



An Overview of Energy Recovery Devices in Seawater Desalination by Reverse Osmosis Method

K. Salehi^{1*}, N. Esfandiari², Kh. Shekoohi³, A. H. Haghghi⁴

1- Assistant Professor of Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering, Darab Branch, Islamic Azad University, Darab, Iran

2- Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran

3- Assistant Professor of Chemistry, Department of Chemistry, Darab Branch, Islamic Azad University, Darab, Iran

4- Assistant Professor of Polymer Engineering, Department of Polymer Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

Email: kobra.salehi@iau.ac.ir

Abstract

Desalination process of seawater by reverse osmosis method, has attracted more attention in recent years, due to its high efficiency, and about 62 percent of seawater is treated by this method. In this process energy recovery devices play an important role in reducing energy consumption and process costs, because on the one hand the energy consumption of high pressure pumps for feeding reverse osmosis membrane is high, and on the other hand 40 percent of feed water is treated with membrane and 60 percent is discharged as a high-pressure waste, which releases a lot of energy. The energy recovery device converts this hydraulic energy of the effluent into mechanical energy and transfers it to the feed pump as a shaft aid or uses it independently to transfer a part of the feed. The purpose of this research is to study energy recovery devices and compare them with each other to select a suitable energy recovery system.

Received: 10 September 2021

Accepted: 27 December 2021

Page Number: 74-84

Keywords:

Reverse Osmosis,
Desalination,
Seawater,
Energy Recovery System

Please Cite this Article Using:

Salehi, K., Esfandiari, N., Shekoohi, Kh., Haghghi, A. H., "An Overview of Energy Recovery Devices in Seawater Desalination by Reverse Osmosis Method", Iranian Chemical Engineering Journal, Vol. 21, No. 123, pp. 74-84, In Persian, (2022).



مروری بر دستگاه‌های بازیافت انرژی در شیرین‌سازی آب دریا به روش اسمز معکوس

کبری صالحی^{۱*}، نادیا اسفندیاری^۲، خدیجه شکوهی^۳، امیرحسین حقیقی^۴

۱- استادیار مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، واحد داراب، دانشگاه آزاد اسلامی، داراب، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی شیمی، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

۳- استادیار شیمی، گروه شیمی، واحد داراب، دانشگاه آزاد اسلامی، داراب، ایران

۴- استادیار مهندسی پلیمر، گروه مهندسی پلیمر، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

پیام نگار: kobra.salehi@iau.ac.ir

چکیده

شیرین‌سازی آب دریا به روش اسمز معکوس به دلیل کارایی بالا در سال‌های اخیر طرفداران بسیاری یافته است و قسمت زیادی از آب دریا با این روش تصفیه می‌شود. در این فرایند، دستگاه‌های بازیافت انرژی نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های فرایند دارند؛ زیرا از یک سو انرژی مصرفی پمپ‌های فشار بالای تغذیه غشای اسمز معکوس زیاد است و از سوی دیگر ۴۰ درصد از آب تغذیه به وسیله غشاها تصفیه و ۶۰ درصد آن به صورت پساب با فشار بالا تخلیه می‌شود که انرژی زیادی را با خود خارج می‌کند. دستگاه بازیافت انرژی هیدرولیک پساب را به انرژی مکانیکی تبدیل و به عنوان کمک‌محور به پمپ تغذیه منتقل می‌کند یا به صورت مستقل برای انتقال بخشی از خوراک استفاده می‌کند. هدف از این پژوهش مطالعه دستگاه‌های بازیافت انرژی و مقایسه آن‌ها با یکدیگر برای انتخاب یک سیستم مناسب بازیافت انرژی است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۶

شماره صفحات: ۷۴ تا ۸۴

کلیدواژه‌ها:

اسمز معکوس،

شیرین‌سازی،

آب دریا،

دستگاه بازیافت انرژی

* داراب، دانشگاه آزاد اسلامی - واحد داراب، گروه مهندسی شیمی

استناد به مقاله:

صالحی، ک.، اسفندیاری، ن.، شکوهی، خ.، حقیقی، ا. ح.، "مروری بر دستگاه‌های بازیافت انرژی در شیرین‌سازی آب دریا به روش اسمز معکوس"، نشریه مهندسی شیمی ایران، سال بیست‌ویکم، شماره ۱۲۳، صص. ۷۴-۸۴، (۱۴۰۱).

۱. مقدمه

در حالی که ۷۲ درصد کره زمین را آب پوشانده، وجود نمک و املاح و مواد معدنی در ۹۲ درصد آن باعث شده تا بیشتر نقاط کره زمین با کمبود آب شیرین مواجه باشد؛ کمبود آب آشامیدنی به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، توجه محققان را به‌سوی یافتن راه حلی برای این مشکل جلب کرده است. شیرین‌سازی آب و حذف املاح موجود در آب‌های شور یکی از راهکارهای مناسب برای استفاده از آب دریا در مناطقی است که با خشک‌سالی و کمبود آب شرب مواجه هستند. در منطقه خاورمیانه به‌علت شرایط خاص آب و هوایی، رشد جمعیت و دسترسی به آب دریا، مقوله شیرین‌سازی آب دریا بیشتر مطرح است. در جدول (۱) میزان شیرین‌سازی آب دریا در سال ۲۰۰۲ و آنچه برای سال ۲۰۲۵ در منطقه خاورمیانه پیش‌بینی شده، آمده است [۱].

فرایند تولید آب شیرین از آب شور به سه دسته تقسیم می‌شود:

۱. فرایند نمک‌زدایی به روش تغییر فاز یا نمک‌زدایی گرمایی که یکی از روش‌های متداول است و در آن آب با استفاده از گرما از فاز مایع به فاز بخار تغییر حالت می‌دهد و از نو با فرایند چگالش، به مایع تبدیل می‌شود. در سال‌های اخیر مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌های زیادی در این باره انجام گرفته است [۶-۲]. در طبیعت در فرایند تولید باران، نمک‌زدایی به‌روش تغییر فاز رخ می‌دهد و این فرایند منبع اصلی آب شیرین در سیاره زمین به‌شمار می‌رود. باید توجه داشت که در فرایندهای نمک‌زدایی گرمایی، مقدار زیادی انرژی مورد نیاز

است. از این نوع فرایند می‌توان فلش چندمرحله‌ای (MSF)، تقطیر چندمرحله‌ای (MEB)، تراکم بخار (VC) روش‌های مکانیکی (MVC) و حرارتی (TVC)، تقطیر خورشیدی، تقطیر خورشیدی مرسوم و تقطیر خورشیدی ویژه را نام برد [۷].

۲. روش‌های تکمیلی مانند روش انجماد و بلورینگی که بر اساس تغییر فاز مایع به جامد و برعکس انجام می‌شود که در آن آب شور منجمد می‌شود و مولکول‌های آب در ساختار یخ شرکت می‌کند؛ اما نمک و مواد معدنی موجود در آن در شوره منجمد نشده باقی می‌ماند، هم‌چنین روش تولید هیدرات در این دسته قرار می‌گیرد. این روش نیز مانند روش انجماد است؛ اما انجماد در دمای بالاتری اتفاق می‌افتد و در نتیجه انرژی کمتری مصرف می‌شود [۱۰-۸].

۳. روش‌های غشایی که شامل روش‌های اسمز مستقیم (FO) [۱۱]، الکترودیالیز (ED) و اسمز معکوس (RO) [۷] است.

اسمز مستقیم (FO) یک فناوری مبتنی بر فرایند است که بر خلاف RO، به‌جای فشار هیدرولیک، از گرادیان فشار اسمزی استفاده می‌کند. در FO، یک محلول با غلظت بسیار بالا از یک نمک که «محلول جاذب» نامیده می‌شود، برای تولید یک گرادیان فشار اسمزی در سراسر یک غشای نیمه‌تراوا استفاده می‌شود که در این صورت منجر به انتقال مولکول‌های آب از خوراک آب شور با غلظت کمتر به محلول جاذب بسیار غلیظ می‌شود [۱۱].

جدول ۱. پیش‌بینی افزایش ظرفیت شیرین‌سازی آب دریا [۱].

Table 1. Predicted increase in seawater desalination capacity [1].

Country	2009	2025
	Desalination Production (MCM)	Desalination Production (MCM)
Bahrain	123	162
Kuwait	589	750
Oman	68	115
Qatar	194	253
Saudi Arabia	1063	1690
UAE	813	1357

می‌گذارد. به‌عنوان مثال در تحقیقاتی با افزایش دما از ۱۵ به ۴۰ درجه سانتیگراد، مصرف انرژی ویژه از 0.5 kW.h/m^3 به 0.27 kW.h/m^3 کاهش داشت. در آب با غلظت بالای نمک مثل آب دریا، افزایش دما تا ۳۰ درجه سانتیگراد باعث کاهش مصرف انرژی ویژه و بعد از آن باعث افزایش مصرف انرژی ویژه شد [۲۲]. عمل کرد تجهیزات در شدت جریان خوراک بالا نشان داد که انرژی کل لازم در فرایند نمک‌زدایی با اسمز معکوس، هنگامی که از تجهیزات بازیافت انرژی استفاده شود، کاهش می‌یابد، به‌علاوه افزایش شدت جریان خوراک باعث افزایش بازیابی آب شیرین می‌شود [۲۳].

برای دستیابی به سطوح فشار مورد نیاز برای فرایند، مقدار زیادی انرژی مصرف می‌شود که بیشتر این انرژی که به‌وسیله پمپ‌های فشار برای غلبه بر فشار اسمزی آب تغذیه غشای تصفیه تأمین می‌شود [۲۵] به‌همراه آب نمک غلیظ یا پساب که در محیط تخلیه می‌شود، هدر می‌رود؛ زیرا در سیستم نمک‌زدایی آب دریا، ۴۰ درصد از آب دریا می‌تواند از غشای اسمز معکوس نفوذ کند تا آب شیرین به دست آید؛ اما ۶۰ درصد آب شور باقی‌مانده یا پساب، نمی‌تواند از غشای اسمز معکوس عبور کند و اگر به‌طور مستقیم از طریق سوپاپ اطمینان فشار تخلیه شود، میزان بالایی از انرژی فشاری هدر خواهد رفت. [۲۶ و ۲۷]. بنابراین باید راهی را جستجو کرد که امکان استفاده مجدد از آب نمک با فشار بالا را فراهم آورد؛ زیرا دفع آب نمک تحت فشار بالا یک کاستی و نقص بزرگ برای سیستم محسوب می‌شود و استفاده از یک فرایند کارآمد «بازیابی انرژی» را ضروری می‌کند. عمل کرد اصلی یک دستگاه بازیابی انرژی، بهبود بهره‌وری انرژی با استفاده از انرژی مصرف‌شده از پسماند و بازگرداندن آن به خوراک است [۲۸ و ۲۹]. در این مقاله دستگاه‌های بازیافت انرژی در فرایند اسمز معکوس بررسی و مقایسه می‌شود.

۲. روش‌های مرسوم بازیافت انرژی در فرایند اسمز معکوس

دستگاه‌های بازیافت انرژی از پساب خروجی بخش غشایی، به دو نوع گریز از مرکز و جابه‌جایی مثبت تقسیم‌بندی می‌شوند. نوع گریز از مرکز که انرژی هیدرولیکی را به انرژی مکانیکی گریز از مرکز تبدیل می‌کند، سپس به انرژی هیدرولیکی برمی‌گرداند، عمدتاً

در سیستم‌های الکترودیالیز، آب شور، حاوی نمک‌های غیرمحلول است که در یون‌های باردار مثبت و منفی تفکیک می‌شوند. یون‌های مثبت (کاتیون)، به سمت الکتروود منفی (کاتد) حرکت و یون‌های منفی (آنیون) به سمت الکتروود مثبت (آند) واقع در فرایندها حرکت می‌کنند [۱۳-۱۲، ۷].

از بین فرایندهای غشایی، استفاده از روش اسمز معکوس بسیار پر طرفدار است و در سال‌های اخیر، بررسی‌های آزمایشگاهی، مدل‌سازی و شبیه‌سازی بسیاری بر روی آن انجام گرفته است [۱۴-۱۸] و نزدیک به ۶۰ درصد شیرین‌سازی‌های آب دریا به‌وسیله اسمز معکوس انجام می‌شود [۱۹].

نمک‌زدایی آب دریا به‌روش اسمز معکوس به ویژگی‌های غشاهای نیمه‌تراوا وابسته است. از این فرایندها، برای تفکیک آب از محلول حاوی نمک به‌وسیله اعمال فشار قوی استفاده می‌شود و آب شیرین می‌تواند تحت اثر فشار اسمزی از غشا عبور کند. روش اسمز معکوس به‌دلیل کارایی بالا به‌سرعت و به‌طور وسیع در سال‌های اخیر در تصفیه صنعتی آب دریا و دیگر صنایع به کار رفته است. بخش‌های اصلی سیستم اسمز معکوس شامل این بخش هاست: پیش‌تصفیه، بخش غشا، پمپ با فشار بالا، واحد بازیابی انرژی و بخش پایانی که تثبیت‌کننده است. سرعت فرایند اسمز معکوس تا حدودی مشکل تأمین منابع آب شیرین را حل کرده؛ اما با این حال مصرف بالای انرژی در این روش نباید دست کم گرفته شود [۲۱-۸].

در این فرایند، آب شور تحت فشار بسیار بالا روی غشای اسمز معکوس هدایت می‌شود که آب خالص از آن عبور می‌کند و نمک پشت غشا باقی می‌ماند. مصرف انرژی زمانی اتفاق می‌افتد که آب (خوراک خام) از غشا با کمک پمپ‌های فشار قوی عبور می‌کند تا فشار مورد نیاز را برای دستیابی به یک جریان مطلوب تأمین کند. پارامترهای بسیاری بر روی میزان مصرف انرژی در فرایند نمک‌زدایی با اسمز معکوس از جمله دمای خوراک [۲۲]، دبی خوراک [۲۳]، شوری آب خوراک، پیکربندی فرایند، شرایط عملیاتی مانند استفاده از دستگاه بازیافت انرژی و فشار آب تغذیه غشاهای و غیره، تأثیر می‌گذارد [۲۴].

نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که در آب خوراک با غلظت پایین نمک افزایش دمای خوراک تأثیر معنی‌داری بر مصرف انرژی ویژه

شامل توربین پلتون، توربوشارژر هیدرولیک، تقویت‌کننده فشار هیدرولیک و پمپ گریز از مرکز معکوس است و در اواخر قرن بیستم برای کاهش مصرف انرژی پمپ‌های فشار قوی و بازیابی انرژی فشاری به صورت همزمان استفاده می‌شدند. در قرن ۲۱، دستگاه‌های بازیابی انرژی جابه‌جایی مثبت که انرژی هیدرولیکی را مستقیماً منتقل می‌کنند، عمدتاً شامل نوع پیستونی (مانند DWEER™) و نوع دوار سرامیکی (مانند PX™) به کار گرفته شدند [۲۵ و ۲۰]. در حال حاضر، واحدهای شیرین‌سازی بزرگ از دستگاه‌های هم‌فشار استفاده می‌کنند که بیش از ۹۵ درصد بازده انتقال انرژی دارند و مصرف انرژی ویژه آن‌ها زیر $2/5 \text{ kW.h/m}^3$ است [۳۱ و ۳۰]. هم‌چنین به دلیل مشکلات مربوط به دستگاه جابه‌جایی مثبت، محققان نوآوری‌های بیشتری را در دستگاه گریز از مرکز ایجاد و پیشرفت‌هایی را در دستگاه جابه‌جایی مثبت ایجاد کرده‌اند [۳۲].

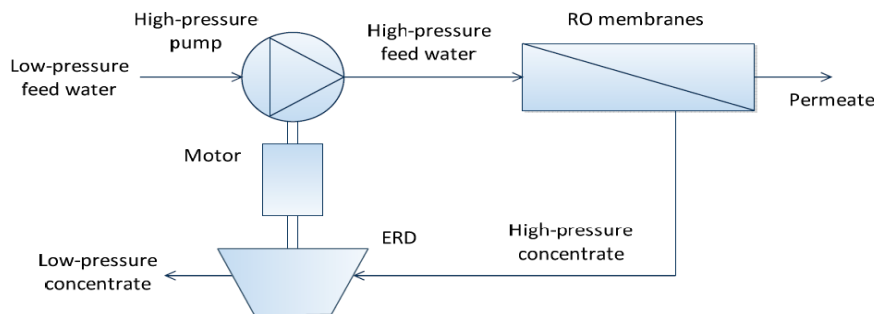
۲-۱ دستگاه‌های بازیافت انرژی گریز از مرکز

دستگاه‌های بازیافت انرژی گریز از مرکز با استفاده از یک توربین، انرژی هیدرولیکی موجود در جریان پسماند را به انرژی مکانیکی چرخشی تبدیل می‌کنند که یا به وسیله یک محور برای کمک به پمپ اصلی فشار بالا عمل می‌کند یا مستقیماً به یک پمپ گریز از مرکز متصل می‌شود. در هر دو نوع، انرژی مکانیکی از نو به انرژی هیدرولیکی تبدیل و به جریان خوراک اعمال می‌شود. ERDهای گریز از مرکز را می‌توان به دو دسته اصلی جابه‌جایی (انرژی) هیدرولیک به مکانیکی کمکی و جابه‌جایی هیدرولیکی به صورت سری تقسیم بندی کرد.

۲-۱-۱ جابه‌جایی (انرژی) هیدرولیک به مکانیکی کمکی در این پیکربندی، توربین به پمپ اصلی فشار قوی متصل می‌شود که آب تغذیه غشای اسمز معکوس را تأمین می‌کند. انرژی مورد نیاز پمپ فشار قوی به وسیله موتور و توربین به‌عنوان یک پکیج الحاقی با سازوکار کمک به محور اعمال می‌شود. شکل (۱) این نوع سیستم بازیابی را نشان می‌دهد [۳۳].

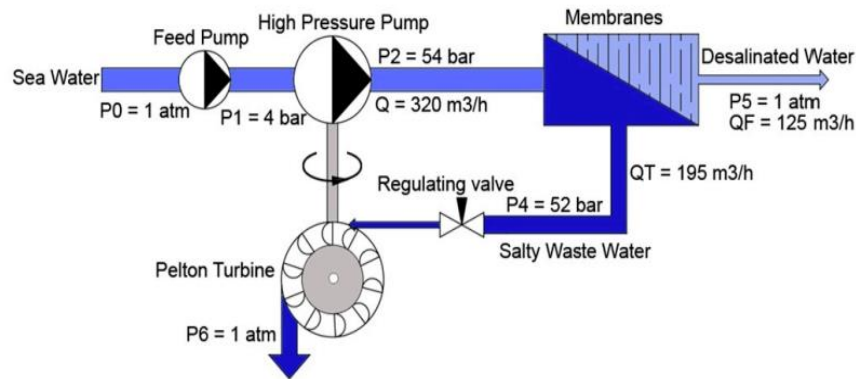
توربین‌های فرانسسیس^۲ و پلتون^۳ به‌طور معمول برای این نوع پیکربندی استفاده می‌شوند. این پیکربندی در حداکثر بازده خود در محدوده پایینی از فشار و جریان عمل می‌کند. توربین فرانسسیس هم‌چنین به‌عنوان پمپ جریان معکوس شناخته می‌شود و حداکثر بازده کلی توربین فرانسسیس ۸۰-۷۵ درصد است [۳۴].

در دهه ۱۹۸۰ توربین‌های پلتون به دلیل بازدهی بیشتر و کارایی بهتر، سهولت کار و هزینه کم جایگزین توربین‌های فرانسسیس شد. این نوع توربین‌ها برای هد فشاری زیاد تا متوسط و دبی کم تا متوسط طراحی شده و هنگامی ترجیح داده می‌شوند که منبع آب موجود دارای فشار هیدرولیکی نسبتاً بالا با سرعت جریان پایین باشد. بسته به جریان آب و طراحی، چرخ‌های پلتون با هد فشاری از ۱۵ متر تا ۱۸۰۰ متر بهترین عمل کرد را دارند، اگرچه از نظر تئوری محدودیت وجود ندارد. راندمان کلی سیستم بازیابی انرژی شامل توربین پلتون متصل شده به پمپ اصلی فشار قوی، با در نظر گرفتن قدرت محور فراهم‌شده به وسیله موتور، می‌تواند به ۷۶ درصد برسد. از کاستی‌های توربین‌های پلتون تشکیل یک جریان کف مانند است که فقط با جاذبه می‌تواند تخلیه شود و یا پس از ته نشینی مجدداً پمپ شود. شکل (۲) این نوع توربین را نشان می‌دهد [۲۰].



شکل ۱. سیستم شیرین‌سازی RO شامل سازوکار کمک به محور توربین محور [۳۳].

Figure 1. RO desalination system including turbine-driven shaft assist mechanism [33].



شکل ۲. فرایند اسمز معکوس با بازیافت انرژی توربین پلتون [۲۰].

Figure 2. Reverse osmosis process with pelton turbine energy recovery[20].

با سازوکار کمک‌محور انرژی کمتری مصرف می‌کنند؛ زیرا پمپ فشار بالا در دومی با فشار بالاتر کار می‌کند، بنابراین بازده کمتری دارد (شکل (۳)) [۲۰ و ۳۳].

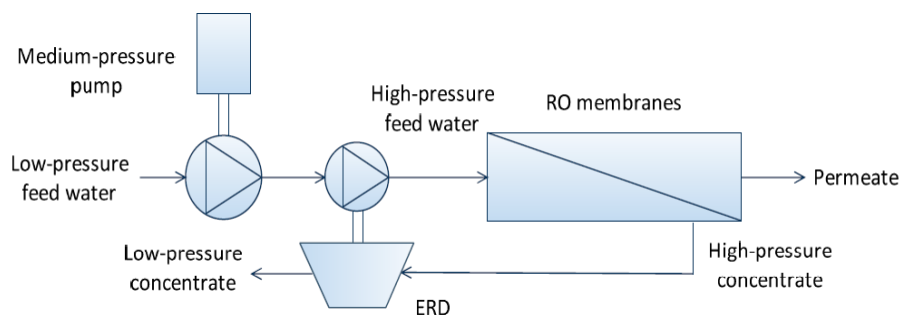
۲-۲ دستگاه‌های بازیابی انرژی جابه‌جایی مثبت

۱-۲-۲ تجهیزات بازیابی انرژی ایزوباریک پیستونی

این تجهیزات برای انتقال انرژی از جریان خروجی به جریان خوراک با استفاده از یک شیر و پیستون به کار می‌روند و کاهش انرژی با کاستن حجم جریان خروجی پمپ فشار بالا به دست می‌آید. در پیکربندی‌های بدون پیستون، زمان تماس بالا (۲۰ تا ۶۰ ثانیه) بین آب نمک و آب دریا در محفظه ایزوباریک باعث افزایش نمک خوراک غشا تا بالاتر از ۱/۵ درصد می‌شود. چندین تجهیز ایزوباریک با آرایش موازی بدون افت بازدهی می‌تواند عمل کند.

۲-۱-۲ جابه‌جایی هیدرولیکی به صورت سری

جابه‌جایی هیدرولیکی با نام توربوشارژر شامل توربین و پروانه پمپ گریز از مرکز است که بدون وجود موتور به همان محور متصل شده است. جریان پسماند به روتور توربین، هدایت و انرژی هیدرولیکی آن به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود؛ سپس پروانه پمپ، انرژی مکانیکی تولیدشده به وسیله روتور توربین را به انرژی فشاری تبدیل می‌کند. بنابراین توربوشارژرها کاملاً از راه جریان پسماند تغذیه می‌شوند و نیازی به انرژی الکتریکی، روانکاری خارجی یا نیروی پنوماتیک ندارند. در این حالت صرفه‌جویی در انرژی حاصل می‌شود؛ زیرا فشار تخلیه مورد نیاز پمپ اصلی کاهش می‌یابد. چون توربوشارژر مستقل از سرعت موتور است، سرعت خودش می‌تواند طوری انتخاب شود که بیشترین بازدهی را داشته باشد. سیستم‌های توربوشارژر نسبت به سیستم‌های



شکل ۳. سیستم شیرین‌سازی RO شامل جابه‌جایی هیدرولیکی به صورت سری (توربوشارژر) [۳۳].

Figure 3. RO desalination system including hydraulically displacement (turbocharger) in series [33].

۳. مقایسه میان دستگاه‌های مختلف بازیافت انرژی برای انتخاب یک دستگاه مناسب

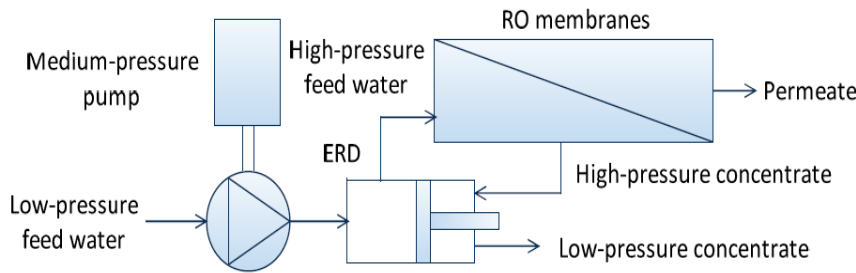
در مقایسه میان دستگاه‌های بازیافت انرژی عوامل زیادی را از جمله بازده انتقال انرژی [۳۵ و ۲۶]، میزان مصرف انرژی ویژه [۳۸-۳۵]، طول عمر، انعطاف‌پذیری، مکانیک ساده، جذابیت [۲۰]، تعمیر و نگهداری و خوردگی [۳۹] باید در نظر گرفت. از میان دستگاه‌های مختلف بازیافت انرژی، دستگاه‌های جابه‌جایی مثبت در واحدهای اسمز معکوس بزرگ استفاده می‌شوند و دستگاه‌های بازیافت گریز از مرکز در واحدهای کوچک و برای بازیافت انرژی از پساب نمکی غلیظ با فشار بالا مناسب است [۴۰]. دستگاه‌های بازیافت انرژی از نوع پیستونی دارای برتری‌هایی از قبیل بازدهی بالا، ظرفیت زیاد و سادگی فرایند هستند و انتخاب بهتری برای بازیابی انرژی در واحدهای بزرگ اسمز معکوس آب دریا^۱ محسوب می‌شوند [۲۰]. دستگاه‌های بازیابی انرژی گریز از مرکز به پمپ تقویت‌کننده موتور و

تجهیزات بازیابی انرژی ایزوباریک به دسته‌های زیر تقسیم می‌شوند:

- ۱- مبدل فشاری با یک تک‌سیلندر دوکاره
 - ۲- مبدل فشاری با دو سیلندر دوکاره
 - ۳- مبدل فشاری با سه سیلندر دوکاره
 - ۴- مبدل‌های فشاری با دو سیلندر کنترل‌شده با شیر
- اجزای تشکیل‌دهنده تجهیزات مبدل فشاری با یک تک‌سیلندر دوکاره در شکل (۴) نشان داده شده است [۳۴-۳۳، ۲۰].

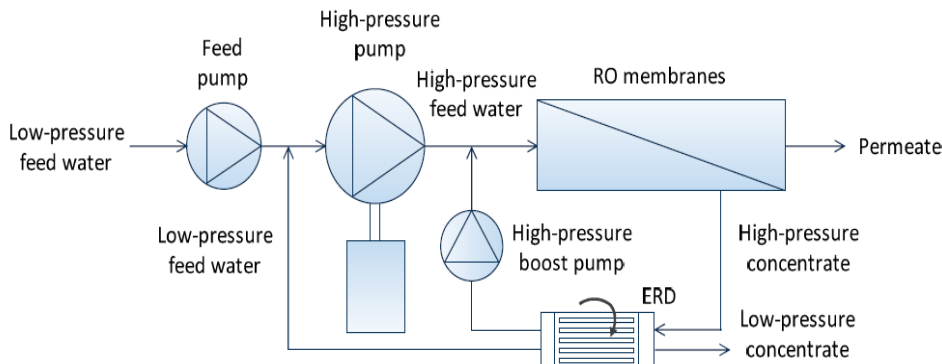
۲-۲-۲ دستگاه بازیابی انرژی هم‌فشار دوار

راندمان بالای دستگاه هم‌فشار پیستون و سادگی عملیاتی دستگاه‌های بازیافت انرژی گریز از مرکز در دستگاه هم‌فشار دوار ترکیب شده است. در سیستم‌های مجهز به دستگاه هم‌فشار دوار، پساب غشا مستقیماً به سمت خوراک هدایت می‌شود (شکل (۵)) [۳۳].



شکل ۴. مبدل فشاری با یک تک‌سیلندر دوکاره [۳۳].

Figure 4. Pressure exchanger with a single double acting cylinder [33].



شکل ۵. پیکربندی سیستم شامل دستگاه بازیابی انرژی هم‌فشار دوار [۳۳].

Figure 5. System configuration including the rotary isobaric energy recovery device [33].

که در آن E_T کل انرژی مصرفی، E_{in} انرژی مورد نیاز برای دریافت آب خوراک، E_{pt} انرژی پیش و پس از تصفیه، E_{hp} انرژی لازم برای پمپ‌های فشار قوی، E_A انرژی لازم برای سایر موارد نظیر تهیه مواد شیمیایی، جابه‌جایی آب و شست‌وشوی فیلترها، E_{ERD} انرژی بازیابی شده به وسیله دستگاه بازیافت انرژی^۱ هستند.

همچنین انرژی ویژه مورد نیاز برای نمک‌زدایی با سیستم اسمز معکوس با معادله زیر می‌تواند حساب شود [۳۹].

$$SE = \frac{E_{HP} + E_{BP} + E_{SP}}{Q_P} \quad (2)$$

$$SE = \left[\frac{Q_{HP}(P_{HP} - P_F)}{\eta_{HP}} + \frac{Q_{BP}(P_{HP} - P_{BP})}{\eta_{BP}} + \frac{Q_{SP}P_F}{Q_P} \right] \quad (3)$$

در این معادله SE مصرف انرژی ویژه سیستم نمک‌زدایی با اسمز معکوس، E_{HP} انرژی مصرفی پمپ فشار بالا، E_{BP} انرژی مصرفی پمپ بوستر، E_{SP} انرژی مصرفی پمپ تأمین خوراک، Q_P شدت جریان محصول، Q_{HP} شدت جریان پمپ فشار بالا، P_F فشار آب خوراک پمپ فشار بالا، η_{HP} بازدهی پمپ فشار بالا، Q_{BP} شدت جریان پمپ بوستر، P_{BP} فشار ورودی پمپ بوستر، η_{BP} بازدهی پمپ بوستر است.

انرژی مصرفی ویژه، SEC، نیز با رابطه زیر حساب می‌شود [۴۱].

$$SEC = \frac{P_{W,HPP} + P_{W,BP}}{q_{V,P}} \quad (4)$$

در این معادله $q_{V,P}$ دبی حجمی محصول، $P_{W,HPP}$ توان پمپ فشار بالا و $P_{W,BP}$ توان پمپ بوستر است. توان پمپ‌ها نیز با استفاده از معادلات زیر حساب می‌شود.

$$P_{W,HPP} = \frac{Q_{V,HPP}(P_{F,HPP} - P^E)}{\eta_{HPP} \cdot \eta_{eng}} \quad (5)$$

$$P_{W,BP} = \frac{q_{V,ERD}(P_{F,HPP} - P_{F,ERDout})}{\eta_{BP} \cdot \eta_{eng}} \quad (6)$$

کنترل الکترونیکی احتیاج ندارند. در جابه‌جایی هیدرولیک به مکانیکی، پمپ توربین محور به نیروی محور اضافی نیاز دارد که به وسیله موتور تأمین می‌شود. با این حال منبع تغذیه اضافی برای سیستم مرجع مورد نیاز نیست. بنابراین فقط ژنراتورهای توربینی که پمپ موتوری را تغذیه می‌کنند، مرکز توجه واقع می‌شوند. علاوه بر این، توربوشارژرها به پمپ اصلی فشار متوسط نیاز دارند. همچنین کارایی توربوشارژرها بیشتر از ژنراتورهای با محرک توربین فرانسسیس و مشابه ژنراتورهای مبتنی بر پلتون است. لازم به ذکر است که بازده ژنراتور توربین محور شامل بازده ژنراتور و موتور نیز می‌شود؛ در حالی که بازده شارژر توربو فقط شامل توربین و بازده پمپ است. مبدل‌های فشار با دو سیلندر عمل پارامترهای جریان مورد نیاز را دارند. نیازی به منبع تغذیه اضافی ندارند و برای فشاردادن آب تغذیه از پمپ فشار متوسط استفاده می‌کنند. اگرچه پمپ پیروسون و پمپ آب دریا با دستگاه بازیابی انرژی، سرعت جریان نفوذ بسیار کمی را فراهم می‌کنند و به فشار تغذیه کم نیاز دارند؛ اما هر دو برای کارکرد پمپ تقویت‌کننده خود به منبع تغذیه اضافی نیاز دارند [۳۳].

مبدل‌های فشار با سیلندر کنترل شده دو سوپاپی و دستگاه‌های بازیابی انرژی هم‌فشار دوار به دلیل پیکربندی سیستم مورد نیاز از مطالعه خارج می‌شوند. پمپ فشار قوی که آب تغذیه فشار قوی را به غشاهای اسمز معکوس می‌رساند، نیاز به کار مداوم دارد [۳۳]. بنابراین ژنراتورهای توربینی، توربو شارژرها و مبدل‌های فشار با دو سیلندر عمل‌کننده به خصوصیات سیستم مرجع پاسخ مناسب‌تری می‌دهند. بازده توربین پلتون بالاتر از بازده توربین فرانسسیس است. علاوه بر این، پمپ پیروسون و پمپ آب دریا با دستگاه بازیابی انرژی نیز الزامات سیستم را برآورده می‌کنند و ممکن است دارای ویژگی‌های عمل‌کردی باشند که در اصل با افزایش فشار ورودی، می‌توان مصرف برق صفر را به دست آورد. بنابراین تحقیقات بیشتری برای مبدل فشار با سه سیلندر دوکاره و استفاده از پمپ جابه‌جایی مثبت معکوس به عنوان موتور لازم است [۳۳].

کل انرژی مورد نیاز برای فرایند اسمز معکوس همراه با دستگاه بازیافت انرژی به صورت زیر حساب می‌شود [۲۵]:

$$E_T = E_{in} + E_{pt} + E_{hp} + E_A - E_{ERD} \quad (1)$$

1. Energy Recovery Devices

باقی‌مانده پشت غشا که دارای انرژی فشاری بسیار بالایی است به‌طور مستقیم از راه سوپاپ اطمینان فشار تخلیه می‌شود و انرژی فشاری زیادی هدر می‌رود. از طرفی بخش اعظم انرژی در پمپ‌های فشار بالای انتقال آب شور (خوراک‌دهی) به غشای اسمز معکوس به مصرف می‌رسد. بنابراین وجود سیستم بازیافت انرژی برای کاهش مصرف انرژی در پمپ‌های تغذیه، مهم، قابل توجه و حیاتی است. در سیستم بازیافت انرژی، میزان بازیافت و مصرف انرژی فاکتورهای کلیدی برای انتخاب و طراحی سیستم هستند؛ برای این منظور باید شناخت کاملی از سیستم‌های بازیافت انرژی کسب شود که در این مقاله اطلاعاتی در این زمینه ارائه شد و مقایسه‌هایی میان دستگاه‌های بازیافت انرژی انجام گرفت. براساس اطلاعات کلی به‌دست‌آمده از سایر تحقیقات، دستگاه بازیافت انرژی PX بیشترین بازدهی را دارد.

مراجع

- [1] Dawoud, M. A., "Water import and transfer vs desalination in arid regions: GCC countries case study", *Desalination and Water Treatment*, 28, pp.153-163, (2011).
- [2] Bagheri, A., Esfandiari, N., Honarvar, B., "Improving Performance of Solar Still by External Solar Panels and Cylindrical Parabolic Collector for Seawater Desalination", *Journal of Solar Energy Research*, 4, pp.163-170, (2019).
- [3] Bagheri, A., Esfandiari, N., Honarvar, B., Azdarpour, A. "An experimental study on the effects of direct and indirect use of solar energy on solar seawater desalination", *Water Supply*, 20, pp. 259-268, (2020).
- [4] Bagheri, A., Esfandiari, N., Honarvar, B., Azdarpour, A., "First principles versus artificial neural network modelling of a solar desalination system with experimental validation", *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems* 26, pp. 453-480, (2020).
- [5] Bagheri, A., Esfandiari, N., Honarvar, B., "Experimental investigation of the effect of using the cylindrical parabolic collector, different solar panels and their cooling on seawater desalination in double-slope solar still", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 43, pp. 107-119, (2021).
- [6] Bagheri, A., Esfandiari, N., Honarvar, B., "ANN Modeling and experimental study of the effect of various factors on solar desalination", *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 70, pp. 41-57, (2021).

در این معادلات $q_{V,HPP}$ دبی حجمی پمپ فشار بالا، $P_{F,HPP}$ فشار خوراک پمپ فشار بالا، P^E فشار محیط، η_{HPP} بازدهی پمپ فشار بالا، η_{eng} بازدهی موتور، $q_{V,ERD}$ دبی حجمی دستگاه بازیافت انرژی، $P_{F,ERDout}$ فشار خوراک بعد از دستگاه بازیافت انرژی و η_{BP} بازدهی پمپ بوستر است. بازدهی نیز از رابطه زیر حساب می‌شود [۴۱]:

$$Eff = \frac{q_{V,ERD} \cdot P_{F,ERDout} + q_{V,C} \cdot P_{C,ERDout}}{q_{V,ERD} \cdot P_{F,ERDin} + q_{V,C} \cdot P_{C,ERDin}} \quad (7)$$

Eff بازدهی دستگاه بازیافت انرژی، $q_{V,C}$ شدت جریان حجمی پسماند، $P_{C,ERDin}$ فشار پسماند ورودی به دستگاه بازیافت و $P_{C,ERDout}$ فشار پسماند بعد از دستگاه بازیافت که به محیط تخلیه می‌شود.

جدول (۲) بازدهی دستگاه‌های بازیافت انرژی را که طبق تعریف برابر با نسبت مجموع فشار خوراک و پسماند پس از دستگاه بازیافت به مجموع فشار این دو جریان قبل از دستگاه بازیافت است، مقایسه می‌کند [۳۹ و ۳۴ و ۲۸]. مقایسه موارد نشان می‌دهد که دستگاه‌های هم‌فشار به‌ویژه بازیافت انرژی PX بیشترین بازدهی را دارند.

جدول ۲. مقایسه بازدهی دستگاه‌های بازیافت

انرژی [۳۹ و ۳۴ و ۲۸].

Table 2. Comparison of energy recovery devices [28,34,39].

ERD Type	Francis Turbine	Pelton Turbine	Turbocharger	Isobaric Devices	DWEER	Piston	PX
Efficiency%	75-80	80-85	80	95-97	98	94	96-98

۴. نتیجه‌گیری

در واحدهای نمک‌زدایی آب دریا به‌روش اسمز معکوس، پساب غلیظ

- [7] Mansour, T. M., Ismail, T. M., Ramzy, K., Abd El-Salam, M., "Energy recovery system in small reverse osmosis desalination plant: Experimental and theoretical investigations", *Alexandria Engineering Journal*, 59, pp. 3741-3753, (2020)
- [8] Nallakukkala, S., Lal, B., "Seawater and produced water treatment via gas hydrate: Review", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9, pp.105053, (2021).
- [9] AWWA, "Water desalting planning guide for water utilities", John Wiley and Sons, New York, 2004.
- [10] Parker, A., "Potable water from sea water", *Nature*, 149, PP. 184-186, (1942).
- [11] Jeon, J., Park, B., Yoon, Y., Kim, S., "An optimal design approach of forward osmosis and reverse osmosis hybrid process for seawater desalination", *Desalination and Water Treatment*, 57(55), pp. 1-9, (2016).
- [12] Panagopoulos, A., Haralambous K. J., Loizidou, M., "Desalination brine disposal methods and treatment technologies -A review", *Science of the Total Environment*, 693, p. 133545, (2019).
- [13] Shufei, Z., Libo, X., Zidan, X., "Analysis on the development history and current situation of seawater desalination at home and abroad", *Water Treatment Technology*, 40, pp. 12-15, (2014).
- [14] Bahoosh, M., Kashi, E., Shokrollahzadeh, S., Rostami, Kh., "Comparison the performance of different reverse osmosis membrane modules by CFD modeling", *Iranian Journal of Chemical Engineering*, 16, pp. 101-116, (2019).
- [15] Saleem, N., Zaidi, B., "Nanoparticles in reverse osmosis membranes for desalination: A state of the art review", *Desalination*, 475, pp. 11417, (2020).
- [16] Gaublomme, D., Strubbe, L., Vanoppen, M., Torfs, E., Mortier, S., Cornelissen, E., De Gussem, B., Verliefe, A., Nopens, I., "A generic reverse osmosis model for full-scale operation", *Desalination*, 490, pp. 114509, (2020).
- [17] Hadadian, Z., Zahmatkesh, S., Ansari, M., Haghghi, A., Moghimipour, E., "Mathematical and experimental modeling of reverse osmosis (RO) process", *Korean Journal of Chemical Engineering*, 38, pp. 366-379 (2021).
- [18] Lee, T., Rahardianto, A., Cohen, Y., "Flexible reverse osmosis (FLERO) desalination", *Desalination*, 452, pp. 123-13(2019).
- [19] Nair, M, Kumar, D., "Water desalination and challenges: The Middle East perspective: A Review", *Desalination and Water Treatment*, 51, pp. 10-12, (2012).
- [20] Huang, B., Pu, K., Wu, P., Wu, D., Leng, J. "Design, Selection and Application of Energy Recovery Device in Seawater Desalination: A Review", *Energies*, 13, pp. 4150-4169 (2020).
- [21] Yanyue, L., "Research on Optimal Design of Reverse Osmosis Seawater Desalination System", PhD. Thesis, Ocean University of China, Qingdao, China, (2004).
- [22] Koutsou, C. P., Kritikos, E., Karabelas, A. J., Kostoglou, M., "Analysis of temperature effects on the specific energy consumption in reverse osmosis desalination processes", *Desalination*, 476, pp. 114213-114222, (2020).
- [23] Alanezi, A. A., Altaee, A., Sharif, A., "The effect of energy recovery device and feed flow rate on the energy efficiency of reverse osmosis process", *Chemical Engineering Research and Design*, 158, pp. 12-23, (2020).
- [24] Liu, C., Rainwater, K., Song, L., "Energy analysis and efficiency assessment of reverse osmosis desalination process", *Desalination*, 276(1-3), pp. 352-358, (2011).
- [25] Gude, V. G., "Energy consumption and recovery in reverse osmosis", *Desalination and Water Treatment*, 36, pp.239-260, (2011).
- [26] Tianbao, S., Lu, L., Jianwei, B., Xidong, X., Yulian, Y., Chunyou, P. "Key points of design and equipment selection of reverse osmosis seawater desalination high-pressure system", *Water Purification Technology*, 38, pp.131-134, (2019).
- [27] Wilf, M.; Bartels, C., "Optimization of seawater RO systems design", *Desalination*, 173, pp.1-12, (2005).
- [28] Guirguis, M. J., "Energy Recovery Devices in Seawater Reverse Osmosis desalination Plants with Emphasis on Efficiency and Economical Analysis of Isobaric versus Centrifugal Devices", PhD Thesis, University of South Florida, (2011).
- [29] Al-Hawaj, O. M., "The work exchanger for reverse osmosis plants", *Desalination*, 157, pp. 23-27, (2003).
- [30] MacHarg, J. P. "Retro-fitting existing SWRO systems with a new energy recovery device", *Desalination*, 153, pp. 253-264, (2002).
- [31] Dundorf, S., MacHarg, J., Seacord T. F., "Optimizing lower energy seawater desalination, the affordable desalination collaboration", in: IDA World congress, Maspalomas, Gran Canaria, Spain, 2007.
- [32] Okamoto, Y., Lienhard, J. H., "How RO membrane permeability and other performance factors affect process cost and energy use: A review", *Desalination*, 470, pp.48-49, (2019).
- [33] Michas, D., "Design of an Energy Recovery Concept for a Small-scale Renewable-driven Reverse Osmosis Desalination System", Thesis, (2013).
- [34] Schunke, A. J., Alberto, G., Herrera, H., Padhye, L., Berry, T. A., " Energy Recovery in SWRO Desalination: Current Status and New Possibilities", *Frontiers in Sustainable Cities*, 2, pp. 1-7, (2020).

- [35] Li, S., Duran, K., Delagah, S., Mouawad, J., Jia, X., Sharbatmalek, M., "Energy efficiency of staged reverse osmosis (RO) and closed-circuit reverse osmosis (CCRO) desalination: a model-based comparison", *Water Supply*, 22(20), (2020).
- [36] Kim, Y., Kang, M. G., Lee, S., Jeon, S. G., Choi, J. S., "Reduction of energy consumption in seawater reverse osmosis desalination pilot plant by using energy recovery devices", *Desalination and Water Treatment*, 51, pp.766-771, (2013).
- [37] Zhou, J., Wang, Y., Duan, Y., Tian, J., Xu, S., "Capacity flexibility evaluation of a reciprocating-switcher energy recovery device for SWRO desalination system", *Desalination*, 416, pp.45-53, (2017).
- [38] Christofides, P. D., Zhu, A., Cohen, Y., "Minimization of energy consumption for a two-pass membrane desalination: Effect of energy recovery, membrane rejection and retentate recycling", *Journal of Membrane Science*, 339, pp. 126-137, (2009).
- [39] Stover, R. L., "Seawater reverse osmosis with isobaric energy recovery devices", *Desalination*, 203, pp. 168-175, (2007).
- [40] Schneider, B., "Selection operation and control of a work exchanger energy recovery system based on the Singapore project", *Desalination*, 184, pp. 197-210, (2005).
- [41] Rodriguez, L. G., Pouyfaucou, A. B., "Future prospects of reducing specific energy consumption in SeaWater Reverse Osmosis (SWRO) desalination plants", *Interreg Atlantic Area*, pp1-31, (2019).