بررسی تولید توان الکتریکی در نیروگاه اسمز فشار–کاهیده(PRO)

محسن فلاح[۱و*]، موسی محمدپور فرد[۲]

تاریخ دریافت مقاله:
۱۳۹۰/۲/۵
تاریخ پذیرش مقاله:
۱۳۹۰/۶/۱

چکیده:

تولید توان توسط روش اسمز فشار–کاهیده(PRO)، یک روش مطمئن برای آینده به شمار می‌آید. در این روش آب از یک خوراک (جریان کم نمک یا جریان آب تمیز) از طریق یک غشاء نیمه تراوا به یک محلول غلیظ یا جریان غلیظ فشار بالا، مثل آب دریا نفوذ می کند و باعث افزایش بیشتر دبی و فشار آن می شود. سپس عبور این جریان پر فشار از یک توربین آبی باعث چرخش ژنراتور متصل به آن شده و تولید توان الکتریکی می‌کند. در این مقاله علاوه بر بررسی عملکرد نیروگاه به روش PRO و بررسی آن برای شرایط کاری ایران، یک مدل PRO برای پیش بینی جریان آب و چگالی توان تحت شرایط تئوری، مورد بررسی قرار گرفته است. مدل مبتنی بر تخمین تجربی ضریب نفوذ پذیری آب از غشاء (A)، ضریب نفوذ پذیری نمک از غشاء(B) و مقاومت ویژه ذرات معلق در محلول(K) است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که روش PRO با بهینه سازی های انجام گرفته در غشای آن دارای توان ویژه تولیدی بالاتر و درنتیجه بازده بالاتری نسبت به مدلهای قبلی می‌باشد و در نتیجه رویکرد تمایل به تولید توان با این روش را افزایش می‌دهد.

کلمات کلیدی:
اسمز فشار–کاهیده، خوراک، غشاء نیمه تراوا، ضریب نفوذپذیری

۱) مربی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت معلم آذربایجان
۲) استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت معلم آذربایجان
* نویسنده مسئول، mfallah@azaruniv.edu

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

مقدمه

پتانسیل تولید انرژی جهانی از روش اسمز فشار-کاهیده[1] حدود TWh/year ۲۰۰۰-۱۶۵۰ در سال تخمین زده شده است[۱]. در حالی که تولید انرژی جهان از تمام منابع تجدید پذیر در حدود TWh/year ۱۰۰۰۰ در سال تخمین زده شده است. در نروژ، پتانسیل حاضر قدرت اسمزی، بیشتر از TWh/year ۱۲ تخمین زده می‌شود، یعنی معادل با ۱۰ درصد مصرف توان در آن کشور و در اروپا پتانسیل تولید معادل TWh/year ۱۷۰ تخمین زده می شود[۱۰].

هزینه‌ی سرمایه گذاری برای یک نیروگاه اسمزی، در مقایسه با نیروگاه بادی نسبتا بالاست. اما بهر حال نیروگاه اسمزی تقریبا برای بهره برداری در ظرفیت کامل و بدون توقف طراحی می شود. این می‌تواند هزینه تولید انرژی در روشPRO را تا سطح قابل توجهی کاهش دهد. تخمین بدست آمده در مطالعات اخیر نیروگاه توان اسمزی استات کرفت نروژ، نشان می‌دهد که تولید نیروی اسمزی ممکن است آنقدر پیشرفت کند که ارزش رقابت با سایر منابع انرژی تجدید پذیر مانند انرژی بادی و بیوماس را داشته باشد.

مفهوم تولید انرژی از طریق مخلوط آب شور و شیرین از اواسط ۱۹۵۰ توسعه داده شده است. بدنبال آن در سال ۱۹۷۳ با آغاز بحران های نفت، رویکرد تولید توان به روش PRO افزایش یافت و منجر به انجام تحقیقاتی در این زمینه گردید. در ابتدای کار، به منظور تولید توان از غشاهای نیمه تراوای فیبری توخالی مورد استفاده در روش اسمز معکوس[2] استفاده می‌شد. بطوری که جریان غلیظ از پوسته و آب تمیز از داخل غشای توخالی جریان می یافت. تحقیقات بیشتر نشان داد توان خروجی به مراتب کمتر از حد توان خروجی قابل انتظار است و این بدلیل استفاده از غشاهای اسمز معکوس و ظرفیتهای غشا مورد استفاده در نمک زدایی آب دریا بود. این نتایج نشان داد که غشاهای مورد استفاده در روش اسمز معکوس برای روش های اسمز طبیعی و PRO مناسب نیست و آن بدلیل شکل و ضخامت لایه نگهدارنده آن بود[۶]. در تحقیقات بیشتر مشخص شد که طرحهای غشاهای موجود برای جریان های عبوری سرعت بالا روی سطح غشاء جوابگو نیستند. بنابراین عدم دسترسی به غشاها و ظرفیتهای مناسب باعث عدم پیشرفت کافی در صنعت تولید توان اسمزی شده است. تحقیقات مربوط به افزایش چگالی توان (مقدار توان تولیدی از واحد مساحت سطح غشا) از سالها پیش آغاز شده و یکی از شرکتهای پیش‌رو در این مطالعات و ساخت نیروگاه توان اسمزی شرکت استات‌کرفت[3] می‌باشد. نتایج مطالعات این شرکت نشان می‌دهد، در صورتی‌که چگالی توان در غشا به W/m^2 ۵ افزایش یابد، تولید توان از این روش کاملا مقرون به صرفه و قابل رقابت با سایر انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد[۱۲].این شرکت توانسته چگالی توان غشا را از کمتر W/m^2 ۰/۱ در سال ۱۹۹۹ به بیشتر از W/m^2 ۳ در سال ۲۰۰۶ برساند[۹]. همچنین آچیلی و همکاران [۳]، به نتایج بسیار خوبی در ارائه مدلی برای ارزیابی چگالی توان و جریان عبوری از غشا دست یافته‌اند.

در مقاله اخیر علاوه بر بررسی عملکردی نیروگاه به روش PRO نسبت به سایر روشهای قبلی و بررسی آن برای شرایط کاری ایران، مدل توسعه داده شده توسط آچیلی و همکاران [۳]، برای تولید توان به روش PRO، که شامل تاثیرات نفوذ محلول غلیظ، محلول تغذیه (خوراک)، ته نشست ذرات بر سطوح داخلی و خارجی غشا و فشار هیدرولیکی، بر روی جریان آب عبوری از غشا و خصوصا چگالی توان (توان ویژه) خروجی سیستم می‌باشد نیز بررسی شده است. با استفاده از این مدل، چگالی توان برای روش PRO برای مشخصه های مختلف غشاء، ساختار غشاهای مختلف، اندازه ها و ترکیب های مختلف قابل دستیابی است.

[1] Pressure Retarded Osmosis (PRO)
[2] Reverse Osmosis (RO)
[3] Statkraft

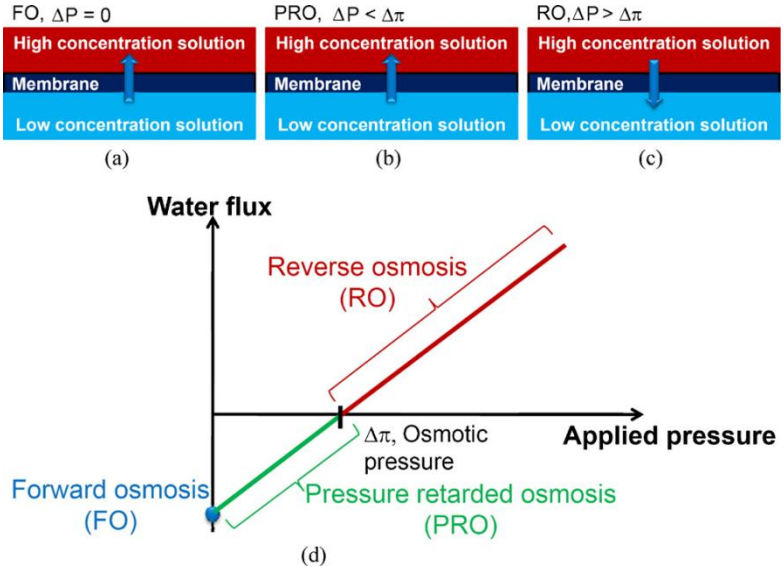
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

تئوری فرایندهای اسمزی

فرآیندهای اسمزی

اسمز فرایند انتقال سیال (آب) از طریق یک غشاء نفوذ پذیر (نیمه تراوا)، از یک محلول رقیق مثل آب خالص به یک محلول غلیظ مثل محلول آب و نمک است. این فرایند بوسیله اختلاف در غلظت‌های مولی محلول ها، از طریق یک غشاء که اجازه عبور آب را می دهد ولی مانع عبور اغلب مواد محلول و یونها نظیر نمک می‌شود، انجام می پذیرد. اگر یک اختلاف فشار هیدرولیکی یا یک فشار کاری (ΔP) روی محلول غلیظ اعمال شود، مانع انتقال خالص مولکولهای آب از غشاء می شود. در این صورت اختلاف فشار اسمزی ($\Delta \pi$) برابر با اختلاف فشار هیدرولیکی است.

در اسمز پیش رونده[1] ، فشار هیدرولیکی (یا فشار کاری) در سمت محلول غلیظ وجود ندارد. که باعث عبور مولکولهای آب موجود در جریان خوراک (آب شیرین یا آب با غلظت کم نمک) از غشا به سمت جریان با غلظت نمک بالا (محلول کشنده[2]) شده و آنرا رقیق می‌نماید. تا زمانی که غلظت دو طرف غشا یکسان گردد. اگر در سمت محلول غلیظ، فشاری اعمال شود به طوریکه اختلاف فشار هیدرولیکی بیشتر از اختلاف فشار اسمزی گردد، جهت جریان مولکولهای آب بر عکس می‌شود که به آن اسمز معکوس می‌گویند. در این روش مولکولهای آب از سمت محلول غلیظ به سمت محلول تمیز جاری می‌شوند. از روش اسمز معکوس معمولا برای مراکز تصفیه آب و صنایع آب شیرین کن استفاده می‌کنند. در PRO اختلاف فشار هیدرولیکی کمتر از فشار اسمزی و جهت جریان از خوراک تمیز به سمت جریان غلیظ است [۱۳]. شکل (۱) جهت جریان و شار آب در فرایندهای مختلف اسمز را نشان می‌دهد.



شکل ۱: نمایش جهت جریان حلال(آب) در (الف) اسمز پیش‌رونده (FO)، (ب) اسمز فشار-کاهیده (PRO) ، (ج) اسمز معکوس(RO) و (د) مقدار شار آب در مقابل فشار کاری در فرایندهای اسمز

[1] Forward Osmosis (FO)
[2] Draw Solution

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

مخلوط آب شیرین و آب شور

اساس کار تولید توان اسمزی استفاده از آنتروپی اختلاف دو جریان آب با غلظتهای نمک متفاوت است. اگر آب شیرین در آب دریا ریخته شود، به صورت فرایند برگشت ناپذیر با آب مخلوط می‌شود. آنتالپی مخلوط برای این سیال‌ها نزدیک صفر است. دما در محدوده اختلاط، به دمای آب شیرین، دمای آب شور و حجم موثر هریک از اجزای مخلوط بستگی دارد. اگر فرایند اختلاط به صورت یک فرایند برگشت پذیر در وسیله ای که صرفا به این منظور ساخته شده است انجام گیرد کار تولید خواهد شد. تغییر در انرژی آزاد گیبس $\left(\Delta G_{mix}\right)$ برای اختلاط یک مول از آب شیرین با مقدار نامحدود از آب دریا، با فرض ایده‌آل بودن مایعات و اینکه x_{H_2O} کسر مولی آب دریاست، با رابطه(۱) بیان می شود.

$$\Delta G_{mix} = RT \ln x_{H_2O} \qquad (۱)$$

آب دریا، همان شرایط اسمزی محلول آب و نمک با gr_{NaCl}/l ۳۲ دارد. در این محلول، غلظت نمک و آب به ترتیب ۰/۵۴۹ و ۵۴/۹۲ mol/l است. با جاگذاری نسبت مولی آب با توجه به غلظتهای آب و نمک در محلول در شرایط دمای $^{\circ}C$ ۲۰در معادله (۱) مقدار تغییرات تابع گیبس $\left(\Delta G_{mix}\right)$، ۲/۷ kJ- به ازای هر کیلوگرم آب شیرین (۴۸/۱ J- به ازای هر مول آب شیرین) بدست می‌آید.

این مقدار انرژی می تواند در یک وسیله ای که آب شیرین و آب شور را به صورت برگشت پذیر مخلوط می‌کند، به کار تبدیل شود که با در نظرگرفتن حجم مولی آب برابر $۱۸\times۱۰^{-۶}\ m^3/mol$، این با فشار اسمزی در ۲۶/۷ bar برابر است. فرآیند اختلاط آب شور و آب شیرین تقریبا یک فرآیند بی‌دررو (بدون تبادل گرمایی) است. از آنجا که آنتالپی مخلوط نزدیک صفر است، کار حاصل از فرآیند از قانون اول ترمودینامیک بدست می‌آید:

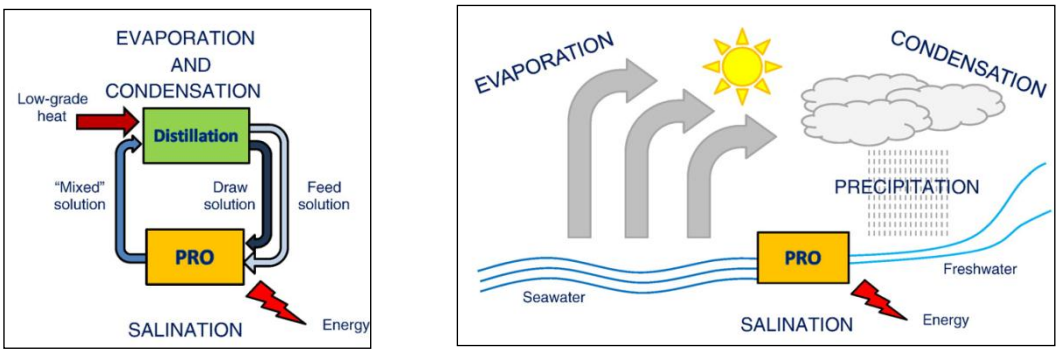
$$dE = c_p dT = dq + dw = dw \qquad (۲)$$

که در این فرمول dE تغییرات انرژی درونی و c_P ظرفیت گرمایی سیستم است. تولید کار در این ناشی از خنک کردن مخلوط می باشد. فرض کنیم که به عنوان مثال یک مول از آب شیرین با ۳ مول از آب شور مخلوط شده است. انرژی حاصل از فرآیند کمتر از ۴۸/۱ J برای ۷۲ g (۴ mol) آب شور رقیق با ظرفیت گرمایی ۴/۲ J/g، که تا کمتر از ۰/۱۷ $^{\circ}C$ سرد شده است، بدست می‌آید. در یک فرایند بهینه شده واقعی، تولید انرژی در شرایطی که مخلوط کمتر از ۰/۰۸ $^{\circ}C$ سرد شود، کمتر از نصف کار برگشت پذیر خواهد بود[۱۱].

تولید توان به روش PRO

سیستم‌های PRO به دو گروه سیکل باز و سیک بسته تقسیم می‌شوند. شکل (۲) شماتیک مربوط به این سیکلها را نشان می‌دهد[۲].

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]



(الف) سیکل بسته (ب) سیکل بسته

شکل۲: شماتیک سیکل باز و بسته در تولید توان به روش PRO

در سیکل باز انرژی خورشید باعث تبخیر آب دریاها شده و در اثر چگالش به صورت باران فرو می‌ریزد و رودخانه‌های شیرین را بوجود می‌آورد. این رودخانه‌ها دوباره به سوی دریا سرازیر می‌شوند.

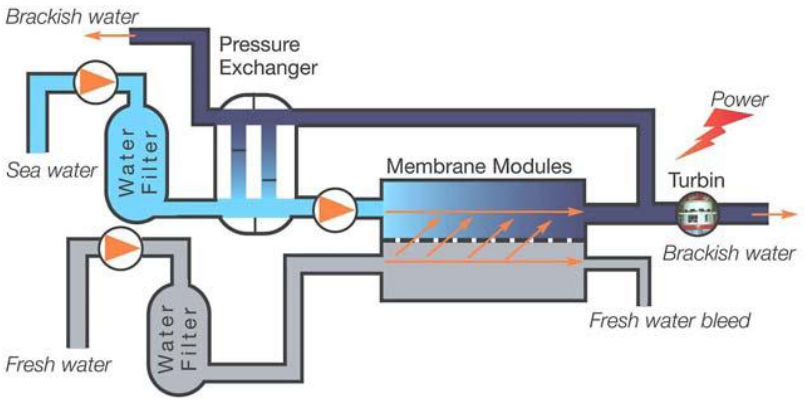
به منظور تجاری سازی توان اسمزی، انعطاف پذیری و سازگاری نیروگاههای سیکل باز با شرایط واقعی، و مقایسه بازده و تولید انرژی تحت شرایط مکانی و موقعیت نصب نیروگاه، طرحهای مختلف مورد ارزیابی قرارگرفته است[۱۰،۱۱]. احداث نیروگاه می‌تواند در سطح دریا، زیر دریا و یا کمی پایین تر از سطح دریا، انجام پذیرد. در فاصله چند متر پایین‌تر از سطح دریا امکان کاهش پمپها به حداقل و دستیابی به بازده ۸۱٪ وجود دارد. بنابراین بازده کلی در این حالت نه تنها به طور مشخصی بالاتر از موقعیت سطح دریاست بلکه از شرایط نصب در زیر دریا با توجه به مشکلات احداث آن نیز بهتر است[۹].

شکل(۳) شماتیکی از یک نیروگاه سیکل باز PRO بر روی سطح دریا را نشان می‌دهد که توسط شرکت استات‌کرافت در نروژ اجرا شده است. در این نیروگاه، آب شیرین یا آب با غلظت نمک پایین به عنوان خوراک (آب تغذیه) پس از تصفیه شدن وارد محفظه غشا می شود و در آنجا، ۸۰–۹۰٪ آب با غلظت نمک پایین از طریق فرایند اسمزی بواسطه غشا به داخل آب پرفشار و شور دریا منتقل می‌شود. فرایند اسمز، دبی حجمی آب پرفشار را افزایش داده و این اساس انتقال انرژی در فرایند تولید توان است. این فرایند نیازمند غشاهای مناسب بویژه انتقال جریان آب بالا و نفوذ ناپذیری مناسب نمک است. آب شور دریا ابتدا فیلتر شده و بعد از عبور از مبدل فشار و افزایش فشار آن وارد محفظه غشا شده و در آنجا بواسطه نفوذ آب تمیز از سمت دیگر غشا علاوه بر رقیق شدن، فشارش بیشتر افزایش می‌یابد. دبی حجمی آب شور حدود دو برابر آب شیرین است.

آب شور رقیق شده دریا سپس به دو قسمت تقسیم می‌شود. یک–سوم ظرفیت جریان آب دریا وارد توربین آبی برای تولید توان می‌شود و دو–سوم باقیمانده به یک مبادله کن فشار برای بازیابی انرژی و افزایش فشار آب شور ورودی به سیستم بازگشت داده می‌شود. در رنج فشار کاری بهینه بین ۱۱ تا ۱۵ بار، معادل ارتفاع آب ۱۰۰ تا ۱۴۵ متر در یک نیروگاه آبی، قادر به تولید ۱ MW بر m^3/s آب تمیز است. جریان آب تمیز در فشار محیط کار می‌کند.

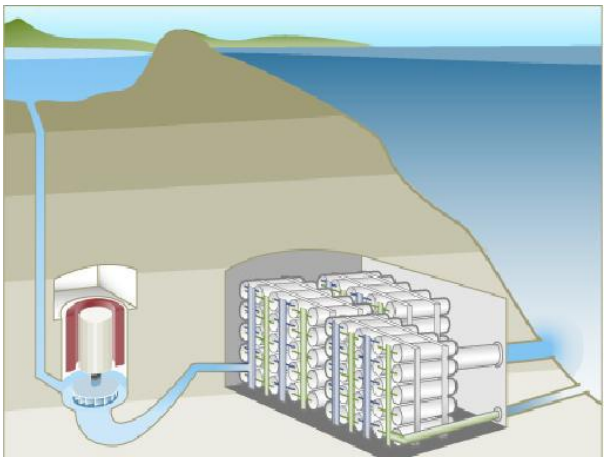
عملیات فیلتراسیون و آماده سازی آب به کیفیت آب بستگی دارد. از طرفی بدلیل عدم تصفیه کامل و ورود ذرات به محفظه غشا و رشد گیاهان بر روی غشا، تمیزکاری، رسوبزدایی و ضدعفونی دوره‌ای باید در نظر گرفته شود. این موارد برای ثابت نگهداشتن عملکرد غشا برای سالهای طولانی بسیار حائز اهمیت است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]



شکل۳: شماتیکی از مدل نیروگاه بهینه تولید توان به روشPRO طراحی و اجرا شده توسط شرکت استات کرافت و افتتاح شده در نروژ

شکل(۴) شماتیک یک نیروگاه اسمزی در زیر دریا را نشان می‌دهد. در این نیروگاه استفاده از نیروی وزن آب به جای مبدل فشار باعث کاهش پمپهای مربوط به ارسال آب دریا شده و بازده نسبت به نیروگاه در سطح دریا به طور چشمگیری افزایش می‌یابد.

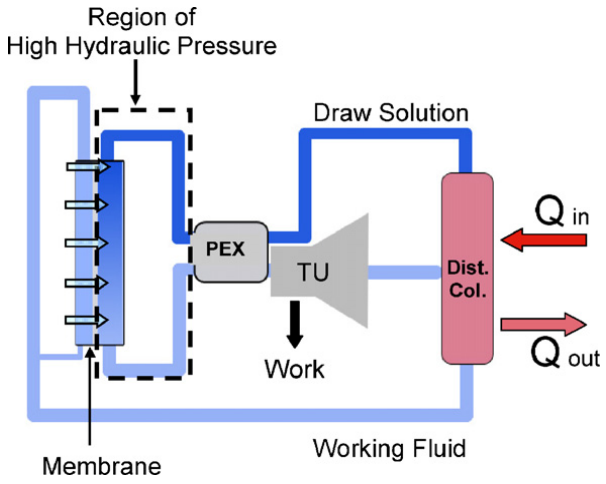


شکل٤: شماتیک یک نیروگاه اسمزی در زیر دریا

سیستمهای PRO سیکل بسته در واقع برای تبدیل حرارت پایین به کار مکانیکی طراحی شده‌انـد. در ایـن روش، گرمـای لازم بـرای تبخیر از یک منبع حرارتی خارجی بدست می‌آید. به این سیستمها، موتور گرمایی اسمزی نیز گفته می‌شود. مـک جینـیس و همکـاران [۷]، مدلی از موتور گرمایی اسمزی را طراحی نمودند که در آن به جای کلرید سدیم (نمک معمولی) از نمـک آمونیـاک اسـتفاده شـده است. این محلول دارای خواص مطلوبی می‌باشد. از جمله حلالیت بالای نمک‌های آمونیاک، وزن مولکولی پایین و نفوذپذیری بالا، که منجر به فشار اسمزی بالا و متعادل کردن تاثیرات قطبش غلظت خارجی مـی‌شـود. همچنـین پـایین بـودن نقطـه جـوش آمونیـاک و دی‌اکسیدکربن باعث تبخیر آنها به جای تبخیر خود آب در انتقال گرمای اندک می‌شود. در این سیستم، محلول غلیظ (محلول کشـنده)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

نمک‌های آمونیاک است. محلول رقیق (سیال کاری[1]) نیز آب با غلظت آمونیاک-دی‌اکسیدکربن کمتر ppm ۱ می‌باشد. شکل (۵) شماتیک این سیستم را نشان می‌دهد.



شکل ۵: موتور گرمایی اسمزی با محلول آمونیاک-دی‌اکسید کربن برای تولید توان به روش PRO

محلول رقیق پس از عبور از غشای نیمه تراوا باعث افزایش بیشتر فشار محلول نمک آمونیاک پرفشار و غلیظ شده، و پس از عبور از یک مبدل فشار وارد توربین شده و کار انجام می‌دهد.

مدلسازی غشای نیمه تراوا

همانگونه که اشاره شد، بازده نیروگاه فشار اسمزی وابستگی شدید به غشای نیمه تراوای آن دارد. لذا مطالعات فراوانی برای بهبود و مدلسازی این غشاها صورت گرفته است. در این میان مدل ارائه شده در مرجع [۳]، برای پیش‌بینی چگالی توان به روش PRO برای مشخصه های مختلف غشاء، ساختار غشاهای مختلف، اندازه ها و ترکیب های مختلف ارائه شده است که با داده‌های تجربی همخوانی مناسبی دارد. روابط حاکم بر این مدل و نتایج حاصله از آن در ادامه آمده‌است.

معادلات حاکم

معادله کلی جریان آب عبوری از غشا در روشهای FO، RO و PRO از رابطه (۳) بدست می‌آید.

$$J_w = A(\Delta\pi - \Delta P) \qquad (۳)$$

که در آن J_w فلوی آب و A ضریب نفوذ پذیری آب از غشا می‌باشد. برای FO، ΔP صفر است. برای RO، $\Delta P > \Delta\pi$ و برای PRO، $\Delta P < \Delta\pi$ است. مسیر جریان آب نفوذی برای سه حالت گفته شده در شکل (۱) نشان داده شده است. موقعیت قرارگیری

[1] Working Fluid

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

لایه متراکم (لایه فعال[1]) در غشای نامتقارن برای FO در سمت محلول غلیظ آب و نمک قرار دارد و در RO و PRO، لایه متراکم با محلول تمیز در ارتباط است.

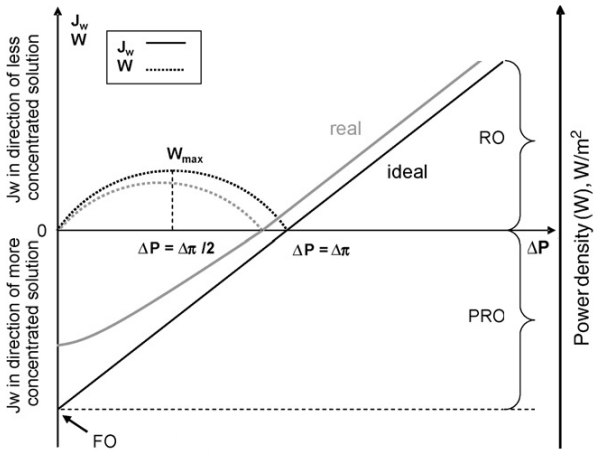
در PRO، توان تولیدی در واحد سطح غشا (یعنی چگالی توان)، برابر حاصلضرب جریان جرمی آب و اختلاف فشار هیدرولیکی می‌باشد:

$$W = J_w \Delta P = A(\Delta\pi - \Delta P)\Delta P \qquad (۴)$$

با مشتق گیری نسبت به ΔP، می‌توان نشان داد که بیشترین چگالی توان (توان ویژه) در $\Delta P = \Delta\pi/2$ بدست می‌آید. با جایگذاری ΔP در رابطه (۴) داریم:

$$W_{\max} = \frac{A(\Delta\pi)^2}{4} \qquad (۵)$$

J_w به عنوان تابعی از ΔP در شکل (۶) برای شرایط ایده‌آل و واقعی نشان داده شده است. نقطه FO، ناحیه PRO و RO در شکل نشان داده شده است. نقطه معکوس شدن جهت جریان در $\Delta\pi = \Delta P$ اتفاق می‌افتد. شکل(۶) همچنین $W_{\max}$ و W در ناحیه PRO نشان می‌دهد.



شکل ٦: اندازه و جهت جریان آب عبوری از غشا *(Jw)* و اندازه توان ویژه *(W)* در روشهای FO، PRO و RO

[1] Active layer

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

الف) نفوذپذیری نمک

مقدار کمی نمک بدلیل اختلاف غلظت دو طرف غشا به درون غشا نفوذ می‌کند که به آن نفوذ معکوس نمک گفته می شود. غشاهای مورد استفاده در فرایندهای اسمزی به نفوذ معکوس نمک حساس هستند. نفوذ معکوس نمک اختلاف فشار اسمزی موثر از طریق غشا را کاهش می‌دهد. ضریب نفوذ پذیری نمک (B) از یک غشای نیمه تراوا از نتایج تجربی برای RO که به رابطه زیر داده می‌شود بدست می‌آید:

$$B = \frac{A(1-R)(\Delta P - \Delta \pi)}{R} \qquad (۶)$$

که در آن R پس زنی نمک به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R = 1 - \frac{C_P}{C_F} \qquad (۷)$$

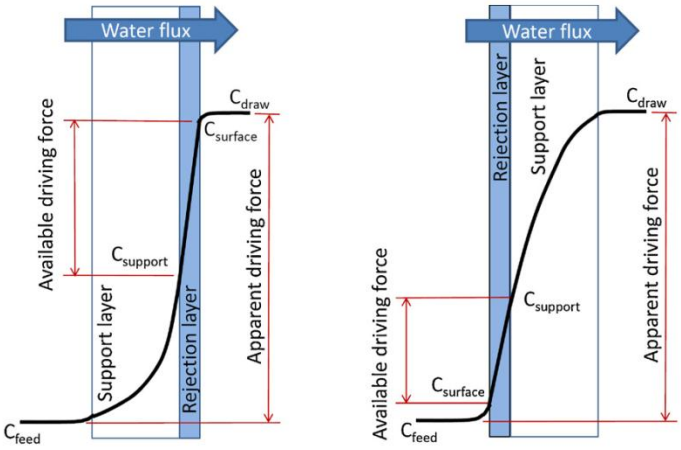
که در آن C_P غلظت نمک در طرف محلول تمیز (آب نفوذی) و C_F غلظت نمک در طرف خوراک (آب دریا) می‌باشد.

ب) قطبش غلظتی

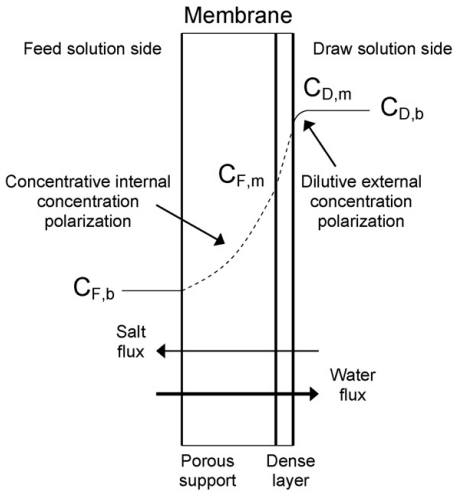
یکی دیگر از پدیده‌های بسیار موثر در کاهش اختلاف فشار اسمزی موثر غشا، قطبش غلظتی است. قطبش غلظتی به انباشت و رسوب ذرات محلول در سطح تماس غشا گفته می‌شود که باعث کاهش میزان نفوذپذیری غشا و کاهش شارش آب می‌شود. غشاهای مورد استفاده در فرایندهای اسمزی اکثرا نامتقارن می‌باشند. غشای نامتقارن، دارای یک لایه متراکم (لایه فعال) با ضخامت نازک است که بر روی صفحه نگهدارنده متخلخل قرار دارد. لذا قطبش غلظتی خارجی روی لایه متراکم و از داخل در روی لایه نگهدارنده اتفاق می‌افتد. محل قرارگرفتن لایه فعال از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شکل(۷) مدلسازی قطبش غلظت داخلی را نشان می‌دهد[۱۳]. در حالتی که لایه فعال با آب خوراک ارتباط دارد (شکل ۵–الف) نیرو محرکه در دسترس[1] (اختلاف غلظت دو طرف لایه متراکم) کمتر از زمانی است که صفحه متخلخل نگهدارنده با آب خوراک ارتباط دارد (شکل ۵–ب). لذا در کاربردهای PRO، لایه متراکم در سمت محلول غلیظ و لایه نگهدارنده در سمت آب تغذیه (آب تمیز) قرار دارد. شکل(۸) نمایش یک غشای نامتقارن در روش PRO با قطبش غلظت داخلی و خارجی و نمایش جهت جریان آب و نمک را نشان می‌دهد[۳].

[1] Available Driving Force

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]



شکل ۷: مدلسازی غشای نیمه تراوا. (الف) لایه فعال در تماس با خوراک (ب) صفحه نگهدارنده در تماس با خوراک



شکل ۸: نمایش یک غشای نامتقارن در روش PRO با قطبش غلظت داخلی و خارجی و نمایش جهت جریان و نمک

این آرایش برای اطمینان از ایجاد فشار هیدرولیکی در طرف آب غلیظ توسط غشا، الزامی است. در این آرایش قطبش غلظتی خارجی و داخلی اتفاق می‌افتد. قطبش غلظت خارجی از تئوری فیلم[۴] بدست می آید. ضریب قطبش غلظتی خارجی $\left(\pi_{D,m}/\pi_{D,b}\right)$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\pi_{D,m}}{\pi_{D,b}} = \exp\left(-\frac{J_w}{k}\right) \qquad (۸)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

که در آن $\pi_{D,m}$ فشار اسمزی در سطح غشا و $\pi_{D,m}$ فشار اسمزی کل محلول غلیظ است و k ضریب انتقال جرم در محلول غلیظ از رابطه (۹) بدست می‌آید.

$$k = \frac{Sh.D}{d_h} \qquad (۹)$$

که در آن D ضریب نفوذ ذرات حل شده در محلول غلیظ و d_h قطر هیدرولیکی کانال جریان است. با توجه به اینکه جریان در کانالها دارای رینولدز پایین (Re<50) است لذا عدد شروود (Sh) از رابطه زیر تخمین زده می‌شود:

$$Sh = 0.2\,\mathrm{Re}^{0.27}\,Sc^{0.40} \qquad (۱۰)$$

که در آن Sc عدد اشمیت است.

لی و همکاران [۵] مدلی برای قطبش غلظت داخلی در PRO بیان کردند که در آن J_w از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$J_w = A\left[\pi_{D,m}\frac{1-\frac{C_{F,b}}{C_{D,m}}\exp(J_w K)}{1+\frac{B}{J_w}[\exp(J_w K)-1} - \Delta P\right] \qquad (۱۱)$$

در این رابطه K مقاومت ویژه در مقابل نفوذ ذرات حل شده به لایه متخلخل است و از رابطه (۱۲) بدست می آید.

$$K = \frac{t\tau}{D\varepsilon} \qquad (۱۲)$$

که در آن t، τ و ε به ترتیب ضخامت، انحنا و ضریب تخلخل لایه متخلخل است.

ج) جریان جرمی آب در PRO

به منظور بررسی تاثیر پلاریزاسیون غلظت خارجی و داخلی روی جریان آب در PRO، معادله (۱۱) با فرض $\frac{C_{F,b}}{C_{D,m}} = \frac{\pi_{F,b}}{\pi_{D,m}}$ و جاگذاری $\pi_{D,m}$ از معادله (۸)، را می‌توان به صورت زیر بهبود بخشید.

$$J_w = A\left[\pi_{D,b}\exp\left(-\frac{J_w}{k}\right)\frac{1-\frac{\pi_{F,b}}{\pi_{D,m}}\exp(J_w K)\exp\left(\frac{J_w}{k}\right)}{1+\frac{B}{J_w}[\exp(J_w K)-1]} - \Delta P\right] \qquad (۱۳)$$

پارامترهای لازم برای محاسبه جریان آب از نتایج تجربی روشهای FO و RO و محاسبات اشاره شده بدست می‌آید. مقدار K از نتایج FO و آب یونیزه شده به عنوان خوراک و استفاده از معادله (۱۱) به صورت زیر بازسازی می‌شود:

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

$$K = \frac{1}{J_w} \ln \left(\frac{A\pi_{D,b} \exp\left(-\frac{J_w}{k}\right) - J_w}{B} + 1 \right) \qquad (۱۴)$$

د) چگالی توان یا توان ویژه در PRO

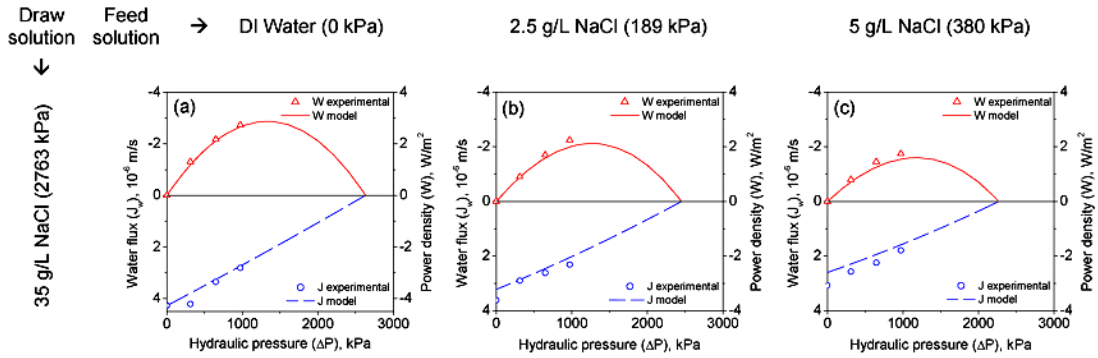
چگالی توان به صورت با استفاده از معادلات (۴) و (۱۳) به صورت معادله (۱۵) درمی‌آید.

$$W = A \left[\pi_{D,b} \exp\left(-\frac{J_w}{k}\right) \frac{1 - \frac{\pi_{F,b}}{\pi_{D,m}} \exp(J_w K) \exp\left(\frac{J_w}{k}\right)}{1 + \frac{B}{J_w}[\exp(J_w K) - 1]} - \Delta P \right] \Delta P \qquad (۱۵)$$

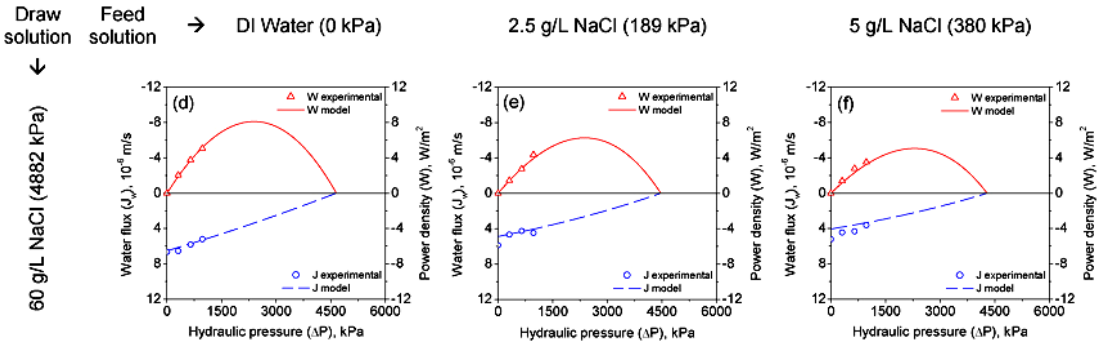
نتیجه گیری

در شکل (۹)، منحنی های PRO برای جریان آب و چگالی توان (توان ویژه) به عنوان تابعی از فشار هیدرولیکی برای سه نوع محلول غلیظ با غلظتهای مختلف در مقایسه با نتایج تجربی [۳] نشان داده شده است. بیشترین مقدار اختلاف فشار هیدرولیک قابل حصول در شرایط تجربی ۹۷۰ kPa می‌باشد و فشار بیشتر از آن باعث سوراخ شدن غشا می‌شود. محلولهای غلیظ که بجای آب دریا شبیه سازی شده اند دارای ۳۵g/L و ۶۰g/L نمک (NaCl) در نظر گرفته شده است. مقادیر جریان آب و توان ویژه به ترتیب در محورهای اول و دوم y نشان داده شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]



(الف)



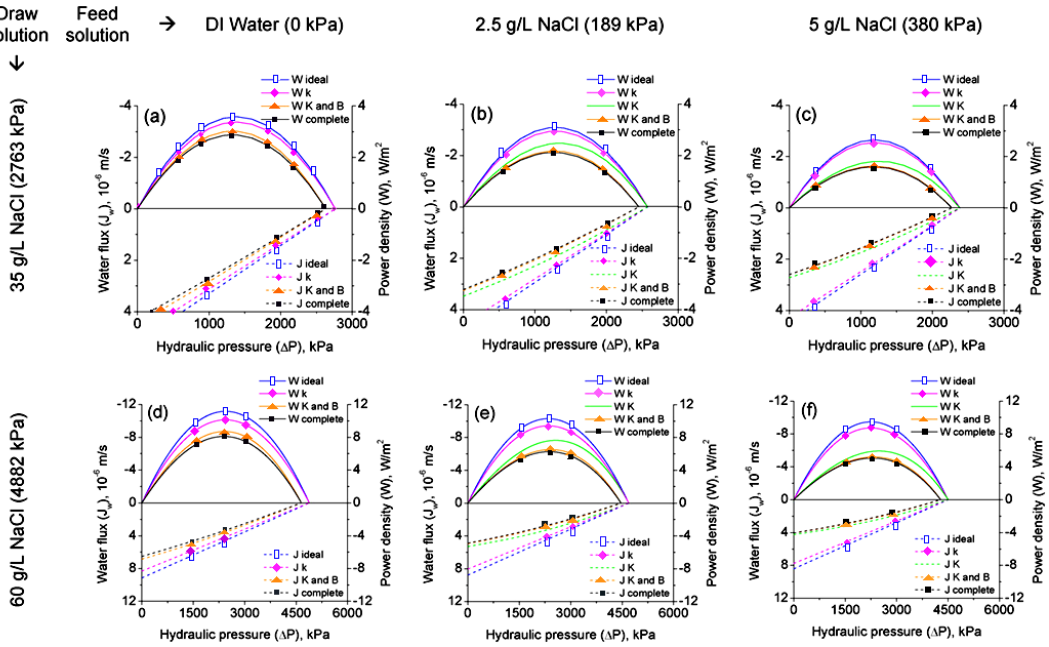
(ب)

شکل۹: مقایسه نتایج مدل با نتایج تجربی برای جریان آب عبوری از غشا (J_w) و توان ویژه (W) به صورت تابعی از فشار هیدرولیکی کاری ΔP . جریان غلظت آب شور در شکل (الف) ۳۵g/L_{NaCl} (۲۷۶۳ kPa) و شکل (ب) ۶۰g/L_{NaCl} (۴۸۸۲ kPa)

در هر دو مورد افزایش فشار هیدرولیکی باعث کاهش جریان آب عبوری از غشا تا رسیدن به صفر و سپس معکوس شدن جریان می‌شود. ماکزیمم چگالی توان زمانی اتفاق می افتد که فشار هیدرولیکی تقریبا نصف فشار اسمزی است. به عنوان مثال در محلول با غلظت ۳۵g/L نمک (شکل ۵ الف) و خوراک ۲/۵g/L نمک، نقطه جریان معکوس در فشار ۲۴۵۰kpa و ماکزیمم چگالی توان در ۱۲۸۰kpa اتفاق می افتد. وقتی غلظت خوراک افزایش می‌یابد، جریان آب عبوری و چگالی توان کاهش می یابد. این امر بدلیل کاهش فشار اسمزی($\Delta \pi$) و به علت افزایش پلاریزاسیون غلیظ سازی و افزایش عبور نمک است. با مقایسه شکلهای ۹- الف و ۹- ب، مشاهده می شود که هر چه غلظت نمک در محلول غلیظ (مثل آب دریا) بیشتر باشد، یا اختلاف غلظت دو طرف غشا افزایش یابد، چگالی توان و جریان آب عبوری به شدت افزایش می یابد، که این بدلیل افزایش نیروی رانش است. ماکزیمم توان ویژه بین ۱/۶ w/m^2 تا ۲/۹ برای غلظت ۳۵g/L و بین ۵/۱ w/m^2 تا ۸/۱ برای غلظت ۶۰g/L می‌باشد. مقایسه این نتایج با نتایج حاصل از مدل‌های [۱و۸]، اختلاف ۴ w/m^2 را نشان می‌دهد که حاکی از توسعه موفق این مدل نسبت به روشهای قبلی می باشد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

همچنین تاثیر پلاریزاسیون غلیظ سازی خارجی و داخلی و عبور نمک بر جریان آب عبوری از غشا و تـوان ویـژه در شـکل (۱۰) نشان داده شده است. در شرایط ایده‌آل یعنی بدون عوامل کاهش توان (بدون پلاریزاسیون غلیظ‌سازی خارجی و داخلی و عبور نمک از غشا) بیشترین توان و بیشترین جریان آب عبوری از غشا را داریم. افزایش هر یک از اثرات نظیر پلاریزاسـیون غلـیظ سـازی خـارجی (W_k)، پلاریزاسیون غلیظ سازی داخلی(W_K)، و تاثیر همزمـان پلاریزاسـیون داخلـی و عبـور نمـک WB,K (B برابـر۷-۱۰×۱/۱۱ استفاده شده است) و در نهایت تاثیر همه موارد به ترتیب باعث کاهش بیشتر توان و جریان آب عبـوری از غشـا مـی شـود. همچنـین چنانچه اشاره شد افزایش غلظت نمک سیال غلیظ (آب دریا) به ترتیب باعث کاهش و افزایش توان ویژه و جریان آب عبوری می‌شود.



شکل ۱۰: نتایج مدل برای جریان آب عبوری از غشا (J_w) و توان ویژه (W) به صورت تابعی از فشار هیدرولیکی کاری ΔP برای غلظت‌های مختلف جریان خوراک و آب شور

در ایران با توجه به غلظت بالای نمک دریاچه ارومیه، (غلظت نمک ۲۸۰ گرم بر لیتر در تابستان و غلظت نمک ۲۶۰ گرم بر لیتر در زمستان) و با توجه به اینکه بسیاری از رودخانه های منتهی به این دریاچه، دارای آب شیرین می باشد، پتانسیل عظیمی از انـرژی را در بر دارد. بنابراین دریاچه ارومیه محل ایده‌آلی برای تولید توان اسمزی می باشد. همچنین خلیج فـارس و دریـای عمـان بـه ترتیـب دارای غلظت نمک در حدود ۴۸ گرم بر لیتر و۳۷ گرم بر لیتر می‌باشد. با در دسترس بودن آب شیرین در کناره ی خلیج فارس و دریای عمان پتانسیل مناسب برای استفاده از این روش در جنوب کشور با پیشرفت تکنولوژی ساخت غشاها وجـود دارد. دریاچـه خـزر بـا دارا بودن غلظت نمک در حدود ۱۳ گرم بر لیتر، دریای مناسبی برای استفاده از این روش نمی‌باشد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

منابع

[1] Aaberg R.J. 2003. “A New and Powerful Renewable Energy Source? Osmotic Power”, PP. 48–50.

[2] Achilli A. and Amy E. C. 2010. “Pressure Retarded Osmosis: From the Vision of Sidney Loeb to the First Prototype Installation – Review”, Desalination, Vol. 261, PP. 205–211.

[3] Achilli A. Tzahi Y. C. Amy E. C. 2009. “Power Generation with Pressure Retarded Osmosis: An Experimental and Theoretical Investigation”, Journal of Membrane Science, Vol. 343, PP. 42–52.

[4] Elimelech M. and 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. 223–241.

[5] Lee K.L. Baker R.W. Lonsdale H.K. 1981. “Membrane for Power Generation by Pressure Retarded Osmosis”, Journal of Membrane Science, Vol. 8 PP. 141–171.

[6] McCutcheon J.R. and Elimelech M. 2008. “Influence of Membrane Support Layer Hydrophobicity on Water Flux in Osmotically Driven Membrane Processes”, Journal of Membrane Science, Vol. 318, PP. 458–466.

[7] McGinnis R. L. McCutcheon R.J. Elimelech M. 2007. “A Novel Ammonia–Carbon Dioxide Osmotic Heat Engine for Power Generation”, Journal of Membrane Science, Vol. 305, PP.13–19.

[8] Pattle R.E. 1954. “Production of Electric Power by Mixing Fresh and Salt Water in the Hydroelectric Pile”, Nature, PP. 174-260.

[9] Skilhagen S.E. Dugstad J.E. Aaberg R.J. 2008. "Osmotic Power—Power Production Based on the Osmotic Pressure Difference between Waters with Varying Salt Gradients", Desalination, Vol. 220, PP. 476–482.

[10] Thorsen T. and Holt T. 2009 “Method and System for Performing Maintenance on A Membrane Used for Pressure Retarded Osmosis”, Patent Application Publication, Pub. No. US 0008330 A1.

[11] Thorsen T. and Holt T. 2009. “The Potential for Power Production from Salinity Gradients by Pressure Retarded Osmosis”, Journal of Membrane Science, Vol. 335, PP. 103–110.

[12] Venables M. 2008. "Power Osmosis", Engineering & Technology, PP. 50-52.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]

[13] Xu Y. Peng X. Tang C. Y. Shiang Fu Q. Nie S. 2010. "Effect of Draw Solution Concentration and Operating Conditions on Forward Osmosis and Pressure Retarded Osmosis Performance in a Spiral Wound Module", Journal of Membrane Science, Vol. 348, PP. 298–309.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-19]