

بررسی جداسازی نمک و بازیابی آب در فرایند اسمز معکوس آب دریا با استفاده از آب خنک کننده نیروگاه

سید محسن دهنوی، سهیلا شکرالله زاده*

پژوهشکده فناوری‌های شیمیایی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲ خرداد ۱۳۹۷

دریافت پس از اصلاح: ۲۶ مرداد ۱۳۹۷

پذیرش نهایی: ۱۰ شهریور ۱۳۹۷

کلمات کلیدی:

اسمز معکوس،

افزایش دما،

نیروگاه برق، آب خنک کننده،

جداسازی نمک

چکیده

در سالیان اخیر، انرژی اتمی موجود در آب خنک کننده نیروگاه‌ها برای تولید آب از آب‌های شور مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق، اثر استفاده از آب خنک کننده نیروگاه واقع در ساحل خلیج فارس به عنوان خوراک یک واحد پیش‌تاز اسمز معکوس بر جداسازی نمک از آب دریا، کیفیت محصول نهایی و بازیابی آب بررسی شد. با افزایش دمای آب خوراک از ۲۰ تا ۴۵ °C، اگرچه شار آب تولیدی تا حدود دو برابر افزایش یافت (۷/۵ تا ۱۴ L/m²h) ولی باعث کاهش پس‌زنی غشاء و جداسازی نمک به وسیله غشاء شد. در نتیجه، ضریب هدایت الکتریکی آب تولیدی تا حدود ۷۰۰ تا ۱۲۰۰ μS/cm افزایش یافت. این تغییر به دلیل افزایش تراوش پذیری غشاء نسبت به آب و نمک در دمای بالاتر آب می‌باشد. افزایش شار آب باعث صرفه‌جویی در مصرف ویژه انرژی برای تولید آب شد، اما مطلوبیت آب تولیدی برای آشامیدن را کاهش داد، اگرچه همچنان در بازه استانداردهای سازمان بهداشت جهانی قرار گرفت.

۱- مقدمه

توسعه انسانی به میزان دسترسی انسان به منابع آبی بستگی دارد. ایران در ناحیه خاورمیانه واقع شده که بزرگترین منطقه دچار بحران آب می باشد. متوسط سالانه بارش در ایران ۲۵۰ میلی متر است که یک سوم متوسط بارش سالانه جهانی می باشد [۱]. بنابراین، با توجه به مساحت قابل توجه نواحی کناره دریای عمان و خلیج فارس، یکی از گزینه های تامین آب به ویژه برای مناطق جنوبی کشور، نمک زدایی از آب دریا می باشد. فرایند غشایی اسمز معکوس امروزه سهم عمده ای در تصفیه آب های آلوده و شیرین سازی آب های شور دارد. هزینه روش اسمز معکوس در حال حاضر از روش های حرارتی کمتر بوده و هر روز در حال کاهش می باشد [۲، ۳].

بازدهی الکتریکی کلی سیستم تبدیل توان در اغلب نیروگاه ها، به طور متوسط ۳۰٪ می باشد. این به معنای آن است که دوسوم توان حرارتی تولید شده به آب خنک کننده در کندانسورها تخلیه می شود. استفاده از این توان حرارتی اتلافی برای تولید آب شیرین همواره مورد توجه بوده است. در صورت استفاده از این آب گرم به عنوان خوراک واحد اسمز معکوس، باعث کاهش ویسکوزیته آب ورودی و افزایش تراوش پذیری پلیمر غشاء شده و در نتیجه، تولید آب شیرین افزایش می یابد. به طور متوسط با هر درجه افزایش دما حدود ۲ تا ۴ درصد افزایش تولید آب تولیدی گزارش شده است. ولی با افزایش دما، به دلیل کاهش جداسازی نمک بوسیله غشاء، شوری آب تولیدی اسمز معکوس نیز تا حدودی افزایش می یابد [۴، ۵]. بیش از یک دهه است که پیشنهاد استفاده از همجواری^۱ نیروگاه ها و آب شیرین کن ها مطرح شده است. آب خنک کننده پس از خروج از کندانسور معمولاً ۱۵-۵°C گرم تر از آب دریا بوده که می تواند منبعی برای انرژی تلفی شود. مزایای این همجواری علاوه بر کاهش سرمایه گذاری اولیه، باعث کاهش هزینه تولید آب به دلیل بازیابی بالاتر آب در واحد اسمز معکوس و کاهش اثرات زیست محیطی تخلیه آب گرم به دریا می شود. از معایب این روش می توان به کاهش پس زنی نمک^۲ به وسیله غشاء اشاره نمود که منجر به افزایش غلظت نمک در آب تولیدی می شود [۶].

در بررسی اثر دما بر عملکرد اسمز معکوس بوسیله پژوهشگران، رفتار دو سامانه نمک زدایی اسمز معکوس (به تنهایی) و اسمز معکوس در حالت هیبرید با فرایند حرارتی MSF^۳، به صورت

تجربی با یکدیگر مقایسه شدند. در این آزمون از دو مدول مارپیچ حلزونی و الیاف توخالی با ظرفیت تولید آب و پیش-تصفیه یکسان استفاده شد. آب ورودی به این غشاها از آب دریای گرم واحد MSF تامین شدند. نتایج این تحقیق نشان داد که بازیابی آب در واحد اسمز معکوس هیبریدی در فشار یکسان تا حدود ۴۳٪ بیش از عملیات در شرایط معمولی با استفاده از آب های سطحی بوده و بازیابی آب به مقدار ۲/۲٪ به ازای هر درجه سلسیوس افزایش داشته است [۷، ۸]. تغییرات فصلی در تولید آب و گرفتگی زیستی در یک واحد اسمز معکوس آب دریا در دو فصل تابستان و زمستان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با وجود مزایایی که دمای بالاتر آب برای افزایش شدت جریان آب تولیدی دارد، در تابستان محیط بهتری برای رشد میکروارگانیسم ها فراهم بوده و باعث گرفتگی و کاهش شار عبوری در زمان های طولانی تر شد. همچنین، میزان جداسازی نمک به وسیله غشاء در زمستان بالای ۹۵٪ بوده ولی در تابستان کاهش یافت [۸].

در پژوهشی دیگر، مطالعات مفهومی فرایند اسمز معکوس با پیش گرم کردن آب خوراک با هدف کاهش مصرف برق و تولید بیشتر آب و کاهش قیمت نمک زدایی انجام شد. در این طراحی، دما در بازه ۴۴-۱۰°C و شوری محلول خوراک در بازه ۲۰۰۰۰-۵۰۰۰۰ mg/L در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که مقدار بازیابی آب با افزایش شوری آب خوراک در یک دمای ثابت کاهش یافته و جداسازی نمک از آب خوراک به صورت یکنواخت با افزایش دما و در شوری های مختلف خوراک، کاهش یافت. با افزایش دما، هزینه تولید آب کاهش یافته و این کاهش در شوری های بالاتر، محسوس تر بود. با افزایش دما، فشار خوراک معمولاً کاهش و فشار اسمزی افزایش می یابد و این مسئله در یک شوری معین آب، باعث کاهش فشار محرک شده و در نتیجه مصرف انرژی و هزینه های نمک زدایی آب کاهش می یابد [۹]. هزینه تولید آب در دمای مختلف با غلظت-های متغیر نمک در خوراک آب دریا در یک مسئله بهینه سازی شبکه اسمز معکوس مورد ارزیابی قرار گرفت و نشان داده شد که هر دو پارامتر دما و شوری خوراک بر طراحی و راهبری شبکه اسمز معکوس تاثیر دارند. نتایج نشان داد که هزینه تولید آب به نسبت غلظت خوراک و دما تغییر می یابد. به دلیل اثر مثبت افزایش دمای خوراک بر شار آب، هزینه های کلی سالیانه با افزایش دما تا نقطه خاصی کاهش می یابد. در این نقطه، حداکثر تراوش پذیری غشاء نسبت به نمک رخ داده، غلظت نمک در آب محصول به حداکثر مقدار مجاز رسیده و پس از آن، هزینه تولید آب شروع به افزایش می کند [۱۰].

^۱ Co-location^۲ Salt rejection^۳ Multi-stage Flash Distillation

اگرچه، چندین مطالعه در مورد اثر استفاده از آب با دمای بالاتر در فرایند اسمز معکوس به انجام رسیده، ولی بررسی اثر استفاده از گرمای موجود در آب خنک‌کننده یک نیروگاه در سواحل خلیج فارس، بر جداسازی نمک و تولید آب در اسمز معکوس انجام نشده است. خلیج فارس به دلیل شرایط جغرافیایی خاص و وجود آب شیرین‌کن‌های متعدد در ساحل جنوبی آن، دارای شوری و دمای بالاتری نسبت به سایر آب‌های آزاد می‌باشد. پاسخ به این سوال که استفاده از آب خنک‌کننده، چه تاثیری بر تولید آب و جداسازی نمک دارد، برای این تحقیق اهمیت داشته است. بدین منظور، از یک واحد پایلوت اسمز معکوس دریایی در کنار نیروگاه استفاده شد و اطلاعات موجود در دو فصل متوالی مورد بررسی قرار گرفت. اثر عبور آب دریا از مدار خنک‌کننده بر ترکیب درصد مواد موجود در آب نیز بررسی شد تا تاثیر آن بر کیفیت محصول نهایی مورد بررسی قرار گیرد.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد

کلیه مواد شیمیایی مورد استفاده، با خلوص آزمایشگاهی بوده و از منابع معتبر خریداری شدند. محل مطالعه، نیروگاه حرارتی واقع در یکی از بنادر خلیج فارس می‌باشد. آب خنک‌کننده بخار تولیدی نیروگاه از آب دریا (خلیج فارس) تامین می‌شد که پس از چندین مرحله جداسازی مواد زیستی و ذرات معلق و کلر زنی مورد استفاده قرار می‌گرفت.

۲-۲- روش تحقیق

واحد پیش‌تاز (پایلوت) اسمز معکوس آب دریا (SWRO) با ظرفیت تولید آب پنج مترمکعب در روز مورد بهره‌برداری قرار گرفت. اجزای مهم پایلوت عبارتند از فیلترهای شنی و کربنی HTCOMA، فیلترهای کاتریتیجی (۱۰ و یک میکرون)، پمپ فشار قوی خوراک Danfoss (با فشار ۸۰-۲۰ بار)، مدول غشایی مارپیچی اسمز معکوس (۴ اینچی FilmTec با غشاء کامپوزیتی لایه‌نازک پلی‌آمیدی SW30HRLE4040 با تحمل دمای حداکثر ۴۵ °C)، محفظه فشار غشاء، پمپ‌های دوزینگ Athena برای تزریق ضد رسوب و سدیم متابی سولفیت، روتامترهای جریان خوراک و محصول پلیمری LZS-15 و نشانگرهای دمای دیجیتالی شرکت Autonics و ضریب هدایت خوراک و محصول شرکت INSTRO. برای تغییر فشار خوراک،

نسبت بازیابی آب علاوه بر دما، به فشار آب ورودی نیز بستگی دارد. با افزایش فشار بر آب خوراک در محدوده فشارهای پایین‌تر (تا حدود ۴۶ بار) افزایش بازیابی آب با شیب ملایم مشاهده شد. در فشارهای بالاتر خوراک (بالاتر از ۵۰ بار) شیب بیشتر شده و دما باعث افزایش سریع‌تر در بازیابی آب شد [۱۱]. یکی از عوامل کاهش نیروی محرکه در انتقال آب از غشاء نیمه تراوا، پلاریزاسیون غلظتی در لایه مرزی نزدیک غشاء (لایه غلظتی) می‌باشد. اثر دما در تشکیل لایه غلظتی و مقاومت ایجاد شده در لایه مرزی و به عبارتی پلاریزاسیون غلظتی در مقالات مورد بحث قرار گرفته و نشان داده شد که افزایش دما باعث کاهش پلاریزاسیون غلظتی می‌شود [۱۱، ۱۲]. بررسی گرفتگی زیستی در غشاهای کارکرده در نقاط مختلف جهان، نشان داد که در غشاهایی که در دمای پایین‌تر کار کرده بودند، مقدار بیوفیلم تشکیل شده بر غشاء کمتر بود. ضخامت لایه بیومس با افزایش دمای خوراک کاهش یافته ولی ساختار و ترکیب درصد آن با دما تغییر می‌نماید که هر دوی این عوامل بر افزایش افت فشار غشاء تاثیرگذار هستند [۱۳].

همانگونه که گفته شد، افزایش دمای ورودی باعث کاهش پس-زنی نمک به وسیله غشاء و افزایش مواد جامد محلول (TDS) در محصول می‌شود. در تحقیقی، با افزایش دما از ۱۱ تا ۲۳ °C میزان املاح محلول آب تولیدی از ۴۲۵ تا ۵۱۵ mg/L افزایش نشان داد. این مقدار همچنان کمتر از استاندارد ارائه شده توسط سازمان بهداشت جهانی (۱۵۰۰ mg/L) برای آب آشامیدنی می‌باشد. همچنین، علاوه بر نمک، نفوذ بور از غشاء نیز افزایش و جداسازی آنها کاهش می‌یابد [۱۴]. علاوه بر تمامی موارد ذکر شده، افزودن ترکیبات شیمیایی به آب طی سیکل خنک‌کننده، ممکن است باعث بروز مشکلاتی در عملکرد اسمز معکوس شود که باید مورد بررسی قرار گیرد.

در اکثر کشورهای پیشرفته جهان، معمولاً پیش از اجرای سیستم‌های غشایی، بر ساخت و بهره‌برداری از واحد پیش‌تاز (پایلوت) تاکید می‌شود تا به صورت خیلی دقیق پارامترهای مختلف در تولید آب برای مدت زمان معینی مورد بررسی قرار گیرد. مطالعات پایلوت این امکان را فراهم می‌آورد تا ارزیابی عملکرد یک سیستم پیشنهادی، در شرایط خاص محل (سایت اجرا) ارزیابی شود. اطلاعات جمع‌آوری شده از پایلوت، وارد فرایند طراحی و برنامه‌ریزی شده و بر اساس آن تصمیم‌گیری انجام می‌شود. نتیجه این کار، طراحی کامل‌تر، تخمین بهتر هزینه‌ها، و درک صحیح‌تر از پایداری یک پروژه طراحی شده است [۱۵].

داده های پایلوت در بازه زمانی تیر تا آذر ماه ۱۳۹۵ ثبت شده و مورد بررسی قرار گرفتند. داده های ورودی به سامانه شامل زمان عملیات، دمای خوراک، ضریب هدایت الکتریکی خوراک و شدت جریان خوراک بوده و داده های خروجی عبارت بودند از شدت جریان آب محصول، ضریب هدایت محصول و میزان مصرف مخصوص انرژی. میزان انرژی مصرفی با اندازه گیری انرژی به وسیله کنتور برق اندازه گیری شد.

جدول ۱ مقادیر حداقل، حداکثر، میانگین و انحراف استاندارد هر پارامتر را ارائه داده است. در داده ها، ناحیه وسیعی از دمای خوراک مشاهده می شود که بیانگر تغییرات فصلی است.

جدول ۱. داده های واحد پایلوت اسمز معکوس دریایی

مقدار متوسط	مقدار بیشینه	مقدار کمینه	واحد	پارامتر	خوراک
۳۰/۳	۴۵	۲۲	°C	دما	
۵۵/۱	۶۹	۴۷	bar	فشار	
۷۷	۱۲۵	۴۰	L/h	شدت جریان	محصول
۷۶۸	۱۲۲۳	۴۵۱	$\mu\text{S/cm}$	هدایت الکتریکی	
۲۵	۶۰	۱۰	kWh/m^3	مصرف ویژه انرژی	

به منظور آنالیز آب خنک کننده، از روش نمونه برداری مرکب استفاده شد. بدین منظور، شش نمونه ده لیتری از آب خنک-کننده به وسیله بطری های پلی اتیلنی برداشته شده و پس از مخلوط شدن با یکدیگر، برای اندازه گیری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه معتمد محیط زیست ارسال شدند. پارامترهای pH، آنیون ها و کاتیون های معمول و برخی فلزات سنگین (با دستگاه جذب اتمی مدل Varian A240FS)، کل مواد جامد معلق (با دستگاه کدورت سنج Hach 2100P) و مواد جامد محلول (با دستگاه اندازه گیری هدایت الکتریکی Hach HQ14d) بر اساس روش های استاندارد مورد آزمون قرار گرفتند. میزان انرژی مصرفی برای هر لیتر آب تولیدی (مصرف ویژه انرژی) با اندازه گیری میزان برق مصرفی پایلوت و حجم تجمعی آب محصول در زمان کارکرد پایلوت و تقسیم آن دو بر یکدیگر به دست آمد. نسبت بازیابی آب، به صورت نسبت حجم آب تولیدی به آب خوراک محاسبه شد.

از اینورتر جریان پمپ فشار بالا Delta VFD-B استفاده شد. شکل ۱، تجهیزات پایلوت را نشان می دهد. به منظور واقعی بودن داده ها، پایلوت در کنار خروجی آب خنک کننده قرار گرفته و از آن به عنوان خوراک سامانه اسمز معکوس استفاده شد.



شکل ۱. واحد پایلوت اسمز معکوس

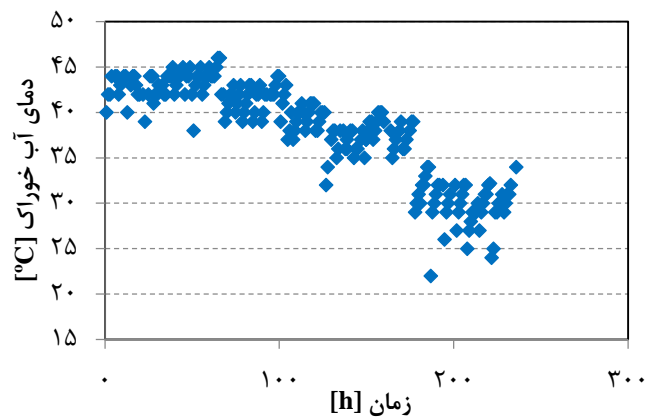
۲-۳- مراحل تحقیق

داده های پایلوت در بازه زمانی تیر تا آذر ماه ۱۳۹۵ ثبت شده و مورد بررسی قرار گرفتند. داده های ورودی به سامانه شامل زمان عملیات، دمای خوراک، ضریب هدایت الکتریکی خوراک و شدت جریان خوراک بوده و داده های خروجی عبارت بودند از شدت جریان آب محصول، ضریب هدایت محصول و میزان مصرف مخصوص انرژی. میزان انرژی مصرفی با اندازه گیری انرژی به وسیله کنتور برق اندازه گیری شد. جدول ۱ مقادیر حداقل، حداکثر، میانگین و انحراف استاندارد هر پارامتر را ارائه داده است. در داده ها، ناحیه وسیعی از دمای خوراک مشاهده می شود که بیانگر تغییرات فصلی است.

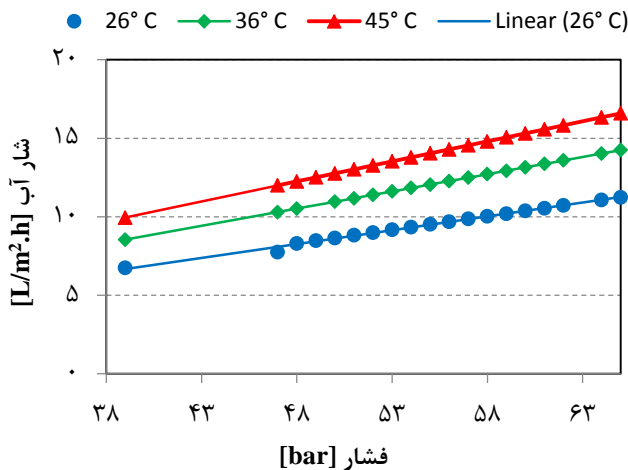
۳-ارائه نتایج و تحلیل یافته‌ها

تغییرات پارامترهای موثر در عملیات اسمز معکوس در پایلوت شامل دمای آب خوراک، تغییرات فشار پیش از غشاء، ضریب هدایت آب محصول، شار آب تولیدی و میزان مصرف ویژه انرژی طی حدود ۲۵۰ ساعت کارکرد پایلوت اندازه‌گیری و محاسبه شدند. در مدت زمان کارکرد پایلوت، ضریب هدایت آب ورودی (دریا) به طور متوسط ۵۷ mS/cm اندازه‌گیری شد. نتایج ثبت داده‌های مربوط به آب دریا و آب خنک‌کننده نشان داد که دمای آب خنک‌کننده در اثر عبور از کندانسور به طور متوسط ۶ °C افزایش می‌یابد. ذکر این نکته ضروری است که در این تحقیق به دلیل انجام آزمون در شرایط واقعی، عوامل تاثیرگذار (دما و فشار آب خوراک) به صورت همزمان تغییر می‌نمایند، بنابراین، از منحنی‌های بدست‌آمده می‌توان روند کلی تغییرات را مشاهده کرد.

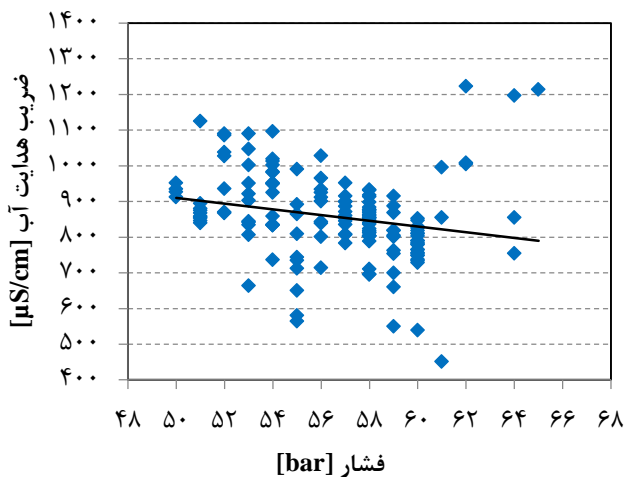
تغییرات دمای آب ورودی به پایلوت اسمز معکوس در مدت زمان بهره‌برداری در شکل ۲ ارائه شده است. در این مدت، دمای آب بین ۲۲ تا ۴۵ °C تغییر نمود. همانگونه که مشاهده می‌شود، در مدت زمان‌های طولانی‌تر و نزدیک به اواخر فصل پاییز، دمای آب خوراک (آب دریا) کاهش یافت.



شکل ۲. تغییرات دمای آب بر حسب زمان کارکرد پایلوت



شکل ۳. تغییرات فشار خوراک بر حسب زمان کارکرد پایلوت



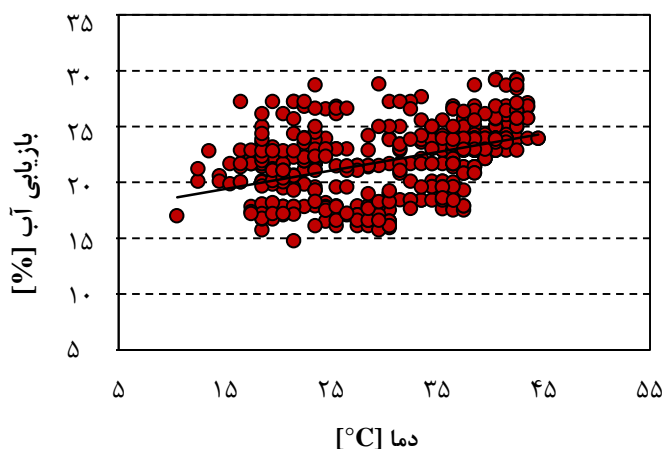
شکل ۴. تغییرات شار آب تولیدی نسبت به فشار در دمای مختلف

از طرفی افزایش فشار، میزان حذف نمک به وسیله غشاء را افزایش می‌دهد. زیرا هر چه فشار بیشتر باشد زمان همراهی یون‌های نمک با مولکول‌های آب کمتر فراهم شده و در نتیجه جداسازی بهتری انجام می‌شود [۵]. در اثبات این مسئله، روند کاهش ضریب هدایت الکتریکی محصول یا به عبارتی عبور نمک از غشاء با افزایش فشار در شکل ۵ ترسیم شده است.

شار آب عبوری از غشاء بر حسب مدت زمان بهره‌برداری از پایلوت در شکل ۶ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در زمان‌های طولانی‌تر شار آب از ۱۵ تا حدود ۸ L/m².h افت

فشار آب ورودی در زمان کار پایلوت در بازه ۴۷-۶۵ bar تغییر داده شد تا اثر آن بر عملکرد سیستم و انرژی مصرفی بررسی شود (شکل ۳). تغییر فشار باعث افزایش شار آب عبوری از غشاء شد (شکل ۴). به عبارت دیگر، با بالا رفتن فشار، ضریب انتقال جرم مولکول‌های آب افزایش یافت. شار آب تولیدی علاوه بر افزایش با فشار، با افزایش دما نیز افزایش قابل توجهی نشان داد. تغییرات شدت شار آب در فشارهای مختلف و در سه دمای ۲۶، ۳۶ و ۴۵ °C در شکل ۴ ترسیم شده است. علت افزایش شار آب، مقدار ضریب تراوش‌پذیری بیشتر غشاء در

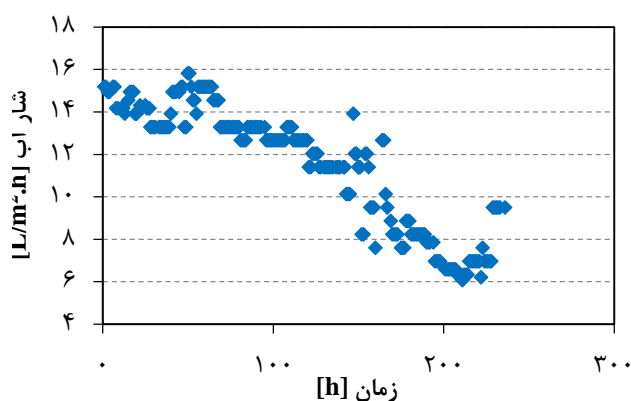
معنای کاهش مصرف ویژه انرژی و کاهش هزینه‌های تولید آب است [۶].



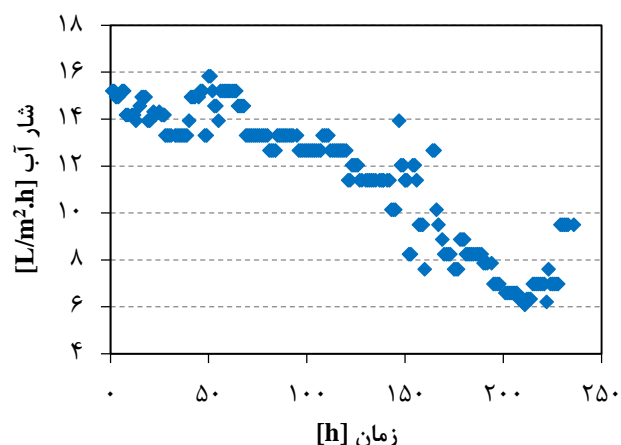
شکل ۷. تغییرات بازیابی آب نسبت به دمای آب خوراک

میزان مصرف ویژه انرژی برای تولید آب در شکل ۸ ارائه شده و در بیشتر موارد در ناحیه $0/06-0/1$ kWh/L تغییر نمود که با توجه به عدم وجود سیستم بازیابی فشار در پایلوت، از نظر مقدار قابل قبول است. فاصله مشاهده شده بین حداقل و حداکثر انرژی مصرفی به دلیل مجموعه عوامل موثر در تولید آب از جمله ضریب هدایت، دما، شدت جریان و فشار آب خوراک می‌باشد. پراکندگی داده‌های موجود در شکل، به دلیل واقعی بودن شرایط کار با پایلوت بوده که در آن تمامی پارامترهای ذکر شده به صورت همزمان تغییر نمودند. در برخی نقاط ممکن است پارامترها در جهت افزایش مصرف انرژی عمل نموده باشند، اگرچه نباید از احتمال خطای انسانی در ثبت داده‌ها صرف‌نظر نمود. همانگونه که مشاهده می‌شود، مصرف ویژه انرژی در طول زمان، افزایشی بوده و نشان می‌دهد که کاهش دمای آب در زمان‌های طولانی‌تر (شکل ۲) باعث کاهش شار آب و در نتیجه افزایش مصرف ویژه انرژی برای تولید آب شیرین می‌شود. این مسئله در تطابق با یافته سایر محققین است [۱۶]. بدیهی است که در صورت استفاده از آب دریا نسبت به آب خنک‌کننده، به دلیل دمای پایین‌تر میزان مصرف انرژی افزایش خواهد یافت.

نمود. این مسئله را می‌توان به دو دلیل عمده کاهش دمای آب و فشار پشت غشاء نسبت داد (در مقایسه با شکل‌های ۲ و ۳) [۲]. اگرچه، گرفتگی غشاء هم می‌تواند یکی از علل کاهش شار آب باشد که با توجه به زمان کم کارکرد پایلوت، نمی‌تواند آن را دلیل اصلی به احتساب آورد. سایر پژوهشگران، مشکل گرفتگی را در زمان‌های طولانی‌تر عمر غشاء مشاهده و گزارش نمودند [۸].



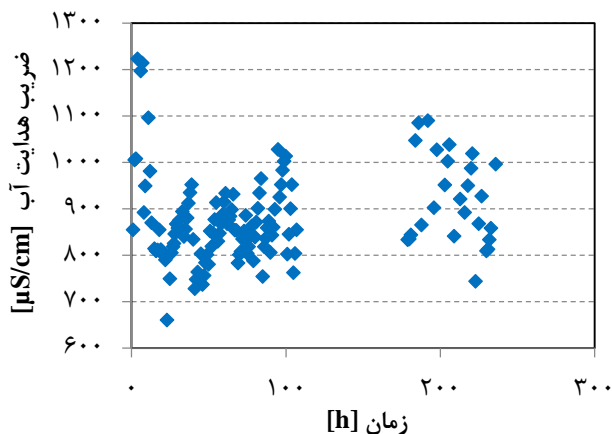
شکل ۵. تغییرات ضریب هدایت آب تولیدی بر حسب فشار ورودی غشاء



شکل ۶. تغییرات شار آب غشاء بر حسب زمان کارکرد پایلوت

درصد بازیابی آب بر اساس دمای آب خوراک در شکل ۷ ارائه شده و در بازه ۱۵-۲۸ درصد قرار گرفته است. این منحنی نیز همانند شار آب، به طور متوسط روند صعودی نسبت به افزایش دما را نشان می‌دهد. تغییرات مشاهده شده در داده‌های هر دما، در اثر تغییرات فشار و شدت جریان آب خوراک می‌باشد. به طور متوسط، به ازای هر درجه افزایش دما، نسبت بازیابی به طور متوسط به میزان $0/002$ افزایش یافت که این افزایش به

محلول (و یون های مربوطه) و کدورت در اثر عملکرد جداسازی غشایی در اسمز معکوس، در آب کاهش یافت.

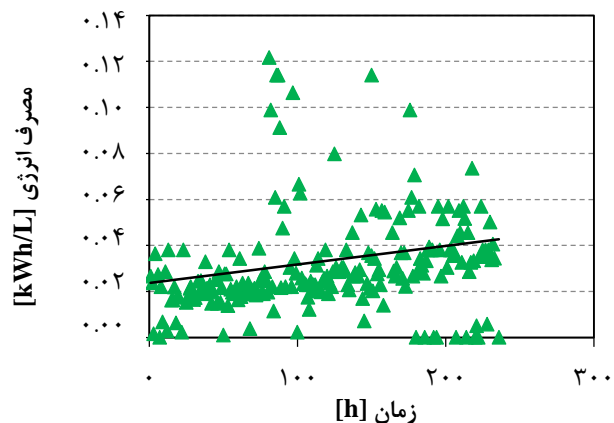


شکل ۹. تغییرات ضریب هدایت آب محصول بر حسب زمان کارکرد پایلوت

غلظت بور در آب خنک کننده (آب دریا) نیز از ۴ تا ۰/۹ mg/L کاهش یافته و در محدوده مجاز برای آب آشامیدنی قرار گرفت [۱۴]. در نتایج آزمون، تغییرات غیرمعمول در غلظت ترکیبات مشاهده نشد تا دلیلی بر اثرگذاری عبور آب دریا از کندانسور نیروگاه بر ترکیبات آب دریا باشد. در نتیجه، انتظار می‌رود که عبور آب دریا از مسیر خنک‌کنندگی، مشکلی در عملکرد اسمز معکوس ایجاد ننماید، اگرچه نیاز به انجام آزمایش تکمیلی می‌باشد.

۴- جمع‌بندی

نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داد که در صورت استفاده از آب خلیج فارس به عنوان آب خنک‌کننده نیروگاه، دمای آب خروجی به طور متوسط 6°C افزایش یافته و این انرژی گرمایی می‌تواند برای افزایش تولید آب و کاهش مصرف ویژه انرژی مورد استفاده قرار گیرد. همجواری نیروگاه و واحد نمک‌زدایی اسمز معکوس، امکان بهره‌برداری از انرژی موجود در آب خنک‌کننده را فراهم می‌آورد. نتایج نشان داد که دمای بالاتر آب در فصول تابستان باعث بازیابی بیشتر آب در اسمز معکوس شده و مصرف ویژه انرژی برای تولید آب کاهش یافت. در کنار اثرات مثبت دمای بالا در اسمز معکوس، باید به کاهش جداسازی نمک به وسیله غشاء و در نتیجه افزایش شوری آب محصول و امکان تخریب و گرفتگی سریع‌تر غشاء در دمای بالا به عنوان چالش اشاره نمود. در این تحقیق، اگرچه حداکثر شوری آب تولیدی کمتر از حداکثر مقدار پیشنهادی سازمان بهداشت جهانی برای آشامیدن به دست آمد، ولی برای ایجاد



شکل ۸. تغییرات مصرف ویژه برق بر حسب زمان کارکرد پایلوت

با وجود مزایایی که در عملکرد اسمز معکوس با افزایش دما مشاهده شد، نتایج سایر محققین نشان داده که در دمای بالاتر عملیاتی، کاهش در میزان جداسازی نمک و شوری آب تولیدی (محصول) به دلیل افزایش تراوش‌پذیری غشاء پلیمری نسبت به نمک، افزایش خواهد یافت [۶]. این مسئله در مورد شرایط آب خلیج فارس در مدت بهره‌برداری از پایلوت اسمز معکوس مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که ضریب هدایت الکتریکی آب محصول بین ۷۰۰ تا $1200\ \mu\text{S}/\text{cm}$ تغییر نمود (شکل ۹). اگرچه حداکثر شوری آن ($780\ \text{mg}/\text{L}$) کمتر از حداکثر پیشنهادی سازمان بهداشت جهانی برای آشامیدن است ($1500\ \text{mg}/\text{L}$) [۱۷]، ولی برای ایجاد مطلوبیت بیشتر و کاهش شوری، می‌توان از یک واحد اسمز معکوس کم فشار در انتهای فرایند استفاده نمود. امکان استفاده از آب تولیدی در سایر کاربردها را نظیر شستشو، آبیاری و سایر کاربردهای غیرآشامیدنی نیز می‌توان در نظر گرفت. در برخی از تحقیقات انجام شده، مقادیر کمتری از ضریب هدایت الکتریکی در آب تولیدی گزارش شده (حدود $500\ \text{mg}/\text{L}$) که می‌توان آن را به دمای عملیاتی پایین‌تر (حدود 23°C) و غشای متفاوت آن تحقیق نسبت داد [۱۴]. مقادیر بالاتر ضریب هدایت الکتریکی آب در ۲۰ ساعت اولیه مربوط به زمان‌هایی است که دمای آب، بالا و فشار پمپ نیز در حداکثر مقدار خود بود. فاصله بین داده‌ها، به دلیل از کار افتادن هدایت‌سنج پایلوت ایجاد شده است. پراکندگی داده‌ها به دلیل تغییر همزمان پارامترهای موثر بر عملکرد اسمز معکوس می‌باشد.

علاوه بر ثبت داده‌های مربوط به جریان خوراک و محصول و شرایط فرایندی در پایلوت، پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب خوراک در چهار نوبت و آب تولیدی پایلوت در سه نوبت مورد آزمون قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. همانگونه که انتظار می‌رفت، مقادیر ضریب هدایت، مواد جامد

معکوس می‌باید در بازه زمانی طولانی‌تر مورد بررسی قرار گیرد. با توسعه دانش تولید غشاهایی با پس‌زنی نمک بیشتر، مقاومت بالاتر نسبت به گرفتگی و دمای بالا در سال‌های اخیر، شرایط بهتری برای استفاده از آب خنک‌کننده نیروگاه‌ها برای ورودی به آب شیرین‌کن اسمز معکوس فراهم شده است.

مطلوبیت بیشتر، می‌توان از یک واحد اسمز معکوس کم فشار در انتهای فرایند استفاده نمود. امکان استفاده از آب تولیدی در سایر کاربردها نظیر شستشو، آبیاری و سایر کاربردهای غیرآشامیدنی را نیز باید در نظر گرفت. تاثیر دمای بالا بر گرفتگی غشاء و آسیب رسانیدن به ساختار غشاهای اسمز

جدول ۲. نتایج آنالیز آب خوراک و آب تولیدی پایلوت اسمز معکوس

نوبت نمونه برداری							پارامتر
۴	۳	۳	۲	۲	۱	۱	
خوراک	خوراک	محصول	خوراک	محصول	خوراک	محصول	مکان نمونه برداری
۸/۰	۸/۲	۷/۶	۸/۱	-	۷/۸	۷/۷	pH
۴۸۹۰۰	۵۰۱۰۰	۶۴۸	۵۱۲۰۰	۹۰۸	۶۱۴۹۰	۴۹۰	ضریب هدایت (μS/cm)
۲۹۴۰۰	۳۰۰۶۰	۳۸۹	۳۱۸۰۰	۵۴۵	۴۴۸۶۰	۳۲۵	کل مواد جامد محلول (mg/L)
۱/۰۴	۱/۲	۰/۲۶	۱/۰۹	۰/۷۸	۴۷/۹	۰/۶۶	کدورت (NTU)
۲۲۲۶۸	۲۲۷۱۰	۳۳	۲۳۹۸۷	۱۵۶	۱۳۴۰۰	۱۱۰	سدیم (mg/L)
۴۴۰	۵۱۰	۲/۳	۴۵۰	۷/۲	۷۵۰	۷/۰	پتاسیم (mg/L)
-	-	-	-	-	۷۴۰۰	۱۸	سختی کل (mg CaCO ₃ /L)
۲۰۲۵	۱۸۸۲	۲۵/۱	۲۰۵۹	۲/۱	۱۴۹۴	۳/۸	منیزیم (mg/L)
۷۱۰/۴	۱۱۸۴	۶۱/۶	۷۱۶	۳/۶	۴۷۰	۰/۸	کلسیم (mg/L)
۰/۳۹	۰/۳۵	۰/۰۱	۰/۴۲	۰/۰۹	۱/۹۲	۰/۷۱	آهن (mg/L)
۱/۹۵	۱/۲۱	۰/۳۲	۱/۸۵	۰/۰۲	-	-	فلوئور (mg/L)
-	-	-	-	-	۴	۰/۹	بور (mg/L)
۴۲۰۰	۴۴۰۰	۱۰۰	۴۵۰۰	-	۸۲۸۷	۴۵/۶	سولفات (mg/L)
۲۲۸۲۰	۲۳۱۹۷	۵۳/۴	۲۲۷۸۹	۲۵۸	۲۰۰۰۰	۱۳۸	کلراید (mg/L)
-	-	-	-	-	۱/۵	۱/۰	دی اکسید سیلیس (mg/L)
۱۴۸	۱۵۲	۱۵۶	۱۵۱	۳۲	-	-	قلیائیت متیل اورانژ (mg CaCO ₃ /L)
-	-	-	-	-	۷۵۰	۲۵	قلیائیت کل (mg CaCO ₃ /L)

Engineering, Lyngby, Denmark

- [4] S.J. Kim, (2009) "A control methodology for the feed water temperature to optimize SWRO desalination process using genetic programming", *Desalination*, 247(1-3), 190-199
- [5] J. Kusera (2015) *Reverse osmosis design, process and applications for engineers*, John Wiley Pub.Co.
- [6] N.Voutchkov (2013) *Desalination, engineering, planning and design*, 1st ed., McGraw-Hill Co.
- [7] El-sayed, M. Abdel-Jawad, S. Ebrahim, and A. Al-Saffar (2000) "Performance evaluation of two RO membrane

۵-منابع و مراجع

- [1] J. Zargan, and S.M. Waez-Mousavi (2016) "Water crisis in Iran: Its intensity, causes and confronting strategies", *Indian Journal of Science and Technology*, 9(44), 1-6
- [2] C. Fritzmann, J. Lowerberg, T. Wintgens, and T. Melin (2007) "State-of-the-art of reverse osmosis desalination", *Desalination*, 216(1-3), 1-76
- [3] F. Lucay, L.A. Cisternas, and E.Galvez (2016) "Global sensitivity analysis of reverse osmosis processes", *The 26th European Symposium on Computer Aided Process*

- [13] S. Chesters, N. Pena, S. Gallego, M. Fazel, M.W. Armstrong, and F. del Vigo (2011) "Results from 99 seawater RO membrane autopsies". *World Congress/Perth Convention and Exhibition Centre (PCEC)*, Perth, Western Australia
- [14] A. Farhat, F. Ahmad, N. Hilal, and H.A. Arafat (2013) "Boron removal in new generation reverse osmosis (RO) membranes using two-pass RO without pH adjustment", *Desalination*, 310, 50–59
- [15] C.R. Reiss (2004) "The importance of pilot studies in the development of large-scale seawater desalination plants", *The Future of Desalination in Texas: Technical Papers, Case Studies, and Desalination Technology Resources*, 2, 1–10
- [16] V.G. Gude (2011) "Energy consumption and recovery in reverse osmosis", *Desalination and Water Treatment*, 36(1–3), 239–260
- [17] World Health Organization (WHO) (2011) Guidelines for drinking-water quality, 4th ed.
- configurations in a MSF RO hybrid system", *Desalination*, 128, 231–245
- [8] H. L. Yang, C. Huang, and J. Chun-Te Lin, J. C. Te (2010) "Seasonal fouling on seawater desalination RO membrane", *Desalination*, 250(2), 548–552
- [9] S. Nisan, B. Commerçon, and S. Dardour (2005) "A new method for the treatment of the reverse osmosis process, with preheating [10] K.M. Sassi, and I.M. Mujtaba (2012) "Effective design of reverse osmosis based desalination process considering wide range of salinity and seawater temperature", *Desalination*, 306, 8–16.
- [11] S. Agashichev, and K.N. Lootah (2003) "Influence of temperature and permeate recovery on energy consumption of a reverse osmosis system", *Desalination*, 154(3), 253–266
- [12] S. Agashichev, S. Almalek, A. Almarouei, E. Osman, J. Kumar, T. Ali, and M. Abdulla (2009) "The influence of seawater temperature on the net driving force and CP degree in reverse osmosis", *Desalination and Water Treatment*, 6, 1-3

Investigation on salt separation and water recovery in the process of seawater reverse osmosis using cooling water of power plant

Seyed Mohsen Dehnavi, Soheila Shokrollahzadeh*

Department of Chemical Technologies, Iranian Research Organization for Science and Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

In recent years, the waste energy in cooling water of power plants has been applied for the production of water from saline waters. In this research, the effect of using the cooling water of a power plant located on the Persian Gulf coast, as a feed of a reverse osmosis unit was investigated on the separation of salt from seawater, the quality of the final product and water recovery. By increasing the feed water temperature from 20 to 45 °C, although the flow of the produced water increased about twice (from 7.5 to 14 L/m²h), it decreased the membrane salt rejection and salt separation by the membrane. As a result, the electrical conductivity of the produced water increased to about 700 to 1200 μS/cm. This change is due to enhanced membrane permeability to water and salt at higher water temperatures. Increased water flux saved energy for water production, but reduced the desirability of drinking water, although it remained within the world health organization (WHO) standards.

All right reserved.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: May 23, 2018

Received in revised form: August 17, 2018

Accepted: September 1, 2018

Key words:

Reverse osmosis,
Temperature increase,
Power plant,
Cooling water,
Salt separation

* Corresponding author
shokrollahzadeh@irost.ir
