (S)

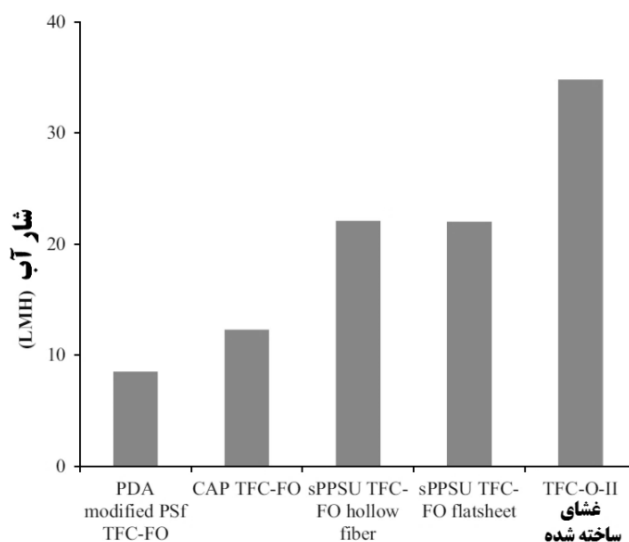


شکل ۳- تفاوت تخلخل و ساختار لایه پشتیبان در سه غشای TFC، CTA و BW30 (۳۹)

Figure 3. Difference between porosity and support layer structure of three TFC, CTA and BW30 membranes (39)

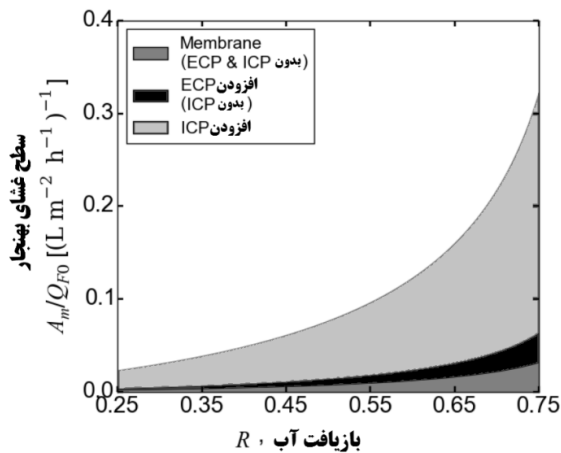
فرآیند اسمز مستقیم با محلول کِشنده ۲ مولار NaCl با سایر غشاهای موجود مقایسه شده است.

وانگ و همکاران (۴۰) از یک سلولز استر آب دوست جدید برای ایجاد لایه پشتیبان برای غشای TFC فرآیند اسمز مستقیم استفاده کرده اند. که در شکل (۴) بازده میزان شار آب غشا در



شکل ۴- مقایسه عملکرد غشای ساخته شده با PDA modified PSf TFC-FO (۴۱)، CAP TFC-FO (۴۲)، sPPSU TFC-FO hollow fiber (۴۳)، sPPSU TFC-FO flatsheet (۴۴) و TFC-O-II غشای ساخته شده (۴۵).

Figure 4. Performance comparison between the built membrane and PDA-modified PSf TFC-FO (41), CAP TFC-FO (42), sPPSU TFC-FO hollow fiber (43), sPPSU TFC-FO flat sheet (44) (45).



شکل ۵- حداقل سطح غشای موردنیاز به هنگام لحاظ

شدن ECP و ICP به عنوان تابعی از بازیافت آب (A_m)

سطح غشا و Q_{F0} شار اولیه محلول خوراک است) (۴۶)

Figure 5. Minimum Normalized Membrane Area that is required when considering ECP and ICP as a function of Water Recovery (A_m is the membrane area and Q_{F0} is the initial feed flow rate) (46)

پدیده پلاریزاسیون غلظتی داخلی رقیق نقش مهمی در کنترل جریان آب عبوری از غشای فرآیند اسمز مستقیم ایفا می کند و مدل های ارایه شده روزبه روز در حال تکامل هستند تا محدوده شرایط عملیاتی گسترده تر و ساختار مختلف و بهینه شده غشایی که صنعتی و تجاری شدن فرآیند اسمز مستقیم به آن پیوند خورده است، را بهتر شبیه سازی کنند. در کاهش پلاریزاسیون غلظتی عوامل مختلفی از جمله: دما، شار، جهت جریان، جهت گیری غشا، ویسکوزیته، خواص محلول خوراک و محلول کِشنده دخالت دارند که در سال های اخیر و با پیشرفت فناوری های رایانه ای، زمینه برای بررسی چندین پارامتر تأثیرگذار به صورت هم زمان به وسیله روش هایی مانند دینامیک سیالات محاسباتی فراهم شده که خود می تواند نوید دست یابی هرچه سریع تر به صنعتی شدن فرآیند اسمز مستقیم با محلول کِشنده و غشای بهینه را دهد.

اثر شرایط عملیاتی و خواص محلول های خوراک و کِشنده چین و همکاران (۴۵) اثرات مجزای ICP و ECP را به وسیله مدل سازی و آزمایش های تجربی انجام دادند و مشاهده کردند که DICP می تواند جریان آب را تا ۹۹/۹٪ کاهش دهد. آن ها به این نتیجه رسیدند که مدلشان می تواند برای انتخاب محلول کِشنده و پیش بینی شار آب در شرایط مشابه مورد استفاده قرار بگیرد.

دشماخ و همکاران (۴۶) تأثیر خواص غشا (A , B و S) را روی عملکرد یک غشای TFC فرایند FO که در آن از آب دریا (0.6 M NaCl) به عنوان محلول خوراک استفاده شده، بررسی کرده اند. در این پژوهش مشخص شده است که جریان متقابل محلول های کِشنده و خوراک تأثیر مثبت بیش تری روی بازیافت آب^۱ (نسبت شار حجمی آبی که در غشا نفوذ می کند به شار اولیه محلول خوراک) دارد تا جریان هم سو. همچنین، کاهش S و افزایش A باعث کاهش سطح موردنیاز غشا می گردد که در این مورد نقش کاهش S بسیار پررنگ تر است. شکل (۵) میزان حداقل سطح غشای بهنجار^۲ موردنیاز به هنگام لحاظ شدن ECP و ICP را به عنوان تابعی از بازیافت آب (R) نشان می دهد. با لحاظ کردن ECP و ICP سطح غشای موردنیاز افزایش پیدا می کند و اثر ICP به مراتب بیش تر است که این امر نشان می دهد در فرآیند FO مقاومت زیادی به وسیله ICP در مقابل شار آب وجود دارد.

خلاصه و جمع بندی

در این مقاله فرآیند اسمز مستقیم به عنوان فرایندی نوین در نمک زدایی از آب و چالش های آن مورد بررسی قرار گرفته است. به طور خاص، به پدیده پلاریزاسیون غلظتی در داخل و خارج از غشا پرداخته شده که عامل مهم در کاهش شار آب تولیدی محسوب می شود. مروری بر پژوهش های ارایه شده توسط محققان مختلف در سه دسته بندی: ساخت غشا، اثر شرایط عملیاتی و شبیه سازی و مدل سازی فرایند غشایی اسمز مستقیم انجام شده است.

1- Water Recovery

2- Minimum Normalized Membrane Area

- polarization on flux behavior in forward osmosis. *Journal of Membrane Science*. Vol. 284, pp:237–47.
9. Akther, N., Sodiq, A., Giwa, A., Daer, S., Arafat, H.A., Hasan, S.W., 2015. Recent advancements in forward osmosis desalination :A review. *Chemical Engineering Journal*. Vol. 281, pp:502-22.
 10. Hoek, E.M.V., Guiver, M., Nikonenko, V., Tarabara, V.V., Zydney, A.L., 2013. Membrane terminology, encyclopedia. *Membrane Science Technology*, PP:2219–28.
 11. Cath, T.Y., Childress, A.E., Elimelech, M., 2006. Forward osmosis :Principles, applications, and recent developments. *Journal of Membrane Science*, Vol. 281(1–2), pp:70-87.
 12. Zhao, S., Zou, L., Tang, C.Y., Mulcahy, D., 2012. Recent developments in forward osmosis: Opportunities and challenges. *Journal of Membrane Science*, Vol. 396, pp:1-21.
 13. Seppala, A., Lampinen, M.J., 2004. On the non-linearity of osmotic flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 28, pp:283–96.
 14. McCutcheon, J.R., McGinnis, R.L., Elimelech, M., 2006. Desalination by ammonia–carbon dioxide forward osmosis: Influence of draw and feed solution concentrations on process performance. *Journal of Membrane Science*, Vol. 278(1–2), pp:114-23.
 15. Kim, J., Jeong, K., Jun Park M., Ho, K.S., Joon, H.K., 2015. Recent advances in osmotic energy generation

References

1. WWAP (World Water Assessment Programme), 2012. The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk. Paris, UNESCO.
2. Seckler, D., Amarasinghe, U., Molden, D., De Silva, R., Barker, R., 1998. World water demand and supply, 1990 to 2025: Scenarios and issues. International Water Management Institute Research Report, 19.
3. Amarasinghe, U.A., Smakhtin, V., 2014. Global water demand projections: Past, present and future. International Water Management Institute (IWMI) Research Report. 156.
4. McGinnis, R.L., Elimelech, M., 2007. Energy requirements of ammonia–carbon dioxide forward osmosis desalination. *Desalination*, Vol. 207(1–3), pp:370-82.
5. Achilli, A., Cath, T.Y., Marchand, E.A., Childress, A.E., 2009. The forward osmosis membrane bioreactor: A low fouling alternative to mbr processes. *Desalination*, Vol, 239, pp:10–21.
6. Mi, B., Elimelech, M., 2010. Organic fouling of forward osmosis membranes: Fouling reversibility and cleaning without chemical reagents. *Journal of Membrane Science*, Vol. 348(1–2), pp:337-45.
7. Holloway, R.W., Cath, T.Y., Dennett, K.E., Childress, A.E., 2005. Forward osmosis for concentration of anaerobic digester centrate. *Water research*, Vol. 41(17), pp:4005-14.
8. McCutcheon, J.R., Elimelech, M., 2006. Influence of concentrative and dilutive internal concentration

22. McCutcheon, J.R., Elimelech, M., 2007. Modeling water flux in forward osmosis: Implications for improved membrane design. *AIChE Journal*, Vol. 53, pp:1736–44.
23. Mulder, M., 1996. *Basic principles of membrane technology*: Springer Science & Business Media;
24. Su, J., Chung, T.S., 2011. Sublayer structure and reflection coefficient and their effects on concentration polarization and membrane performance in FO processes. *Journal of Membrane Science*, Vol. 376, pp:214–24.
25. Gray, G.T., McCutcheon, J.R., Elimelech, M., 2006. Internal concentration polarization in forward osmosis: Role of membrane orientation. *Desalination*, Vol. 197, pp:1–8.
26. Faghieh Malek, R., Samimi, A., Shokrollahzadeh, S., 2015. «Internal concentration polarization in forward osmosis process for water desalination (a review)». 15th Iranian National Congress Of Chemical Engineering (ICHEC), Tehran, Iran, https://www.civilica.com/Paper-ICHEC15-ICHEC15_007.html.
27. Zhao, S., Zou, L., 2011. Relating solution physicochemical properties to internal concentration polarization in forward osmosis. *Journal of Membrane Science*, Vol. 379, pp:459–67.
28. Klaysom, C., Cath, T.Y., Depuydt, T., Vankelecom, I.F.J., 2013. Forward and pressure retarded osmosis: Potential solutions for global challenges in via pressure-retarded osmosis (pro): A review. *Energies*, Vol. 8, pp:11821–45.
16. Qasim, M., Darwish, N.A., Sarp, S., Hilal, N., 2015. Water desalination by forward (direct) osmosis phenomenon: A comprehensive review. *Desalination*, Vol. 374, pp:47–69.
17. Elimelech, M., Bhattacharjee, S., 1998. A novel approach for modeling concentration polarization in crossflow membrane filtration based on the equivalence of osmotic pressure model and filtration theory. *Journal of Membrane Science*, Vol. 145, pp:223–41.
18. Sablani, S.S., Goosen, M.F.A., Al-Belushi, R., Wilf, M., 2001. Concentration polarization in ultrafiltration and reverse osmosis: A critical review. *Desalination*, Vol. 141, pp:269–89.
19. Gruber, M.F., Johnson, C.J., Tang, C.Y., Jensen, M.H., Yde, L., Helix-Nielsen, C., 2011. Computational fluid dynamics simulations of flow and concentration polarization in forward osmosis membrane systems. *Journal of Membrane Science*, Vol. 379(1–2), pp:488–95.
20. Nematzadeh, M., Samimi, A., Shokrollahzadeh, S., 2016. Application of sodium bicarbonate as draw solution in forward osmosis desalination: influence of temperature and linear flow velocity. *Desalination and Water Treatment*, Vol. 57, pp:20784–91.
21. Song, L., Elimelech, M., 1995. Theory of concentration polarization in crossflow filtration. *Journal of Chemical Society Faraday Trans*, Vol. 91, pp:3389–98.

35. Sagiv, A., Semiat, R., 2011. Initelement analysis of forward osmosis process using NaCl solutions. *Journal of Membrane Science*, Vol. 379, pp:86–96.
36. Mathias, F.G., Ulf, A., Claus, H., 2016. Open-source CFD model for optimization of forward osmosis and reverse osmosis membrane modules. *Separation and Purification Technology*, Vol. 158, pp:183–92.
37. Pankaj, S., Sajikumar, N., Kaimal, R., 2016. Simulation of Forward Osmosis Using CFD. *Procedia Technology*, Vol. 24, pp:70-6.
38. Jung, D.H., Lee, J., Kim, D.Y., Lee, Y.G., Park, M., Lee, S., 2011. Simulation of forward osmosis membrane process: Effect of membrane orientation and flow direction of feed and draw solutions. *Desalination*, Vol. 277, pp:83–91.
39. Wei, J., Qiu, C., Tang, C.Y., Wang, R., Fane, A.G., 2011. Synthesis and characterization of flat-sheet thin film composite forward osmosis membranes. *Journal of Membrane Science*, Vol. 372(1–2), pp:292-302.
40. Ong, R.C., Chung, T.S., de Wit, J.S., Helmer, B.J., 2015. Novel cellulose ester substrates for high performance flat-sheet thin-film composite (TFC) forward osmosis (FO) membranes. *Journal of Membrane Science*, Vol. 473, pp:63-71.
41. Han, G., Zhang, S., Li, X., Widjojo, N., Chung, T.S., 2012. Thin film composite forward osmosis membranes based on polydopamine modified polysulfone substrates with enhancements in both water flux and energy and water supply. *Chemical Society Reviews*, Vol. 42, pp:6959-89.
29. Lee, K.L., Baker, R.W., Lonsdale, H.K., 1981. Membranes for power generation by pressure-retarded osmosis. *Journal of Membrane Science*, Vol. 8(2), pp:141-71.
30. Loeb, S., Titelman, L., Korngold, E., Freiman, J., 1997. Effect of porous support fabric on osmosis through a loeb–sourirajan type asymmetric membrane. *Journal of Membrane Science*, Vol. 129, pp:243–9.
31. Yip, N.Y., Tiraferri, A., Phillip, W.A., 2010. Schiffman, J.D., Elimelech, M., High performance thin-film composite forward osmosis membrane. *Environmental Science & Technology*, Vol. 44(10), pp:3812-8.
32. Phillip, W.A., Yong, J.S., Elimelech, M., 2010. Reverse draw solute permeation in forward osmosis: modeling and experiments. *Environmental Science & Technology*, Vol. 44(13), pp:5170-6.
33. Tang, C.Y., She, Q., Lay, W.C.L., Wang, R., Fane, A.G., 2010. Coupled effects of internal concentration polarization and fouling on flux behavior of forward osmosis membranes during humic acid filtration. *Journal of Membrane Science*, Vol. 354(1–2), pp:123-33.
34. Li, W., Gao, Y., Tang, C.Y., 2011. Network modeling for studying the effect of support structure on internal concentration polarization during forward osmosis: Model development and theoretical analysis with fem. *Journal of Membrane Science*, Vol. 379, pp:307–21.

- Composite Membranes and Formation Mechanism of Thin-Film Layers on Hydrophilic Cellulose Acetate Propionate Substrates for Forward Osmosis Processes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 51(30), pp:10039-50.
45. Qin, J.J., Chen, S., Oo, M.H., Kekre, K.A., Cornelissen, E.R., Ruiken, C.J., 2010. Experimental studies and modeling on concentration polarization in forward osmosis. *Water Science and Technology*, Vol. 61(11), pp:2897-904.
46. Deshmukh, A., Yip, N.Y., Lin, S., Elimelech, M., 2015. Desalination by forward osmosis: Identifying performance limiting parameters through module-scale modeling. *Journal of Membrane Science*, Vol. 491, pp:159-67.
- salt rejection. *Chemical Engineering Science*, Vol. 80, pp:219-31.
42. Widjojo, N., Chung, T.S., Weber, M., Maletzko, C., Warzelhan, V., 2013. A sulfonated polyphenylenesulfone (sPPSU) as the supporting substrate in thin film composite (TFC) membranes with enhanced performance for forward osmosis (FO). *Chemical Engineering Journal*, Vol. 220, pp:15-23.
43. Zhong, P., Fu, X., Chung, T.S., Weber, M., Maletzko, C., 2013. Development of Thin-Film Composite forward Osmosis Hollow Fiber Membranes Using Direct Sulfonated Polyphenylenesulfone (sPPSU) as Membrane Substrates. *Environmental Science & Technology*, Vol. 47(13), pp:7430-6.
44. Li, X., Wang, K.Y., Helmer, B., Chung, T.S., 2012. Thin-Film