

مروری بر روش‌های عملیاتی به منظور پیش‌گیری از بروز رسوبات

سیلیس در واحدهای تصفیه آب

کوروش اسفندیاری^{۱*}، اشکان اربابی^۲، حامد صفاریان^۲، رامین زارعی^۲

^۱ دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران

^۲ شرکت فناور ایمن لوتوس، شهرک صنعتی آق‌قلا، گرگان، ایران

ایمیل عهده‌دار مکاتبات: k.esfandiari@mazust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۶

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۵

چکیده

با توجه به چالش‌های کمبود آب، فرآیندهای غشایی اسمز معکوس برای تصفیه آب گسترش یافته‌اند. در این روش، آب با فشار از غشاء نیمه‌تراوا عبور کرده و ناخالصی‌ها جدا می‌شوند. با این حال، تشکیل رسوب املاح موجود در آب بر سطح غشاء، کارایی این فناوری را کاهش داده، عمر مفید غشاء را کم و هزینه‌ها را افزایش می‌دهد. سیلیس، از رایج‌ترین املاح آب، در اثر پلیمریزاسیون اسیدسیلیسیک رسوب می‌کند. از آنجایی که حذف رسوبات سیلیس دشوار و نیازمند شوینده‌های شیمیایی قوی و مضر برای محیط‌زیست است، پیش‌گیری از تشکیل رسوب سیلیس از اهمیت بالایی برخوردار است. راهکارهای پیش‌گیرانه شامل اصلاح سطح

غشاء، تنظیم pH و دمای آب ورودی برای افزایش انحلال پذیری سیلیس، کاهش غلظت سایر املاح موجود در آب که به تشکیل رسوب کمک می کنند، پیش تصفیه آب ورودی برای کاهش غلظت سیلیس و استفاده از آنتی اسکالانت های مناسب برای ممانعت از پلیمریزاسیون سیلیس است. لذا در این مقاله مروری، تلاش شده است ضمن بررسی آخرین پژوهش های موجود از دیدگاه عملیاتی، راهکارهای عملیاتی مناسب برای استفاده توسط کارشناسان واحدهای تصفیه آب به روش اسمز معکوس مورد جمع بندی قرار گیرد. کلمات کلیدی: تصفیه آب، جداسازی غشایی، اسمز معکوس، رسوبات سیلیس، آنتی اسکالانت.

A Review of Operational Methods for Preventing Silica Scaling in Water Treatment Plants

Kourosh Esfandiari ^{1*}, Ashkan Arbabi ², Hamed Saffarian ², Ramin Zarei ²

¹ Faculty of Chemical Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran.

² Fanavar Eimen Lotus Co., Aq-Qala Industrial Estate, Gorgan, Iran.

* Corresponding Author Email: k.esfandiari@mazust.ac.ir

Received: 27/05/2025

Revised: 21/09/2025

Accepted: 27/09/2025

Abstract

Water scarcity has driven the widespread adoption of reverse osmosis (RO) membrane processes for water purification. In reverse osmosis plants, water is pressurized and passes through a semi-permeable membrane and the impurities are separated and the pure water is generated. However, the formation of mineral scale on the membrane surface significantly reduces the technology's efficiency, shortens membrane lifespan, and increases operational costs. Silica, a common water impurity, precipitates due to the polymerization of silicic acid. Since silica scale removal is challenging and often requires strong, environmentally harmful chemical cleaners, preventing its formation is crucial. Preventive strategies include membrane surface modification, adjusting the pH and temperature of the feed water to increase silica solubility, reducing the concentration of other contributing minerals, pre-treating feed water to lower silica concentration, and using appropriate antiscalants to inhibit silica polymerization. This review article examines the latest operational research to compile practical solutions for experts managing reverse osmosis water treatment facilities.

Keywords: water treatment, membrane separation, reverse osmosis, silica scaling, antiscalant

آب به عنوان یک منبع ضروری برای فعالیت‌های انسانی و سلامت اکوسیستم به شمار می‌آید. با این وجود در سال‌های اخیر جامعه جهانی به دلیل رشد سریع جمعیت و تغییرات اقلیمی با چالش‌های دوگانه آلودگی و کمبود آب مواجه شده است. از این رو، روش‌های مختلف شیرین‌سازی (تصفیه) آب به ویژه فرآیندهای غشایی مبتنی بر اسمز معکوس، توجه فراوانی را به خود جلب و امکان تصفیه آب از منابع غیرمتعارف از جمله آب دریا، آب شور و فاضلاب را امکان‌پذیر نموده است. در تصفیه غشایی آب به روش اسمز معکوس، با ایجاد فشاری بیشتر از فشار اسمزی، آب از میان یک غشاء نیمه‌تراوا عبور کرده و ناخالصی‌ها، مواد محلول و یون‌ها از آن جدا می‌شود. با توجه به اینکه عبور آب از میان غشاء، منجر به تغلیظ فاز موجود در پشت غشاء خواهد شد، عملکرد و کارایی فناوری‌های غشایی به طور قابل‌توجهی توسط تشکیل رسوب املاح بر روی سطح غشاء محدود می‌شود (Rolf et al., 2022; Tong et al., 2019). تشکیل یا رسوب املاح بر روی سطح غشاء علاوه بر کاهش نرخ بازیابی آب و افت کیفیت آب تولیدی، منجر به کاهش عمر مفید غشاء به دلیل عملیات برنامه‌ریزی نشده و متعدد شستشوی غشاء می‌شود. این در حالی است که در واحدهای صنعتی، با افزایش نرخ بازیابی آب تا حد ممکن که با هدف صرفه‌جویی در هزینه‌های عملیاتی و کاهش میزان هدر رفت آب صورت می‌پذیرد، سیستم غشایی هر چه بیشتر به یک نقطه‌ی حدی در تشکیل رسوبات نزدیک می‌شود (Zhang et al., 2022).

از جمله رسوبات مرسوم ایجاد شده بر روی سطح غشاهای اسمز معکوس می‌توان به سیلیس، رسوبات کربناتی (نظیر کربنات کلسیم و باریوم)، رسوبات سولفاتی (نظیر سولفات کلسیم، باریوم و استرانسیم)، هیدروکسیدهای فلزی (نظیر هیدروکسید آهن، آلومینیوم، منیزیم و منگنز) و همچنین فلوئورید کلسیم و فسفات کلسیم اشاره نمود. این رسوبات بر اساس غلظت املاح اصلی تشکیل دهنده‌ی آن‌ها در پساب خروجی و شرایط دما، pH و غلظت سایر املاح، بر روی سطح غشاء رسوب می‌نمایند. شکل (۱)، نمایشی از شرایط تشکیل برخی از رسوبات مرسوم در حضور غلظت‌های مختلف املاح تشکیل دهنده‌ی آن‌ها و pH آب را نشان می‌دهد (Saltworks Technologies Inc). در این شکل، اعداد نوشته شده بر روی نام رسوبات نشان دهنده‌ی میزان انحلال‌پذیری آن رسوب در آب (بر حسب میلی‌گرم بر لیتر) و اعداد نوشته شده در پایین نام رسوبات حداقل غلظت هر یک از یون‌های تشکیل دهنده‌ی آن رسوب (بر حسب میلی‌گرم بر لیتر) است. به عنوان مثال، در رابطه با رسوب کربنات کلسیم (CaCO_3)، حداکثر میزان انحلال‌پذیری این رسوب در آب برابر با ۶/۱۷ میلی‌گرم بر لیتر بوده و این رسوب در pH‌های بالاتر از ۵ و در شرایطی که غلظت یون‌های کربنات و کلسیم بیشتر از به ترتیب ۳/۷ و ۲/۵ میلی‌گرم بر لیتر باشد، تشکیل خواهد شد.

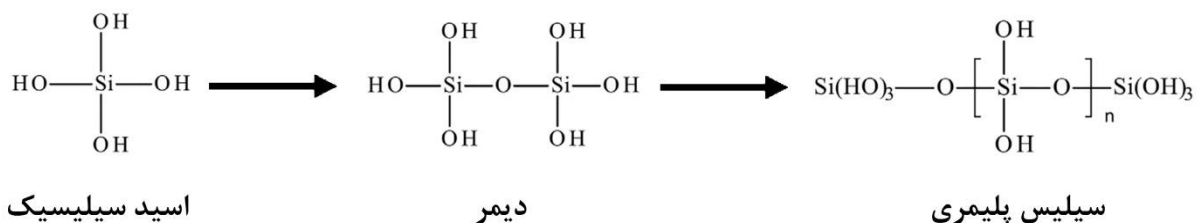
2550 سولفات کلسیم CaSO₄ Ca ²⁺ 751 SO ₄ ²⁻ 1799				120 سیلیس SiO₂ SiO ₂ 120 pH <10
15 فلوئورید کلسیم CaF₂ Ca ²⁺ 7.7 pH >2 F ⁻ 7.3	6.17 کربنات کلسیم CaCO₃ Ca ²⁺ 2.5 pH >5 CO ₃ ²⁻ 3.7	132 سولفات استرانسیم SrSO₄ Sr ²⁺ 63 SO ₄ ²⁻ 69	1.0 هیدروکسید آلومینیوم Al(OH)₃ Al ³⁺ 0.37 pH >3	9.6 هیدروکسید منیزیم Mg(OH)₂ Mg ²⁺ 4.0 pH >10
20 فسفات کلسیم Ca₃(PO₄)₂ Ca ²⁺ 7.8 pH >5 PO ₄ ³⁻ 12.2	24 کربنات باریم BaCO₃ Ba ²⁺ 17 pH >5 CO ₃ ²⁻ 7.3	2.45 سولفات باریم BaSO₄ Ba ²⁺ 1.4 SO ₄ ²⁻ 1.0	1.43 هیدروکسید آهن Fe(OH)₃ Fe ²⁺ 0.75 pH >3	1.43 هیدروکسید منگنز Mn(OH)₂ Mn ²⁺ 2.0 pH >3

شکل (۱): شرایط تشکیل انواع رسوبات بر روی غشاء اسمز معکوس (Saltworks Technologies Inc).

سیلیس یکی از رایج‌ترین املاح موجود در آب‌های طبیعی بوده که معمولاً در غلظتی بین ۱ تا ۶۰ میلی‌گرم بر لیتر، به دو صورت کریستالی یا آمورف وجود دارد (Tong et al., 2017; Park et al., 2020). سیلیس موجود در آب‌های طبیعی از انحلال سنگ‌ها و مواد معدنی به دست می‌آید. واکنش اصلی انحلال (واکنش ۱) شامل هیدرولیز پیوندهای $Si - O - Si$ است که منجر به تولید اسیدسیلیسیک (H_4SiO_4) می‌گردد (Park et al., 2020).

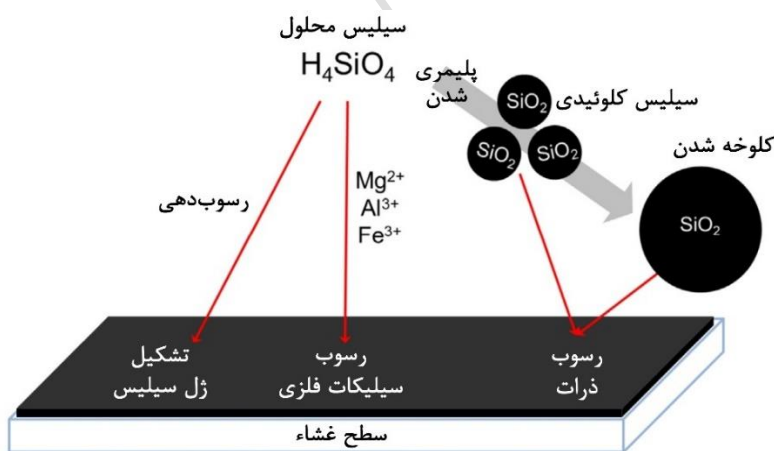


اسیدسیلیسیک محلول که سیلیس واکنش‌پذیر نیز نامیده می‌شود، یک اسید چهار ظرفیتی ضعیف بوده که تا زمانی که غلظت آن کمتر از ۲ میلی‌مولار باشد در حالت مونومر باقی می‌ماند (Sheikholeslami and Tan, 1999). هنگامی که غلظت اسیدسیلیسیک به یک آستانه غلظتی خاص می‌رسد، رسوب‌گذاری سیلیس به واسطه‌ی پلیمریزاسیون مونومرهای اسیدسیلیسیک که پیوندهای $Si - O - Si$ را از طریق آب‌زدایی تشکیل داده‌اند صورت می‌پذیرد (شکل ۲) (Milne et al., 2014; Makrides et al., 1980) که طی این فرآیند سیلیس از حالت محلول (که طی واکنش با مولیبدات طبق استاندارد ISIRI 7919 قابل تشخیص است)، خارج می‌شود. این امر منجر به تشکیل سیلیس پلیمری (دیمرها، تریمرها و سایر چندپاره‌های اسیدسیلیسیک (Tardy, 1982))، سیلیس کلوئیدی (با قطر ۵ نانومتر یا بیشتر) و سیلیکات‌های فلزی (نظیر سیلیکات‌های منیزیم، آلومینیوم و آهن) می‌گردد (شکل ۳).



شکل (۲): پلیمریزاسیون اسیدسیلیسیک (Park et al., 2020).

هنگامی که غلظت سیلیس موجود در پساب خروجی از واحدهای اسمز معکوس، بیش از میزان حلالیت سیلیس (معمولاً ۱۰۰-۱۸۰ میلی گرم بر لیتر در pH محدوده خنثی (Tong et al., 2017; Iler, 1979)) گردد، واکنش شیمیایی بین گروه‌های عاملی سیلانول (Si-OH) و گروه‌های کربوکسیل (COOH) موجود بر روی سطح غشاء، منجر به تشکیل پیوند هیدروژنی، هسته‌زایی ناهمگن و رسوب مونوسیلیکات بر روی سطح غشاء می‌شود (Sun et al., 2024). اگرچه هسته‌زایی ناهمگن ناشی از پلیمریزاسیون اسیدسیلیسیک به عنوان مکانیسم اصلی رسوب سیلیس پیشنهاد شده است (Mi and Elimelech, 2013; Xie and Gray, 2017)، با این حال ته‌نشینی سیلیس کلوئیدی نیز ممکن است نقش مهمی در بروز گرفتگی غشایی در سیستم‌های اسمز معکوس ایفا نماید (Milne et al., 2014; Semiat et al., 2003).



شکل (۳): انواع حالات تشکیل رسوبات سیلیس بر روی سطح غشاء (Park et al., 2020).

با توجه به اینکه حذف رسوبات سیلیس از سطح غشاء عمدتاً بسیار سخت و بعضاً غیرممکن بوده (Zhang et al., 2022) و نیازمند استفاده از شوینده‌های شیمیایی قوی (نظیر آمونیوم بی‌فلوئوراید و هیدروژن فلئوراید) با چالش‌های زیست‌محیطی فراوانی است (Amjad, 2016)، لذا بهتر است که کارشناسان فنی واحدهای تصفیه آب به روش اسمز معکوس که احتمال تشکیل رسوبات سیلیس بر روی سطح غشاء در آن واحدها زیاد است، از راهکارهای پیش‌گیرانه که در ادامه مورد بررسی و جمع‌بندی قرار می‌گیرند، بهره

گیرند. لذا در این پژوهش، به بررسی روش‌های پیش‌گیری از بروز رسوب سیلیس بر روی سطح غشاء اسمز معکوس و تحقیقات اخیر در این زمینه پرداخته خواهد شد.

۲- روش جستجو و انتخاب منابع

در پژوهش حاضر سعی بر آن شده است که با استفاده از آخرین یافته‌های علمی موجود در قالب مقالات، کتب و پتنت‌های معتبر، تصویری جامع از راه‌کارهای موجود در مواجهه با تشکیل رسوبات سیلیس بر روی سطح غشاهای اسمز معکوس ارائه گردد. در جستجوهای صورت پذیرفته منابع علمی مربوط به ۵ سال اخیر مورد توجه بیشتری قرار گرفته و در کنار آن به متون معتبر علمی قدیمی‌تر نیز برای درک و انتقال بهتر مبانی علمی توجه شده است. همچنین در انتخاب پایگاه‌های علمی محدودیتی لحاظ نشده است و کیفیت و اعتبار متن علمی و تعداد بالای استناد به آن‌ها، در اولویت انتخاب آن متن قرار داشته است. بعلاوه به منظور جستجوی متون علمی از واژگان کلیدی متعدد نظیر "Silica Formation Mechanism"، "Chemistry of Silica Scale Formation Effect"، "Prevention Strategies for Silica Scaling"، "Mechanisms of Action for Silica Scale Prevention"، "Formation of Surface Charges on Silica Scale Formation" و "Types of Antiscalant Chemicals for Silica Scale Prevention" استفاده شده است. به منظور جستجوی متون علمی، علاوه بر استفاده از موتورهای جستجوی مرسوم نظیر www.scholar.google.com، از سایت‌های مجهز به ابزارهای هوش مصنوعی نظیر سایت www.scispace.com نیز بهره گرفته شده است.

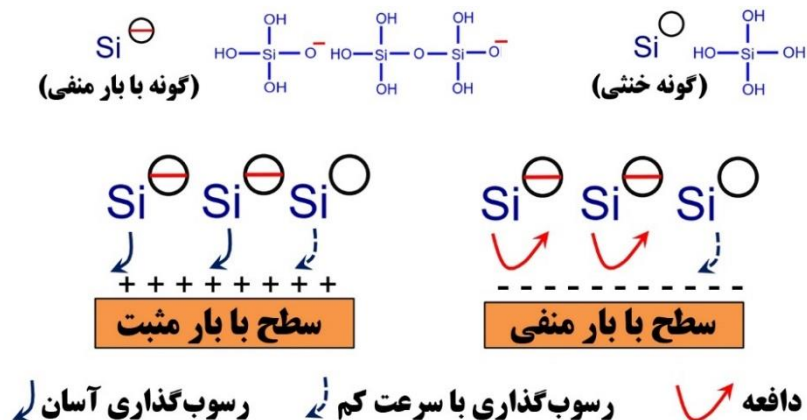
۳- راهکارهای پیش‌گیری از تشکیل رسوبات سیلیس

طی دو دهه اخیر، راهکارهای متعددی نظیر اصلاح بار سطحی غشاء، افزایش انحلال‌پذیری سیلیس با تنظیم pH و دمای آب، کنترل رسوب سیلیس مبتنی بر کاهش سایر املاح موجود در آب، کاهش غلظت سیلیس محلول از طریق فرآیندهای پیش‌تصفیه و استفاده از آنتی‌اسکالانت‌های مناسب جهت ممانعت از پلیمریزاسیون سیلیس و پراکندگی آن، برای کنترل رسوبات سیلیس در سیستم‌های تصفیه آب‌های صنعتی توسعه و اجرا شده‌اند (Iler, 1979) که در ادامه به بررسی دقیق‌تر هر یک از آن‌ها پرداخته خواهد شد.

۳-۱- بررسی تأثیر بار سطحی غشاء (انتخاب غشای مناسب)

Tong et al. (2017)، به بررسی ارتباط بین خصوصیات سطحی غشاء اسمز معکوس و میزان رسوب‌گذاری سیلیس پرداختند و نشان دادند که غشاهای دارای لایه‌ای از بهبود دهنده‌های سطحی با بار مثبت (نظیر پلی‌اتیلن ایمین، PEM)، گونه‌های سیلیس با بار منفی را جذب می‌کنند و منجر به افزایش تشکیل رسوبات سیلیس می‌شوند. این در حالی است که غشاهای با لایه‌ای از بهبود دهنده‌های سطحی با بار منفی (نظیر پلی‌آکرلیک اسید، PAA) آن‌ها را دفع نموده و از تشکیل رسوب پیش‌گیری می‌کنند که این موضوع به دلیل بار منفی گونه‌های

سیلیس شامل مونومرها، دیمرها، تریمرها، دگرشکلها و ساختارهای سیلیس پلیمری هست (شکل ۴). در همین راستا، Rathinam et al. (2019)، نشان دادند که سطوح دارای گروه‌های عاملی با بار منفی یا خنثی نظیر گروه‌های آمین (NH_2)، هیدروکسیل (OH)، کربوکسیل (COOH)، متیل (CH_3) و ترکیبی از آن‌ها، دارای تمایل کمتری به جذب سیلیس هستند.

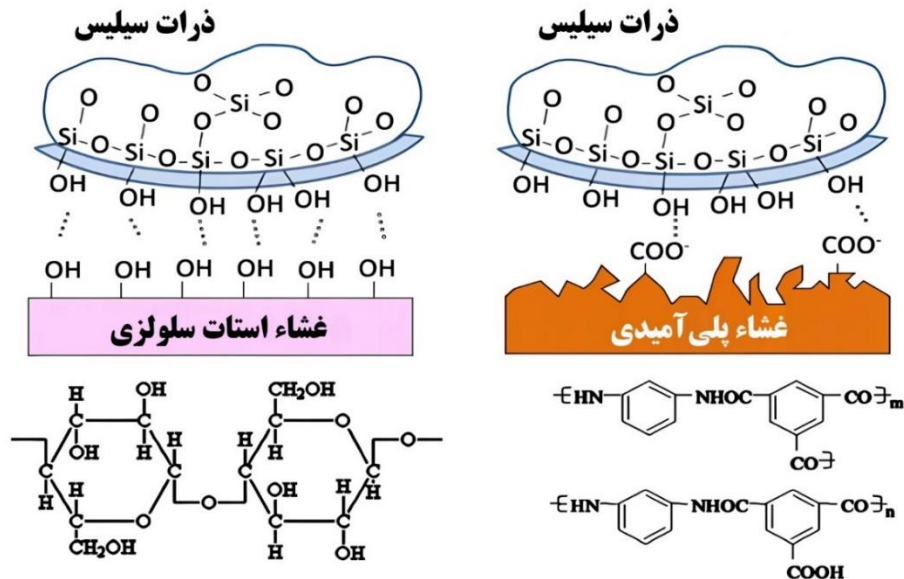


شکل (۴): تأثیر بار سطحی غشاء بر شدت رسوب گذاری سیلیس (Tong et al., 2017).

ذکر این نکته حائز اهمیت است که اگرچه غشاهای مرسوم مورد استفاده در سیستم‌های اسمز معکوس، یعنی غشاهای پلی‌آمیدی (PA) و استات سلولزی (CA)، از گروه‌های عاملی با بار منفی به ترتیب کربوکسیل (COOH) و هیدروکسیل (OH) بر روی سطح غشاء برخوردار هستند (شکل ۵)، با این وجود همچنان بروز رسوبات سیلیس بر روی سطح این غشاءها مشهود است. علاوه بر این، بر اساس بررسی‌های انجام شده توسط Mi and Elimelech (2013)، چنین مشخص شده است با وجود برهم کنش قوی تر ذرات سیلیس با سطح غشاهای استات سلولزی در مقایسه با غشاهای پلی‌آمیدی (به دلیل پیوندهای هیدروژنی)، عملاً به دلیل سطح ناهموار غشاهای پلی‌آمیدی در مقایسه با غشاهای استات سلولزی (Mi and Elimelech, 2010)، شدت تشکیل رسوبات سیلیس بر روی سطح غشاهای پلی‌آمیدی بیشتر است. لذا می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که در حضور غلظت بالایی از املاح سیلیس و با بررسی دقیق سایر پارامترهای فنی آب ورودی و پساب خروجی و توان تحمل غشاهای مورد استفاده، استفاده از غشاهای استات سلولزی می‌تواند گزینه‌ی مناسب‌تری به شمار آید.

علاوه بر موارد مورد اشاره در بالا، اصلاح سطح غشاء توسط پوشش‌دهی و ایجاد ساختارهای کامپوزیتی با مواد آب دوستی نظیر پوشش‌های زویترونیک، پلی‌اتیلن گلایکولاته یا ترکیبات اکسید گرافن نیز با هدف افزایش مقاومت در برابر آلودگی و بهبود عملکرد جداسازی در فرآیندهای فیلتراسیون غشایی (به‌ویژه در تصفیه آب و پساب)، به عنوان روش‌هایی نوین مورد توجه قرار گرفته است. این ساختارهای کامپوزیتی با استفاده از روش‌های مختلفی نظیر تصویربرداری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از

منظر ساختاری و با استفاده از آزمون‌هایی نظیر تغییر شار عبوری، وزن‌سنجی قبل و بعد از رسوب‌گذاری، شستشوی برگشتی و طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس (EDS)، از منظر میزان چسبندگی املاح به سطح، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند (He et al., 2016; Ziemann et al., 2024; Yang et al., 2022; Hu et al., 2023; Mahdavi and Rahimi, 2018).

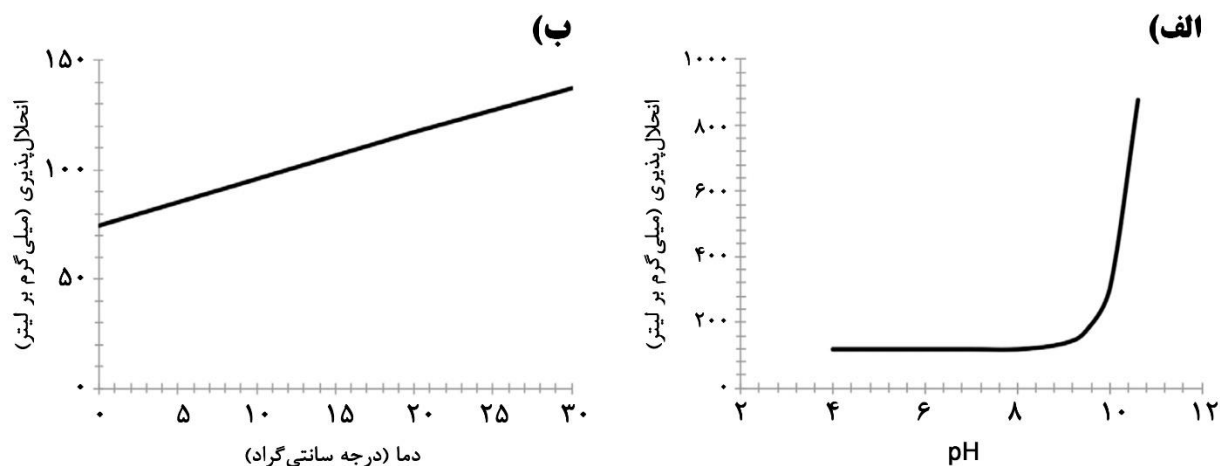


شکل (۵): گروه‌های عاملی موجود بر سطح غشاهای پلی‌آمیدی و استات سلولزی (Mi and Elimelech, 2013).

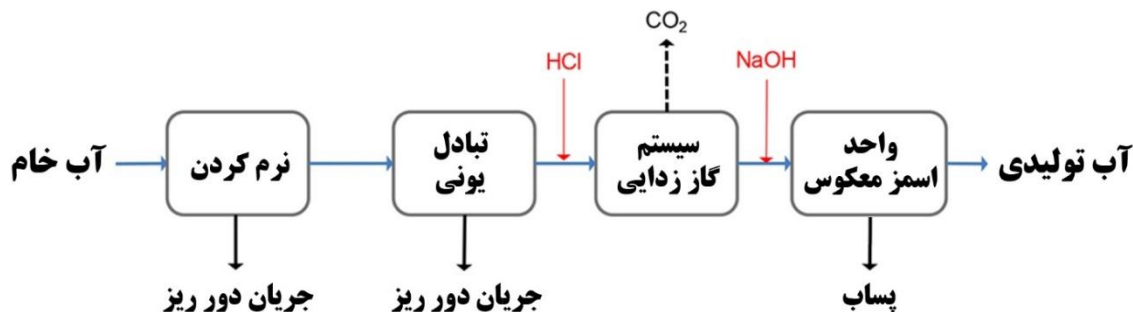
۳-۲- تنظیم pH و دمای آب

یکی از رویکردهای قابل اجرا در مقیاس صنعتی برای بهبود عملکرد سیستم و کاهش دفع پساب در حضور غلظت‌های بالای سیلیس در خوراک ورودی، تنظیم pH خوراک است. میزان pH خوراک از دو دیدگاه می‌تواند منجر به جلوگیری از رسوب سیلیس بر روی غشاء گردد. همان‌طور که در شکل (۶-الف) مشخص است، افزایش pH منجر به افزایش شدید انحلال‌پذیری سیلیس خواهد شد. لذا عملیات اسمز معکوس در pH بالا می‌تواند به باقی ماندن سیلیس در جریان پساب و جلوگیری از پلیمریزاسیون آن منجر شود (Lunevich et al., 2017; Tong et al., 2017; Kherfan, 2014; Loganathan et al., 2015). علاوه بر این، مقادیر بالای pH همچنین می‌تواند به طور مؤثر رسوبات بیولوژیکی، آلی و ذرات رسوب‌زا را کنترل نماید (Park et al., 2020). با این وجود، pH بالای خوراک ممکن است با تشکیل رسوبات ناشی از سختی آب و یون‌های فلزی مانند آهن، آلومینیوم و منگنز همراه باشد. از این رو پیشنهاد می‌شود به منظور افزایش pH آب برای کنترل رسوبات سیلیس، از سیستم‌های پیش‌تصفیه مناسب جهت حذف سختی آب و یون‌های فلزی استفاده گردد (Subramani et al., 2011). به عنوان نمونه، در فناوری اسمز معکوس با راندمان بالا (HERO™)، از تزریق هیدروکسید سدیم برای افزایش pH آب تا محدوده ۱۰-۱۱ پیش از ورود آن به واحد RO استفاده می‌شود. همچنین برای عملکرد

بهتر واحد غشایی در این فناوری، از تعدادی واحدهای پیش تصفیه آب شامل نرم‌سازی به منظور حذف سختی آب، تبادل یونی با اسید ضعیف برای حذف قلیائیت، اسیدی سازی برای تبدیل باقیمانده قلیائیت به دی‌اکسید کربن و گاز زدایی برای حذف دی‌اکسید کربن محلول استفاده می‌شود (شکل ۷).



شکل (۶): تأثیر پارامترهای عملیاتی بر رسوبات سیلیس؛ الف) تأثیر pH و ب) تأثیر دما (Park et al., 2020).



شکل (۷): نمودار بلوکی فناوری اسمز معکوس با راندمان بالا (HERO™) (Park et al., 2020).

در طرف مقابل، کاهش pH آب ورودی با عدم تجزیه‌ی اسیدسیلیسیک به آنیون سیلیکات همراه است (Park et al., 2020) که منجر به کاهش سرعت پلیمریزاسیون سیلیس و در نتیجه کاهش تشکیل رسوب سیلیس بر روی سطح غشاء می‌گردد (Wang et al., 2017). کارکرد واحدهای غشایی اسمز معکوس در pH های پایین همچنین می‌تواند منجر به کاهش رسوب‌گذاری املاح سختی آب نظیر کلسیم و منیزیم شود.

بر خلاف نتایج موجود در ارتباط با محدوده‌ی pH که در بالا به آن اشاره شد، چنین نیز گزارش شده است که در شرایط عدم وجود سیستم‌های پیش تصفیه و در حضور انبوهی از املاح، تنظیم pH در محدوده‌ی ۵ تا ۷ منجر به کاهش تشکیل رسوبات سیلیس و افزایش آب تولیدی خواهد شد (Alazmi et al., 2020). این مشاهده توسط Kempter et al. (2013) نیز گزارش شده است که در pH برابر با ۷ هیچ رسوبی از سیلیس پس از گذشت زمان طولانی مشاهده نگردید.

اگرچه مکانیسم تشکیل رسوبات سیلیس در pH های بالا و پایین متفاوت است (در pH های بالا به دلیل افزایش انحلال‌پذیری و در pH های پایین به دلیل کاهش در سرعت پلیمریزاسیون)، با این وجود به عنوان یک قانون کلی، توصیه می‌شود واحدهای عملیاتی در مواجهه با آب‌های حاوی مقادیر بالای سیلیس، حتی‌الامکان pH آب ورودی را یا در مقادیر بالا (بین ۱۰ تا ۱۱) و یا در مقادیر پایین (برای مثال ۴ تا ۴/۵) تنظیم نمایند که در چنین pH هایی می‌توان از تشکیل رسوب سیلیس تا غلظت‌هایی چندین برابر حالت اشباع در پساب خروجی (یعنی ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) جلوگیری نمود. لازم به اشاره است که انتخاب محدوده‌ی مناسب برای تنظیم pH با توجه به امکانات عملیاتی، نوع واحدهای پیش تصفیه موجود و غلظت سایر املاح موجود در آب خام ورودی (به ویژه املاح سختی آب) صورت می‌پذیرد.

از منظر تأثیر دما بر انحلال‌پذیری سیلیس، همان‌طور که در شکل (۶-ب) مشاهده می‌شود، افزایش دما با افزایش انحلال‌پذیری سیلیس آمورف همراه است. این در حالی است که، انحلال‌پذیری سیلیکات‌های فلزی بر خلاف این روند بوده و با دما رابطه‌ی عکس دارد (Amjad, 2016). ذکر این نکته حائز اهمیت است که با وجود نتایج آزمایشگاهی به دست آمده پیرامون تأثیر دما بر شدت رسوب‌گذاری سیلیس، عملاً تنظیم دمای آب خوراک در واحدهای تصفیه آب مقیاس متوسط و مقیاس کوچک، کاری پیچیده و نیازمند تجهیزات حرارتی ویژه خواهد بود و لذا استفاده از امکان تنظیم دما در چنین واحدهایی عملاً غیرمحمتمل خواهد بود.

۳-۳- کاهش املاح موجود در آب

حضور املاحی نظیر یون‌های فلزی چند ظرفیتی می‌تواند منجر به بروز رسوبات سیلیکات فلزی نامحلول گردد. این فرآیند در pH های نزدیک به pK_a اسیدسیلیسیک (یعنی ۹/۸) رخ می‌دهد که در آن هم یون‌های سیلیکات و هم سیلیس پلیمری می‌توانند با یون‌های فلزی چند ظرفیتی واکنش داده و منجر به تشکیل رسوب سیلیکات‌های فلزی نامحلول گردند (Gabelich et al., 2005). در ارتباط با یون‌های منجر به سختی آب (یعنی کلسیم و منیزیم)، چنین مشخص شده است که حضور این یون‌ها علاوه بر تأثیرگذاری بر رسوب مستقیم سیلیس مونومری، تشکیل سیلیس کلئیدی را نیز تسهیل می‌نماید (Sheikholeslami and Zhou, 2000). این در حالی است که Haidari et al. (2022) نشان دادند که در شرایط عدم تزریق مواد بازدارنده از تشکیل رسوب و عدم حضور یون‌های

چند ظرفیتی کلسیم و منیزیم، سیستم غشایی می‌تواند تا غلظت‌های بالایی از سیلیس در پساب خروجی (یعنی ۲۸۰ میلی‌گرم بر لیتر)، بدون کاهش در نفوذپذیری غشاء به عملیات ادامه دهد.

یون‌های آلومینیوم و آهن، دو کاتیون فلزی دیگر بوده که حضور آن‌ها در پساب خروجی می‌تواند منجر به بروز رسوبات سیلیکاتی شود. به عنوان مثال، در شرایطی که از روش انعقاد شیمیایی با استفاده از آلوم (سولفات آلومینیوم، $Al_2(SO_4)_3$) پیش از ورود آب به واحد RO استفاده شود، تشکیل رسوبات کائولینیت ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) بر روی سطح غشاء محتمل خواهد بود (Gabelich et al., 2005). همچنین مشخص شده است که حضور هم‌زمان یون‌های آلومینیوم و آهن در غلظت‌های بیش از ۰/۰۵ میلی‌گرم بر لیتر در آب ورودی به RO، حتی در شرایطی که غلظت سیلیس کمتر از حد اشباع باشد نیز می‌تواند عملکرد پایدار سیستم RO را با چالش مواجه کند (Al-Ahmad et al., 2000).

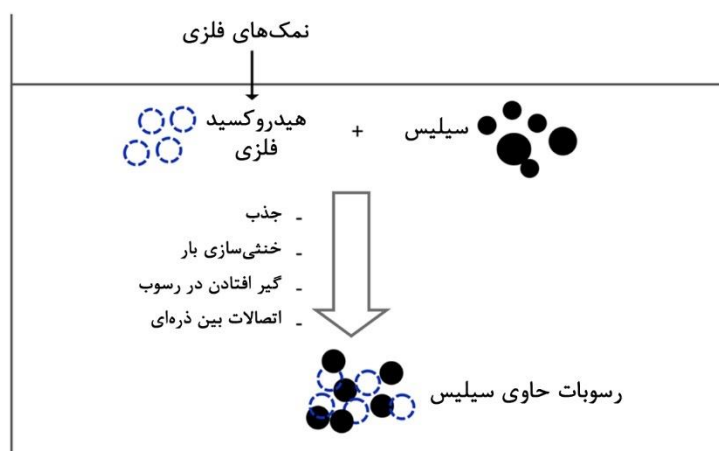
در ارتباط با حضور مقادیر متوسط تا زیاد از NaCl در آب (غلظت حدود ۱ مولار) و در pH برابر با ۳، Lunevich et al. (2016) نشان دادند که انحلال‌پذیری سیلیس از مقدار اولیه ۱۳۰-۱۲۰ میلی‌گرم بر لیتر تا حدود ۸۴-۸۱ میلی‌گرم بر لیتر کاهش خواهد یافت. با این وجود، با تشکیل رسوبات سیلیکات سدیم در غیاب کاتیون‌های چند ظرفیتی (نظیر کلسیم، منیزیم، آهن، آلومینیوم و باریوم)، یون‌های سدیم به صورت یک مانع بین سیلیس و سطح غشاء عمل کرده و منجر به عدم رسوب سیلیس بر روی سطح غشاء می‌شوند.

به عنوان یک جمع‌بندی، چنین مشخص است که کاهش حضور سایر املاح در آب خام ورودی به واحدهای RO به ویژه کاتیون‌های فلزی بخصوص یون‌های کلسیم و منیزیم که در اکثر آب‌های سطحی و زیرزمینی وجود دارند، می‌تواند منجر به کاهش احتمال بروز رسوبات سیلیس بر روی سطح غشاء RO گردد.

۳-۴- استفاده از سیستم‌های پیش‌تصفیه

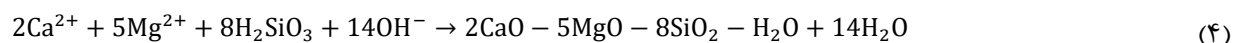
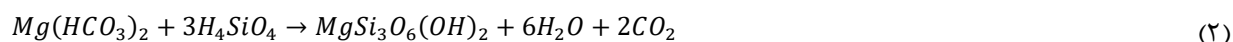
از جمله روش‌های پرکاربرد پیش‌تصفیه آب برای رسیدن به غلظت‌های پایین سیلیس، روش‌های نرم‌کردن، انعقاد شیمیایی، لخته‌سازی و اولترافیلتراسیون / نانوفیلتراسیون است (Park et al., 2020). فرآیند نرم‌کردن، بر اساس جذب سیلیس توسط کربنات کلسیم یا هیدروکسید منیزیم صورت می‌پذیرد و این در حالی است که بر اساس مطالعات صورت پذیرفته، چنین مشخص شده است که تأثیر هیدروکسید منیزیم بر جذب سیلیس بیش از کربنات کلسیم است (Li et al., 2020; Sheikholeslami and Tan, 1999). ذکر این نکته حائز اهمیت است که فرآیند نرم‌کردن به pH محلول بستگی داشته و pH مناسب برای حذف سیلیس توسط هیدروکسید منیزیم در محدوده ۱۰ تا ۱۱ است (Sheikholeslami et al., 2001). همچنین افزودن مواد شیمیایی مازاد نظیر آلومینات سدیم ($Na_2Al_2O_4$) می‌تواند به حذف سیلیس به این روش کمک نماید. این ترکیب با افزایش سختی منیزیمی (بدون تغییر در سختی کلسیمی) و همچنین تشکیل هیدروکسید آلومینیوم، منجر به بهبود حذف سیلیس از آب می‌گردد (Al-Rehaili, 2003).

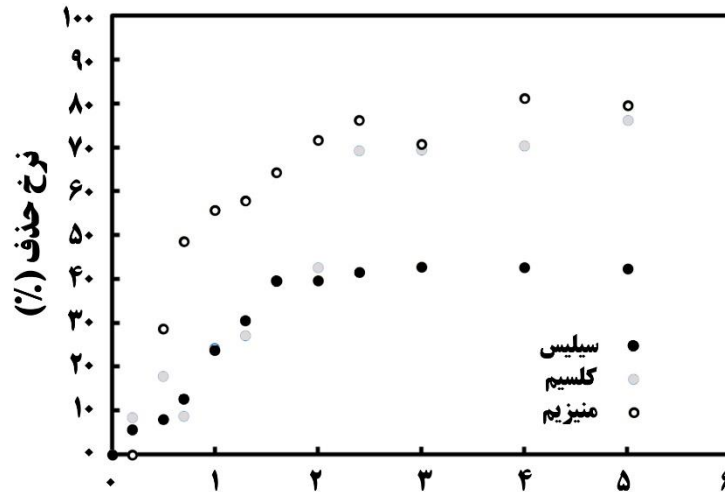
در روش انعقاد شیمیایی، حذف سیلیس بر اساس فعل وانفعالات سیلیس موجود در آب با آهن، آلومینیم و روی صورت می‌پذیرد که این فرآیند نیز همچون فرآیند نرم کردن به pH وابسته است و در pH در محدوده ۵/۵ تا ۱۰/۵ افزایش می‌یابد (Latour et al., 2016). شکل (۸) فرآیند حذف سیلیس به کمک فرآیند انعقاد شیمیایی را نمایش می‌دهد که طی چهار مرحله جذب، خنثی‌سازی بار، گیر افتادن ذرات در رسوب و اتصال بین ذره‌ای گیر افتادن ذرات در رسوب و اتصالات بین ذره‌ای صورت می‌پذیرد.



شکل (۸): پیش تصفیه جهت حذف سیلیس به روش انعقاد شیمیایی (Park et al., 2020).

در روش لخته‌سازی، افزودن ذرات سیلیکاژل یا کلوئیدهای آمورف به محلول فوق‌اشباع از سیلیس، منجر به افزایش غلظت اسیدسیلیسیک در اطراف ذرات شده و پلیمریزاسیون آغاز می‌گردد (Sugita et al., 2003; Liu et al., 2019). با این روش محلول فوق‌اشباع به محلول اشباع تغییر شکل داده و محتوای سیلیس موجود در آن کاهش می‌یابد. در این روش، مشخصات ذرات نظیر اندازه‌ی ذره و مساحت سطح آن‌ها، نرخ حذف سیلیس را تعیین می‌کند (Park et al., 2020). علاوه بر این، استفاده از نانو ذرات مغناطیسی و استفاده از یک میدان مغناطیسی جهت جداسازی ذرات به هم چسبیده، راهکار مؤثر دیگری برای بهبود فرآیند لخته‌سازی جهت حذف سیلیس به شمار می‌آید (Chin et al., 2006). همچنین حذف سیلیس می‌تواند به روش لخته‌سازی الکتریکی و به واسطه‌ی انجام واکنش اسیدسیلیسیک با کاتیون‌های فلزی چند ظرفیتی و یون‌های هیدروکسید تولید شده توسط عبور یک جریان الکتریکی از میان دو صفحه‌ی موازی از جنس آهن یا آلومینیوم بر اساس روابط (۲) تا (۴) صورت پذیرد (Sano and Yamaguchi, 2019). این روش همچنین می‌تواند به منظور حذف هم‌زمان یون‌های کلسیم و سیلیس در شرایطی که خوراک آب ورودی به واحد RO دارای غلظت بالایی از کلسیم و سیلیس باشد، مورد استفاده قرار گیرد (شکل ۹).





شکل (۹): میزان حذف املاح به صورت تابعی از مقدار الکترسیسیته در طول فرآیند پیوسته (Sano and Yamaguchi, 2019).

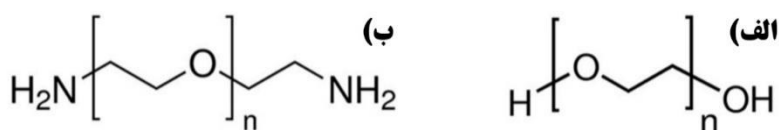
در نهایت استفاده از یک سیستم پیش تصفیه مبتنی بر غشاهای نانوفیلتراسیون یا اولترافیلتراسیون، یکی دیگر از روش‌های ممکن برای حذف املاح سیلیس از خوراک آب ورودی به شمار می‌آید که می‌تواند منجر به حذف بیش از ۹۰ درصد از سیلیس کلئیدی موجود در آب گردد (Yang and Li, 2007; Park et al., 2016). ذکر این نکته حائز اهمیت است که استفاده از سیستم‌های فیلتراسیونی، علاوه بر حذف سیلیس کلئیدی، می‌تواند منجر به کاهش کدورت آب تغذیه به RO بدون تغییر در هدایت الکتریکی یا pH آب گردد (Park et al., 2020).

۳-۵- استفاده از آنتی‌اسکالانت مناسب

مواد شیمیایی تزریقی مورد استفاده برای پیش‌گیری از تشکیل رسوبات مرسوم می‌توانند شامل مواد بازدارنده از تشکیل رسوب، مواد پراکنده‌کننده و یا ترکیبی از آن‌ها باشند. مواد بازدارنده از تشکیل رسوب عمدتاً شامل ترکیبات پایه فسفوناتی نظیر آمینو تریس متیلن فسفونیک اسید (ATMP)، دی‌اتیلن تری‌آمین پنتا متیلن فسفونیک اسید (DTPMP)، هیدروکسی اتیل دی فسفونیک اسید (HEDP) و مواد پراکنده‌کننده می‌تواند شامل مواد پلیمری نظیر پلیمرهای آکرلیک اسید سولفوناته، کوپلیمرهای سولفوناته/سولفات و یا ترپلیمرهایی با جرم مولکولی ۱۰/۰۰۰ تا ۳۰/۰۰۰ (گرم بر مول) باشند (Zhang et al., 2022). امروزه آنتی‌اسکالانت‌های مبتنی بر ترکیبات فسفوناتی و اسیدهای کربوکسیلیک به طور مؤثری برای پیش‌گیری از رسوبات کربنات کلسیم و سولفات کلسیم توسعه یافته‌اند (Chaussemier et al., 2015; Reiss et al., 2020; Yin et al., 2022). اگرچه در برخی مطالعاتی نظیر پژوهش صورت پذیرفته توسط Zhang et al. (2022)، نشان داده شده است که حضور هم‌زمان مواد بازدارنده از تشکیل رسوب و مواد پراکنده‌کننده رسوب، باعث به تعویق افتادن تشکیل رسوبات سیلیس در حضور غلظت بالای سیلیس (۳۵۰ میلی‌گرم بر

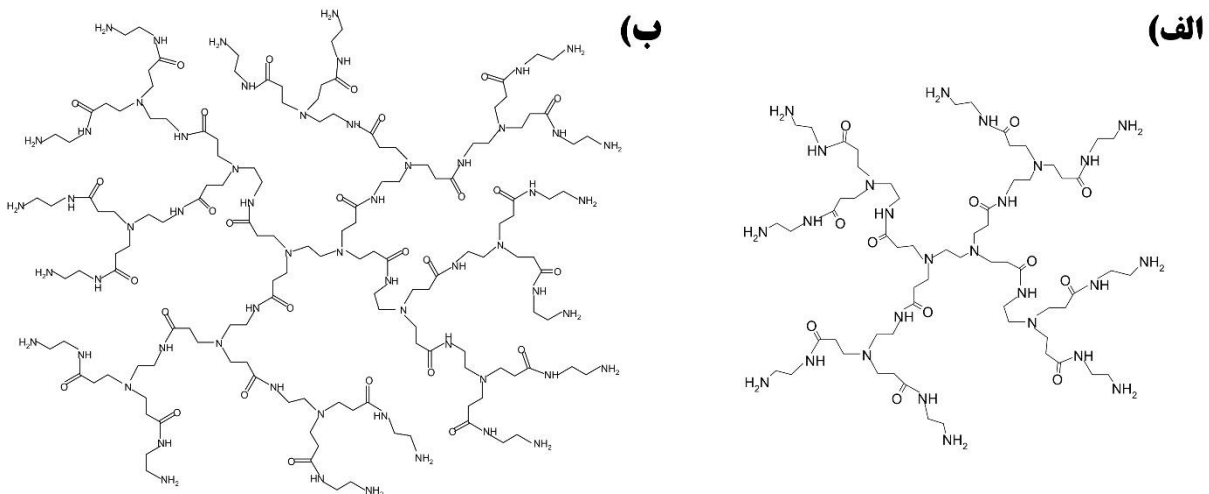
لیتر) و بدون فرآیند تنظیم pH آب ورودی (با اضافه کردن اسید) خواهد شد، با این حال، در مقایسه با رسوبات مرسوم (نظیر کربنات کلسیم و سولفات کلسیم)، رسوبات سیلیس عمدتاً به دلیل ماهیت آمورف آنها، چالش برانگیزتر هستند.

Yao et al. (2023)، آنتی اسکالانت‌های مختلف با گروه‌های عاملی متفاوت را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که آنتی اسکالانت‌های غنی شده با گیرنده‌های هیدروژن (نظیر پلی اتیلن گلیکول دی آمین که دارای گروه‌های آمین است، شکل ۱۰) و آنتی اسکالانت‌های حاوی اهداکننده‌های هیدروژن (نظیر دندریمر پلی آمیدو آمین، PAMAM) هر دو به طور مؤثری قادر به جلوگیری از پلیمریزاسیون اسیدسیلیسیک هستند. علاوه بر این، در شرایط جرم مولکولی برابر، پلی اتیلن گلیکول دی آمین رفتار بازدارندگی از تشکیل سیلیس بهتری نسبت به پلی اتیلن گلیکول از خود به نمایش گذاشت. Yao et al. (2023) چنین بیان داشتند که حضور گروه‌های انتهایی از آمین به جای گروه‌های هیدروکسیل، احتمالاً میزان قرار گرفتن اکسیژن‌های در معرض اسیدسیلیسیک و در نتیجه کارایی ممانعت از پلیمریزاسیون اسیدسیلیسیک را تغییر می‌دهد.



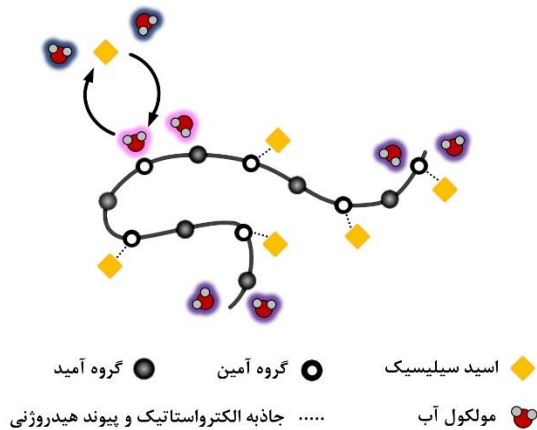
شکل (۱۰): الف) پلی اتیلن گلیکول و ب) پلی اتیلن گلیکول دی آمین و گروه‌های عاملی آنها.

Neofotistou and Demadis (2004) در مطالعه خود در مورد ارزیابی دندریمرهای PAMAM به عنوان بازدارنده‌های سیلیس برای کاربردهای آب خنک کننده گزارش کردند که عملکرد پلیمرها به عنوان بازدارنده‌های پلیمریزاسیون سیلیس به شدت به شاخه‌بندی موجود در دندریمر بستگی دارد. آنها همچنین با بررسی گونه‌های مختلف دندریمر PAMAM دارای گروه‌های پایانی کربوکسیل (COOH) و گروه‌های پایانی آمین (NH₂)، نشان دادند که دندریمرهای دارای گروه‌های پایانی آمینی، عملکرد بازدارندگی بسیار بهتری در مقابل رسوبات سیلیس دارند. شکل (۱۱)، نمایش دهنده‌ی دو نسخه از پلیمر PAMAM (دارای گروه‌های آمینی) می‌باشد که بار سطحی مثبت آنها ناشی از پروتون‌زایی گروه‌های پایانی آمینی است.



شکل (۱۱): دندریمرهای پلی آمیدو آمین با گروه‌های پایانی آمینی الف) PAMAM-1 و ب) PAMAM-2 (Demadis, 2008).

در همین راستا، Kaneda et al. (2023)، نشان داند که ساختار پلیمری حاوی گروه‌های عاملی آمینی و آمیدی (شکل ۱۲) از نزدیکی گونه‌های مونومری سیلیس جلویی کرده و با اتصال به پیش‌سازهای اسیدسیلیسیک یونیزه شده، از تشکیل رسوبات سیلیس پیش‌گیری می‌کند. آن‌ها بیان داشتند که بهبود عملکرد بازدارندگی از سیلیس توسط پلیمرها، نمی‌تواند به تنهایی به دلیل میزان پروتون‌زایی و غلظت مولی ترکیبات آمینی باشد، بلکه حضور هم‌زمان ترکیبات پروتون‌زای آمینی و ترکیبات آمیدی خنثی در زنجیره پلیمری، تأثیری هم‌زمان بر عملکرد بازدارندگی از رسوب سیلیس می‌گذارد.



شکل (۱۲): تصویری از جایگزین شدن اسیدسیلیسیک به جای مولکول‌های آب بر روی ساختار پلیمری حاوی گروه‌های عاملی آمینی/آمیدی (Kaneda et al., 2023).

علاوه بر این ترکیب پراکنده‌کننده‌های پلیمری با مواد کلاته کننده نظیر اتیلن دی آمین تترا استیک اسید (EDTA) یا دی اتیلن تری آمین پنتا استات (DTPA) نیز به عنوان ترکیبی مؤثر برای پیش‌گیری از تشکیل رسوب سیلیس مورد توجه قرار گرفته است (Deo et al., 2019).

در طرف مقابل، پلیمرهای آنیونی نظیر پلی آکریلیک اسید (PAA)، پلی‌مالئیک اسید (PMA) و پلی‌آسپارتیک اسید (PAS)، که دارای گروه‌های عاملی با بار منفی نظیر گروه‌های کربوکسیل (COOH) و سولفونیک (SO₃H) می‌باشند، به دلیل برهم‌کنش ضعیف با گروه‌های Si-OH موجود در اسیدسیلیسیک، به عنوان بازدارنده‌های پلیمریزاسیون سیلیس مؤثر نیستند. این در حالی است که پلیمرهای غیر یونی نظیر پلی-۲-اتیل-۲-آگزازولین (PEOX) و پلی‌وینیل پیرولیدین (PVP) تحت شرایط آزمایشگاهی مشابه، عملکرد بسیار خوبی در مهار واکنش پلیمریزاسیون سیلیس نشان می‌دهند (Amjad and Zuhl, 2010; Neofotistou and Demadis, 2004). اگرچه بازدارندگی از بروز رسوبات سیلیس به نسبت سایر املاح موجود در آب دارای پیچیدگی بیشتری است، با این وجود شرکت‌های بین‌المللی معتبر محصولاتی را در راستای جلوگیری از تشکیل رسوبات سیلیس در آب‌های حاوی غلظت‌های بالاتر از اشباع از سیلیس ارائه نموده‌اند. جدول (۱) نمایش دهنده‌ی برخی از محصولات تجاری موجود تولید شده توسط تولیدکنندگان معتبر بین‌المللی بوده که با هدف آگاهی بخشی به کارشناسان واحدهای شیرین‌سازی آب، ارائه شده است. لازم به ذکر است که در این پژوهش، تنها به بیان چند نمونه از محصولات شناخته شده‌تر پرداخته شده و بدیهی است که انتخاب نهایی نام تجاری، نام محصول و دوز مصرفی مناسب با توجه به مشخصات خوراک آب ورودی به واحد درخواست کننده و در مشورت با کارشناسان فنی تولید کننده/تأمین کننده این گروه از محصولات امکان‌پذیر خواهد بود.

جدول (۱): برخی از آنتی‌اسکالانت‌های تجاری مناسب برای پیش‌گیری از رسوبات سیلیس و مشخصات آن‌ها.

شرکت سازنده	نام تجاری	نام محصول	حداکثر غلظت سیلیس (میلی‌گرم بر لیتر)	محدوده مصرف (میلی‌گرم بر لیتر)	pH محصول
NALCO (ECOLAB)	Permatreat®	PC-510t	۲۳۰ (@ pH=7.5, 30°C)	۶ - ۱۰	۹/۲ - ۱۰/۲
GENESYS International Ltd.	GENESYS	SI	---	۲ - ۵	۹/۸ - ۱۰/۲
AVISTA technologies	VITEC™	4000	۲ تا ۲/۸ برابر غلظت اشباع	۲ - ۵	۴/۵ - ۶/۵
General Electric	Hypersperse™	MSI 310	۲۴۰ (@ 30°C)	۳ - ۶ (< ۱۰)	۴/۷
Chemtex Speciality Ltd.	MAXTREAT®	9002	۳۰۰	---	۲/۵ ± ۰/۵
DOW	ACUMER™	5000	۳۰۰	۲ - ۵	۲/۵

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه مروری، روش‌های مختلف پیش‌گیری از تشکیل رسوب سیلیس مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس مرور منابع مطالعاتی صورت پذیرفته چنین نتیجه‌گیری می‌شود که انتخاب غشاء مناسب حاوی گروه‌های عاملی با بار منفی، تنظیم pH آب ورودی در محدوده‌ی اسیدی (برای مثال ۴ تا ۴/۵) یا قلیایی (برای مثال ۱۰ تا ۱۱)، حذف املاح موجود در آب ورودی به ویژه حذف یون‌های کلسیم و منیزیم از طریق نرم کردن آب، کاهش غلظت سیلیس به روش‌های ممکن و استفاده از مواد آنتی‌اسکالانت شاخه‌دار با گروه‌های پایانی آمین، از جمله بهترین روش‌های ممکن برای جلوگیری از بروز رسوبات سیلیس بر روی سطح غشاء در شرایطی است که خوراک ورودی دارای غلظت‌های بیش از اشباع از سیلیس محلول باشد. بدیهی است که انتخاب هر یک و یا ترکیبی از روش‌های فوق‌الذکر برای واحد تصفیه آب اسمز معکوس، به ویژگی‌های آب خام ورودی و محدودیت‌های عملیاتی بستگی داشته و بر اساس نظر کارشناسان واحد صورت خواهد پذیرفت. جدول (۲) خلاصه‌ای از اصلی‌ترین فناوری‌های ممکن جهت حذف سیلیس در واحدهای صنعتی را نمایش می‌دهد. این جدول به دو بخش روش‌های مبتنی بر پیش‌تصفیه آب خام ورودی و روش‌های مبتنی بر عملکرد واحد RO تحت غلظت‌های بالای سیلیس تفکیک و در هر بخش روش‌های مختلف ممکن ارائه شده است.

جدول (۲): خلاصه‌ای از فناوری‌های حذف سیلیس در واحدهای صنعتی.

روش‌های پیش‌روی فناوری	مشخصات فرآیندی	عنوان فناوری	روش جداسازی	رویکرد
- تولید لجن شیمیایی - افزایش هدایت الکتریکی، pH و فلزات باقی‌مانده در پساب RO	- بازدهی جداسازی: بیشتر از ۹۰ درصد - pH: قلیایی (۱۰-۱۱)	نرم‌سازی / انعقاد شیمیایی	رسوب‌دهی با اضافه کردن نمک‌های فلزی و تنظیم pH	
- قابل استفاده در شرایط اشباع سیلیس - خصوصیات هسته اولیه رسوب	- کاهش سیلیس از ۷۰۰ به ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر	رسوب‌گذاری / تجمع ذرات هسته / تجمع سیلیس در شرایط اشباع	تجمع ذرات هسته / تجمع سیلیس در شرایط اشباع	
- قابل استفاده برای سیلیس کلونیدی - تمیز کردن غشاء	- بازدهی جداسازی: بیشتر از ۹۰ درصد	پیش‌تصفیه آب خام ورودی	جداسازی سیلیس کلونیدی با غشاهای تجاری	
- تداخل با سایر آنیون‌ها	- تنها در رزین‌های آنیونی قوی موثر هستند	تبادل یونی	تبادل سیلیس با یون هیدروکسید	
- تداخل با گونه‌های یونی دیگر	- pH بهینه: ۸ تا ۸/۵ - بازدهی جداسازی: بیشتر از ۹۰ درصد	جذب سطحی	جذب سطحی سیلیس بر روی جاذب‌هایی مثل آلومینای فعال	
- کنترل دقیق میزان تزریق - قوانین زیست محیطی برای سیلیس و آنتی‌اسکالانت	- میزان تزریق: ۴ تا ۱۲/۵ میلی‌گرم بر لیتر - بازدهی جداسازی: ۵۰ تا ۷۵ درصد	مواد ضد رسوب	پیش‌گیری از پلیمریزاسیون سیلیس یا جلوگیری از تجمع ذرات رسوب	
- نیاز به پیش‌تصفیه جهت حذف سختی آب	- محدوده pH: ۱۰ تا ۱۱ - بازدهی جداسازی: ۸۵ درصد	عملکرد واحد RO تحت غلظت بالای سیلیس	افزایش انحلال‌پذیری سیلیس در پساب خروجی	
کاهش در نرخ پس‌زدن سیلیس	- محدوده pH: ۴ تا ۴/۵ - بازدهی جداسازی: ۸۴ تا ۹۶ درصد		کاهش سرعت پلیمریزاسیون سیلیس	

- Al-Ahmad, M., Aleem, F. A., Mutiri, A., and Ubaisy, A. (2000), "Biofouling in RO membrane systems Part 1: Fundamentals and control", *Desalination*, 132, 173-179, [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)00146-6](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)00146-6).
- Al-Rehaili, A. M. (2003), "Comparative chemical clarification for silica removal from RO groundwater feed", *Desalination*, 159, 21-31, [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)90042-7](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)90042-7).
- Alazmi, R., Alazemi, M., Alanezi, A. A., and Alhazza, A. (2020), "Effect of silica fouling on RO membranes used for the desalination of Kuwait brackish water", *Desalination and Water Treatment*, 204, 33-39, <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26246>.
- Amjad, Z. (2016), "Maleic acid-based copolymers as silica scale control agents for aqueous systems", *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 5, 1-11, <http://dx.doi.org/10.17675/2305-6894-2016-5-1-1>.
- Amjad, Z., and Zuhl, R. (2010), "The role of water chemistry on preventing silica fouling in industrial water systems", NACE CORROSION, NACE-10048, <https://doi.org/10.5006/C2010-10048>.
- Chaussemier, M., Pourmohtasham, E., Gelus, D., Pecoul, N., Perrot, H., Ledion, J., Cheap-Charpentier, H., and Horner, O. (2015) "State of art of natural inhibitors of calcium carbonate scaling. A review article", *Desalination*, 356, 47-55, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.014>.
- Chin, C.-J. M., Chen, P.-W., and Wang, L.-J. (2006), "Removal of nanoparticles from CMP wastewater by magnetic seeding aggregation", *Chemosphere*, 63, 1809-1813, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.09.035>.
- Demadis, K. D. (2008), "Silica scale inhibition relevant to desalination technologies: progress and recent developments". Nova Science Publishers, Inc.: New York, ISBN: 978-1-60456-567-6.
- Deo, P., Simon, M., Akhade, P., Abramo, G. P., Young, K. L., and Mehta, S. C. (2019), "Inhibition of silica scale using a chelating agent blended with acid and alkylene oxide derived polymer dispersants". Google Patents.
- Gabekich, C. J., Chen, W. R., Yun, T. I., and Coffey, B. M. (2005), "The role of dissolved aluminum in silica chemistry for membrane processes", *Desalination*, 180, 307-319, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.02.009>.
- Haidari, A., Witkamp, G. J., and Heijman, S. (2022), "High silica concentration in RO concentrate", *Water Resources and Industry*, 27, 100171, <https://doi.org/10.1016/j.wri.2022.100171>.
- He, M., Gao, K., Zhou, L., Jiao, Z., Wu, M., Cao, J., You, X., Cai, Z., Su, Y., and Jiang, Z. (2016), "Zwitterionic materials for antifouling membrane surface construction", *Acta biomaterialia*, 40, 142- 152, <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2016.03.038>.
- Hu, Q., Yuan, Y., Wu, Z., Lu, H., Li, N., and Zhang, H. (2023), "The effect of surficial function groups on the anti-fouling and anti-scaling performance of thin-film composite reverse osmosis membranes", *Journal of Membrane Science*, 668, 121276, <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.121276>.
- Iler, R. K. (1979), "The chemistry of silica, Solubility, Polymerization", *Colloid and Surface Properties, and Biochemistry*, ISBN: 978-0-471-02404-0.
- Kaneda, M., Dong, D., Chen, Y., Zhang, X., Xue, Y., Bryantsev, V. S., Elimelech, M., and Zhong, M. (2023), "Molecular Design of Functional Polymers for Silica Scale Inhibition", *Environmental Science & Technology*, 58, 871-882, <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c06504>.
- Kempter, A., Gaedt, T., Boyko, V., Nied, S., and Hirsch, K. (2013), "New insights into silica scaling on RO-membranes", *Desalination and Water Treatment*, 51, 899-907, <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.715237>.
- Kherfan, S. (2014), "Investigation of Fouling of Membranes of a Reverse Osmosis Unit by Silica", *Open Access Library Journal*, 1, 1-7, <http://dx.doi.org/10.4236/oalib.1100485>.

- Latour, I., Miranda, R., Carceller, R., and Blanco, A. (2016), "Efficiency of polyaluminum nitrate sulfate–polyamine hybrid coagulants for silica removal", *Desalination and Water Treatment*, 57, 17973-17984, <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1091992>.
- Li, Y., Li, M., Xiao, K., and Huang, X. (2020), "Reverse osmosis membrane autopsy in coal chemical wastewater treatment: Evidences of spatially heterogeneous fouling and organic-inorganic synergistic effect", *Journal of Cleaner Production*, 246, 118964, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118964>.
- Liu, Q., Xu, G.-R., and Das, R., (2019), "Inorganic scaling in reverse osmosis (RO) desalination: Mechanisms, monitoring, and inhibition strategies", *Desalination*, 468, 114065, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.07.005>.
- Loganathan, K., Chelme-Ayala, P., and El-Din, M. G., (2015), "Pilot-scale study on the reverse osmosis treatment of oil sands tailings pond water: Impact of pretreatment on process performance", *Desalination*, 360, 52-60, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.12.045>.
- Lunevich, L., Sanciolo, P., Dumeé, L., and Gray, S., (2016), "Silica fouling in high salinity waters in reverse osmosis desalination (sodium–silica system)", *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2, 539-548, <https://doi.org/10.1039/C6EW00065G>.
- Lunevich, L., Sanciolo, P., Milne, N., and Gray, S., (2017), "Silica fouling in coal seam gas water reverse osmosis desalination", *Environmental Science: Water Research & Technology*, 3, 911-921, <https://doi.org/10.1039/C7EW00128B>.
- Mahdavi, H., and Rahimi, A., (2018), "Zwitterion functionalized graphene oxide/polyamide thin film nanocomposite membrane: Towards improved anti-fouling performance for reverse osmosis", *Desalination*, 433, 94-107, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.01.031>.
- Makrides, A. C., Turner, M., and Slaughter, J. (1980), "Condensation of silica from supersaturated silicic acid solutions", *Journal of Colloid and Interface Science*, 73, 345-367, [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(80\)90081-8](https://doi.org/10.1016/0021-9797(80)90081-8).
- Mi, B., and Elimelech, M., (2010), "Gypsum scaling and cleaning in forward osmosis: measurements and mechanisms", *Environmental science & technology*, 44, 2022-2028, <https://doi.org/10.1021/es903623r>.
- Mi, B., and Elimelech, M., (2013), "Silica scaling and scaling reversibility in forward osmosis", *Desalination*, 312, 75-81, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.08.034>.
- Milne, N. A., O'reilly, T., Sanciolo, P., Ostarcevic, E., Belighton, M., Taylor, K., Mullett, M., Tarquin, A. J., and Gray, S. R., (2014), "Chemistry of silica scale mitigation for RO desalination with particular reference to remote operations", *Water research*, 65, 107-133, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.07.010>.
- Neofotistou, E., and Demadis, K. D., (2004), "Use of antiscalants for mitigation of silica (SiO₂) fouling and deposition: fundamentals and applications in desalination systems", *Desalination*, 167, 257-272, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.135>.
- Park, M., Park, J., Lee, E., Khim, J., and Cho, J., (2016), "Application of nanofiltration pretreatment to remove divalent ions for economical seawater reverse osmosis desalination", *Desalination and water treatment*, 57, 20661-20670, <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1111807>.
- Park, Y.-M., Yeon, K.-M., and Park, C.-H., (2020), "Silica treatment technologies in reverse osmosis for industrial desalination: A review", *Environmental Engineering Research*, 25, 819-829, <https://doi.org/10.4491/eer.2019.353>.
- Rathinam, K., Abraham, S., Oren, Y., Schwahn, D., Petry, W., Kaufman, Y., and Kasher, R., (2019), "Surface-induced silica scaling during brackish water desalination: The role of surface charge and specific chemical groups", *Environmental science & technology*, 53, 5202-5211, <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06154>.
- Reiss, A. G., Gavrieli, I., and Ganor, J., (2020), "The effect of phosphonate-based antiscalant on gypsum precipitation kinetics and habit in hyper-saline solutions: An experimental and modeling approach to the planned Red Sea–Dead Sea Project", *Desalination*, 496, 114638, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114638>.

- Rolf, J., Cao, T., Huang, X., Boo, C., Li, Q., and Elimelech, M., (2022), “Inorganic scaling in membrane desalination: models, mechanisms, and characterization methods”, *Environmental Science & Technology*, 56, 7484-7511, <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c01858>.
- Saltworks Technologies INC. *Periodic table of scaling compounds* [Online]. Saltworks Technologies Inc. Available: <https://www.saltworkstech.com/brochures/periodic-table-of-scaling-compounds.pdf>.
- Sano, Y., and Yamaguchi, M., (2019), “Preventing Silica Scale Formation Using Hydroxide Ions Generated by Water Electrolysis”, *Membranes*, 9, 154, <https://doi.org/10.3390/membranes9110154>.
- Semiati, R., Sutzkover, I., and Hasson, D., (2003), “Scaling of RO membranes from silica supersaturated solutions”, *Desalination*, 157, 169-191, [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)00398-9](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00398-9).
- Sheikholeslami, R., Al-Mutaz, I., Koo, T., and Young, A., (2001), “Pretreatment and the effect of cations and anions on prevention of silica fouling”, *Desalination*, 139, 83-95, [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00297-1](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00297-1).
- Sheikholeslami, R., and Tan, S., (1999), “Effects of water quality on silica fouling of desalination plants”, *Desalination*, 126, 267-280, [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(99\)00182-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00182-4).
- Sheikholeslami, R., and Zhou, S., (2000), “Performance of RO membranes in silica bearing waters”, *Desalination*, 132, 337-344, [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)00169-7](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)00169-7).
- Subramani, A., Schlicher, R., Long, J., Yu, J., Lehman, S., and Jacangelo, J. G., (2011), “Recovery optimization of membrane processes for treatment of produced water with high silica content”, *Desalination and Water Treatment*, 36, 297-309, <https://doi.org/10.5004/dwt.2011.2604>.
- Sugita, H., Matsunaga, I., Yamaguchi, T., KATO, K., and UEDA, A., (2003), “Silica removal performance of seed from geothermal fluids”, *Geothermics*, 32, 171-185, [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(03\)00013-0](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(03)00013-0).
- Sun, X., Duan, L., Liu, Z., Gao, Q., Liu, J., and Zhang, D., (2024), “The mechanism of silica and transparent exopolymer particles (TEP) on reverse osmosis membranes fouling”, *Journal of Environmental Management*, 349, 119634, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119634>.
- Ralf K. Iler, (1979), “The chemistry of silica: solubility, polymerization, colloid and surface properties, and biochemistry of silica”, John Wiley and Sons, Chichester, <https://doi.org/10.1002/ange.19800920433>.
- Tong, T., Wallace, A. F., Zhao, S., and Wang, Z., (2019), “Mineral scaling in membrane desalination: Mechanisms, mitigation strategies, and feasibility of scaling-resistant membranes”, *Journal of membrane science*, 579, 52-69, <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.02.049>.
- Tong, T., Zhao, S., Boo, C., Hashmi, S. M., and Elimelech, M., (2017), “Relating Silica Scaling in Reverse Osmosis to Membrane Surface Properties”, *Environmental Science & Technology*, 51, 4396-4406, <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b06411>.
- Wang, Y.-N., Li, X., and Wang, R., (2017), “Silica scaling and scaling control in pressure retarded osmosis processes”, *Journal of Membrane Science*, 541, 73-84, <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.06.088>.
- Xie, M., and Gray, S. R., (2017), “Silica scaling in forward osmosis: From solution to membrane interface”, *Water Research*, 108, 232-239, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.10.082>.
- Yang, G. C., and Li, C.-J., (2007), “Electrofiltration of silica nanoparticle-containing wastewater using tubular ceramic membranes”, *Separation and Purification Technology*, 58, 159-165, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.07.019>.
- Yang, W., Zhao, Z., Pan, M., Gong, L., Wu, F., Huang, C., Wang, X., Wang, J., and Zeng, H., (2022), “Mussel-inspired polyethylene glycol coating for constructing antifouling membrane for water purification”, *Journal of Colloid and Interface Science*, 625, 628-63, <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.06.038>.
- Yao, Y., Ge, X., Yin, Y., Minjarez, R., and Tong, T., (2023), “Antiscalants for mitigating silica scaling in membrane desalination: Effects of molecular structure and membrane process”, *Water Research*, 246, 120701, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120701>.
- Yin, Y., Kalam, S., Livingston, J. L., Minjarez, R., Lee, J., Lin, S., and Tong, T., (2022), “The use of anti-scalants in gypsum scaling mitigation: Comparison with membrane surface modification and

- efficiency in combined reverse osmosis and membrane distillation”, *Journal of Membrane Science*, 643, 120077, <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.120077>.
- Zhang, X., Dongying, Y., Melzer, J., Caroline, S., Qiantao, C., and Sharma, M., (2022), “Silica antiscalant composition and method for silica scaling inhibition in membrane applications”, Google Patents.
- Ziemann, E., Coves, T., Oren, Y. S., Maman, N., Sharon-Gojman, R., Neklyudov, V., Freger, V., Ramon, G. Z., and Bernstein, R., (2024), “Pseudo-bottle-brush decorated thin-film composite desalination membranes with ultrahigh mineral scale resistance”, *Science advances*, 10, eadm7668, <https://doi.org/10.1126/sciadv.adm7668>.

پذیرفته شده / ویرایش نشده