Review Article

Tel: +98(21)88109541
+98(21)88109569
Mail: Info@dmdt.ir

عنوان: مروری بر نگهداری و ارتقای عملکرد سیستم های اسمزمعکوس شامل نگهداری روزانه, افزایش طول عمر غشا پس از بهره برداری و مدیریت عملکرد در شرایط زمستانی

نویسنده: بهاره زلانی کارشناس تحقیق و توسعه شرکت غشاگستر دالاهو

نویسنده مسئول: دکتر سید عباس موسوی

ایمیل نویسنده مسئول: musavi@sharif.ir

شرکت غشاگستر دالاهو

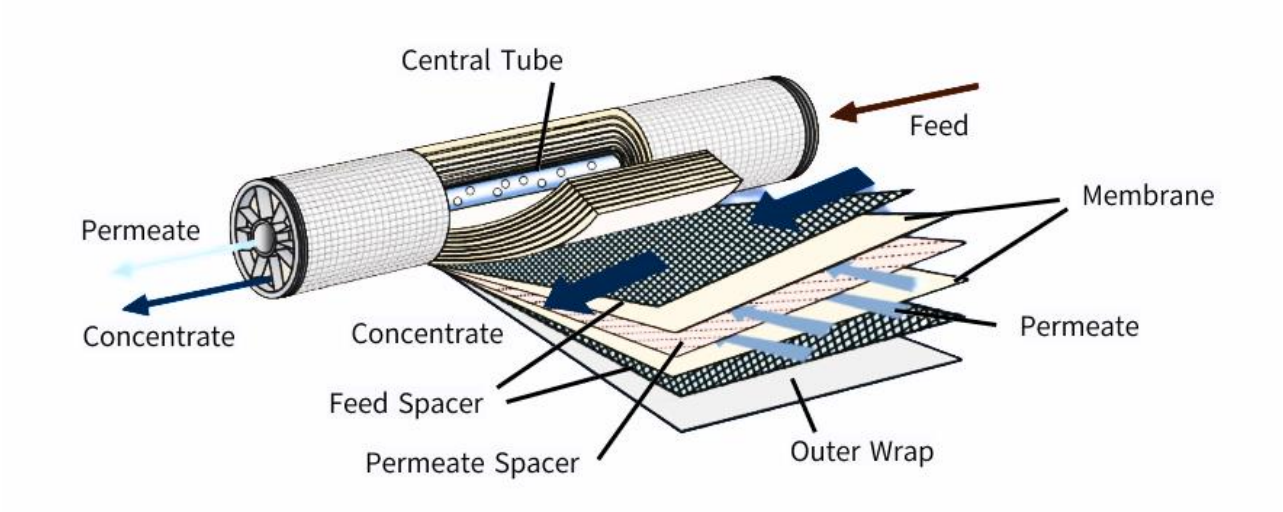
چکیده

امروزه استفاده از سیستم های اسمز معکوس یکی از موثرترین روش های تصفیه آب در صنایع, تامین آب شرب و داروسازی محسوب می شود. غشای Reverse Osmosis غشایی نیمه تراواست که قادر به حذف بخش عمده ای از یون ها, املاح معدنی, ذرات معلق, آلاینده های میکروبیولوژیکی و آلی بوده و آب با خلوص بالا تولید می کند. با این وجود عملکرد پایدار و طول عمر مطلوب این سیستم ها مستلزم رعایت اصول نگهداری, پایش عملکرد و مدیریت شرایط عملیاتی می باشد و همواره با چالش هایی مواجه است. یکی از مهم ترین چالش ها, پدیده ی رسوب گذاری Scaling و گرفتگی Fouling غشا است. رسوب مواد معدنی و ترکیبات آلی روی سطح غشا می تواند موجب کاهش جریان آب عبوری و راندمان سیستم شده و میزان درصد حذف املاح را تحت تاثیر قرار دهد. از این رو جهت بهبود دوام و پایداری سیستم غشایی, لازم است عملیات پیش تصفیه صورت گیرد و تا حد امکان سختی آب را کاهش داد. تمیزکاری شیمیایی, از جمله اقدامات ضروری جهت افزایش راندمان غشا پس از افت در اثر رسوب گرفتگی است. همچنین نگهداری پیشگیرانه یا Preventive Maintenance شامل پایش روزانه فشار خوراک, جریان آب تولیدی Permeate, اختلاف فشار در فیلترها, بررسی وضعیت پمپ ها و اجزای مکانیکی, کنترل دما و PH و کیفیت آب ورودی موجب می شود تا طول عمر مفید غشا به حداکثر برسد. یکی دیگر از چالش های بهره برداری سیستم اسمز معکوس, بهره برداری صحیح و حفظ سلامت غشا در فصل زمستان است که کاهش دما, منجر به ترک خوردگی و آسیب نشود. طراحی و اجرای یک استراتژی جامع نگهداری و تنظیم دقیق پارامترهای عملیاتی, نه تنها موجب افزایش طول عمر مفید غشا و کیفیت آب تولیدی می شود, بلکه هزینه های تعمیر و تعویض را نیز کاهش داده و از توقفات ناگهانی و اختلال در سیستم تصفیه جلوگیری می کند.

کلمات کلیدی: اسمز معکوس, تصفیه آب, سیستم غشایی, نگهداری پیشگیرانه, رسوب گذاری و گرفتگی

۱- مقدمه

به لحاظ ساختاری, غشای RO یک غشای کامپوزیت پلیمری چند لایه است که از یک لایه نازک سطحی به عنوان لایه فعال و یک یا چند لایه متخلخل به عنوان لایه پشتیبان تشکیل شده است.[۱] در این نوع از غشا, جداسازی بر اساس حلالیت و نفوذپذیری بوده و اندازه تقریبی منافذ کمتر از ۰.۰۰۱ میکرون می باشد. سایز بسیار ریز منافذ موجب می شود که سیستم RO در شیرین سازی آب دریا و حذف کامل یون ها و نمک های محلول از آب, کاربرد ویژه ای پیدا کند.[۲] در طراحی یک سیستم اسمز معکوس با راندمان بالا و دبی تولیدی قابل قبول, علاوه بر خصوصیات کامپوزیت غشا, نوع طراحی ماژول و چیدمان صفحات نیز تاثیر به سزایی خواهد داشت. معمولا ماژول تولید شده در مقیاس صنعتی از نوع مارپیچی یا Spiral Wound است (شکل ۱). این نوع ماژول از چند لایه غشای صفحه ای و جداساز Spacer تشکیل شده که به دور یک لوله ی مرکزی پیچیده شده است و مسیر نهایی برای خروج آب تصفیه شده یا Permeate را تامین می کند.[۳] در این پیچش, دو ورق غشا به صورت یک پاکت که سه طرف آن کاملا مهر و موم شده و تنها از یک طرف باز می باشد درآمده و یک لایه نازک و توری شکل بین دو ورق غشا در داخل پاکت قرار می گیرد. این لایه که Permeate Spacer نامیده می شود, یک کانال برای هدایت آب تصفیه شده به سمت لوله ی مرکزی فراهم می کند. در پاکت غشایی ساخته شده, لایه فعال به سمت درون پاکت بوده و قسمت باز پاکت روی لوله مرکزی قرار می گیرد. علاوه بر این, توری مشبک دیگری به نام Feed Spacer فاصله ای بین پاکت های غشایی ایجاد کرده و مضاف بر ایجاد جریان یکنواخت برای خوراک, از رسوب گیری و تراکم صفحات غشا جلوگیری می کند. [۲, ۴]



شکل ۱. ترتیب قرارگیری صفحات غشا و فاصله دهنده ها در یک ماژول مارپیچ

در سیستم غشای اسمز معکوس, خوراک آب با فشار بالا به محفظه ی حاوی ماژول غشایی وارد می شود و از طریق کانال هایی که Feed Spacer ایجاد کرده است به موازات سطح غشا جریان می یابد. تحت تاثیر فشار اسمزی, ملکول های آب از لایه فعال غشا عبور کرده و به کانال Permeate Spacer راه می یابند.

آب تصفیه شده از طریق کانال ها به سمت لوله ی مرکزی هدایت شده و جمع آوری می گردد. به صورت مشابه, آب تغلیظ شده یا Concentrate که حاوی ناخالصی هاست و موفق به عبور از سطح فعال غشا نشده, در مسیر جریان باقی مانده و از انتهای دیگر ماژول به عنوان Rejection خارج می شود. [۲, ۳] مطالعات نشان داده است که نوعی رابطه ی خطی میان زبری سطح غشا و شار عبوری تصفیه شده یا Permeate Flux در شبکه های پلی آمیدی با اتصالات عرضی وجود دارد. به این صورت که با افزایش زبری سطح و یا به اصطلاح ridge and valley, نفوذ پذیری بهبود یافته و دبی آب تصفیه شده افزایش یافته است. [۵] اتصالات عرضی متراکم موجب دفع نمک بالا و شار آب کمتر شده و در مقابل, اتصالات عرضی کم, شار عبوری بیشتر به همراه دفع نمک کمتر به همراه دارد. از این رو نیاز است یک تعادل بهینه میان این دو پارامتر به هنگام ساخت غشا ایجاد شود.

عوامل موثر بر کارایی غشاهای اسمز معکوس عبارت است از خصوصیات آب ورودی به عنوان خوراک, شرایط عملیاتی, طراحی و کیفیت فرایند پیش تصفیه, نگهداری و تعمیرات و در نهایت شرایط محیطی. ارتقای عملکرد سیستم های اسمزمعکوس پس از بهره برداری و افزایش طول عمر ماژول ها, در گرو تامین شرایط کاری مناسب و حذف عوامل آسیب زننده است. [۶] چندین مطالعه در مورد اثرات خواص سطحی غشا نظیر اندازه منافذ و توزیع آن, زبری و خصوصیات سطح, ویژگی های الکتروکینتیک مانند پتانسیل زتا, خواص شیمیایی غشا نظیر آبدوستی یا آب گریزی و در نهایت ساختار شیمیایی تاکنون انجام گرفته است. شیائوهوا ژو و همکاران [۷] تأثیر برهمکنش‌های شیمیایی و فیزیکی ناشی از کلوئیدهای سیلیس را بر میزان گرفتگی غشاهای اسمز معکوس (RO) کامپوزیتی از جنس سلولز استات و پلی‌آمید آروماتیک را بررسی کردند. نتایج نشان داد که میزان گرفتگی کلوئیدی با افزایش قدرت یونی محلول، غلظت کلوئید در خوراک و شار آب تراوش شده از طریق غشا افزایش می‌یابد. درواقع میزان گرفتگی کلوئیدی توسط یک تعامل منحصر به فرد بین نیروی کشش نفوذی و دافعه الکتریکی بین دو لایه کنترل می‌شود. مناچم الیملک و همکاران [۸] رفتار رسوب‌گذاری غشاهای کامپوزیتی فیلم نازک سلولز استات و پلی‌آمید آروماتیک اسمز معکوس (RO) را با سرعت نفوذ اولیه یکسان مورد بررسی قرار دادند. رسوب گذاری یا فولینگ ناشی از تشکیل واکنش های فیزکیوشیمیایی بین آلاینده های آب و مواد غشا است که منجر به انباشت آلاینده ها بر سطح غشا و یا داخل منافذ می شود. به این دلیل, فولینگ عمر و نفوذپذیری غشا را کاهش داده و همچنین فشار عملیاتی و فرکانس شست و شوی شیمیایی را افزایش می دهد. از این رو شناخت عوامل تشدید کننده این اثر و کاهش هرچه بیشتر آن, میتواند عمر مفید غشا را بهبود داده و کارایی آن را حفظ کند. به طور کلی, فولینگ غشا به چندین عامل نظیر کیفیت آب ورودی, ویژگی های سطحی غشا و شرایط عملیاتی بستگی دارد. نتایج نشان داد در شرایط یکسان, غشای پلی آمیدی تمایل بالاتری به رسوب گذاری سطحی داشته و این به دلیل ساختار سطحی ناصاف و زبر آن در مقایسه با سلولز استات است و خصوصیات سطح به مراتب تاثیر بالاتری نسبت به پتانسیل زتا و زاویه ی تماس بر رسوب گذاری داشته است.

بررسی چالش ها و راهکارهای مقابله با آن در سیستم اسمز معکوس, اساسی ترین موضوع مورد بررسی در حوزه تصفیه ی غشایی پساب است. در این مقاله ضمن معرفی چالش ها و دلایل ایجاد آن در المان های غشایی اسمز معکوس, اصول نگهداری ماژول ها و چگونگی کنترل پارامترهای عملکرد به صورت روزانه و یا در شرایط سخت مورد بررسی قرار خواهد گرفت. خصوصیات آب ورودی به عنوان خوراک غشا معرفی خواهد شد و در نهایت, روند کلی فرایند پیش تصفیه و اهمیت آن بازگو خواهد شد.

۲- روش شناسی و منابع داده

در این پژوهش, مقالات و منابع مرتبط از سال ۱۹۹۷ تا ۲۰۲۵ مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. معیار انتخاب مقالات, موضوع مشترک بوده و در تمامی منابع, اصول نگهداری و بهره برداری صحیح از سیستم های اسمز معکوس مورد بحث بوده است. روش‌شناسی به‌کاررفته شامل سه مؤلفه اصلی است: گردآوری منابع بر اساس موضوع، بررسی مفاهیم و جمع بندی مقایسه ای و در نهایت بررسی چالش ها و ارائه راهکارهایی جهت رفع آن ها. به طور کلی هدف این مقاله, مروری بر اصول نگهداری سیستم RO و بهبود عملکرد از طریق حذف عوامل تخریب کننده و یا کاهش آن هاست. در ادامه, پس از بررسی چالش ها و مشکلات پیش و پس از بهره برداری, اصول نگهداری صحیح به صورت روزانه و یا به هنگام شرایط سخت فصلی مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۳- چالش ها و اهداف بهره برداری

یکی از مهم ترین چالش ها به هنگام بهره برداری از سیستم اسمز معکوس, کیفیت آب ورودی به عنوان خوراک است که به طور مستقیم بر عملکرد و طول عمر المان ها تاثیر خواهد داشت. تعیین کیفیت آب ورودی و محدوده ی قابل قبول برای پارامترهای کیفی نظیر TDS, Turbidity, COD, BOD,TH and Micro organisms مهم ترین عامل در حفظ طول عمر غشاست چرا که زبری سطح, پارامتر لازم جهت تامین و افزایش دبی آب عبوری از غشا است و پارامتری غیر قابل حذف یا کاهش است و می بایست تنها با کنترل کیفیت آب ورودی, میزان و سرعت رسوب گرفتگی سطحی را کنترل کرد.[۹] خوراک ورودی به غشای RO حتی الامکان می بایست دارای سختی و مواد معلق پایین و در محدوده ی از پیش تعیین شده باشد تا اثر رسوب گرفتگی روی غشا, پس از مدت زمان طولانی تری مشاهده گردد. همچنین, میتوان با شست و شوی فیزیکی دوره ای, رسوبات سست تر را جداسازی کرده و نیاز به شست و شوی شیمیایی را به تعویق انداخت.این نوع شست و شو معمولا اولین مرحله ی تمیزکاری غشا است که در آن, به کمک افزایش سرعت جریان عرضی, معکوس کردن جریان, ایجاد تلاطم و آشفتگی در جریان ورودی و یا شست و شو با آب تصفیه شده, رسوبات از خلل و فرج سطحی غشا خارج می شوند.[۱۰] درصورتی که فاولینگ به حدی باشد که دیگر با روش های فیزیکی قابل درمان نباشد, نیاز است به کمک مواد شیمیایی این عملیات صورت گیرد. از این رو شست و شوی به موقع و دوره ای در کنار طراحی فرایند پیش تصفیه مناسب می تواند در نگهداری ماژول ها و بهبود عملکرد آن موثر واقع شود.

از طرفی شرایط عملیاتی نظیر فشار, دما, دبی جریان آب ورودی, PH و نسبت جریان برگشتی یا Recovery Rate به شدت بر عملکرد غشا و طول عمر مفید آن موثر است. درصد بازیابی یا Recovery به معنای درصدی از مقدار خوراک ورودی است که با گذر از ماژول غشایی, خالص سازی شده و به عنوان آب تصفیه شده یا Permeate از ماژول خارج می شود. معمولا این پارامتر به گونه ای تنظیم می شود که بیشترین مقدار آب تصفیه شده نسبت به خوراک ورودی تولید شود تا حدی که رسوب گذاری بر سطح غشا صورت نگیرد.[۱۱] واضح است که راه اندازی و بهره برداری سیستم اسمز معکوس تنها در شرایطی موفقیت آمیز خواهد بود که پارامترهای عملیاتی مطابق با محدوده ی تعیین شده در دستورالعمل های طراحی تنظیم شده باشد.

به عنوان مثال, فشار پایین منجر به تولید کمتر توام با مصرف انرژی پایین تر شده و یا فشار بالا علی رقم تولید بیشتر, طول عمر غشا را به دلیل افزایش تنش, کاهش می دهد. دمای بالا اگرچه شار عبوری از غشا را افزایش می دهد, با این حال رسوب گرفتگی بر سطح غشا را به دلیل افزایش میزان بازیابی و افزایش غلظت املاح در مجاورت سطح فعال غشا تشدید می کند. از طرفی PH خارج از محدوده, موجب تسریع در روند رسوب گذاری می شود.[۱۲] درصد جریان Recovery بالا, باعث تغلیظ شدن جریان Concentrate و افزایش احتمال رسوب گذاری شده و می بایست در محدوده ی نرمال تنظیم شود. در مقابل, دبی ناکافی موجب تشدید گرفتگی سطح غشا و کاهش نرخ تولید می گردد.[۱۱] از این رو نیاز است تمامی این پارامترها و شرایط عملیاتی توسط سازنده غشا و به کمک تست های شبیه سازی شده, بهینه شده و محدوده ی عملیاتی مناسب با دیتای موثق, تعیین گردد.

فعالیت غشا در شرایط بهینه تا حد زیادی میتواند از افت عملکرد ماژول جلوگیری کند, با این حال گرفتگی و کاهش راندمان غشا طی فرایند تصفیه آب امری اجتناب ناپذیر است و پس از گذشت مدت زمان معین به طور قطع رخ خواهد داد. چراکه خصوصیات سطحی غشا و کیفیت آب ورودی به طور طبیعی شرایط را برای ایجاد رسوب های معدنی-آلی و بیولوژیکی فراهم کرده و بهینه سازی پارامترها تنها این فرایند را به تاخیر می اندازد. [۱۰, ۱۳] به طور کلی, اصول نگهداری و تعمیرات غشای RO ایجاب می کند تا با کاهش راندمان سیستم و ظرفیت تولید, فورا عملیات شست و شوی فیزیکی و احیای فیلترها به کمک مواد شیمیایی مناسب صورت گیرد و عملکرد غشا به شرایط نرمال برگردد. شست و شوی شیمیایی زمانی رخ می دهد که رسوب با روش فیزیکی مانند بک واش کردن غشا, برداشته نشده و کاهش قابل توجهی در دبی جریان آب تصفیه شده مشاهده شود. در این روش معمولا ۰.۰۳ تا ۲ درصد مواد شیمیایی نظیر قلیاها, اسیدها, نمک های معدنی و سورفکتانت ها به صورت محلول به سطح غشا وارد و رسوبات ایجاد شده را در خود حل کرده و خارج می سازد. فرایند شست و شوی شیمیایی قادر است از گرفتگی شدید غشا جلوگیری کند و دبی تولیدی را به حد نرمال برگرداند, با این حال موجب استهلاک غشا شده و پس از هربار شست و شو, کیفیت و عملکرد غشا رفته رفته کاهش یافته و هرگز به شرایط اولیه خود نخواهد رسید.[۱۴] از این رو پیشگیری از رسوب گرفتگی به کمک فرایندهای پیش تصفیه, بسیار پراهمیت تر و کاربردی تر از درمان موقت به کمک فرایند شست و شو است.[۱۱]

شکل ۲. ماژول غشایی RO پیش و پس از فرایند شست و شوی شیمیایی

شکل ۲ تاثیر فرایند شست و شوی شیمیایی بر غشای اسمزمعکوس را نشان می دهد. رسوب گیری بر صفحات غشا به راحتی قادر است با گرفتگی منافذ و پوشش دهی سطح فعال, میزان دبی آب عبوری خالص شده را به حداقل رسانده و موجب آسیب جدی بر ساختار غشا شود. بدون شست و شوی فیزیکی- شیمیایی, علاوه بر کاهش درصد بازیابی و کیفیت آب تصفیه شده, طول عمر مفید غشا به حد قابل توجهی کاهش یافته و رسوب به فرم جبران ناپذیری ساختار غشا را تخریب می کند. از طرفی, شرایط محیطی از جمله دما به شدت بر عملکرد و ساختار غشای اسمزمعکوس موثر است به گونه ای که دمای پایین در شرایط زمستانی, موجب یخ زدن آب در لوله ها, تجهیزات و در نهایت ماژول غشایی شده و نه تنها منجر به کاهش نرخ تولید, بلکه موجب آسیب مکانیکی به ساختار غشا نیز خواهد شد.[۱۵] همچنین لرزش, ضربه و تغییرات ناگهانی فشار قادر است به شدت سیستم اسمز معکوس را تحت تاثیر قرار دهد. از این رو نیاز است جهت جلوگیری از آسیب, غشا تحت تنش های فیزیکی قرار نگرفته و تغییرات شدید دمایی را تجربه نکند. تمامی این چالش ها به هنگام بهره برداری از سیستم اسمز معکوس مطرح است و عدم نگهداری اصولی و بهینه سازی پارامترهای عملیاتی قادر است در مدت زمان کوتاهی منجر به تخریب ماژول ها گردد. هدف این مقاله, ارائه روش های اصولی و بهینه شده جهت نگهداری روزانه, فصلی و سالانه ماژول های غشایی است تا علاوه بر بهبود روند تولید, سلامت غشا نیز تامین شود.

۴- تحلیل و بحث

در ادامه, اصول نگهداری روزانه و ارتقای عملکرد سیستم های اسمز معکوس در یک بهره برداری اصولی, تشریح خواهد شد. رعایت موازین گفته شده منجر به بهبود طول عمر و ارتقای عملکرد ماژول های غشایی شده و از تخریب زودهنگام آن جلوگیری می کند. همچنین پیش از بهره برداری نیاز است فرایندهایی جهت آماده سازی خوراک ورودی و ست آپ فرایندی صورت گیرد که در این بخش, به این موضوعات پرداخته خواهد شد. به علاوه, مدیریت عملکرد سیستم در شرایط زمستانی به منظور جلوگیری از آسیب های فیزیکی وارد شده به دلیل کاهش دما, به طور مفصل بازگو خواهد شد. واضح است که رعایت این موازین پیش و پس از بهره برداری, قادر است در حفظ طول عمر المان ها و بهبود عملکرد آن ها بسیار موثر واقع شود.

۴-۱. نگهداری روزانه و ارتقای عملکرد سیستم های اسمز معکوس

دستیابی به عملکرد قابل توجه در سیستم های اسمز معکوس و تولید آب با کیفیت و دبی بالا در کنار افزایش طول عمر مفید ماژول, نیازمند بازرسی روزانه سایت و پایش عملکرد سیستم است.[۱۶] پایش عملکرد روزانه, ساده ترین و کم هزینه ترین روش جهت نگهداری غشا و جلوگیری از خرابی های بزرگ و افت کیفیت آب تولیدی است. این عمل سبب می شود راندمان بالا و ظرفیت تولید سایت حفظ شده و از آسیب به ماژول ها جلوگیری شود. مطابق با جدول ۱, نخستین پارامتر نگهداری روزانه, کنترل دقیق فشار در بخش های مختلف سیستم است.

اختلاف فشار ΔP ورودی و خروجی ممبرین شاخص مهمی جهت بررسی سلامت آن هاست. افزایش اختلاف فشار ورودی و خروجی معمولا نشان دهنده ی گرفتگی غشا توسط رسوب های آلی و معدنی می باشد.[۱۷] ثبت و بررسی این داده ها به صورت روزانه سبب می شود که روند تغییرات به موقع مشخص شده و آسیب جدی بر سیستم وارد نشود. به این صورت که با رسیدن افت فشار سیستم به یک مقدار مشخص, شست و شوی فیزیکی یا شیمیایی به موقع صورت گرفته و سیستم به حالت نرمال خود باز میگردد. بررسی کیفیت آب تولیدی نیز از مهم ترین پارامترهای بازرسی روزانه است. هدایت الکتریکی EC و کل مواد جامد محلول TDS در جریان ورودی و خروجی, امکان ارزیابی کارایی سیستم را فراهم می کند.[۱۱] افت ناگهانی کیفیت آب خروجی میتواند بیانگر آسیب وارده بر غشا, رسوب گرفتگی و یا نشتی در اتصالات باشد. از این رو بررسی روزانه اتصالات, مخازن نگهداری و پمپ ها از اهمیت بالایی برخوردار است. نشتی های کوچک, لرزش غیر عادی پمپ در فشار بالا یا صداهای غیرمعمول, میتواند نشان دهنده ی مشکلاتی در سیستم باشد. سفت کردن اتصالات, اطمینان از عدم وجود نشتی و کنترل پمپ ها از اقدامات حیاتی در نگهداری روزانه محسوب می شود. همچنین استفاده از سیستم های ثبت داده که به صورت خودکار اطلاعات مهمی نظیر دما, فشار, دبی جریان و کیفیت آب را اندازه گیری و ثبت می کنند, در این راستا کمک شایانی به اپراتور سایت خواهد کرد تا روند تغییرات را به خوبی تحلیل کرده و از مشکلات احتمالی پیش از وقوع جلوگیری کند. [۱۸]

جدول ۱. چک لیست پارامترهای عملیاتی مهم به هنگام راه اندازی و بهره برداری

پارامتر پایش شونده به صورت روزانه		واحد	هدف از پایش	محدوده نرمال
P_{Feed}	فشار ورودی آب خوراک	bar	بررسی عملکرد پمپ و فشار وارد بر سطح غشا	مطابق طراحی سیستم
$P_{Concentrate}$	فشار خروجی آب تغلیظ شده	bar	تشخیص افت فشار	مطابق طراحی سیستم
$P_C - \Delta P = P_F$	اختلاف فشار	bar	تشخیص رسوب گذاری یا نقص فنی	کمتر از حد آستانه تعیین شده
$Q_{Permeate}$	دبی آب تولیدی	m^3/h	ارزیابی راندمان تولید	ثابت با نوسان مجاز
$Q_{Concentrate}$	دبی آب تغلیظ شده	m^3/h	کنترل تعادل هیدرولیکی سیستم	مطابق طراحی سیستم
Recovery	درصد بازیابی	%	جلوگیری از افزایش غلظت نمک ها در سطح فعال	مطابق طراحی سیستم
EC Feed	هدایت الکتریکی جریان ورودی	µS/cm	ارزیابی کیفیت آب خوراک	کیفیت خوراک ورودی
EC Permeate	هدایت الکتریکی جریان خروجی	µS/cm	ارزیابی کیفیت آب تولیدی و بررسی سلامت غشا	حداقل مقدار ممکن
TDSF	کل جامدات محلول در جریان ورودی	mg/L	پایش بار نمکی ورودی	کیفیت خوراک ورودی
TDSP	کل جامدات محلول در جریان خروجی	mg/L	کنترل کیفیت آب تولیدی	مطابق استاندارد
T Feed		°C	تصحیح عملکرد و بررسی داده ها	20-25°C
PH Feed		-	پیشگیری از آسیب شیمیایی به غشا	6.5-8.5
زمان کارکرد سیستم		h/day	تحلیل عملکرد و برنامه ریزی جهت زمان CIP	پایدار و بدون توقف

پارامترهای عملیاتی, مطابق با نوع غشا و شرایط طراحی سیستم اسمز معکوس تعیین می شوند. از این رو جهت پایش پارامترها و نگهداری روزانه سیستم, نیاز است تمامی پارامترها طبق دیتاشیت ارائه شده توسط تولید کننده, کنترل شده و در محدوده ی مجاز و به دور از شرایط بحرانی قرار گیرند. (شکل۳)

از طرفی, پایش و تنظیم مقدار بهینه ی بازیابی Recovery و جریان دورریز Concentrate جهت ارتقای عملکرد سیستم ضروری است.[۱۴] برای تعیین مقدار بهینه بازیابی و جریان تغلیظ شده در سیستم های اسمز معکوس, می بایست بین بهره وری تولید آب و سلامت غشا یک توازن برقرار کرد. به عبارتی, نمیتوان نرخ بازیابی را تا بیشترین مقدار ممکن بالا برد درحالیکه, اثرات منفی مثل رسوب گرفتگی و کاهش عمر ممبرین رخ ندهد. عدم تنظیم صحیح این پارامترها موجب تمرکز بیش از حد املاح روی سطح غشا و رسوب گرفتگی آن شده و تعداد دفعات نیاز به شست و شو را افزایش می دهد.[۱۹] کنترل این دو پارامتر از طریق تنظیم شیر کنترل دورریز Concentrate Valve انجام می شود به گونه ای که بستن شیر تا حدی باعث افزایش Recovery و کاهش جریان دورریز می شود. باید توجه داشت که هرگز نباید شیر دورریز را کاملا بست زیرا باعث آسیب به ممبرین می شود. تعیین مقدار بهینه بازیابی به توجه به کیفیت آب ورودی و خصوصیات شیمیایی آن مشخص می گردد چراکه هرچه آب ورودی شوری و مواد حل شده ی بیشتری داشته باشد, احتمال گرفتگی غشا با افزایش درصد بازیابی بیشتر می شود. معمولا مقدار بازیابی برای آب دریا ۸ و برای آب لب شور ۱۵ درصد بهینه می شود.[۲۲]

شکل ۳. پایش روزانه و نگهداری سیستم های اسمزمعکوس

همچنین تعداد و زمان انجام فرایند شست و شوی فیزیکی و شیمیایی پارامتری است که به صورت مستقیم بر طول عمر ماژول ها و کیفیت آب تولیدی موثر است. از این رو, سارکر و همکاران [۲۰] اثر شست و شوی روزانه بر کاهش مشکلات ناشی از اسکالینگ و حفظ عملکرد بهینه ی ممبرین به خصوص واحدهایی با مقیاس کوچیک که به صورت ناپیوسته کار می کنند, را بررسی کرد. آن ها متوجه شدند در سیستم های RO که به طور متناوب روشن و خاموش می شوند, آب خوراک روی سطح ممبرین باقی مانده و رسوب گذاری و افت فشار به علت افزایش غلظت نمک ها روی سطح, بسیار سریعتر از حالت معمول اتفاق می افتد. پس از شست و شوی ساده پیش از توقف سیستم با آب تصفیه شده و پایش پارامترهایی از قبیل افت فشار, شار عبوری, هدایت الکتریکی و نرخ Fouling در طول زمان, متوجه شدند رسوب گذاری به شدت کاهش یافته و تعداد دفعات نیاز به CIP کاهش می یابد.

با هدف پیش بینی زمان مناسب جهت شست و شو, شیم و همکاران [۲۱] یک روش هوشمند و داده محور برای بهینه سازی زمان شست و شو ارائه کردند. با این روش مشکل اصلی در بهره برداری واحدهای اسمز معکوس که شست و شو در دوره ی زمانی ثابت و به تشخیص اپراتور و همراه با احتمال خطا انجام میشد, تا حد قابل توجهی کاهش یافت. روش تحقیق در این پروژه, استفاده از داده های عملیاتی طولانی مدت و پیش بینی روند رسوب گذاری قبل از رسیدن به آستانه بحرانی و به کمک مدل های پیش بینی سری زمانی بلند مدت یا Long Term است. در مجموع, پایش روزانه پارامترهای عملکردی و کیفی سیستم به صورت نگهداری پیشگیرانه قادر است با تشخیص زود هنگام رسوب گرفتگی و بهینه سازی زمان شست و شو, هزینه های عملیاتی را از طریق کاهش مصرف مواد شیمیایی, کاهش توقف های اضطراری و نیاز به تعویض تجهیزات به شدت کاهش داده و سلامت غشا را تضمین کند. بر همین اساس, استفاده از روش های داده محور و مدل های پیش بینی, میتواند جایگزین مناسبی برای رویکردهای سنتی نگهداری از قبیل پایش توسط اپراتورها و شست و شوی دوره ای باشد.

۲-۴. افزایش طول عمر غشا پس از بهره برداری

غشاهای اسمز معکوس پس از نصب و بهره برداری صحیح, همچنان نیازمند نگهداری و پایش عملکرد هستند تا طول عمر مفید و راندمان آن ها حفظ شود. یکی از عوامل اصلی کاهش طول عمر غشا, پیش آلودگی یا Fouling است که باعث افت تدریجی شار نفوذی و افزایش فشار کاری می شود. مطالعات نشان می دهد که مدیریت موثر رسوب گذاری از طریق روش های مختلف می تواند به صورت قابل توجهی طول عمر مفید غشا را افزایش دهد. از طرفی, نظارت و نگهداری منظم نیز نقش حیاتی در حفظ عملکرد غشا دارد به گونه ای که بررسی دوره ای پارامترهای عملیاتی و کیفیت آب تولیدی, موجب شناسایی نشانه های اولیه رسوب گذاری شده و فرصت انجام تمیزکاری موثر و به موقع را فراهم می کند. شست و شوی مکانیکی و شیمیایی به صورت دوره ای و با استفاده از روش های مناسب و مواد شیمیایی موثر, باعث حذف آلایندگی های تجمع یافته روی سطح و درون منافذ غشا شده و کارایی غشا را بازیابی می کند. در مجموع, اجرای یک برنامه ی نگهداری جامع شامل پیش تصفیه, نظارت موثر, شست و شوی به موقع و به کارگیری تکنیک های ضد فولینگ, نه تنها عملکرد غشا را در سطوح بهینه نگه میدارد, بلکه به طور معناداری طول عمر بهره برداری از آن را نیز افزایش می دهد. از این رو, پیش و پس از بهره برداری سیستم اسمز معکوس نیاز است اصول نگهداری به شرح زیر صورت گیرد.

۱) **پیش تصفیه موثر پیش از ورود خوراک به ممبرین** یکی از بخش های اساسی و تعیین کننده در طراحی و بهره برداری از سیستم های غشایی است. این فرایند شامل چندین مرحله است که در هر مرحله نوع خاصی از آلاینده ها حذف و یا به فرم محلول در آمده و به نوعی آماده سازی خوراک صورت می گیرد.[۱۶] اگر آب حاوی آلودگی های فاضلابی و میکروبی باشد, نیاز است با عملیات کلر زنی ابتدا این پساب میکروب زدایی شود و سپس وارد ممبرین گردد.

کلرزنی علاوه بر خاصیت گندزدایی, موجب اکسیداسیون برخی فلزات نظیر آهن شده و این فلز را به فرم کلرید فریک تبدیل می کند که جامد است و به راحتی و به کمک تصفیه ی فیزیکی از جریان آب حذف می شود.[۲۲] اگرچه, هرگونه نوسان در دوز کلر حتی در حد مقادیر جزئی کلر آزاد، می‌تواند به تخریب اکسیداتیو غشاهای پلی‌آمید منجر شود. از این رو استفاده از هیدروژن پراکسید در این مرحله یک گزینه مناسب تر و قابل‌اعتمادتر است؛ زیرا بدون ایجاد ترکیبات کلره، آهن دو ظرفیتی را به‌سرعت به فاز فریک تبدیل کرده و به تشکیل لخته های بزرگ و قابل جداسازی کمک می‌نماید. انتخاب عامل اکسنده بنا به محاسبات اقتصادی و شرایط فرایند بوده و بر عهده ی کارفرما می باشد. اگر آب حاوی ذرات جامد و معلق با سایز درشت باشد, پیش از ورود به سیستم نیاز است تصفیه ی فیزیکی با فیلترهای شنی, کربنی و کارتریج صورت گیرد تا مواد معلق, جلبک ها و گل و لای از جریان آب جدا شده و کدورت و مواد معلق موجود (TSS & Turbidity) تا حد قابل توجهی حذف شود.[۱۲]

فیلترهای کربنی علاوه بر حذف ذرات معلق و فلزات اکسید شده, بقایای کلر را نیز از جریان آب حذف کرده و جریان آب ورودی به RO را تا حد زیادی تصفیه می کند. با این حال بخش زیادی از یون ها نظیر سدیم, کلسیم, منیزیم, استرانسیم و حتی ذرات SiO_2 به صورت محلول در آب باقی مانده و تنها راه جداسازی آن ها و تولید آب خالص, استفاده از ممبرین های اسمز معکوس است. پیش از ورود جریان آب حاوی این املاح که دارای سختی و شوری بالاست, نیاز است مواد ضد رسوب یا انتی اکسالانت به جریان آب افزوده گردد تا یون های نام برده به فرم محلول تثبیت شده و کربنات و یا سولفات آن ها موجب رسوب گرفتگی روی سطح غشا نشود. [۱۸, ۱۹] محاسبه شاخص های اساسی نظیر LSI، Supersaturation Index (SSI)، CCPP به خوبی میزان تمایل آب به رسوب گذاری را ارزیابی کرده و می توان پیش از تزریق انتی اسکالانت و یا تنظیم PH, احتمال رسوب گرفتگی بر سطح غشا را پیش بینی کرد. مواد شیمیایی با خاصیت ضد رسوب معمولا در سه نوع سدیم هگزا متا فسفات SHMP, ارگانو فسفونات, پلی آکریلات مورد استفاده قرار می گیرند که با توجه به خاصیت عملکرد پایدار و عدم هیدرولیز شدن, به کارگیری ارگانوفسفونات و پلی آکریلات بیشتر توصیه می شود.[۱۱]

آنتی اکسالانت ها که ترکیبی از فسفونات ها, پلی کربوکسیلات ها و کوپلیمرهای خاص هستند, به یون های کلسیم, منیزیم و باریم می چسبند و شبیه به یک قفل کننده ی یون, اجازه تشکیل بلورهای سولفات و کربنات این یون ها را نمی دهد. در واقع با مهار رشد کریستال و پراکندگی ذرات, موجب می شوند یون ها حتی در غلظت های فوق اشباع نیز به فرم محلول در آب باقی بمانند و ساختار رسوبی تشکیل ندهند. حتی اگر ذرات کوچک رسوب در مجاورت غشا تشکیل شود, ضد رسوب این ذرات را در آب پخش کرده و از چسبیدن آن ها به سطح غشا جلوگیری می کند تا املاح به صورت جریان تغلیظ شده از سیستم خارج شوند.همچنین میتوان از روش های پیش تصفیه مبتنی بر غشا نظیر میکروفیلتر و اولترافیلترها پیش از RO استفاده کرد و بخش زیادی از ذرات, باکتری ها و کلوئیدها را حذف کرده و کیفیت آب ورودی را بهبود بخشید. با این حال, این روش ها معمولا برای منابع آبی با بار آلودگی بالا موثر هستند. نانوفیلترها نیز به عنوان پیش تصفیه ی غشایی برای حذف بیشتر مواد محلول و کاهش بار یون های رسوب گذار کاربرد دارند. [۱۹,۲۸]

بهره گیری از روش پیش تصفیه غشایی مستلزم بررسی هزینه های عملیاتی و مقایسه کیفیت آب بدست آمده با سایر روش های پیش تصفیه است. [۲۸] در نهایت جریان پیش تصفیه وارد ممبرین های اسمز معکوس شده و این غشا ۹۵ تا ۹۹ درصد از نمک های محلول در آب را حذف کرده و فلزات, مواد آلی و میکروارگانیسم ها را تا حد قابل توجه ای از جریان ریجکت می کند. طبق اصول نگهداری و بهره برداری صحیح از غشا بر اساس استانداردها, نیاز است کیفیت آب ورودی به المان غشایی در محدوده ی تعیین شده (جدول ۲) که توسط شرکت غشاگستر دالاهو تهیه و تدوین شده است, قرار گیرد. در این جدول محدوده ی قابل قبول آلایندگی ها تعیین شده و نیاز است کیفیت خوراک آب با فرایند پیش تصفیه ابتدا در این محدوده قرار گرفته و سپس وارد سیستم اسمز معکوس گردد. پیش تصفیه خوراک و رعایت اصول نگهداری, از افت عملکرد و کاهش طول عمر مفید سیستم جلوگیری کرده و سلامت ماژول حین دوره ی بهره برداری را تضمین می کند.

جدول ۲. مشخصات تعیین شده برای خوراک ورودی به المان غشایی

Physical/General Parameter	Typical Maximum Limit	Purpose of Limit
Silt Density Index or SDI	<5 or Ideal <3	Importance in Fouling Potential from Suspended /Colloidal Particle
Turbidity	<1.0 NTU or Ideal <0.2 NTU	Low Turb Is Essential for Low SDI
Temperature	5°C - 45°C (by Membrane)	Effect Membrane Permeability Flux and Pressure Requirement
PH Range	Typically, 2 -11	Must be Controlled to Prevent Hydrolysis of the Polyamide Layer
LSI / S&DSI	<0 for Scaling Ions	Must be Negative to Prevent CaCO3 Scaling with Acid/Antiscalant
Silica	< 150 mg/L	Prevent to Forms Hard and Irreversible Silica/Silicate Scale
Free Chlorine	< 0.1 mg/L or Ideal: 0	Killer of Polyamide Must be Removed by Activated Carbon
Total Organic Carbon or TOC	< 3 - 5 mg/L	High TOC led to Biofouling and Organic Fouling
Oil and grease	< 0.1 mg/L	Foul Membrane
Dissolved Fe, Mn	< 0.05 - 0.1 mg/L	Often Removed by Oxidation/Filtration
Dissolved Al	< 0.1 mg/L	A powerful foulant
Heavy Metal like Cu,Zn,Cr	Low Level	Can Catalyze Oxidation or Hydroxide Formation

۲) **نگهداری و پایش روزانه** پارامترهای عملیاتی نظیر دمای سیستم, افت فشار ورودی و خروجی, کیفیت آب تولیدی و دبی جریان کمک می کند تا نشانه های اولیه گرفتگی, رسوب سطحی و یا آسیب مکانیکی به موقع تشخیص داده شده و عیب یابی گردد. [۲۳]

۳) **ثبت و تحلیل داده ها** به صورت خودکار و بر خط توسط اپراتور سایت به گونه ای که روند تغییرات سیستم را به خوبی شناسایی کرده و از طریق تعمیرات پیشگیرانه و برنامه ریزی هدفمند, از آسیب های جدی تر جلوگیری شود.

۴) **شست و شوی شیمیایی یا CIP: Clean In Place بر اساس ماهیت آلاینده ها** به درستی و در زمان مناسب صورت گیرد به گونه ای که جهت رفع آلاینده های آلی, معدنی و بیولوژیکی نیاز است شست و شوی منظم با ترکیبات قلیایی, اسیدی و ضد باکتریایی انجام شود تا کارایی سیستم به حالت بهینه برگشته و تغییرات فشار کاهش یابد. گاهی با شست و شوی فیزیکی ساده به صورت جریان متقابلی از آب تصفیه شده و با فشار نسبتا بالا, میتوان آلاینده ها و نمک هایی که سطح غشا را پوشانده اند, از حفرات سطحی خارج کرد. با این حال, ممکن است رسوب گرفتگی به حدی باشد که با روش های ساده و شست و شوی مکانیکی قابل درمان نباشد. از این رو شست و شوی شیمیایی جهت بهبود راندمان غشا مورد استفاده قرار می گیرد. بنا به دستورالعمل های تدوین شده توسط تولیدکنندگان, شست و شوی شیمیایی زمانی الزامی است که حداقل یکی از شروط سه گانه زیر برقرار شود.

- کاهش ۱۰ درصدی دبی نرمال شده آب تولیدی یا Normalized Permeate Flow
- افزایش ۱۰-۵ درصدی عبور نمک نرمال شده یا Normalized Salt Passage
- افزایش ۱۵-۱۰ درصدی افت فشار نرمال شده ΔP بین ورودی و خروجی هر مرحله

هدف از شست و شوی شیمیایی, بازیابی عملکرد نرمال غشا شامل دبی آب تولیدی, افت فشار و کیفیت آب تصفیه شده است. لازم است جهت جریان در حین شست و شو همانند جهت جریان به هنگام بهره برداری عادی باشد تا از پدیده تلسکوپی شدن المان ها جلوگیری شود. از طرفی, با توجه به نوع عامل رسوب دهنده, تمیزکننده شیمیایی متغیر است. به عنوان مثال اگر سیستم دارای نمک های معدنی نظیر کلسیم کربنات باشد, بهتر است ۰.۲ درصد وزنی اسید کلریک در دمای ۲۵ درجه و PH=۱-۲ به عنوان محلول تمیزکننده به سیستم وارد شود.[۱۷] بهتر است فرایند شست و شو در دماهای بالاتر از ۲۰ درجه به منظور کارایی بهتر و سرعت بالاتر واکنش شیمیایی صورت گیرد و از ایجاد دماهای پایین به علت ریسک رسوب گذاری برخی مواد, خودداری شود. همچنین در صورت وجود چند ماژول در یک سایت, نیاز است هرکدام به صورت جداگانه شست و شو داده شده و محلول شیمیایی ورودی برای هریک مجزا باشد.[۱۱]

۵) **بهره برداری در محدوده ی طراحی** به گونه ای که فشار خوراک ورودی به ماژول, دبی جریان و نرخ بازیابی مطابق با مقادیر بهینه ی ارائه شده توسط سازنده تنظیم گردد. افزایش فشار میتواند منجر به وارد شدن آسیب های مکانیکی به غشا شده و تنش مکانیکی ایجاد کند. همچنین نرخ بازیابی بالا میتواند رسوب گذاری بر سطح غشا را افزایش دهد که این عامل نیاز به شست و شوی شیمیایی را افزایش داده و عمر مفید ماژول را کاهش می دهد. از این رو لازم است تمام شرایط کاری در محدوده ی بهینه و مشخص تنظیم گردد. [۱۶]

۶) **آموزش اپراتورها بر اساس دستورالعمل های تولید کننده** جهت انجام صحیح فرایندهای شست و شو, محدودیت های عملیاتی, پایش سیستم و نگهداری به گونه ای که عیب یابی سیستم به موقع تشخیص داده شده و مشکلات سایت پیش از بحران حل گردند.

ترکیب پیش تصفیه مناسب, پایش دقیق روزانه, شست و شوی شیمیایی هدفمند, بهره برداری در محدوده ی طراحی, ثبت داده ها و اجرای توصیه های سازنده توسط اپراتورهای سایت, طول عمر غشای اسمزمعکوس را به طور چشم گیری افزایش داده و هزینه های عملیاتی را کاهش می دهد. گرچه طراحی عملکرد سیستم اسمز معکوس به صورت فرایند پیوسته است, با این حال ممکن است گاهی سیستم ها خاموش و مجددا راه اندازی گردند. در این شرایط, شست و شوی سیستم با آب تصفیه شده و یا خوراک با کیفیت بالا می بایست صورت گیرد و تا زمانی انجام شود که غلظت جریان تغلیظ شده خروجی از ماژول به غلظت آب ورودی برسد. این فرایند جهت خارج سازی نمک ها از درون غشا پیش از توقف سیستم ضروریست و معمولا در محدوده ی فشار پایین و در حدود ۳ بار صورت می گیرد. پس از شست و شو سیستم, می بایست شیرهای خوراک به طور کامل بسته شوند و اگر توقف در دمای محیط صورت می گیرد, درون ماژول پر از آب تصفیه شده شود تا از خشک شدن سطح غشا و ترک خوردگی جلوگیری گردد.[۱۱]

۳-۴. مدیریت عملکرد سیستم در شرایط زمستانی

عملکرد صحیح سیستم های اسمز معکوس در فصل زمستان بسیار حساس است, زیرا دماهای پایین می تواند باعث کاهش راندمان, یخ زدگی اجزا و آسیب های جدی به غشا و تجهیزات ثانویه شود.[۱۶] در شرایط معمول با کاهش دما, تولید آب در غشا به دلیل ویسکوزیته ی بالاتر آب, کاهش یافته و عبور آب از سطح غشا سخت تر می شود. در مقابل میزان نمک زدایی نیز افزایش می یابد چراکه به دلیل افزایش ویسکوزیته, نفوذ ذرات محلول در دمای پایین نیز کاهش می یابد. به طور کلی در بازه ی دمایی ۱۵ تا ۳۵ درجه, به ازای هر یک درجه کاهش دما میزان تولید آب تراوش شده به مقدار ۳ درصد کاهش می یابد. از این رو جهت جلوگیری از مشکلات و حفظ پایداری سیستم, رعایت اصول زیر ضروریست.[۲۴]

۱) **کنترل دمای آب خوراک** در محدوده ی دمای ایده آل و در حدود ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی گراد. دمای آب هرگز نباید به زیر ۵ درجه برسد چراکه خطر یخ زدگی در این دما به شدت بالاست و این امر نه تنها باعث ترک خوردگی و آسیب مکانیکی به غشا می گردد, بلکه به علت افزایش ویسکوزیته آب قادر است موجب کاهش جریان نفوذی Permeate Flow شود. در صورت کاهش دما نیاز است از سیستم های گرم کننده یا Heat Tracing روی خطوط خارجی استفاده کرده و یا از هیترها جهت گرم سازی جریان ورودی به ماژول بهره برد.

۲) **محافظت ممبرین ها در برابر یخ زدگی** به گونه ای که محیط قرار گیری ماژول ها همواره عایق بندی شده و در دمای مناسب نگهداری شود. از آن جایی که یخ زدگی آب باقیمانده در ماژول به هنگام توقف های طولانی در فصول سرد, میتواند منجر به آسیب به لایه ی پلی آمیدی فعال و ترک خوردگی غشا گردد, هرگز نباید سیستم را با آب بدون گردش رها کرد و در صورت امکان بهتر است قبل از توقف کامل سیستم را با محلول های محافظتی پر کرد.[۱۵]

۳) **عایق بندی و محافظت فیزیکی تجهیزات** از قبیل لوله ها, فلومترها, گیج های فشار, پمپ ها و هوزینگ ها با استفاده از کاورهای حرارتی و یا جعبه ی محافظ تا از یخ زدگی اطراف تجهیزات جلوگیری شود.

۴) **تنظیم پارامترهای عملیاتی** مناسب با دماهای پایین تر از محدوده. به عنوان مثال کاهش دما باعث افزایش ویسکوزیته آب ورودی و کاهش جریان Permeate می گردد. جهت جبران کاهش دبی جریان تولیدی می توان فشار عملیاتی سیستم را افزایش داد تا دبی تولیدی مجددا به حد بهینه شده بازگردد. همچنین به علت کاهش دما در فصول سرد, کیفیت آب ورودی ممکن است تغییر کند از این رو پایش خصوصیات آب و کاهش مقدار جریان بازیابی میتواند منجر به کاهش ریسک رسوب گذاری روی سطح غشا شود. [۲۵]

۵) **برنامه ریزی جهت راه اندازی سیستم در زمستان پس از یک توقف** به گونه ای که ابتدا اطمینان حاصل شود که در فیلترهای پیش تصفیه, خطوط و پمپ ها یخ زدگی وجود ندارد و سپس, آب گرم در سیستم و قبل از ورود به ممبرین به گردش درآید. با باز شدن مسیر ورودی ابتدا فشار جریان پایین باشد و سپس به تدریج افزایش یابد تا در نهایت, سیستم مجددا وارد خط تولید شود. مراحل خاموش سازی ایمن سیستم به هنگام توقف, قطع برق دستگاه, بستن ورودی آب خوراک, تخلیه فشار داخل سیستم و جلوگیری از استارت ناگهانی در دمای پایین است. نیاز است پس از خاموش سازی دستگاه, تخلیه ی کامل آب از ماژول غشا, پمپ ها و لوله ها به طور کامل صورت گیرد زیرا وجود مقادیر حتی پایین از آب, به علت انبساط حجمی به هنگام یخ زدگی قادر است به ساختار سیستم آسیب جدی وارد کند.[۲۴] پس از تخلیه, می بایست شست و شوی ملایم با آب تمیز جهت جلوگیری از رسوب و رشد میکروبی در دوره توقف انجام شود و ماژول ها به کمک محلول نگهدارنده مناسب از قبیل پروپیلن گلایکول محافظت گردند. لازم به ذکر است که محلول نگهدارنده می بایست غیر سمی و سازگار با نوع غشا باشد. قبل از راه اندازی مجدد لازم است محلول محافظ کاملا تخلیه شده و سیستم با شست و شوی ملایم, آرام آرام گرم شده و کم کم به فشار عملیاتی مورد نظر برسد.[۲۶]

۶) **پایش مداوم** در فصل زمستان از اهمیت ویژه ای برخوردار است. دمای آب ورودی, فشار پمپ ها, جریان تصفیه شده و ریجکت شده, هدایت الکتریکی و کیفیت آب تصفیه شده و در نهایت وضعیت فیلترهای پیش تصفیه می بایست به صورت مداوم و با حساسیت بالا کنترل گردد.

۷) **آموزش پرسنل** در زمینه ی شناسایی خطرات یخ زدگی, اصول راه اندازی و توقف در زمستان, نحوه ی استفاده از ضد یخ های صنعتی و اهمیت پایش مداوم دما و فشار.

در پایان مطابق با استانداردهای بین المللی, اگر به هنگام توقف طولانی سیستم, امکان گرمایش محیطی در سایت وجود نداشت می بایست ماژول ها کاملا تخلیه شده و با محلول نگهدارنده پر شوند.[۱,۲] برای غشای اسمزمعکوس میتوان از محلول سدیم بی سولفیت ۱-۰.۵ درصد یا پروپیلن گلایکول ۳۰-۲۰ درصد وزنی به عنوان نگهدارنده استفاده کرد. همچنین اگر سیستم دچار توقف کوتاه گردد, نیاز است همه خطوط لوله, مخازن و پمپ ها کاملا تخلیه شوند تا از ترک خوردن غشا و تجهیزات جانبی جلوگیری شود. نیاز است در صورت توقف طولانی سایت, هر ۳۰ روز وضعیت محلول نگهدارنده چک شده و در صورت کاهش غلظت, مجددا آماده سازی و کنترل صورت گیرد. راه اندازی مجدد بعد از فصل زمستان به گونه ای است که سیستم باید کاملا از محلول نگهدارنده شسته شود و دمای آب از ۱۵-۱۰ درجه شروع شده و به تدریج افزایش یابد تا از شوک حرارتی جلوگیری شود.[۲۷]

۵- نتیجه گیری

مهم ترین چالش در بهره برداری سیستم های RO, پدیده ی رسوب گذاری Scaling و گرفتگی Fouling غشا است. یکی از عوامل تشدید کننده این پدیده, عدم کنترل کیفیت آب ورودی به المان های غشایی است که با فرایند پیش تصفیه مناسب, تا حد قابل توجه ای میتوان از این امر پیش گیری کرد. گرچه, تنظیم پارامترهای عملیاتی به هنگام بهره برداری نیز تا حد زیادی بر ایجاد رسوب گرفتگی موثر خواهد بود, با این وجود با کنترل مقدار فشار و بازیابی سیستم, میتوان روند این فرایند را به تاخیر انداخت. رعایت اصول نگهداری روزانه و طولانی مدت که شامل دستورالعمل هایی جهت تنظیم پارامترهای عملیاتی, کیفیت خوراک ورودی و چگونگی فرایند پیش تصفیه است, تا حد قابل توجه ای طول عمر مفید سیستم را افزایش داده و از افت عملکرد آن جلوگیری می کند. با این حال, گرفتگی منافذ غشا پس از مدت زمان معین, اجتناب ناپذیر بوده و نیاز است فرایندهای شست و شوی مکانیکی و شیمیایی به صورت دوره ای و با دستورالعمل مناسب صورت گیرد تا راندمان سیستم به حالت طبیعی و حداکثری خود بازگردد. اجرای یک برنامه ی نگهداری جامع شامل پیش تصفیه, نظارت موثر, شست و شوی به موقع و به کارگیری تکنیک های ضد فولینگ, بهره برداری در محدوده ی طراحی, ثبت داده ها و اجرای توصیه های سازنده توسط اپراتورهای سایت نه تنها عملکرد غشا را در سطوح بهینه نگه میدارد, بلکه به طور معناداری طول عمر بهره برداری از آن را نیز افزایش می دهد.

منابع

.١ Mulder, M., *Basic principles of membrane technology*. 2012: Springer science & business media.

.٢ Baker, R.W., *Membrane technology and applications*. 2023: John Wiley & Sons.

.٣ Karabelas, A., M. Kostoglou, and C. Koutsou, *Modeling of spiral wound membrane desalination modules and plants–review and research priorities.* Desalination, 2015. **356**: p. 165-186.

.٤ Nicolaisen, B., *Developments in membrane technology for water treatment.* Desalination, 2003. **153**(1-3): p. 355-360.

.٥ Vrijenhoek, E.M., S. Hong, and M. Elimelech, *Influence of membrane surface properties on initial rate of colloidal fouling of reverse osmosis and nanofiltration membranes.* Journal of membrane science, 2001. **188**(1): p. 115-128.

.٦ Greenlee, L.F., et al., *Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges.* Water research, 2009. **43**(9): p. 2317-2348.

.٧ Zhu, X. and M. Elimelech, *Colloidal fouling of reverse osmosis membranes: measurements and fouling mechanisms.* Environmental science & technology, 1997. **31** :(١٢)p. 3654-3662.

.٨ Elimelech, M., et al., *Role of membrane surface morphology in colloidal fouling of cellulose acetate and composite aromatic polyamide reverse osmosis membranes.* Journal of membrane science, 1997. **127**(1): p. 101-109.

.٩ Pandey, S.R., et al., *Fouling in reverse osmosis (RO) membrane in water recovery from secondary effluent: a review.* Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2012. **11**(2): p. 125-145.

.١٠ Schäfer, A., et al., *Fouling in nanofiltration*. 2004, Elsevier.

.١١ Solutions, D.W., *Filmtec™ reverse osmosis membranes.* Technical Manual, Form, 2010. **399**(609-00071): p. 1-180.

.١٢ Yin, W., et al., *Fouling behavior of isolated dissolved organic fractions from seawater in reverse osmosis (RO) desalination process.* Water Research :١٥٩ .٢٠١٩ ,p. 385-396.

.١٣ Ramon, G.Z., T.-V. Nguyen, and E.M. Hoek, *Osmosis-assisted cleaning of organic-fouled seawater RO membranes.* Chemical engineering journal, 2013. **218**: p. 173-182.

.١٤ Rajendran, D.S., et al., *Recent advances in various cleaning strategies to control membrane fouling: a comprehensive review.* Clean Technologies and Environmental Policy, 2025. **27**(2): p. 649-664.

.١٥ Li, Z.-H., et al., *Fouling characteristic of reverse osmosis membrane for reclaimed water treatment operating under cold winter condition.* Desalination, 2023. **549**: p. 116309.

.١٦ Pervov, A.G., et al., *RO and NF membrane systems for drinking water production and their maintenance techniques.* Desalination, 2000. **132**(1-3): p. 315-321.

.١٧ Zhao, Y.-j., et al., *Fouling and cleaning of membrane-a literature review.* JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES-BEIJING-, 2000. **12**(2): p. 241-251.

.١٨ Yu, W., et al., *Antiscalants in RO membrane scaling control.* Water research, 2020. **183**: p. 115985.

.١٩ AlSawaftah, N., et al., *A comprehensive review on membrane fouling: Mathematical modelling, prediction, diagnosis, and mitigation.* Water, 2021. **13**(9): p. 1327.

.٢٠ Sarker, N.R., et al., *End-of-the-day rinsing for improved maintainability of intermittently operated small-scale photovoltaic-powered reverse osmosis systems.* Desalination, 2025. **599**: p. 118439.

.٢١ Shim, J., et al., *Optimizing membrane cleaning strategy of industrial reverse osmosis process using long sequence time-series forecasting.* Desalination, 2025: p. 119193.

.٢٢ Tayeh, Y.A ,.et al., *A comprehensive review of RO membrane fouling: mechanisms, categories, cleaning methods and pretreatment technologies.* Journal of Hazardous Materials Advances, 2025: p. 100684.

.٢٣ Srivastava, S., et al., *Design and development of reverse osmosis (RO) plant status monitoring system for early fault prediction and predictive maintenance.* Applied Water Science, 2018. **8**(6): p. 159.

.٢٤ Co, V.T., *Guide to Winter Maintenance of Ro Membrane Retrieved from* http://en.vontron.com/Investor_details/55.html.٢٠٢٥ .

.٢٥ Takabatake, H., M. Taniguchi, and M. Kurihara, *Advanced technologies for stabilization and high performance of seawater ro membrane desalination plants.* Membranes, 2021. **11**(2): p. 138.

.٢٦ Technologies., A.W. *Winterizing Reverse Osmosis Sustem :Shotdown and Preservation guide*. 2023; Available from: http://www.axeon water.com/blog/winterizin/g-a-reverse-osmosis-system

.٢٧ Sassi, K.M. and I.M. Mujtaba, *Optimal operation of RO system with daily variation of freshwater demand and seawater temperature.* Computers & chemical engineering, 2013. **59**: p. 101-110.

.٢٨ Bonnélye, V., et al. (2008). "UF/MF as RO pre-treatment: the real benefit." Desalination **222**(1-3): 59-65.