Journal of Water and Wastewater, Vol. 34, No. 1, pp: 138-151

Closed Circuit Reverse Osmosis a Way to Minimize Brine Waste: (Two Case Studies in Power Plant Water Treatment Units)

Sh. Niazi

Assist. Prof., Dept. of Water Engineering and Environment,
The Caspian Sea Basin Research Center, University of Guilan, Rasht, Iran
shahram.niazi@guilan.ac.ir

(Received Aug. 27, 2022 Accepted Nov. 13, 2022)

To cite this article:
Niazi, Sh. 2023."Closed circuit reverse osmosis a way to minimize brine waste: (two case studies in power plant water treatment units)" Journal of Water and Wastewater, 34(1), 138-151. Doi: 10.22093/wwj.2022.359371.3284. (In Persian)

Abstract

Nowadays, lack of water resources has become a crisis in many countries around the world including our country, Iran. In the current situation, minimizing the waste of water is vital. Continuous reverse osmosis system, the most widespread technology for water desalination, wastes large amounts of fresh feed water as high salinity brines. Hydraulic parameters and deposition of salts on the membranes are the most important factors limiting the maximum achievable recovery rates in RO systems. Closed circuit RO technology by modifying the operational mode of continuous RO system to a cyclic semi-batch process, reduces limitations of the maximum possible recovery and can decrease the amount of water waste by 90%. Due to the lack of experience and knowledge about CCRO technology in Iran, the main goal of the present study is the performance evaluation of CCRO systems in Iran's water desalination plants. For this purpose, two industrial RO systems, located in central and northwestern Iran, were selected as case studies. For the first time, according to the real feed water matrix, the maximum achievable recovery of systems was investigated by changing continuous RO to CCRO systems. The results revealed that implementing CCRO systems could significantly decrease brine production rate 74 to 89%. However, the electrical energy consumption of the systems increased reasonably 8 to 36%. For high salinity feed water (1st case study), the maximum allowable operating pressure of membrane 41.4 bar limited the recovery of CCRO system to 88.7%. For the system with low salinity feed 2nd case study, the recovery was limited to 96.6% due to restriction in the maximum permeate flowrate per element (1.58 m^3h^{-1}). In this case, the saturation levels of silica and sulfate salts were much higher than the permissible levels. Therefore, dosing a suitable antiscalant and high volumes of sulfuric acid were necessary to control the scaling. However, acid and antiscalant demands were reduced by a decrease in CCRO recovery rate.

Keywords: Continuous RO, Closed Circuit RO, Water Desalination, Recovery Rate, Minimum Water Waste.

dx.doi.org/10.22093/wwj.2022.359371.3284

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۴، شماره ۱، صفحه: ۱۵۱-۱۳۸

اسمز معکوس مدار بسته راهی برای به حداقل رساندن دورریز شور آب: (مطالعه موردی در دو تصفیه‌خانه آب نیروگاه)

شهرام نیازی

استادیار، گروه مهندسی آب و محیطزیست، پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر،
دانشگاه گیلان، رشت، ایران
shahram.niazi@guilan.ac.ir

(دریافت ۱۴۰۱/۶/۵ پذیرش ۱۴۰۱/۸/۲۲)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:
نیازی، ش.، ۱۴۰۲، "اسمز معکوس مدار بسته راهی برای به حداقل رساندن دورریز شور آب: (مطالعه موردی در دو تصفیه‌خانه آب نیروگاه)"
مجله آب و فاضلاب، ۳۴(۱)، ۱۵۱-۱۳۸. Doi: 10.22093/wwj.2022.359371.3284

چکیده

امروزه که چالش کمبود منابع آب، به یک بحران جدی در بسیاری از مناطق جهان به ویژه کشورمان ایران تبدیل شده است، اهمیت کاهش هر چه بیشتر دورریز آب بیش از پیش احساس می‌شود. سیستم‌های اسمز معکوس پیوسته به‌عنوان پرکاربردترین فرایند نمک‌زدایی از آب، بخش قابل‌توجهی از آب خام ورودی را به‌صورت تلخاب بسیار شور هدر می‌دهند. پارامترهای هیدرولیکی و رسوب‌گذاری نمک‌ها بر روی غشاها، مهم‌ترین عوامل محدودکننده درصد بازیابی در سیستم‌های RO هستند. تکنولوژی RO مدار بسته با تغییر فرایند پیوسته ROهای متداول به فرایندی نیمه پیوسته و چرخه‌ای، محدودیت‌های درصد بازیابی این سیستم‌ها را کاهش داده و می‌تواند میزان دورریز آب را تا ۹۰ درصد کاهش دهد. با توجه به دانش و تجربه بسیار کم در خصوص سیستم‌های CCRO در ایران، هدف اصلی این پژوهش ارزیابی عملکرد و کارایی سیستم‌های CCRO در تصفیه‌خانه‌های آب ایران بود. در همین راستا، دو سیستم RO پیوسته موجود در تصفیه‌خانه‌های آب مستقر در مرکز و شمال‌غرب ایران انتخاب شدند. برای اولین بار، بر اساس آنالیز شیمیایی آبهای خام این تصفیه‌خانه‌ها، حداکثر درصد بازیابی با فرض تغییر سیستم‌های RO موجود به سیستم CCRO، بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که با استفاده از سیستم CCRO به‌جای سیستم RO پیوسته به‌ازای کاهش قابل‌توجه حجم تلخاب تولیدی ۷۴ تا ۸۹ درصد مصرف انرژی الکتریکی سیستم به میزان قابل‌قبولی (۸ تا ۳۶ درصد) بیشتر می‌شود. در سیستم CCRO با آب ورودی شورتر (تصفیه‌خانه اول)، حداکثر درصد بازیابی قابل‌دسترس برابر با ۸۸/۷ بود که عامل محدودکننده برای دستیابی به درصد بازیابی بیشتر، حداکثر فشار قابل‌تحمل غشاها bar ۴۱/۴ بود. در مورد سیستم با خوراک حاوی شوری کمتر (تصفیه‌خانه دوم)، حداکثر شدت جریان مجاز تراوش‌یافته m^3h^{-1} ۱/۵۸، درصد بازیابی سیستم را در ۹۶/۶ محدود کرد. البته در این شرایط با توجه به غلظت زیاد سیلیس و سولفات در آب ورودی به این سیستم، درصد اشباع سیلیس و نمک‌های سولفات بسیار بیشتر از حدود مجاز بود که به‌منظور کنترل رسوب‌گذاری این نمک‌ها لازم بود ماده ضدرسوب مناسب و احجام زیادی اسید سولفوریک به آب ورودی تزریق شود. به هر حال با کاهش درصد بازیابی سیستم CCRO احجام مصرف اسید و ماده ضدرسوب کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: اسمز معکوس پیوسته، اسمز معکوس مدار بسته، نمک‌زدایی آب، درصد بازیابی، حداقل دورریز آب

dx.doi.org/10.22093/wwj.2022.359371.3284

۱- مقدمه

امروزه کمبود آب در بسیاری از مناطق جهان به یک چالش جدی تبدیل شده است. متأسفانه تغییرات اقلیمی، کاهش نزولات جوی، رشد سریع و ناهمگون جمعیت، توسعه فعالیت‌های کشاورزی و صنایع آب‌بر، مدیریت ناکارآمد و آلودگی منابع آبی موجود باعث تشدید این چالش و تبدیل آن به بحران در بسیاری از کشورها از جمله کشورمان ایران شده است (Madani, 2014, Gosling and Arnell, 2016). از آنجایی که بیش از ۹۷ درصد منابع آبی در دسترس بر روی کره زمین آبهای شور هستند، فرایندهای نمک‌زدایی آب نقش مهمی در تأمین آب موردنیاز جوامع بشری دارند (Qasim et al., 2019).

فرایند غشایی اسمز معکوس[1] پرکاربردترین و متداول‌ترین روش استفاده شده برای نمک‌زدایی آبهای لب شور و آب دریا است، به‌طوری که در حدود ۷۰ درصد از واحدهای نمک‌زدایی موجود در دنیا از سیستم‌های RO استفاده می‌کنند (Feria-Díaz et al., 2021). در سیستم‌های RO با عبور آب از غشای نیمه‌تراوا، تقریباً تمامی ذرات کلوییدی و مواد حل شده، از آب جدا می‌شوند. با توجه به دمای آب، نوع غشا، کیفیت و ترکیب درصد مواد محلول در آب ورودی، میزان حذف مواد محلول از ۹۵ درصد تا بیش از ۹۹ درصد متغیر است (DuPont, 2022b). جریان آب خالص عبور کرده از غشا، تراوش‌یافته[2] و جریان آب باقیمانده که حاوی مقدار زیادی ناخالصی‌های محلول و نامحلول است، جریان تغلیظ شده[3] نام دارد. نسبت میزان جریان تراوش‌یافته تولیدی به میزان آب ورودی درصد بازیابی[4] نامیده می‌شود (DuPont, 2022b).

سیستم‌های متداول RO پیوسته علی‌رغم داشتن مزیت‌های تکنولوژیک و اقتصادی فراوان، با برخی محدودیت‌های فرایندی از جمله محدود بودن درصد بازیابی آنها روبه‌رو هستند. در سیستم‌های متداول RO (شکل ۱) با توجه به کیفیت، میزان شوری آب ورودی و پیکربندی سیستم معمولاً بازیابی ۶۵ تا ۸۵ درصد است. به این ترتیب ۱۵ تا ۳۵ درصد آب ورودی به سیستم به‌عنوان پساب بسیار شور تغلیظ شده (تلخاب)، هدر می‌رود. مدیریت احجام بالای این پساب‌های بسیار شور علاوه بر هزینه‌بر بودن، با تبعات محیط‌زیستی فراوان به‌خصوص آلوده کردن و شوری منابع آبی پذیرنده همراه است (Afrasiabi and Shahbazali, 2012, Morillo et al., 2014, Panagopoulos et al., 2019). بنابراین برای کاهش تبعات اقتصادی و مخاطرات محیط‌زیستی این پساب‌های بسیار شور، لازم است حجم تولیدی آنها کاهش یابد. به این منظور باید درصد بازیابی سیستم‌های RO به بیشترین مقدار ممکن افزایش پیدا کند. افزایش درصد بازیابی در ماژول‌های RO موجب کاهش حجم جریان تغلیظ شده و در نتیجه تغلیظ و شوری هر چه بیشتر جریان ورودی بر روی سطح غشای RO می‌شود. این افزایش غلظت شوری جریان در طول مخزن بر روی سطح غشاهای انتهایی تشدید می‌شود. چنانچه غلظت نمک‌های محلول در جریان تغلیظ شده از حد اشباع آنها بیشتر شود، کریستال‌های نمک، تشکیل شده و بر روی سطح غشا در سمت خوراک رسوب می‌کنند (Van De Lisdonk et al., 2001, Crittenden et al., 2012).

تشکیل رسوب بر روی سطح غشا موجب گرفتگی آن، افزایش افت فشار و کاهش دبی تراوش‌یافته تولیدی آن می‌شود. همچنین فاصله زمانی نیاز به شستشوی شیمیایی غشاها را کاهش و در نتیجه حجم مواد شوینده شیمیایی مصرفی را افزایش می‌دهد. بنابراین در سیستم‌های متداول RO یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده درصد بازیابی، رسوب نمک‌های محلول و گرفتگی غشا است (Dhakal et al., 2014, Warsinger et al., 2015, Greenlee et al., 2009).

بر اساس آنالیز آب خام ورودی به سیستم، نمک‌های کلسیم کربنات، کلسیم سولفات، کلسیم فلوراید، تری کلسیم فسفات، باریم سولفات، استرانسیم سولفات و سیلیس مهم‌ترین نمک‌هایی هستند که احتمال فوق اشباع شدن و رسوب بر روی سطح غشا را دارند (Ferguson et al., 2011). برای تعیین میزان فوق اشباع بودن نمک‌ها در آب می‌توان از شاخص اشباع[5] استفاده کرد که به‌صورت لگاریتم نرخ اشباع شوندگی یعنی لگاریتم نسبت حاصل‌ضرب اکتیویته به حاصل‌ضرب حلالیت یون‌های تشکیل‌دهنده نمک است (Antony et al., 2011, Crittenden et al., 2012). اگر SI برابر صفر باشد، محلول در تعادل است و اگر کمتر از صفر باشد، زیر اشباع و نیز اگر بزرگتر از صفر باشد، فوق اشباع است و امکان

[1] Revers Osmosis (RO)
[2] Permeate
[3] Concentrate
[4] Recovery
[5] Saturation Index (SI)

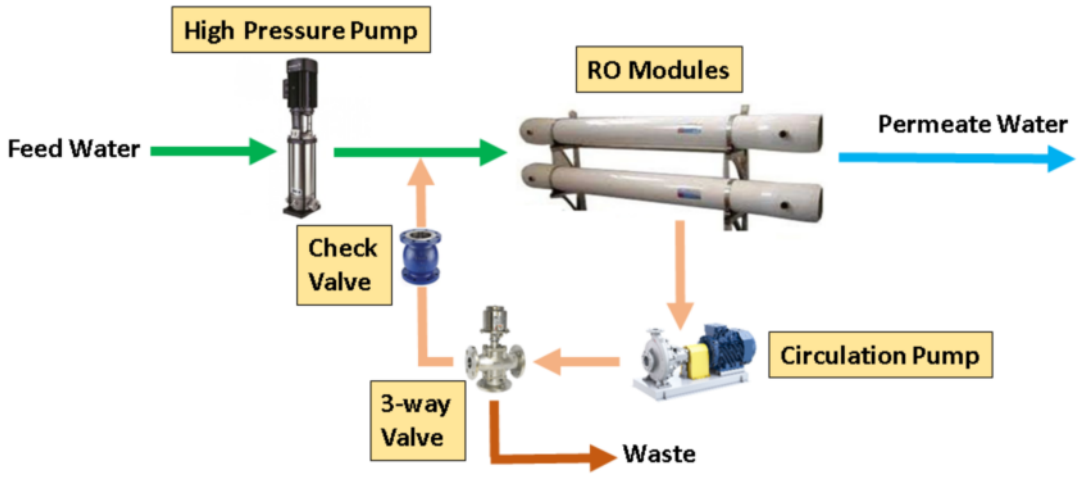

Fig. 1. CCRO system components

شکل ۱- اجزای سیستم CCRO

رسوب‌گذاری وجود دارد.

معمولاً در سیستم‌های RO برای ارزیابی خورندگی آبهای لب‌شور و تمایل به رسوب‌گذاری کلسیم کربنات از شاخص اشباع لانگلیر[1] استفاده می‌شود. LSI بر اساس دما (T)، pH، مقدار جامدات محلول کل[2]، مقدار سختی کلسیمی و قلیاییت کل[3] آب تعیین می‌شود (DuPont, 2022b). مقدار منفی LSI آب بیانگر خورندگی آب و مقدار مثبت آن نشان‌دهنده تمایل آب به رسوب‌گذاری بیشتر است. از آنجا که حلالیت کربنات کلسیم با افزایش pH، افزایش دما و افزایش قلیاییت، کاهش می‌یابد؛ می توان با تزریق اسید سولفوریک یا کلریدریک در ورودی RO، pH و در نتیجه مقدار LSI و احتمال رسوب‌گرفتگی را کاهش داد. در طراحی سیستم‌های RO مقدار مطلوب LSI در جریان تغلیظ شده در حدود ۰/۲- است. البته سازندگان غشاهای RO برای اطمینان بیشتر، علاوه بر کنترل مقدار LSI، تزریق مواد ضدرسوب[4] به آب ورودی به RO را نیز توصیه می‌کنند. با تزریق مواد ضدرسوب حد مجاز مقدار LSI تا ۱/۸ افزایش یافته و در نتیجه میزان مصرف اسید موردنیاز برای کنترل رسوب‌گرفتگی کاهش می‌یابد (DuPont, 2022b, Hydraunatics, 2017).

با به‌کارگیری ماده ضدرسوب مناسب، نمک‌های محلول در آب حتی در مقدار بیش از حد اشباع نیز رسوب‌گذاری نمی‌کنند. جدول ۱ حد مجاز فوق اشباع شدن نمک‌های مختلف را تا قبل از رسوب‌گذاری بر روی سطح غشاهای RO مشخص کرده است (Hydraunatics, 2017, Ferguson et al., 2011). در واقع این مقدار بیشترین درصد بازیابی در سیستم RO پیوسته را مشخص می‌کنند.

علاوه بر تزریق اسید و مواد ضدرسوب برای کنترل رسوب‌گذاری در سیستم‌های RO ایده‌های خلاقانه‌ای مانند استفاده از میدان مغناطیسی (Salman et al., 2015) و تغییر متناوب برای جریان در ماژول‌های RO (Ilias et al., 2002) پیشنهاد شده‌اند که تاکنون در مقیاس صنعتی استفاده نشده‌اند. در همین راستا اخیراً شرکت Desalitech تکنولوژی جدیدی با عنوان RO مدار بسته[5] در مقیاس صنعتی ارائه کرده است که ادعا می‌کند با حل مشکل رسوب‌گذاری در غشاهای RO، محدودیت حداکثر درصد بازیابی سیستم‌های RO پیوسته را ندارد (Efraty, 2009, Efraty, 2010). مطابق ادعای این شرکت، سیستم CCRO می‌تواند با بازچرخانی جریان تغلیظ شده طی یک فرایند نیمه پیوسته، به بازیابی تا ۹۸ درصد دست یابد (Lin and Elimelech, 2015, Li et al., 2020, Werber et al., 2017).

[1] Langelier Saturation Index (LSI)
[2] Total Dissolved Solids (TDS)
[3] Total Alkalinity (Alk)
[4] Antiscalant
[5] Closed Circuit Reverse Osmosis (CCRO)

dx.doi.org/10.22093/wwj.2022.359371.3284

جدول ۱- حدود مجاز فوق اشباع شدن نمک‌های محلول در آب در شرایط استفاده از ماده ضدرسوب مناسب (Hydraunatics, 2017, Ferguson et al., 2011)

Table 1. Permissible super saturation levels in water for dissolved salts in the case of dosing a suitable antiscalant (Hydraunatics, 2017, Ferguson et al., 2011)

Name	Chemical formula	Permissible saturation level
Calcium carbonate	$CaCO_3$	150%
Calcium sulfate	$CaSO_4$	400%
Calcium fluoride	CaF_2	12000%
Calcium phosphate	$Ca_3(PO_4)_2$	2500%
Barium phosphate	$BaSO_4$	8000%
Strontium phosphate	$SrSO_4$	1200%
Silica	SiO_2	120%

سیستم CCRO از همان اجزای سیستم های متداول RO استفاده کرده و نیاز به تجهیز خاص و ویژه‌ای ندارد (شکل ۱). در این سیستم، فرایند به‌صورت چرخه‌های متوالی تصفیه و شستشو[1] انجام می‌شود. در چرخه تصفیه، جریان تغلیظ شده تولیدی، توسط پمپ بازچرخانی فشرده شده، با جریان آب ورودی مخلوط شده و دوباره به ماژول‌های RO باز گردانده می‌شود. در این شرایط دبی جریان تراوش یافته برابر با دبی پمپ فشار قوی ورودی است و عملاً جریانی به‌عنوان پساب شور از سیستم خارج نمی‌شود. به همین ترتیب بازچرخانی جریان تغلیظ شده تا جایی ادامه می‌یابد که درصد بازیابی سیستم به مقدار موردنظر برسد. پس از رسیدن به درصد بازیابی موردنظر، چرخه تصفیه به پایان رسیده و چرخه شستشوی سیستم آغاز می‌شود. در چرخه شستشو پمپ بازچرخانی خاموش شده و شیر سه‌طرفه به سمت خروجی سیستم باز می شود. شیر یک‌طرفه نصب شده بر روی جریان برگشتی به نوعی یک رژیم جریان پلاگ از ورودی تا خروجی ماژول‌ها برقرار می‌کند که موجب تخلیه آب تغلیظ شده از ماژول‌ها و شستشوی رسوبات از سطح غشاها می‌شود. زمان چرخه تصفیه برای رسیدن به بازیابی ۹۸ درصد در حدود ۳۰ تا ۴۰ دقیقه بوده و چرخه شستشو نیز در حدود ۱/۵ تا ۲ دقیقه به‌طول می‌انجامد (Stover, 2013, Efraty et al., 2012).

در سال‌های اخیر پژوهش‌هایی در خصوص کارایی سیستم‌های CCRO، مقاومت آنها در برابر رسوب‌گذاری و گرفتگی و مقایسه عملکرد آنها با سیستم‌های متداول RO پیوسته انجام شده است که مهم‌ترین نتایج آنها به‌شرح زیر خلاصه شده‌اند:

- افزایش درصد بازیابی در تصفیه‌خانه شهر لس‌آنجلس با تغییر سیستم RO پیوسته به CCRO از ۷۵ به ۹۳ درصد. افزایش درصد بازیابی تأثیری در تناوب زمانی شستشوی شیمیایی غشاها نداشته است (Mansell et al., 2014).
- افزایش درصد بازیابی در تصفیه‌خانه فاضلاب سنگاپور از ۷۵ به ۸۸ درصد با استفاده از CCRO به‌جای RO پیوسته، بدون نیاز به شستشوی شیمیایی اضافی (Stover, 2016).
- عدم رسوب‌گذاری سیلیس و کلسیم سولفات در شرایط فوق اشباع بر روی غشاها در سیستم RO ناپیوسته با بازیابی ۹۰ درصد (Tarquin and Delgado, 2012).
- عدم مشاهده رسوب‌گذاری بر روی غشاها در یک سیستم CCRO تا بازیابی ۹۶ درصد در شرایطی که غلظت سیلیس در آب ورودی آن ۳۲ ppm بوده است (Gal et al., 2016).
- در سیستم‌های CCRO اگر غلظت سیلیس در آب خام ورودی بیش از حد اشباع (۱۲۰ ppm) باشد، رسوب‌گذاری بر روی غشاها به‌صوت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد (Efraty, 2016).
- زمان ماند آب در CCRO نسبت به سیستم‌های RO پیوسته بسیار کمتر (۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ برابر) است. حتی در شرایط فوق اشباع، نمک‌های محلول در آب از جمله سیلیس، کلسیم کربنات و کلسیم سولفات، فرصت هسته‌زایی، تبلور و چسبیدن به سطح غشاها را پیدا نمی‌کنند. مقاومت سیستم‌های CCRO در مقابل رسوب‌گذاری و گرفتگی بیشتر بوده و درصد بازیابی در آنها زیادتر است (Warsinger et al., 2018).

[1] Flushing

• بدون حضور مواد ضدرسوب زمان هسته‌زایی کلسیم کربنات در آب لب‌شور در حدود ۴ ساعت و در صورت تزریق مواد ضدرسوب، این زمان ۱۰۰ تا ۲۸۰ ساعت افزایش می‌یابد (Dhakal et al., 2014).

• پارامترهای هیدرولیکی و رسوب‌گذاری در سیستم‌های RO پیوسته، مهمترین عوامل محدودکننده درصد بازیابی سیستم هستند. حداکثر درصد بازیابی سیستم‌های CCRO بیشتر تحت تأثیر پارامترهای هیدرولیکی سیستم است (Futterlieb et al., 2021).

از آنجایی که تاکنون سیستم CCRO در کشورمان ایران نصب و بهره‌برداری نشده است، دانش و تجربه بسیار کمی در خصوص عملکرد این تکنولوژی جدید در میان فعالان صنعت آب و فاضلاب کشور وجود دارد و تا این لحظه، پژوهشی در خصوص میزان کارایی این سیستم‌ها در ایران انجام نشده است. همچنین با توجه به اینکه یکی از مهم‌ترین مزیت‌های سیستم CCRO نسبت به سیستم‌های متداول RO پیوسته زیادتر بودن درصد بازیابی آنها عنوان شده است، هدف اصلی این پژوهش ارزیابی حداکثر درصد بازیابی سیستم‌های CCRO در تصفیه‌خانه‌های آب ایران بود. در همین راستا، دو سیستم RO پیوسته موجود در تصفیه‌خانه‌های آب واقع در مرکز و شمال‌غرب ایران انتخاب شد و برای اولین بار، بر اساس آنالیز شیمیایی آبهای خام این تصفیه‌خانه‌ها، حداکثر درصد بازیابی با فرض تغییر سیستم‌های RO موجود به سیستم CCRO، بررسی شد.

۲- روش پژوهش

موارد مورد مطالعه دو تصفیه‌خانه آب واقع در مرکز و شمال‌غرب ایران بودند که با تصفیه و نمک‌زدایی آب چاه، آب یون‌زدایی شده موردنیاز برای دو نیروگاه سیکل ترکیبی را تأمین کردند. سیستم‌های موجود در تصفیه‌خانه‌ها برای تبدیل آب چاه به آب یون‌زدایی شده شامل واحدهای کلرزنی، فیلتر دو بستره، کارتریج فیلتر، RO پیوسته، بستر رزین‌های کاتیونی، دگازور، بستر رزین‌های آنیونی و بستر رزین‌های مختلط هستند. آنالیز شیمیایی آبهای خام ورودی (آب چاه) به این تصفیه‌خانه‌ها و مشخصات فنی سیستم‌های RO موجود که در حال بهره‌برداری هستند، در جدول ۲ خلاصه شده‌اند.

به‌منظور ارزیابی عملکرد سیستم CCRO، فرض شد که سیستم‌های RO پیوسته موجود با سیستم‌های CCRO جایگزین شوند. در این شرایط، با همان مشخصات آب خام برای دبی‌های تراوش‌یافته تولیدی (جدول ۲)، سیستم‌های CCRO طراحی شدند. در ادامه پارامترهای مهمی مانند تعداد غشاها، حداکثر درصد بازیابی ممکن، میزان مصرف مواد شیمیایی و انرژی الکتریکی موردنیاز برای هر سیستم محاسبه و با هم مقایسه شدند. محاسبات و شبیه‌سازی سیستم‌های RO با استفاده از نرم‌افزار Water Application Value Engine[1] شرکت DuPont و محاسبات مربوط به رسوب‌گذاری و تزریق مواد شیمیایی با نرم‌افزار PROTON شرکت AWC[2] انجام شد.

۳- نتایج و بحث

بر اساس خروجی شبیه‌سازی‌های انجام شده، مشخصات فنی سیستم‌های CCRO طراحی شده در جدول ۳ خلاصه شده‌اند.

۳-۱- نوع و تعداد المان‌های غشا در CCRO

در حال حاضر، در طراحی سیستم‌های صنعتی CCRO فقط غشاهای مدل FilmTec SOAR در دسترس هستند. SOAR 3000i غشایی ۸ اینچی است که در فشارهای کم، کار می‌کنند و برای جداسازی آلاینده‌های آلی از فاضلاب‌ها و آب شهری مناسب هستند. این مدل غشا در بین غشاهای SOAR کمترین میزان دفع نمک[3] را دارد و بیشتر یون‌های دو و چند ظرفیتی را جدا می‌کند. مدل‌های SOAR 4000i و SOAR 5000i غشاهایی با میزان دفع نمک و فشار عملکردی بیشتر هستند که در سیستم‌های تصفیه آبهای صنعتی از جمله آب خنک‌کننده کاربرد عمومی دارند. غشاهای مدل SOAR 6000i و SOAR 7000i بیشترین میزان دفع نمک و فشار عملکردی را دارند و برای سیستم‌های تصفیه تلخاب و آب خوراک بویلرها کاربرد دارند (DuPont, 2022a).

برای انتخاب مدل غشا، پارامترهایی از جمله نوع آب ورودی، میزان شوری آن و مقدار دفع نمک موردنیاز، باید مورد توجه قرار گیرند. بر این اساس برای سیستم‌های تصفیه‌خانه مورد مطالعه اول و دوم، غشای SOAR 6000i انتخاب شد. تعداد غشاها با توجه به ظرفیت موردنظر تولید جریان تراوش‌یافته برای هر سیستم و دبی

[1] Water Application Value Engine (WAVE)
[2] American Water Chemical (AWC)
[3] Salt Rejection

جدول ۲- آنالیز شیمیایی آب خام ورودی و مشخصات فنی سیستم‌های RO پیوسته موجود در تصفیه‌خانه‌های مورد مطالعه

Table 2. Characteristics of raw water sources and technical specifications of existing RO systems in case studies

Raw water chemical analysis			Technical specifications of existing continuous RO systems		
Parameter	**Case study 1**	**Case study 2**	**Parameter**	**Case study 1**	**Case study 2**
Type	Brackish	Brackish	Feed water type	Well water	Well water
EC (μScm^{-1})	9368	2586	Feed water flowrate (m^3h^{-1})	32.6	55
pH at 20°C	7.61	8.08	Feed water pressure (bar)	19.8	15.4
Turbidity (NTU)	0.23	0.39	Feed water TDS (mgL^{-1})	5374	1732
TDS (mgL^{-1})	5374	1732	Recovery rate (%)	67.5	75
HCO_3 (mgL^{-1})	75.8	228	Permeate flowrate (m^3h^{-1})	22	41.3
Ca (mgL^{-1})	477.2	120	Permeate TDS (mgL^{-1})	59.1	15.6
Mg (mgL^{-1})	118	168	Brine flowrate (m^3h^{-1})	10.6	13.7
Na (mgL^{-1})	1280.34	456	Brine TDS (mgL^{-1})	16294	6913
K (mgL^{-1})	4.3	6.35	No. of stages	2	2
Cl (mgL^{-1})	2480	485.4	No. of modules in each stage	1st stage: 3 2nd stage: 1	1st stage: 5 2nd stage: 2
SO_4 (mgL^{-1})	690	374.4	No. of membrane elements in each module	6	6
NO_3 (mgL^{-1})	27.8	1.236	Membrane element type	Filmtec BW30-400	Filmtec BW30-400
F (mgL^{-1})	0.53	0.468	Total No. of membrane elements	24	42
SiO_2 (mgL^{-1})	13.3	33	Specific energy consumption ($kWhm^{-3}$)	1.02	0.72
B (mgL^{-1})	0.7	1.344	Brine LSI	1.48	1.61
Ba (mgL^{-1})	0.01	0.06	Sulfuric acid 98% demand (Ld^{-1})	–	–
Sr (mgL^{-1})	17.1	2.27	Antiscalant 10% demand (Ld^{-1})	2.6	4.8

جدول ۳- مشخصات فنی سیستم‌های CCRO طراحی شده برای تصفیه‌خانه‌های مورد مطالعه اول و دوم

Table 3. The simulation results for each CCRO system

Parameter	Case study 1	Case study 2
Feed water flowrate (m^3h^{-1})	24.8	42.8
Feed water pressure (bar)	16.1 - 41.4	12.5 – 38.4
Feed water TDS (mgL^{-1})	5374	1732
Max. possible recovery rate (%)	88.7	96.6
No. of circulating cycle	18	48
Total time of circulating cycle (min)	12.5	40
Time of flushing cycle (min)	1.7	1.5
Limitation for higher recovery	Max. allowable operating pressure (41.4 bar)	Max. permeate flow per element (1.58 m^3h^{-1})
Permeate flowrate (m^3h^{-1})	22	41.3
Permeate TDS (mgL^{-1})	64.3	61.2
Brine flowrate (m^3h^{-1})	2.8	1.5
Brine TDS (mgL^{-1})	46756	49398
Membrane element type	SOAR 6000i	SOAR 6000i
Total No. of membrane elements	21	36
No. of membrane elements in each module	3	4
No. of modules	7	9
Salt rejection (%)	98.8	96.4
Specific energy consumption ($kWhm^{-3}$)	1.1	0.98
Sulfuric acid 98% demand (Ld^{-1})	–	178
Antiscalant 10% demand (Ld^{-1})	5.3	9.3

تولیدی هر غشا (در حدود m^3h^{-1} ۱/۱) محاسبه شدند. تعداد غشای موردنیاز برای تصفیه‌خانه اول ۲۱ و برای تصفیه‌خانه دوم ۳۶ المان (و کمتر از تعداد غشاها در سیستم‌های RO موجود) به‌دست آمد. در ROهای پیوسته درصد بازیابی سیستم وابسته به فضا و حجم ماژول‌ها است در حالی که در RO نیمه پیوسته رسیدن به درصد بازیابی وابسته به‌مدت زمان هر چرخه است. بنابراین برخلاف ROهای متداول، سیستم CCRO برای رسیدن به درصدهای بازیابی بالا نیازی به مراحل پشت سرهم از ماژول‌های ۶ تا ۸ غشایی ندارد و فقط طی یک مرحله و با استفاده از ماژول‌های کمتر با ۳ تا ۵ غشا به درصد بازیابی موردنظر می‌رسد. هر چه تعداد غشاها در مخزن کمتر باشد، سرعت جریان متقاطع بیشتر و شار جریان در المان‌های ابتدایی مخزن کمتر است. در نتیجه احتمال رسوب‌گذاری و گرفتگی در غشاها کمتر خواهد بود. بنابراین برای آبهای با شوری بیشتر، بهتر است از ماژول‌های کوتاهتر با تعداد غشای کمتر استفاده شود (Futterlieb et al., 2021, Stover, 2016). بر همین اساس برای تصفیه‌خانه اول ۷ مخزن ۳ المانه و برای تصفیه‌خانه دوم ۹ ماژول ۴ المانه انتخاب شدند.

۳-۲- حداکثر درصد بازیابی ممکن

در سیستم‌های RO درصد بازیابی سیستم به کیفیت، شوری، نوع خوراک، تعداد ماژول‌ها، تعداد مراحل و تعداد المان‌های غشا در هر مخزن وابسته است. هر چه کیفیت آب ورودی کمتر باشد و امکان رسوب‌گذاری و گرفتگی بیشتر باشد، حداکثر درصد بازیابی ممکن کمتر خواهد بود. همچنین درصد بازیابی با افزایش تعداد مراحل و تعداد المان‌های غشای سری بیشتر می‌شود. البته با افزایش تعداد مراحل و المان‌های سری، پیچیدگی سیستم بیشتر شده و متعادل کردن هیدرولیک جریان در غشاها سخت‌تر می‌شود (DuPont, 2022b).

به طور کلی پارامترهای هیدرولیکی و عوامل رسوب‌گذاری محدودکننده‌های اصلی درصد بازیابی در سیستم‌های RO هستند. مهمترین پارامترهای رسوب‌گذاری شامل شاخص LSI و حد فوق اشباع شدن نمک‌های مندرج در جدول ۱ هستند. از مهمترین پارامترهای هیدرولیکی نیز می‌توان حداقل شدت جریان تغلیظ شده، حداکثر شدت جریان تراوش‌یافته و حداکثر درصد بازیابی هر المان غشا و همچنین حداکثر فشار عملیاتی سیستم را نام برد (Futterlieb et al., 2021).

برای کنترل پارامترهای رسوب‌گذاری از تزریق اسید و مواد ضدرسوب مناسب و به‌منظور کنترل پارامترهای هیدرولیکی از روش‌های متعادل‌سازی تراوش‌یافته از جمله ایجاد فشار معکوس در جریان تراوش‌یافته، برقراری جریان برگشتی برای مراحل مختلف و استفاده از پمپ تقویتی بین مراحل استفاده می‌شود (DuPont, 2022b).

۳-۲-۱- سیستم‌های RO پیوسته

مطابق جدول ۲ در حال حاضر درصد بازیابی سیستم‌های RO موجود در تصفیه‌خانه‌های اول و دوم به‌ترتیب ۶۷/۵ و ۷۵ درصد بود.

باز طراحی این سیستم‌ها نشان داد که با متعادل‌سازی هیدرولیک سیستم (اعمال فشار معکوس در جریان تراوش‌یافته و افزایش فشار بین مراحل)، حتی با کاهش ۶ المان غشا می‌توان درصد بازیابی سیستم‌های موجود را افزایش داد (شکل ۲). پارامترهای محدودکننده درصد بازیابی در این سیستم‌ها حداکثر شدت جریان تراوش‌یافته (m^3h^{-1} ۱/۴۳) و حداکثر درصد بازیابی (۱۹درصد) هر المان غشا بودند. در خصوص سیستم RO تصفیه‌خانه دوم، با توجه به غلظت زیاد سیلیس در آب خام ورودی، عامل محدودکننده درصد بازیابی حد مجاز فوق اشباع شدن سیلیس (۱۲۰درصد) در جریان تلخاب RO بود. به‌طوری که چه در سیستم موجود و چه با کاهش ۶ المان غشا، با فرض استفاده از ماده ضدرسوب مناسب، حداکثر بازیابی سیستم ۷۸/۵ درصد بود (شکل ۲). بدیهی است از آنجا که عامل اصلی محدودکننده حداکثر درصد بازیابی سیستم، رسوب‌گذاری سیلیس بود، عملاً روش‌های متعادل‌سازی هیدرولیک جریان تراوش‌یافته تأثیری در افزایش درصد بازیابی سیستم نداشت.

محاسبه شاخص LSI برای این سیستم‌ها نشان داد که با توجه به دما و pH آب خوراک و درصد بازیابی در نظر گرفته شده، مقدار شاخص LSI برای سیستم RO موجود در تصفیه‌خانه اول برابر ۱/۴۸ و در تصفیه‌خانه دوم برابر ۱/۶۱ بود که این مقدار از حد مجاز (۱/۸) کمتر بوده و در نتیجه نیازی به تزریق اسید برای کاهش pH خوراک ورودی وجود نداشت (جدول ۴). در صورت افزایش بازیابی سیستم‌های RO، مقدار LSI همچنان کمتر از حد

dx.doi.org/10.22093/wwj.2022.359371.3284

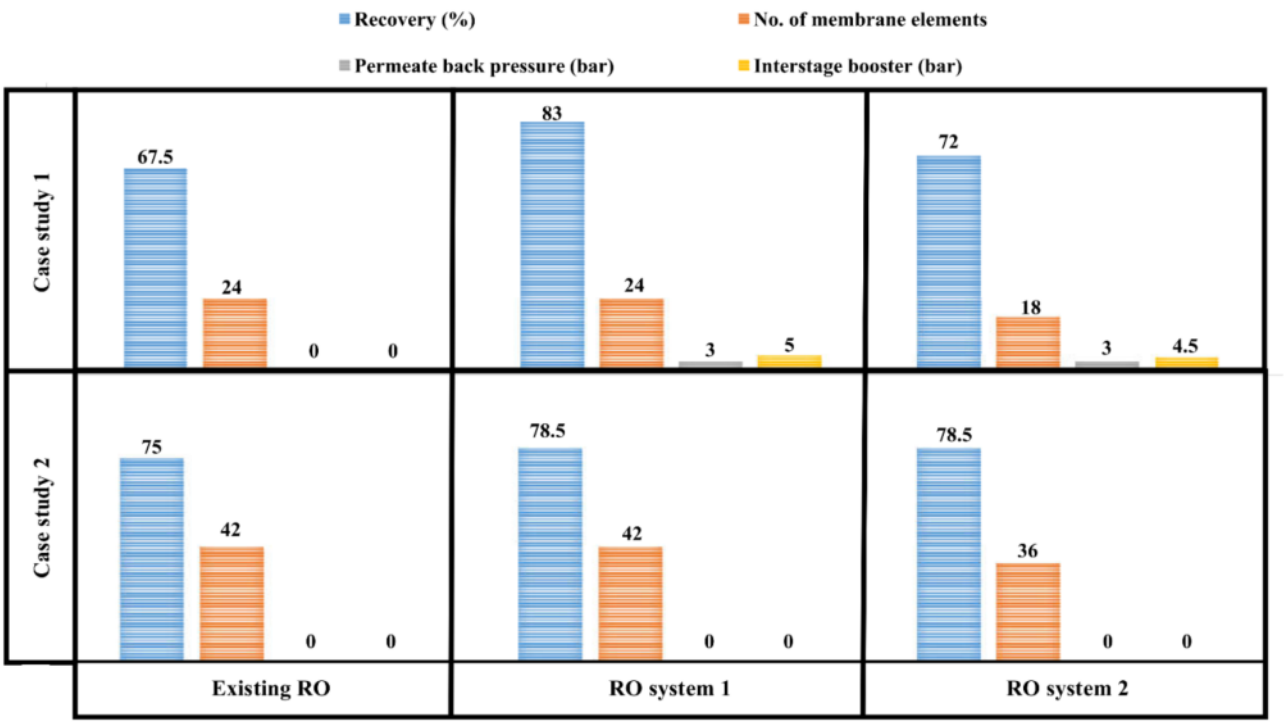

Fig. 2. Recovery rate increasing in existing RO systems by permeate balancing

شکل ۲- مشخصات سیستم‌های RO موجود و میزان افزایش درصد بازیابی آنها را در صورت متعادل‌سازی هیدرولیک سیستم‌ها

جدول ۴- مقدار LSI محاسبه شده برای سیستم‌های RO پیوسته و میزان اسید موردنیاز

Table 4. Calculated LSI for continuous RO systems and required acid dosing

Case study	Continuous RO- case study 1			Continuous RO- case study 2		
	System 2	System 1	Existing system	System 2	System 1	Existing system
Recovery rate (%)	72	83	67.5	78.5	78.5	75
Brine LSI	1.58	1.79	1.48	1.72	1.72	1.61
Sulfuric acid 98% demand (Ld^{-1})	–	1	–	–	–	–

مجاز ۱/۸ بود و نیازی به تزریق اسید در ورودی RO وجود نداشت (به‌غیر از بازیابی ۸۳ درصد در تصفیه‌خانه اول).

۳-۲-۲- سیستم‌های CCRO

در سیستم‌های CCRO نسبت سیستم‌های RO پیوسته، به‌دلیل تعداد غشاهای کمتر در هر مخزن، بازچرخانی جریان تغلیظ شده و سرعت جریان متقاطع بیشتر، زمان کمتر چرخه‌های تصفیه (فاصله کوتاه بین دو شستشوی متوالی) و در نتیجه زمان ماند کم نمک‌های موجود در آب بر روی سطح غشاها، امکان و احتمال رسوب‌گذاری نمک‌ها و گرفتگی غشاها کمتر است. در سیستم‌های CCRO تصفیه‌خانه‌های اول و دوم، زمان کل چرخه‌های تصفیه به‌ترتیب ۱۲/۵ و ۴۰ دقیقه محاسبه شد (جدول ۳). بنابراین برای سیستم‌های CCRO معمولاً عوامل محدودکننده حداکثر درصد بازیابی سیستم، پارامترهای هیدرولیکی هستند نه پارامترهای رسوب‌گذاری.

نتایج نشان دادند که در سیستم CCRO طراحی شده برای تصفیه‌خانه اول، حداکثر درصد بازیابی قابل دسترس برابر با ۸۸/۷ بوده که عامل محدودکننده برای دستیابی به درصد بازیابی بیشتر، حداکثر فشار قابل تحمل غشاها (۴۱/۴ bar) بود. آب ورودی به این سیستم شوری بالا ($۵۳۷۴\ mgL^{-1}$) داشت و از آنجایی که با افزایش شوری آب، فشار اسمزی بیشتر می‌شود، این فشار برای سیستم‌های RO در درصدهای بازیابی بالا، ممکن بود از حد فشار

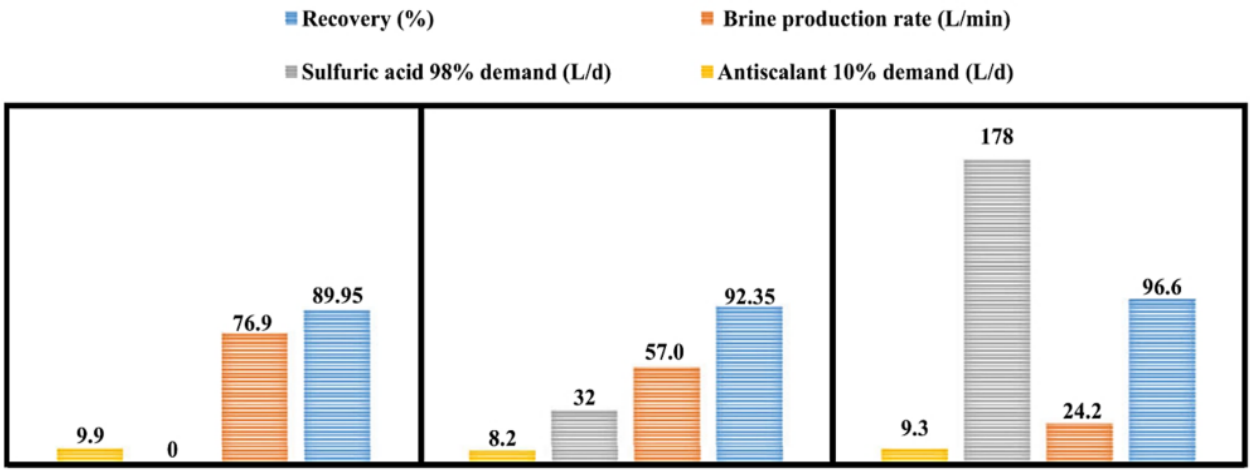

Fig. 3. Chemical consumption and brine production rate for 2nd case study CCRO system at different recovery rates

شکل ۳- میزان مصرف مواد شیمیایی و تلخاب تولیدی در درصدهای بازیابی مختلف برای سیستم CCRO تصفیه‌خانه دوم

قابل‌تحمل غشاها تجاوز کند.

در مورد سیستم CCRO تصفیه‌خانه دوم، حداکثر شدت جریان مجاز تراوش‌یافته ($۱/۵۸\ m^3h^{-1}$) در غشای ابتدایی مخزن، حداکثر درصد بازیابی سیستم را در ۹۶/۶ محدود کرد. نکته قابل‌توجه در خصوص این سیستم، نیاز به مصرف مقدار زیاد اسید ($۱۷۸\ Ld^{-1}$) بود. در بازیابی ۹۶/۶ درصد با توجه به غلظت زیاد سیلیس و سولفات در آب ورودی به این سیستم، درصد اشباع سیلیس (۶۶۷/۱ درصد) و نمک‌های سولفات (باریم سولفات ۲۳۴۸۳ درصد) بسیار بیشتر از حدود مجاز بیان شده در جدول ۱ بودند.

همان طور که اشاره شد، سیستم‌های CCRO نسبت به سیستم‌های RO پیوسته مقاومت بسیار بیشتری در مقابل رسوب‌گذاری و گرفتگی دارند، اما در شرایطی که درصد فوق اشباع شدن نمک‌ها بسیار زیاد باشد، لازم است تمهیداتی برای جلوگیری از گرفتگی غشاها در نظر گرفته شود. در همین راستا در شرایط بازیابی ۹۶/۶ درصد نیاز به تزریق $۹/۳\ Ld^{-1}$ ماده ضدرسوب مناسب و $۱۷۸\ Ld^{-1}$ اسید سولفوریک غلیظ (برای کاهش pH آب ورودی تا ۵) وجود داشت. لازم به‌ذکر است که با توجه به حجم بالای مصرف اسید در این حالت، ممکن است راهبری سیستم با درصد بازیابی ۹۶/۶ صرفه اقتصادی نداشته باشد. نتایج باز طراحی سیستم CCRO در درصدهای بازیابی مختلف نشان دادند که با کاهش درصد بازیابی سیستم می‌توان احجام مصرف اسید و ماده ضدرسوب را کاهش داد (شکل ۳). بدیهی است در این شرایط تصمیم‌گیری در خصوص درصد بازیابی سیستم، مصالحه‌ای بین میزان تلخاب تولیدی و مقدار ماده شیمیایی مصرفی است.

۳-۳- میزان مصرف انرژی الکتریکی

به‌طور کلی مبحث میزان مصرف انرژی در سیستم‌های RO پیوسته، بیشتر در سیستم‌های آب شیرین‌کن دریایی به‌دلیل فشار عملکردی بالای سیستم مطرح است. امروزه در سیستم‌های آب شیرین‌کن دریایی مصرف انرژی الکتریکی ۲ تا $۴\ kWhm^{-3}$ است (Voutchkov, 2018, Li et al., 2020, Werber et al., 2017).

در سیستم‌های RO پیوسته که آب ورودی شوری کمتر دارد و از نوع لب‌شور است، فشار عملیاتی سیستم کمتر و معمولاً میزان مصرف انرژی الکتریکی سیستم منطقی، مقرون‌به‌صرفه‌تر و در حدود ۱ تا $۱/۵\ kWhm^{-3}$ است (Voutchkov, 2018).

در سیستم‌های CCRO به‌دلیل درصد بازیابی بالاتر و تغلیظ بیشتر خوراک ورودی، فشار عملکردی سیستم بالاتر است. در این سیستم‌ها به‌دلیل افزایش غلظت خوراک ناشی از بازچرخانی آب، اختلاف فشار اسمزی دو طرف غشا افزایش و در نتیجه اختلاف فشار مؤثر یا خالص بین دو طرف غشا کاهش می یابد. در نتیجه برای حفظ مقدار آب تراوش‌یافته باید فشار خوراک ورودی به ماژول را افزایش داد که خود سبب افزایش مصرف انرژی و نیز صرف هزینه بیشتر برای کار در فشار بالاتر خواهد شد (Warsinger et al., 2016). در نتیجه بررسی مقدار مصرف انرژی

dx.doi.org/10.22093/wwj.2022.359371.3284

جدول ۵- مقایسه میزان تلخاب تولیدی و انرژی مصرفی هر سیستم CCRO نسبت به سیستم‌های RO پیوسته

Table 5. Brine production rate and electrical energy demand for each system

System	Case study 1		Case study 2	
	Continuous RO	CCRO	Continuous RO	CCRO
Recovery rate (%)	67.5	88.7	75	96.6
Brine production rate (m^3h^{-1})	10.6	2.8	13.7	1.5
Reduction in brine production (%)	74		89	
Electrical energy demand ($kWhm^{-3}$)	1.02	1.1	0.72	0.98
Reduction in energy demand (%)	8		36	

الکتریکی سیستم‌های CCRO اهمیت بیشتری دارد.

در سیستم‌های RO پیوسته بخشی از انرژی سیستم از طریق خروج جریان پرفشار تلخاب هدر می‌رود، در حالی که در فرایند CCRO با بازچرخانی جریان تغلیظ شده عملاً از هدررفت انرژی جلوگیری می‌شود. همچنین با توجه به درصد بازیابی بیشتر در این سیستم، جریان موردنیاز آب ورودی به سیستم کاهش یافته و در نتیجه ظرفیت پمپ فشار قوی ورودی (به‌عنوان بزرگترین مصرف‌کننده انرژی در سیستم) کاهش و مصرف انرژی آن کمتر می‌شود. علاوه بر موارد فوق در فرایند CCRO برخلاف فرایند RO پیوسته، فشار ورودی به ماژول های غشا به‌صورت تدریجی افزایش می‌یابد و همواره در بیشینه مقدار، ثابت نمی‌ماند. مجموعه عوامل بیان شده باعث می‌شود که مصرف انرژی الکتریکی در سیستم‌های CCRO نسبت به سیستم‌های RO پیوسته بهینه‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تر باشد (Stover, 2016).

بررسی نتایج در جدول ۵ نشان داد که در مورد تصفیه‌خانه اول که شوری آب ورودی به آن بیشتر است، با استفاده از سیستم CCRO به‌جای سیستم RO پیوسته به ازای ۷۴ درصد کاهش حجم تلخاب تولیدی فقط ۸ درصد مصرف انرژی بیشتر می‌شود. به همین ترتیب برای تصفیه‌خانه دوم با کاهش ۸۹ درصدی مقدار تلخاب تولیدی، مصرف انرژی ۳۶ درصد افزایش می‌یابد. بنابراین برای آبهای لب‌شور با شوری بیشتر، بازدهی انرژی سیستم CCRO بالاتر است، چون برای آبهای شورتر مقدار مصرف انرژی سیستم RO پیوسته بیشتر بوده و در این حالت تفاوت مصرف انرژی CCRO با آن کمتر خواهد بود. به هر حال به‌نظر می‌رسد با توجه به مزیت‌های فراوان کاهش چشم‌گیر احجام تلخاب تولیدی در سیستم‌های RO، انتخاب و استفاده از سیستم CCRO مقرون‌به‌صرفه و مناسب باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد سیستم‌ها در صورت تغییر سیستم‌های RO پیوسته موجود به CCRO در دو تصفیه‌خانه صنعتی آب لب‌شور بررسی شد. مهم‌ترین نتایج حاصل از بررسی مشخصات فنی و ارزیابی عملکرد سیستم‌های CCRO به‌شرح موارد زیر هستند:

در صورتی که پارامترهای هیدرولیکی عوامل محدودکننده درصد بازیابی در سیستم RO پیوسته باشند، متعادل‌سازی هیدرولیک سیستم (اعمال فشار معکوس در جریان تراوش‌یافته و فشار تقویتی بین مراحل) می‌تواند حداکثر درصد بازیابی را افزایش دهد. همچنین در طراحی و راهبری سیستم‌های RO توجه به میزان افزایش LSI، غلظت نمک‌ها و سیلیس در جریان تلخاب ضروری است.

در سیستم‌های CCRO نسبت سیستم‌های RO پیوسته، به‌دلیل تعداد غشاهای کمتر در هر مخزن، بازچرخانی جریان تغلیظ شده و سرعت جریان متقاطع بیشتر و همچنین زمان کمتر چرخه‌های تصفیه (۱۲/۵ و ۴۰ دقیقه) و در نتیجه زمان ماند کم نمک‌های موجود در آب بر روی سطح غشاها، امکان و احتمال رسوب‌گذاری نمک‌ها و گرفتگی غشاها کمتر است. بنابراین برای سیستم‌های CCRO معمولاً پارامترهای محدودکننده درصد بازیابی سیستم، پارامترهای هیدرولیکی هستند نه پارامترهای رسوب‌گذاری. حداکثر درصد بازیابی سیستم‌های CCRO که آب ورودی شوری بالایی دارد، وابسته به حداکثر فشار قابل‌تحمل غشاها است.

در سیستم‌های CCRO در صورتی که درصد اشباع سیلیس و نمک‌ها بسیار بیشتر از حدود مجاز باشد، لازم است ماده ضدرسوب مناسب و احجام بالایی اسید سولفوریک به آب ورودی تزریق شود. در این حالت، ممکن است راهبری سیستم با حداکثر درصد بازیابی صرفه اقتصادی نداشته باشد. با کاهش درصد بازیابی سیستم‌های CCRO می‌توان احجام مصرف اسید و ماده ضدرسوب را کاهش داد. تصمیم‌گیری در خصوص درصد بازیابی این سیستم‌ها، مصالحه‌ای بین میزان تلخاب تولیدی و مقدار ماده شیمیایی مصرفی است. برای تصفیه‌خانه‌هایی که در مناطق کم‌آب مستقر شده‌اند و یا به‌دلیل کمبود فضا، سردی هوا و شدت تبخیر سطحی کم منطقه، ساخت استخرهای تبخیری با مشکلاتی همراه است، به نظر می‌رسد افزایش درصد بازیابی سیستم در ازای مصرف بیشتر مواد شیمیایی مقرون‌به‌صرفه باشد.

با استفاده از سیستم CCRO به‌جای سیستم RO پیوسته به‌ازای کاهش قابل‌توجه حجم تلخاب تولیدی (۷۴ تا ۸۹ درصد) مصرف انرژی الکتریکی سیستم به میزان قابل‌قبولی (۸ تا ۳۶ درصد) بیشتر می‌شود.

طی این پژوهش، ارزیابی عملکرد سیستم‌های CCRO نشان داد که با تغییر سیستم‌های متداول RO پیوسته در تصفیه‌خانه‌های آب به سیستم CCRO، می‌توان حجم دورریز آب و تلخاب تولیدی را به مقدار قابل‌ملاحظه‌ای کاهش داد. علاوه بر پارامترهای هیدرولیکی جریان در سیستم، مقدار و نوع نمک‌های موجود در آب، نقش اساسی در تعیین حداکثر درصد بازیابی و میزان مصرف مواد شیمیایی در سیستم‌های CCRO دارند که باید در طراحی این سیستم‌ها مدنظر قرار گیرند. البته با توجه به اینکه مکانیسم و رفتار فرایندهای CCRO و مقاومت آنها در مقابل رسوب‌گذاری و گرفتگی به‌طور کامل شناخته شده نیستند، انجام پژوهش‌های آزمایشگاهی گسترده در مقیاس پایلوت و صنعتی ضروری به‌نظر می‌رسد. این پژوهش می‌تواند شروعی برای انجام پژوهش‌های امکان‌سنجی استفاده از تکنولوژی جدید CCRO در تولید آب موردنیاز نیروگاهی، صنعتی و شرب در ایران باشد. البته با توجه به اینکه تغییر سیستم RO به CCRO در مقیاس صنعتی هزینه‌بر و همراه با ریسک‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری است، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، در صورت دسترسی به غشاهای FilmTec SOAR، در یک پایلوت آزمایشگاهی این امکان‌سنجی به‌صورت تجربی بررسی شود.

۵- قدردانی

به این وسیله از حمایت پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر دانشگاه گیلان قدردانی می‌شود.

References

Afrasiabi, N. & Shahbazali, E. 2012. RO brine treatment and disposal methods. *Desalination and Water Treatment,* 35, 39-53.

Antony, A., Low, J. H., Gray, S., Childress, A. E., Le-Clech, P. & Leslie, G. 2011. Scale formation and control in high pressure membrane water treatment systems: a review. *Journal of Membrane Science,* 383, 1-16.

Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J. & Tchobanoglous, G. 2012. *MWH's Water Treatment: Principles and Design. 3rd Edition*. NJ John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey, Canada.

Dhakal, N., Salinas Rodriguez, S. G., Schippers, J. C. & Kennedy, M. D. 2014. Induction time measurements in two brackish water reverse osmosis plants for calcium carbonate precipitation. *Desalination and Water Treatment,* 53, 285-293.

DuPont 2022a. *Introduction to WAVE*. DuPont Water Solutions Pub., California, USA.

DuPont 2022b. *Water Solutions: FilmTec™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual Form No. 45-D01504-en.* DuPont Water Solutions Pub., California, USA.

Efraty, A. 2009. Apparatus for continuous closed circuit desalination under variable pressure with a single container. Desalitech Pub., California, USA.

Efraty, A. 2010. Continuous closed-circuit desalination apparatus without containers. Desalitech Pub., California, USA.

Efraty, A. 2016. CCD series no-16: opened vs. closed circuit SWRO batch desalination for volume reduction of silica containing effluents under super-saturation conditions. *Desalination and Water Treatment,* 57**,** 9569-9584.

Efraty, A., Barak, R. N. & Gal, Z. 2012. Closed circuit desalination — a new low energy high recovery technology without energy recovery. *Desalination and Water Treatment,* 31**,** 95-101.

Ferguson, R. J., Ferguson, B. R. & Stancavage, R. F. 2011. Modeling scale formation and optimizing scale-inhibitor dosages. *IDA Journal of Desalination and Water Reuse,* 3**,** 30-39.

Feria-Díaz, J. J., Correa-Mahecha, F., López-Méndez, M. C., Rodríguez-Miranda, J. P. & Barrera-Rojas, J. 2021. Recent desalination technologies by hybridization and integration with reverse osmosis: a review. *Water,* 13**,** 1369.

Futterlieb, M., Elsherbiny, I. M. A., Tuczinski, M., Lipnizki, J. & Panglisch, S. 2021. Limits of high recovery inland desalination: closed-circuit reverse osmosis – a viable option? *Chemie Ingenieur Technik,* 93**,** 1359-1368.

Gal, Z., Septon, J., Efraty, A. & Lee, A. M. 2016. CCD series no-20: high-flux low-energy upgrade of municipal water supplies with 96% recovery for boiler-feed and related applications. *Desalination and Water Treatment,* 57**,** 20219-20227.

Gosling, S. N. & Arnell, N. W. 2016. A global assessment of the impact of climate change on water scarcity. *Climatic Change,* 134**,** 371-385.

Greenlee, L. F., Lawler, D. F., Freeman, B. D., Marrot, B. & Moulin, P. 2009. Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges. *Water Research,* 43**,** 2317-2348.

Hydraunatics, 2017. *Chemical Pretreatment for RO and NF*. Nitto Group Company. California, USA.

Ilias, S., Hargrove, S. C. & Talbert, M. E. 2002. Method for improving the permeate flux of a cross-flow membrane filter. U.S. Patents. 6**,** 168-714.

Li, S., Duran, K., Delagah, S., Mouawad, J., Jia, X. & Sharbatmaleki, M. 2020. Energy efficiency of staged reverse osmosis (RO) and closed-circuit reverse osmosis (CCRO) desalination: a model-based comparison. *Water Supply,* 20**,** 3096-3106.

Lin, S. & Elimelech, M. 2015. Staged reverse osmosis operation: configurations, energy efficiency, and application potential. *Desalination,* 366**,** 9-14.

Madani, K. 2014. Water management in Iran: what is causing the looming crisis? *Journal of Environmental Studies and Sciences,* 4**,** 315-328.

Mansell, B., Nikonova, T., Ackman, P., Langpap, B., Tang, C., Tremblay, R., et al. 2014. Evaluation of RO concentrate treatment and disposal options for the Santa Clarita Valley. *Proceedings of the 29th Annual Wate Reuse Symposium,* Dallas, Texas, USA.

Morillo, J., Usero, J., Rosado, D., El Bakouri, H., Riaza, A. & Bernaola, F. J. 2014. Comparative study of brine management technologies for desalination plants. *Desalination,* 336**,** 32-49.

Panagopoulos, A., Haralambous, K. J. & Loizidou, M. 2019. Desalination brine disposal methods and treatment technologies - a review. *Science of The Total Environment,* 693**,** 133545.

Qasim, M., Badrelzaman, M., Darwish, N. N., Darwish, N. A. & Hilal, N. 2019. Reverse osmosis desalination: a state-of-the-art review. *Desalination,* 459**,** 59-104.

Salman, M., Safar, M. & Al-Nuwaibit, G. 2015. The effect of magnetic treatment on retarding scaling deposition. *Tojsat,* 5**,** 62-77.

Stover, R. L. 2013. Industrial and brackish water treatment with closed circuit reverse osmosis. *Desalination and Water Treatment,* 51**,** 1124-1130.

Stover, R. L. 2016. High recovery, low fouling, and low energy reverse osmosis. *Desalination and Water Treatment,* 57**,** 26501-26506.

Tarquin, A. & Delgado, G. 2012. Concentrate enhanced recovery reverse osmosis: a new process for RO concentrate and brackish water treatment. *Proc. American Institute of Chemical Engineers Meet., Pittsburg,* PA, USA*,* 272277.

Van De Lisdonk, C. A. C., Rietman, B. M., Heijman, S. G. J., Sterk, G. R. & Schippers, J. C. 2001. Prediction of supersaturation and monitoring of scaling in reverse osmosis and nanofiltration membrane systems. *Desalination,* 138**,** 259-270.

Voutchkov, N. 2018. Energy use for membrane seawater desalination – current status and trends. *Desalination,* 431**,** 2-14.

Warsinger, D. M., Swaminathan, J., Guillen-Burrieza, E., Arafat, H. A. & Lienhard V, J. H. 2015. Scaling and fouling in membrane distillation for desalination applications: a review. *Desalination,* 356**,** 294-313.

Warsinger, D. M., Tow, E. W., Maswadeh, L. A., Connors, G. B., Swaminathan, J. & Lienhard, V. J. 2018. Inorganic fouling mitigation by salinity cycling in batch reverse osmosis. *Water Reserach,* 137**,** 384-394.

Warsinger, D. M., Tow, E. W., Nayar, K. G. & Maswadeh, L. A. 2016. Energy efficiency of batch and semi-batch (CCRO) reverse osmosis desalination. *Water Research,* 106**,** 272-282.

Werber, J. R., Deshmukh, A. & Elimelech, M. 2017. Can batch or semi-batch processes save energy in reverse-osmosis desalination? *Desalination,* 402**,** 109-122.