

تعیین فرآیند بهینه ZLD برای استفاده دوباره از پساب سیستم‌های اسمز معکوس (مطالعه موردی: سیستم اسمز معکوس شهرستان لار)

مسعود نوشادی^{۱*} و محمد افسری^۲

چکیده

ایران از جمله کشورهایی است که عمدتاً در منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک قرار دارد و دارای مشکلات بسیاری در زمینه تأمین آب است. از جمله روش‌های پیشرفته تصفیه آب، به کارگیری فرآیندهای غشائی از جمله اسمز معکوس (RO) است که به‌طور گسترده در مناطق خشک و نیمه‌خشک استفاده می‌شود. در روش اسمز معکوس دو نوع آب تولید می‌شود: یکی آب تصفیه شده و دیگری پساب غلیظ. برای استفاده دوباره از این پساب غلیظ در اسمز معکوس نیاز به حذف تعدادی از عناصر بحرانی است که برای غشا ایجاد مشکل می‌کند. در این پژوهش، از فرآیند تخلیه مایع صفر (ZLD) برای حذف عناصر بحرانی پساب سیستم اسمز معکوس شهر لار واقع در استان فارس استفاده شد. هدف از این پژوهش، بررسی فرآیندهای مختلف ZLD و تعیین فرآیند بهینه برای تصفیه دوباره پساب اسمز معکوس بود. گزینه‌های مختلفی برای تصفیه پساب اسمز معکوس در نظر گرفته شد که شامل فرآیندهای جذب، ترسیب شیمیایی و ترکیبی از این فرآیندها بودند. نتایج در فرآیند جذب از بستر کریستالی سیال کربنات کلسیم و در فرآیندهای ترسیب شیمیایی از هیدروکسید سدیم، آهک، آلومینات سدیم و سولفات آلومینیوم استفاده شد. این مواد شیمیایی در غلظت‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم در لیتر با پساب ترکیب شدند و پارامترهای کلسیم، منیزیم، کلراید، سدیم، پتاسیم، اسیدیت، شوری، سیلیس و کدورت در آن‌ها اندازه‌گیری شد. در نهایت غلظت بهینه بر مبنای بیشترین بازدهی حذف عناصر مضر برای غشا اسمز معکوس تعیین شد. بازدهی بهینه حذف املاح در سود سوزآور، آهک، آلومینات سدیم و سولفات آلومینیوم با غلظت‌های به ترتیب ۵۰۰، ۴۰۰، ۲۰۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر به دست آمدند. هم‌چنین برای بهبود بازدهی حذف، ترکیب مواد شیمیایی با هم بر اساس غلظت‌های بهینه هر کدام از آن‌ها که در مرحله قبل به دست آمده بود، صورت گرفت. بنابراین سولفات آلومینیوم و سود سوزآور، سولفات آلومینیوم و آهک، آلومینات سدیم و سود سوزآور و آلومینات سدیم و آهک با هم ترکیب شدند. در این مرحله بهترین بازدهی حذف در ترکیب غلظت‌های بهینه آلومینات سدیم و سود سوزآور بود. در بستر کریستالی سیال فرآیند جذب املاح در بارگذاری‌های سطحی مختلف جریان بررسی شدند که بارگذاری سطحی بهینه $1/94 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ بود. در فرآیند ترکیبی از ترسیب شیمیایی و جذب استفاده شد که بازدهی بهینه در بستر کریستالی سیال با بارگذاری سطحی $1/94 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ همراه افزودن غلظت‌های بهینه آلومینات سدیم (۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و سود سوزآور (۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر) به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: اسمز معکوس، بستر کریستالی سیال، تخلیه مایع صفر، ترسیب شیمیایی.

ارجاع: نوشادی م. و افسری م. ۱۳۹۹. تعیین فرآیند بهینه ZLD برای استفاده دوباره از پساب سیستم‌های اسمز معکوس (مطالعه موردی: سیستم اسمز معکوس شهرستان لار). مجله پژوهش آب ایران. ۳۷: ۱۳۱-۱۴۳.

1- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

2- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

* نویسنده مسئول: noshadi@shirazu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۲۱

مقدمه

با رشد سریع تقاضای آب و همچنین کمبود و محدودیت زیاد عرضه آب در جهان، جوامع بشری نیاز به تأمین آب شیرین شهری را به عنوان اولویت برنامه‌های خود قرار داده و در تلاش هستند تا بحران کمبود آب را در حال و آینده به حداقل برسانند. طبق آخرین سرشماری در سال ۱۳۹۰، جمعیت ایران در حدود ۷۶ میلیون و ۱۰۰ هزار نفر با میزان رشد حدود ۱/۳ درصد بوده است و این یعنی در حال حاضر سالانه حدود ۹۰۰ هزار نفر به جمعیت کشور افزوده می‌شود. میزان رشد جمعیت در استان‌های هرمزگان، سیستان و بلوچستان، بوشهر و خوزستان به ترتیب ۲/۳۷، ۱/۰۵، ۳/۱۱ و ۱/۱۷ درصد بود که این موضوع بیان‌کننده افزایش بیشتر جمعیت در مناطقی است که دارای کمبود آب بیشتری هستند؛ بنابراین این جوامع برای تقویت منابع آب خود به منابع آب‌های شور و لب شور روی آورده و در صدد تأمین نیازهای خود از این طریق اند. شوری منابع آب شیرین در بسیاری از مناطق که فقر آب دارند، از طریق فعالیت‌های انسانی، استفاده مکرر از آن‌ها و خشک‌سالی در حال افزایش است.

امروزه در میان فناوری‌های مختلف آب‌شیرین‌کن‌ها، روش اسمز معکوس (RO^۱) مقبولیت بسیار زیادی پیدا کرده است. مانند بسیاری از فناوری آب‌شیرین‌کن‌ها، تصفیه از آب لب شور به وسیله سیستم اسمز معکوس دو جریان را در پی دارد: یک جریان آب تصفیه شده و دیگری جریان تغلیظ شده با شوری بسیار بالا. گزینه‌هایی که در حال حاضر برای مدیریت این جریان تغلیظ شده در دسترس است، عبارتند از: الف- تخلیه مستقیم به دریا و آب‌های سطحی، ب- تزریق به درون چاه‌های عمیق، ج- استفاده برای مصارف عمومی و د- تخلیه مایع به میزان صفر (ZLD^۲).

نیاز به حفاظت از منابع آب سطحی و زیرزمینی در بسیاری از موارد ممکن است مانع از دفع مواد تغلیظ شده بوسیله سه روش اول شود؛ بنابراین روش تخلیه مایع به میزان صفر (ZLD) یک روش جایگزین مناسب است. در ZLD، مواد تغلیظ شده برای تولید آب شیرین بصورت تولید نمک خشک شده، تصفیه می‌شود. در نتیجه هیچ مایعی در این فرآیند به صورت مایع بی مصرف نبوده و هدر

رفت آب وجود نخواهد داشت (بند و ویراپانینی، ۲۰۰۸). از این روش می‌توان برای تصفیه جریان تغلیظ شده برای برگرداندن دوباره آن به دستگاه اسمز معکوس استفاده کرد. ZLD یک چرخه بسته کامل است که در آن املاح از پساب حذف و تخلیه می‌شوند. سیستم‌های تصفیه با روش ZLD با هدف حذف مواد معدنی، نمک‌ها و مواد آلی از پساب سیستم‌های تصفیه برای استفاده دوباره از آن در فرآیند شیرین‌سازی آب شور و تولید آب شیرین مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین این سیستم مشکل اساسی رسوب‌گذاری ناشی از بعضی عناصر موجود در آب مانند سولفات کلسیم و سیلیکا (که روی تغلیظ‌کننده‌های آب نمک تأثیر منفی می‌گذارد) را از بین می‌برد، بنابراین در ZLD تصفیه میانی مایع غلیظ برای استفاده دوباره صورت می‌گیرد. در فرآیند ZLD، مراحل مختلفی از جمله، انعقاد، ترسیب شیمیایی، جذب و تبخیر وجود دارد.

با توجه به هزینه‌های مرتبط با آب‌شیرین‌کن‌های حرارتی و حوضچه‌های تبخیر، منطقی به نظر می‌رسد که بررسی و تحقیق در مورد آب‌شیرین‌کن‌های غشایی مورد توجه قرار بگیرد. بهبود و بازیابی آب در فرآیندهای غشایی به عنوان درصدی از آب‌هایی که از غشاهای عبور می‌کنند، تعریف می‌شود که غلظت این آب با توجه به مقدار رسوب تشکیل شده روی غشا تغییر می‌کند و آب باقی مانده از ترکیباتی مانند سولفات کلسیم، سولفات باریم و سیلیس اشباع می‌شود. در نتیجه برای آنکه بتوان عملکرد بهبود و بازیابی مواد تغلیظ شده را بالا برد، باید رسوبات این نمک‌ها را کاهش داد. ترکیبات باقی مانده در پساب مانند کلسیم و منیزیم (و ترکیبات آن‌ها) باعث رسوب روی غشا اسمز معکوس و باریم و سیلیس باعث تخریب و از بین رفتن غشا می‌شود که با کاهش این املاح می‌توان بازدهی بازیافت غشا را افزایش داد و از پساب سیستم اسمز معکوس استفاده دوباره کرد.

ورگیلی و همکاران (۲۰۱۲) برای تعیین سودمندی روش ZLD، مطالعاتی انجام دادند که در این مطالعات، تصفیه فاضلاب کارخانه رنگ نساجی از طریق فرآیندهای تصفیه شامل ترکیبات مختلفی از UF^۳، NF1^۴، NF2^۵ و RO بررسی شدند. عملکرد اقتصادی و تکنولوژی در چهار

3- Ultrafiltration
4- Loose Nanofiltration
3- Tight Nanofiltration

1- Reverse Osmosis
2- Zero Liquid Discharge

(اسمز معکوس) منطقه تنگ الحد از توابع شهر حاجی آباد شهرستان زرین دشت در استان فارس انجام شد. بستر کریستالی سیال همراه سدیم آلومینات، به عنوان مؤثرترین آزمایش در حذف کلسیم و سیلیکا انتخاب شد که در آن سیلیکا و کلسیم به ترتیب ۵۴ و ۹۰ درصد کاهش یافتند.

لوگاناتان و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی در آبخوان زیرزمینی آتاباسکا در کشور کانادا کیفیت آبهای زیرزمینی را که آلوده به ترکیبات نفتی و همچنین دارای مقادیر زیادی سختی، قلیائیت و مواد جامد محلول (TDS) بود، بررسی کردند و برای تصفیه و رساندن کیفیت آب به حد مطلوب از روش‌های تخلیه مایع صفر (ZLD)، ترکیب اکسیداسیون شیمیایی و اولترافیلتراسیون‌های پلیمری، اسمز معکوس (RO) و تکنولوژی متبلورکننده‌های تبخیری استفاده کردند. نتایج نشان داد که واحد UF در حذف آهن بسیار مؤثر بود. همچنین آنان با شکافتن غشاهای RO و فیلترهای UF مشاهده کردند که رسوب آهن در غشاهای فیلترها تجمع کرده است. آنان به این نتیجه رسیدند که مقادیر بالای از کلسیم، منیزیم و بی کربنات در پساب RO، باعث پوسته پوسته شدن غشاهای شده و نیاز است که این املاح در آب ورودی کاهش پیدا کنند. همچنین کریستال‌های تولید شده عمدتاً از سدیم کلراید بودند. نتایج نشان داد که ZLD در تولید آب شیرین از آبخوان و به حداقل رساندن نمک و املاح از پساب بسیار مؤثر بوده است.

نینگ و ترویر (۲۰۰۷) نشان دادند که می‌توان از طریق رسوب نمک‌های نامحلول بین ۷۰ تا ۹۰ درصد آب را بازیافت کرد و اگر پساب اسمز معکوس تصفیه شود، می‌توان بازیافت آب را به ۹۹-۹۷ درصد ارتقاء داد.

اورن و همکاران (۲۰۰۱) نشان دادند که روش‌های نرم‌سازی آب به همراه میکروفیلتراسیون (MF) می‌توانند بازیافت آب را به ۸۰ درصد برسانند. آنان نتیجه گرفتند که فرآیندهای غشایی (اولترافیلتراسیون، نانوفیلتراسیون، اسمز معکوس و الکترودیالیز) می‌توانند به گونه‌ای چشمگیر بازیافت آب را بهبود دهند.

مواد و روش‌ها

جامعه آماری در این پژوهش شامل نمونه‌های پساب شور آب شیرین کن اسمز معکوس شهر لار بود. شکل ۱ مدل‌های اسمز معکوس، مخزن آب تصفیه شده و مخزن

رویگرد به صورت UF/NF1 (رویگرد ۱)، NF1/NF2 (رویگرد ۲)، NF1/RO (رویگرد ۳) و UF/NF2/RO (رویگرد ۴) ارائه شد. هر رویگرد پس از تقطیر غشایی به‌طور نسبی آنالیز شدند. نتایج نشان داد که رویگرد ZLD مناسب‌ترین روش در تصفیه آب تغلیظ شده بود.

ویشنو و همکاران (۲۰۰۸) در مطالعه‌ای روی سه واحد رنگرزی در هندوستان، انواع مختلف روش تصفیه پساب‌ها از جمله تصفیه فیزیکوشیمیایی، تصفیه بیولوژیکی، ازون‌زنی، سیستم اسمز معکوس، سیستم نانوفیلتراسیون، متبلورکننده‌ها و صفحات تبخیرکننده خورشیدی را مقایسه و پارامترهای pH، TDS، TSS، کلراید، سولفات، COD، سیلیکا، SDI^1 و LSI^2 و سختی کل را اندازه‌گیری کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که بازیابی آب به روش اسمز معکوس و نانوفیلتراسیون به ترتیب ۸۷ و ۷۱ درصد بود. هم‌چنین در پژوهش آنان مشخص شد که سود قابل توجهی در بازیابی آب با استفاده از اسمز معکوس وجود دارد. این مطالعه هم‌چنین نشان داد که آب با کیفیت بالا را می‌توان با ترکیب فرآیندهای غشایی، با توجه اقتصادی مقرون به صرفه تولید کرد و آن را در واحدهای رنگرزی به چرخه تولید بازگرداند.

شیبانی فر و نوشادی (۲۰۱۵) در پژوهشی به ارزیابی فرآیندهای چندمرحله‌ای ZLD برای رسیدن به حداکثر بازده ترسیب نمک‌های محلول در پساب و استفاده دوباره از آن در RO پرداختند. این تحقیق روی پساب اسمز معکوس منطقه ویژه اقتصادی خلیج فارس در شهر بندرعباس انجام شد. آنان برای ارزیابی و مقایسه گزینه‌های مختلف رسوب و حذف عناصر بحرانی، تعدادی آزمون در مقیاس آزمایشگاه انجام دادند. نتایج آنان نشان داد از بین فرآیندهای مختلف ترسیب شیمیایی و جذب، فرآیند بهینه ZLD شامل بستر کریستالی سیال با آلومینای فعال همراه آلوم بود که مقادیر کلسیم و سیلیکا را به ترتیب ۵۲ و ۷۶/۷۵ درصد کاهش داد.

نوشادی و کاظمی‌زاده (۲۰۱۳) در پژوهشی از روش ZLD برای حداکثر کردن درصد آب بازیافتی توسط غشاء اسمز معکوس و حداقل کردن ظرفیت مورد نیاز در نمک‌زدایی حرارتی و حوضچه تبخیر استفاده کردند. این تحقیق با برداشت و آزمایش روی نمونه پساب واحد آب شیرین کن

شیمیایی با استفاده از آلوم، آهک، سود سوزآور و آلومینات سدیم قرار گرفتند. نمونه‌ها از بستر سیال حاوی کریستال‌های کربنات کلسیم با و بدون افزودن مواد شیمیایی، عبور داده شدند و سپس مورد بررسی و تحلیل قرار گرفتند. همه آزمایش‌ها با سه تکرار انجام شدند که میانگین آن‌ها ارائه و تحلیل شده است.

آب ورودی به سیستم اسمز معکوس و جدول ۱ کیفیت پساب خروجی اسمز معکوس را نشان می‌دهد. بر اساس کیفیت آب شور در RO، املاح بحرانی که بازدهی RO را محدود می‌کنند باید شناسایی شوند؛ بنابراین از پساب این سیستم اسمز معکوس در زمان‌های مختلف نمونه‌برداری شد و پس از انتقال به آزمایشگاه پارامترهای مورد نظر اندازه‌گیری شدند. ابتدا این نمونه‌ها تحت فرآیند ترسیب



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۱- (الف) مدول‌های اسمز معکوس، (ب) مخزن آب تصفیه شده، (ج) مخزن آب ورودی به دستگاه اسمز معکوس

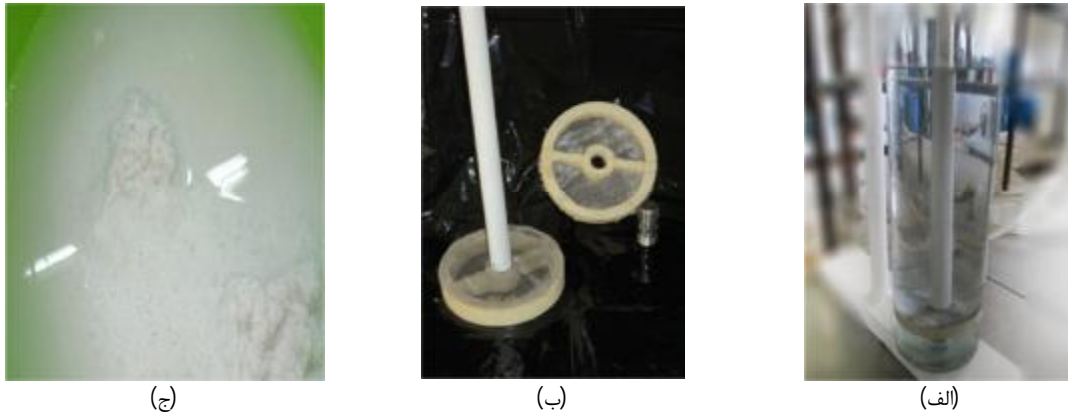
نمونه پساب با بارگذاری‌های سطحی مختلف ۰/۷، ۰/۸۵، ۱/۰۱، ۱/۱۶، ۱/۳۲، ۱/۴۷، ۱/۶۳، ۱/۷۸، ۱/۹۴، ۲/۰۹، ۲/۲۵، ۲/۴۰ و ۲/۴۸ متر مکعب در ساعت در متر مربع از بستر کریستالی عبور داده شدند. در نهایت بر اساس نتایج به دست آمده، بارگذاری‌های سطحی بزرگ‌تر یا مساوی ۱/۴۷ انتخاب شدند و در ادامه آزمایش‌ها از این بارگذاری‌های سطحی استفاده شد. در این فرآیند پارامترهای کلسیم، منیزیم و سیلیس هم در پساب و هم در نمونه‌هایی که از بستر عبور داده شدند، اندازه‌گیری و سپس تجزیه و تحلیل قرار شدند.

فرآیند ترسیب شیمیایی

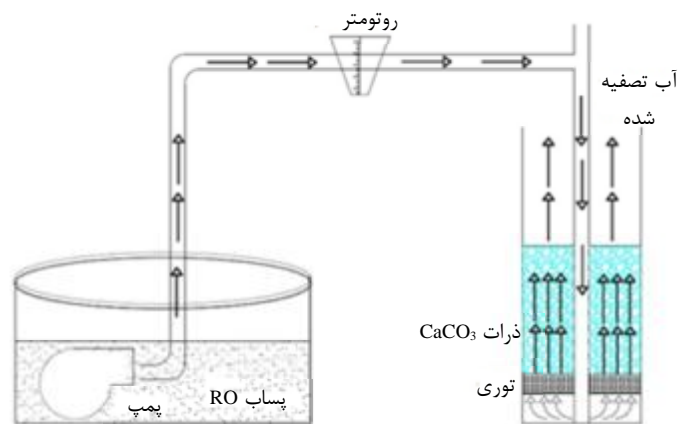
برای ارزیابی فرآیند تصفیه به روش ZLD، به نمونه‌های پساب دستگاه اسمز معکوس، غلظت‌های مختلف هیدروکسید سدیم، آهک، سولفات آلومینیوم و آلومینات سدیم اضافه شد که این غلظت‌ها ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بودند. برای بررسی نتایج افزودن این مواد شیمیایی به پساب، غلظت‌های کلسیم، منیزیم و سیلیس اندازه‌گیری شدند و برای هر ماده شیمیایی غلظت بهینه تعیین شد.

فرآیند جذب املاح توسط بستر کریستالی سیال (FBC)

ابتدا دانه‌های CaCO_3 به‌طور کامل بوسیله آب مقطر شست‌وشو شدند تا همه مواد زائد از آن خارج شدند. اندازه دانه‌ها ۱-۰/۵ میلی‌متر با دانسیته ۱/۴ گرم در سانتی‌متر مکعب بود. دانه‌های CaCO_3 با نسبت حجم دانه به حجم آب ۱:۱ در استوانه شیشه‌ای قرار گرفتند. نمونه‌های پساب RO با جریان رو به بالا از زیر بستر به‌طور یکنواخت و آرام وارد شدند. برای ورود یکنواخت آب از پایین به استوانه شیشه‌ای حاوی CaCO_3 ، در زیر این استوانه یک صفحه پلی استر فشرده با قطر هم اندازه با استوانه شیشه‌ای قرار داده شد و روی آن یک توری از جنس استیل با سایز ۸۰ میکرون قرار گرفت تا دانه‌های کربنات کلسیم از آن عبور نکنند. در وسط پلی‌استر یک سوراخ حیدر دار تعبیه شد و یک لوله استیل در آن قرار گرفت. جریان پساب به وسیله یک پمپ کوچک از یک روتامتر (دبی سنج) عبور می‌کرد و سپس وارد لوله استیل می‌شد که در وسط استوانه شیشه‌ای قرار داشت می‌شد و از پایین پس از عبور از توری صفحه پلی استر رو به بالا از بستر دانه‌های کربنات کلسیم عبور داده می‌شد (شکل‌های ۲ و ۳).



شکل ۲- الف) استوانه شیشه‌ای برای حرکت رو به بالای پساب (بدون بستر کریستالی)، ب) پلی استر فشرده با لوله استیل، ج) شست‌وشوی دانه‌های کربنات کلسیم با آب مقطر



شکل ۳- شکل شماتیک فرآیند جذب املاح با بستر کریستالی سیال

نتایج و بحث

ابتدا برای تعیین و ارزیابی پارامترهای مختلف کیفی پساب، نمونه‌های آب خام ورودی و پساب اسمز معکوس شهر لار در آزمایشگاه تجزیه شدند که نتایج آن در جدول ۱ نشان داده شده است. طبق این جدول مقادیر همه پارامترها به استثناء pH و قلیائیت کل در پساب RO از آب خام ورودی بیشتر شده است. با توجه به جدول ۱ مقادیر کلسیم، منیزیم و سیلیس (که عناصر مزاحم و مضر برای غشاء اسمز معکوس هستند) در پساب نسبت به آب خام ورودی به سیستم اسمز معکوس به ترتیب ۱۶۴/۳، ۱۶۹/۲ و ۱۷۵/۲ درصد افزایش یافته است. بدیهی است که افزایش این عناصر، لزوم مدیریت پساب در سیستم‌های اسمز معکوس را مسجل کرده و مدیریت این پساب برای حفظ محیط‌زیست و هم چنین افزایش بازدهی اسمز معکوس، بسیار مهم و ضروری است.

همچنین برای تعیین اثر برهم کنش مواد شیمیایی در فرآیند تصفیه، غلظت بهینه مواد شیمیایی به این صورت ترکیب شدند: ترکیب غلظت‌های بهینه هیدروکسید سدیم و آلومینات سدیم، ترکیب غلظت‌های بهینه هیدروکسید سدیم و سولفات آلومینیوم، ترکیب غلظت‌های بهینه آهک و آلومینات سدیم، ترکیب غلظت‌های بهینه آهک و سولفات آلومینیوم.

ترکیب فرآیندهای جذب املاح و ترسیب شیمیایی

با افزودن غلظت‌های بهینه مواد شیمیایی به نمونه‌های پساب و سپس عبور آن بستر کریستالی سیال در بارگذاری‌های سطحی مختلف، اثر توأمان فرآیند جذب املاح و ترسیب شیمیایی بررسی شدند. در این مرحله نیز غلظت‌های کلسیم، منیزیم و سیلیس در پساب RO تعیین شدند.

ترسیب شیمیایی

۱/۹۴ و ۲/۰۹ مترمکعب در متر مربع در ساعت مناسب‌تر بوده است. غلظت کلسیم، منیزیم و سیلیس در نمونه پساب در سری ۱ به ترتیب ۱۴۸/۰، ۶۹/۶ و ۲۷/۸ میلی‌گرم در لیتر و در سری ۲ به ترتیب ۱۸۰/۰، ۱۰۸/۰ و ۳۷/۹ میلی‌گرم در لیتر بود.

ترکیب فرآیند جذب املاح و ترسیب شیمیایی

در این فرآیند به صورت ترکیبی فرآیندهای جذب املاح و ترسیب شیمیایی با هم انجام شدند. در این فرآیند غلظت‌های بهینه مواد شیمیایی به پساب اسمز معکوس اضافه و سپس وارد بستر کریستالی سیال شد تا در بارگذاری‌های سطحی مختلف مقدار کاهش املاح تعیین شود. نتایج در شکل ۵ نشان داده شده است.

در بارگذاری سطحی $2/09 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ مقادیر کاهش کلسیم، منیزیم و سیلیس با افزودن ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر سود به ترتیب ۸۲/۲، ۳۱/۱ و ۹۷/۲ درصد، با افزودن ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر آهک به ترتیب ۴۵/۰، ۰/۰ و ۲۲/۴ درصد و با افزودن ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر آلومینات سدیم به ترتیب ۱۵/۰، ۲/۱ و ۸۷/۸ درصد کاهش یافتند؛ بنابراین فرآیند بستر کریستالی سیال با افزودن ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر سود از بقیه فرآیندها مناسب‌تر بود.

در این آزمایش‌ها که ترکیب فرآیند ترسیب شیمیایی و جذب املاح انجام شد، نتایج فرآیند بستر کریستالی سیال به همراه افزودن غلظت بهینه سولفات آلومینیوم بیان نشد؛ چون میزان pH این محلول به کمتر از ۷ رسید و در این محیط فرآیند ترسیب شیمیایی و جذب املاح به ندرت صورت می‌گیرد و در نتیجه، نتایج مطلوبی در کاهش املاح وجود نداشت.

فرآیند ترسیب شیمیایی با ترکیب غلظت‌های بهینه

مواد شیمیایی

برای تعیین اثر برهم کنش مواد شیمیایی در حذف کلسیم، منیزیم و سیلیس غلظت‌های بهینه مواد شیمیایی با هم ترکیب و به پساب RO اضافه شدند. در این مرحله غلظت‌های بهینه هیدروکسید سدیم (۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و سولفات آلومینیوم (۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر)، غلظت‌های بهینه هیدروکسید سدیم (۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و آلومینات سدیم (۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر)،

نتایج افزودن غلظت‌های مختلف هیدروکسید سدیم (سود)، آهک، آلومینات سدیم و سولفات آلومینیوم به نمونه پساب RO و تأثیر آن در غلظت‌های کلسیم، منیزیم و سیلیس در شکل ۴ ارائه شده است. طبق این شکل مقادیر کاهش کلسیم، منیزیم و سیلیس در غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر هیدروکسید سدیم به ترتیب ۸۶/۵، ۲۷/۶ و ۹۱/۸ درصد، در غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر آهک به ترتیب ۴۵/۹، ۱۳/۸ و ۶۲/۴ درصد، در غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر آلومینات سدیم به ترتیب ۱۵/۶، ۸/۹ و ۸۶/۲ درصد و در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر سولفات آلومینیوم به ترتیب ۶۵/۰، ۱۰۰/۰ و ۷۸/۵ درصد بوده است. غلظت‌های فوق، غلظت‌های بهینه برای حذف عناصر بحرانی بوده است؛ بنابراین استفاده از $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ سولفات آلومینیوم یک فرآیند مؤثر در ترسیب شیمیایی منیزیم (۱۰۰ درصد) بود. ولی ترسیب کلسیم (۶۵/۰ درصد) و سیلیس (۸۷/۵ درصد) به طور مؤثر رخ نداده است. استفاده از $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ هیدروکسید سدیم باعث کاهش مؤثر کلسیم (۸۶/۵ درصد) و سیلیس (۹۱/۸٪) شده؛ ولی کاهش منیزیم (۲۷/۶ درصد) اندک بوده است؛ بنابراین به طور کلی استفاده از هیدروکسید سدیم در کاهش املاح مضر مؤثرتر بوده است.

بستر کریستالی سیال

نمونه‌های پساب RO در بارگذاری‌های سطحی مختلف از بستر کریستالی سیال عبور داده شدند تا تأثیر فرآیند جذب املاح در کاهش عناصر بحرانی و مضر برای غشاء مشخص شود. نتایج فرآیند جذب املاح از بستر کریستالی در دو سری از نمونه‌های پساب سیستم اسمز معکوس در بارگذاری‌های سطحی $0/7$ تا $1/47 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ و همچنین در بارگذاری‌های سطحی $1/47$ تا $2/40 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ در جدول ۲ نشان داده شده است. در بارگذاری‌های سطحی $1/94$ ، $2/09$ ، $2/25$ و $2/40$ مترمکعب در مترمربع در ساعت بازدهی حذف کلسیم به ترتیب ۱۳، ۱۶، ۱۶ و ۱۸ درصد، بازدهی حذف منیزیم به ترتیب ۲/۰، ۰/۰، ۰/۰ و ۰/۰ درصد و راندمان حذف سیلیس به ترتیب ۱۲، ۱۱، ۹ و ۱۰ درصد بود؛ بنابراین بستر کریستالی سیال به تنهایی بازدهی حذف مؤثری برای کاهش کلسیم، منیزیم و سیلیس نداشته ولی به طور کلی بارگذاری‌های سطحی

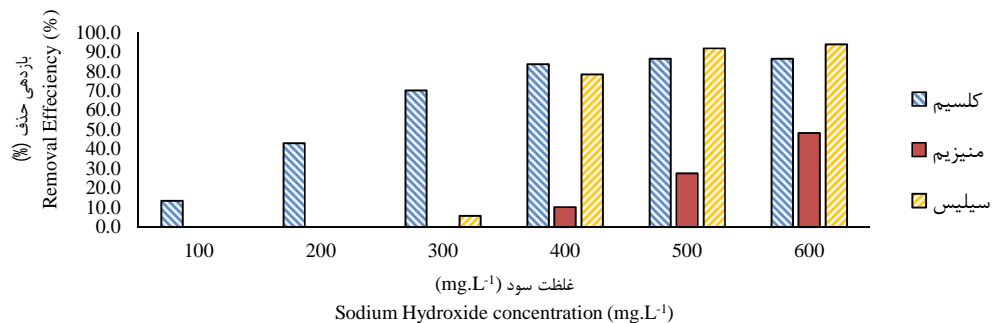
میلی گرم در لیتر آلومینات سدیم به ترتیب ۶۸/۸، ۵۴/۲ و ۹۳/۳ درصد، در ترکیب ۴۰۰ میلی گرم در لیتر آهک و ۲۰۰ میلی گرم در لیتر آلومینات سدیم به ترتیب ۴۵/۸، ۲۰/۸ و ۹۳/۰ درصد و در ترکیب ۴۰۰ میلی گرم در لیتر آهک و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر سولفات آلومینیوم به ترتیب ۵۰/۰، ۶۹/۰ و ۵۲/۵ درصد بوده است، بنابراین گزینه بهینه ترکیب مواد شیمیایی فرآیند ترکیب ۵۰۰ میلی گرم در لیتر سود و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر سولفات آلومینیوم بود.

غلظت‌های بهینه آهک (۴۰۰ میلی گرم در لیتر) و آلومینات سدیم (۲۰۰ میلی گرم در لیتر) و غلظت‌های بهینه آهک (۴۰۰ میلی گرم در لیتر) و سولفات آلومینیوم (۱۰۰ میلی گرم در لیتر) با هم ترکیب و به پساب RO اضافه شدند که نتایج آن در شکل ۶ ارائه شده است. طبق این شکل مقادیر راندمان حذف کلسیم، منیزیم و سیلیس در ترکیب ۵۰۰ میلی گرم در لیتر سود و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر سولفات آلومینیوم به ترتیب ۸۸/۲، ۱۰۰/۰ و ۷۰/۷ درصد، در ترکیب ۵۰۰ میلی گرم در لیتر سود و ۲۰۰

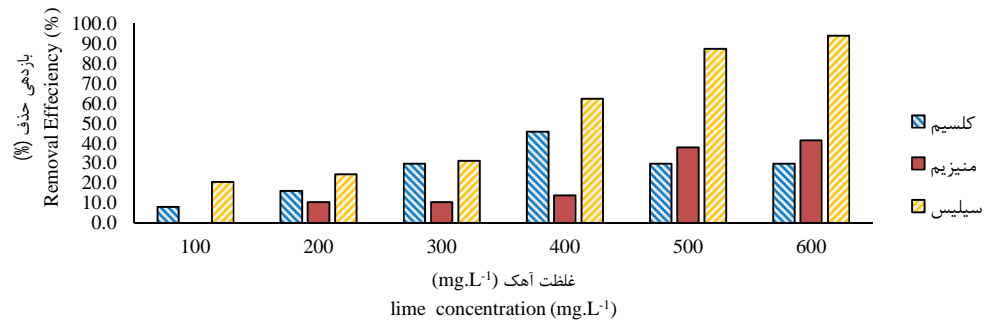
جدول ۱- پارامترهای کیفی نمونه‌های آب ورودی و پساب اسمز معکوس

پارامتر	واحد	مقدار در پساب	مقدار در آب خام ورودی	تغییرات در پساب نسبت به آب ورودی (%)
pH	-	۸/۰۵	۸/۱۶	-۱۳
هدایت الکتریکی	dS/m	۳/۵۷۰	۱/۳۵۷	۱۶۳/۱
سختی کل	mg.L ⁻¹	۱۲۰۰/۰	۴۵۰/۰	۱۶۶/۷
قلیائیت فنل فتالین (قلیائیت ساده)	mg.L ⁻¹	۲۰/۰	۵/۰	۳۰۰/۰
قلیائیت متیل اورانژ (قلیائیت کل)	mg.L ⁻¹	۳۰۰/۰	۱۳۵۰/۰	-۷۷/۸
کدورت	NTU	۲/۳	۱/۰	۱۳۰/۰
رنگ	PtCo	۱۲/۰	۱۰/۰	۲۰/۰
NH ₃	mg.L ⁻¹	>۰/۰۲	>۰/۰۲	-
SiO ₂	mg.L ⁻¹	۲۷/۸	۱۰/۱	۱۷۵/۲
Fe	mg.L ⁻¹	>۰/۱	>۰/۱	-
Ca ²⁺	mg.L ⁻¹	۱۴۸/۰	۵۶/۰	۱۶۴/۳
Mg ²⁺	mg.L ⁻¹	۷۰/۰	۲۶/۰	۱۶۹/۲
Al ²⁺	mg.L ⁻¹	۰/۲	۰/۲	۰/۰
Na ⁺	mg.L ⁻¹	۴۳۰/۰	۱۴۰/۰	۲۰۷/۱
K ⁺	mg.L ⁻¹	۲۲/۰	۸/۰	۱۷۵/۰
Mn	mg.L ⁻¹	>۰/۱	>۰/۱	-
Cr	mg.L ⁻¹	>۰/۵	>۰/۵	-
Ni	mg.L ⁻¹	>۰/۵	>۰/۵	-
Ba	mg.L ⁻¹	>۰/۵	>۰/۵	-
Cu	mg.L ⁻¹	>۰/۱	>۰/۱	-
PO ₄ ³⁻	mg.L ⁻¹	۰/۰۱۷	۰/۰۰۲	۷۵۰/۰
SO ₄ ²⁻	mg.L ⁻¹	۷۱۰/۰	۲۶۵/۰	۱۶۷/۹
NO ₃ ⁻	mg.L ⁻¹	۲/۵۶	۱/۱۴	۱۲۴/۶
NO ₂ ⁻	mg.L ⁻¹	۰/۳۳	۰/۰۰۵	۶۵۰۰/۰
CO ₃ ²⁻	mg.L ⁻¹	۰/۰	۰/۰	۰/۰
HCO ₃ ⁻	mg.L ⁻¹	۸/۰	۲/۰	۲۳۳/۳
F	mg.L ⁻¹	۳/۸	۱/۲	۲۱۶/۷
Cl ⁻	mg.L ⁻¹	۱۲۳۱/۴	۲۰۰/۲	۵۱۵/۱

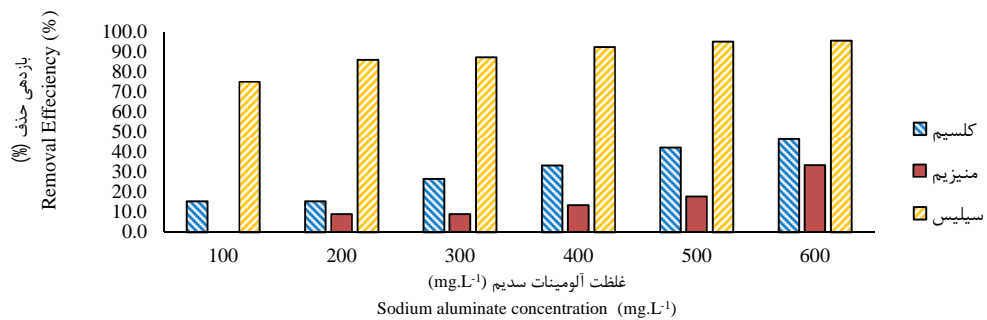
* علامت منفی در جدول به معنی کاهش مقدار پارامتر مورد نظر در پساب بوده است.



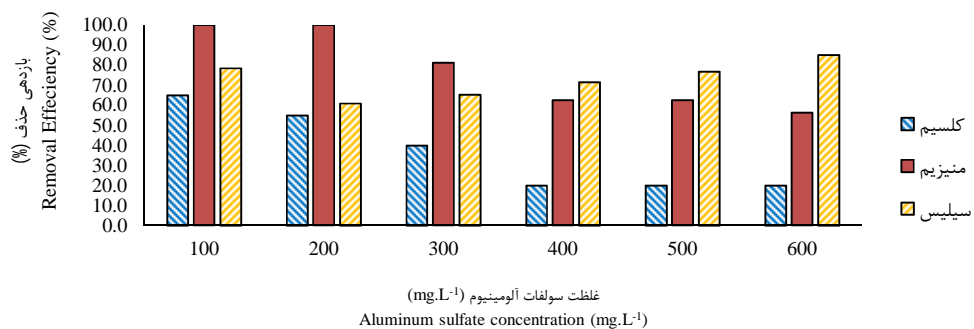
(الف)



(ب)



(ج)

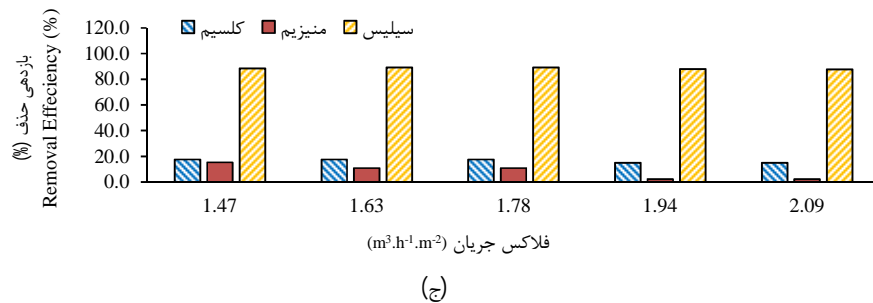
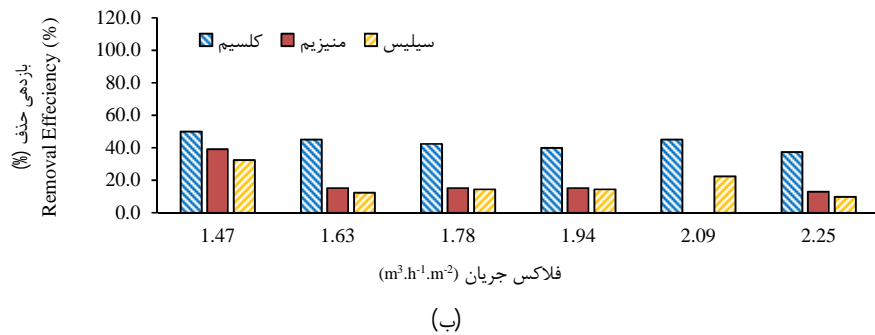
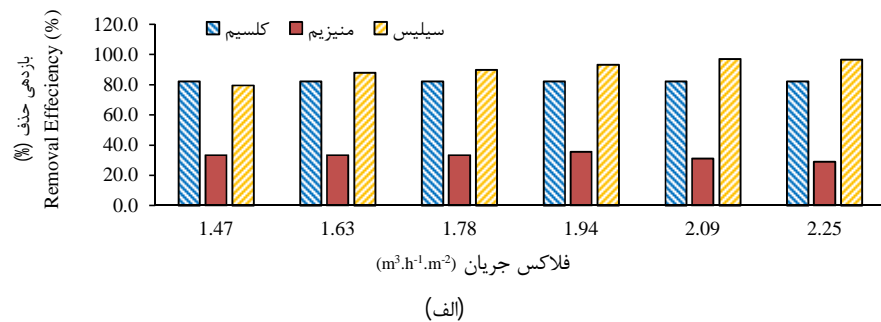


(د)

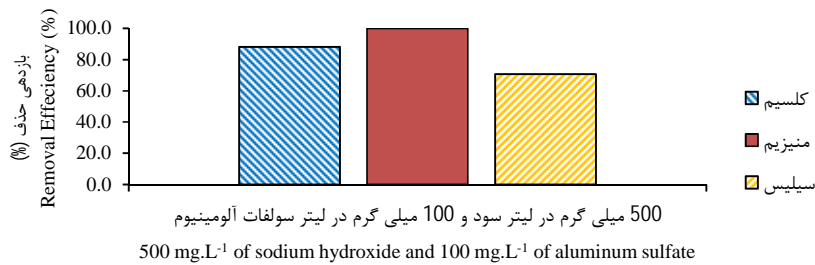
شکل ۴- مقادیر بازدهی حذف کلسیم، منیزیم و سیلیس در آزمایش‌های ترسیب شیمیایی با: الف) هیدروکسید سدیم، ب) آهک، ج) آلومینات سدیم، د) سولفات آلومینیوم

جدول ۲- غلظت و بازدهی حذف کلسیم، منیزیم و سیلیس در بستر کریستالی سیال و بارگذاری‌های سطحی مختلف

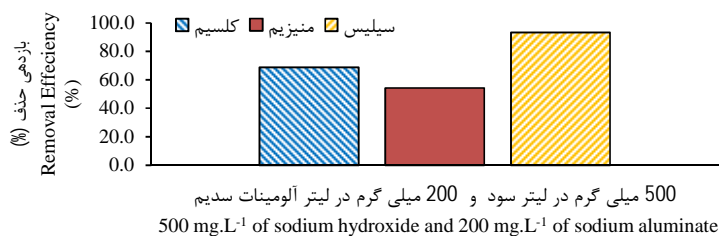
سیلیس		منیزیم		کلسیم		بارگذاری سطحی ($m^3 h^{-1} m^{-2}$)
بازدهی حذف (%)	غلظت ($mg L^{-1}$)	بازدهی حذف (%)	غلظت ($mg L^{-1}$)	بازدهی حذف (%)	غلظت ($mg L^{-1}$)	
۰/۰	۲۷/۸	۱۰/۳	۶۲/۴	۵/۴	۱۴۰/۰	۰/۷۰
۷/۹	۲۵/۶	۱۰/۳	۶۲/۴	۱۰/۸	۱۳۲/۰	۰/۸۵
۳/۲	۲۶/۹	۶/۹	۶۴/۸	۱۸/۹	۱۲۰/۰	۱/۰۱
۸/۶	۲۵/۴	۲۰/۷	۵۵/۲	۱۶/۲	۱۲۴/۰	۱/۱۶
۱۷/۶	۲۲/۹	۲۴/۱	۵۲/۸	۱۳/۵	۱۲۸/۰	۱/۳۲
۱۶/۹	۲۳/۱	۲۷/۶	۵۰/۴	۱۸/۹	۱۲۰/۰	۱/۴۷
۱۰/۸	۳۳/۸	۲/۲	۱۰۵/۶	۱۱/۱	۱۶۰/۰	۱/۴۷
۱۰/۰	۳۴/۱	۴/۴	۱۰۳/۲	۱۱/۱	۱۶۰/۰	۱/۶۳
۹/۸	۳۴/۲	۴/۴	۱۰۳/۲	۱۱/۱	۱۶۰/۰	۱/۷۸
۱۱/۹	۳۳/۴	۲/۲	۱۰۵/۶	۱۳/۳	۱۵۶/۰	۱/۹۴
۱۱/۳	۳۳/۶	۰/۰	۱۰۸/۰	۱۵/۶	۱۵۲/۰	۲/۰۹
۹/۰	۳۴/۵	۰/۰	۱۰۸/۰	۱۵/۶	۱۵۲/۰	۲/۲۵
۱۰	۳۴/۰	۰/۰	۱۰۸/۰	۱۷/۸	۱۴۸/۰	۲/۴۰



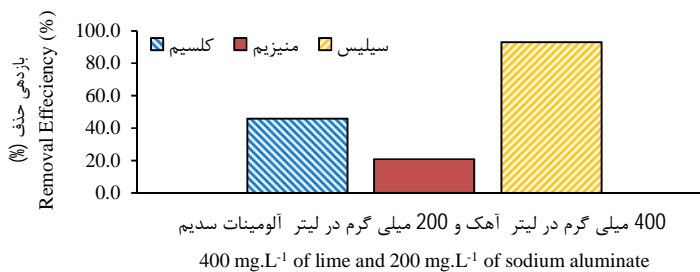
شکل ۵- مقادیر بازدهی حذف کلسیم، منیزیم و سیلیس در فرآیند جذب املاح بوسیله بستر کریستالی سیال با افزودن: (الف) ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر سود (ب) ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر آهک (ج) ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر آلومینات سدیم



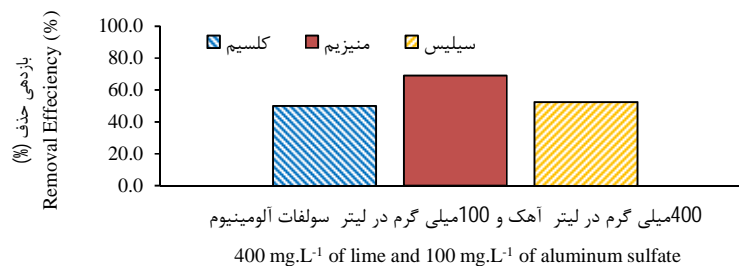
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۶- مقادیر بازدهی حذف کلسیم، منیزیم و سیلیس در ترسیب شیمیایی با: الف) ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر سود و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر سولفات آلومینیوم، ب) ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر سود و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر آلومینات سدیم، ج) ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر آهک و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر آلومینات سدیم، د) ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر آهک و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر سولفات آلومینیوم

طبق جدول ۳، برای همه گزینه‌های بررسی شده بارگذاری سطحی $1/94 \text{ m}^3 \cdot \text{hr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ از بقیه مناسب‌تر بوده است. طبق این جدول، مقادیر حذف کلسیم، منیزیم و سیلیس برای استفاده از هیدروکسید سدیم و سولفات آلومینیوم به ترتیب $۸۵/۳$ ، $۵۶/۸$ و $۴۷/۲$ درصد، برای استفاده از هیدروکسید سدیم و آلومینات سدیم به ترتیب $۹۵/۸$ ، $۹۷/۹$ و $۹۴/۴$ درصد، برای استفاده از آهک و آلومینات

افزودن ترکیب غلظت‌های بهینه مواد شیمیایی به بستر کریستالی سیال

در این مرحله با تعیین غلظت‌های بهینه مواد شیمیایی و ترکیب آن‌ها با یکدیگر و افزودن آن‌ها به بستر کریستالی سیال، فرآیند ترکیبی جذب املاح و ترسیب شیمیایی با هم انجام شد که با تعیین بارگذاری سطحی بهینه در این فرآیند، می‌توان گزینه مناسب فرآیند ZLD را تعیین کرد.

سدیم به ترتیب ۱۵/۲، ۳۳/۲ و ۵۱/۵ درصد و برای استفاده از آهک و سولفات آلومینیوم به ترتیب ۱۷/۶، ۳/۴ و ۲۴/۴ درصد بوده است؛ بنابراین فرآیند استفاده از هیدروکسید سدیم (۵۰۰ mg.L⁻¹) و آلومینات سدیم (۲۰۰ mg.L⁻¹) به همراه بستر کریستالی سیال با بارگذاری سطحی $1/94 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ گزینه بهینه بود.

جدول ۳- غلظت و بازدهی حذف کلسیم، منیزیم و سیلیس در حالت‌های ترکیبی مختلف

سیلیس		منیزیم		کلسیم		بارگذاری سطحی جریان ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)
بازدهی حذف (%)	غلظت (mg L^{-1})	بازدهی حذف (%)	غلظت (mg L^{-1})	بازدهی حذف (%)	غلظت (mg L^{-1})	
* استفاده از ۱۰۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر به ترتیب سولفات آلومینیوم و سود						
۵۳/۹	۱۰/۹	۵۶/۸	۳۸/۴	۸۵/۳	۲۰/۰	۱/۴۷
۴۹/۲	۱۲/۰	۵۶/۸	۳۸/۴	۸۵/۳	۲۰/۰	۱/۶۳
۴۶/۲	۱۲/۷	۵۶/۸	۳۸/۴	۸۵/۳	۲۰/۰	۱/۷۸
۴۷/۲	۱۲/۴	۵۶/۸	۳۸/۴	۸۵/۳	۲۰/۰	۱/۹۴
** استفاده از ۲۰۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر به ترتیب آلومینات سدیم و سود						
۶۷/۲	۷/۷	۸۷/۵	۱۴/۴	۹۱/۷	۱۶/۰	۱/۴۷
۹۴/۱	۱/۴	۹۵/۸	۴/۸	۹۳/۸	۱۲/۰	۱/۶۳
۹۴/۶	۱/۳	۱۰۰/۰	۰/۰	۹۵/۸	۸/۰	۱/۷۸
۹۴/۴	۱/۳	۹۷/۹	۲/۴	۹۵/۸	۸/۰	۱/۹۴
*** استفاده از ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر به ترتیب آلومینات سدیم و آهک						
۶۴/۱	۸/۵	۳۳/۳	۱۰۰/۸	۱۵/۲	۱۱۲/۰	۱/۴۷
۶۶/۱	۸/۰	۳۶/۵	۹۶/۰	۱۵/۲	۱۱۲/۰	۱/۶۳
۶۹/۲	۷/۳	۳۴/۹	۹۸/۴	۱۵/۲	۱۱۲/۰	۱/۷۸
۵۱/۵	۱۱/۴	۳۳/۳	۱۰۰/۸	۱۵/۲	۱۱۲/۰	۱/۹۴
**** استفاده از ۱۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر به ترتیب سولفات آلومینیوم و آهک						
۳۸/۸	۲۳/۲	۳/۴	۶۷/۲	۲۰/۶	۱۰۸/۰	۱/۴۷
۲۴/۷	۲۸/۵	۳/۴	۶۷/۲	۲۰/۶	۱۰۸/۰	۱/۶۳
۲۸/۹	۲۶/۹	۳/۴	۶۷/۲	۲۰/۶	۱۰۸/۰	۱/۷۸
۲۴/۴	۲۸/۶	۳/۴	۶۷/۲	۱۷/۶	۱۱۲/۰	۱/۹۴

* غلظت کلسیم، منیزیم و سیلیس در پساب RO به ترتیب ۱۳۶/۰، ۸۸/۸ و ۲۳/۵ mg.L^{-1} بود.

** غلظت کلسیم، منیزیم و سیلیس در پساب RO به ترتیب ۱۹۲/۰، ۱۱۵/۲ و ۲۳/۵ mg.L^{-1} بود.

*** غلظت کلسیم، منیزیم و سیلیس در پساب RO به ترتیب ۱۳۲/۰، ۱۵۱/۲ و ۲۳/۵ mg.L^{-1} بود.

**** غلظت کلسیم، منیزیم و سیلیس در پساب RO به ترتیب ۱۳۶/۰، ۶۹/۶ و ۳۷/۹ mg.L^{-1} بود.

نتیجه‌گیری

عنوان کاهش املاح مد نظر باشد، این گزینه می‌تواند به عنوان گزینه مطلوب معرفی شود. البته در ترسیب شیمیایی با سولفات آلومینیوم (100 mg.L^{-1}) نیز کاهش قابل توجه منیزیم (۱۰۰ درصد) رخ داد. این مرحله می‌تواند در جاهایی که منیزیم به عنوان عنصر مزاحم تلقی شود، مورد استفاده قرار گیرد. در ترکیب ترسیب شیمیایی با فرآیند جذب املاح که تنها از یک ماده شیمیایی استفاده شود، فرآیند بستر کریستالی سیال با افزودن هیدروکسید سدیم (500 mg.L^{-1}) می‌تواند به عنوان گزینه مطلوب استفاده شود؛ چون حذف

در این پژوهش فرآیندهای ترسیب شیمیایی و جذب املاح و همچنین ترکیب این دو فرآیند در کاهش املاح پساب سیستم اسمز معکوس بررسی شد. در فرآیند ترسیب شیمیایی در تعیین غلظت‌های بهینه از مواد شیمیایی هیدروکسید سدیم، سولفات آلومینیوم، آلومینات سدیم و آهک استفاده شد که در ترسیب شیمیایی به وسیله هیدروکسید سدیم (500 mg.L^{-1}) کاهش املاح بیشتر بود و کلسیم و سیلیس به ترتیب ۸۶ و ۹۲ درصد کاهش یافت، بنابراین اگر فقط فرآیند ترسیب شیمیایی به

همچنین کیفیت پساب آن می‌است. برای رسیدن به یک جامعیت در روش ZLD نیاز به انجام پژوهش‌های مختلف است تا بر اساس آن بتوان به یک مدل نهایی برای ZLD رسید که در آن جنبه‌های مختلف کیفیت پساب لحاظ شده باشد.

بنابراین بر اساس نتایج به‌دست آمده با ترکیب فرآیند ترسیب شیمیایی و جذب املاح می‌توان مرحله تصفیه تغلیظ میانی سیستم‌های RO را انجام داد و از پساب اسمز معکوس دوباره استفاده کرد و بازده سیستم‌های RO را افزایش داد. با توجه به اینکه حذف کدام عنصر ضروری‌تر است، می‌توان از یکی از گزینه‌های فوق استفاده کرد.

سپاس‌گزاری

بدین‌وسیله از شرکت آب و فاضلاب استان فارس برای همکاری‌های فنی و مالی در انجام این طرح قدردانی می‌شود. مسلماً بدون این همکاری‌ها انجام این پژوهش میسر نبود.

منابع

1. Bond R. and Veerapaneni S. 2008. Zeroing in on ZLD technologies for inland desalination. Journal of American Water Works Association. 100(9): 76-89.
2. Loganathan K. Chelme-Ayala P. and El-Din M. G. 2016. Pilot-scale study on the treatment of basal aquifer water using ultrafiltration, reverse osmosis and evaporation/crystallization to achieve zero-liquid discharge. Journal of environmental management. 165: 213-223.
3. Ning R. Y. and Troyer T. L. 2007. Colloidal fouling of RO membranes following MF/UF in the reclamation of municipal wastewater. Desalination. 208: 232-237.
4. Noshadi M. and Kazemizadeh M. 2015. Determination of optimum ZLD process for reuse of reverse osmosis effluent (case study: reverse osmosis of Lar city). IJST, Transactions of Civil Engineering. 39: 575-588.
5. Oren Y. Katz V. and Daltrophe N. C. 2001. Improved compact accelerated precipitation softening (CAPS). Desalination. 139(1): 155-159.
6. Sheibanifar M. and Noshadi M. 2016. Determine the Optimal ZLD Pro cess for Reuse of Reverse Osmosis Effluent. Journal of Civil and Environmental Engineering. 48(3): 63-77.

کلسیم و سیلیس به ترتیب ۸۲/۲ و ۹۷/۲ درصد بود؛ البته حذف منیزیم ۳۱/۱ درصد بود که مناسب نیست؛ بنابراین این گزینه فقط برای حذف کلسیم و سیلیس مناسب است.

در فرآیند ترسیب شیمیایی به‌صورت ترکیب غلظت‌های بهینه مواد شیمیایی نیز آزمایش ترکیب غلظت بهینه هیدروکسید سدیم (500 mg.L^{-1}) و آلومینات سدیم (200 mg.L^{-1}) با کاهش ۶۸/۸، ۵۴/۲ و ۹۳/۳ درصدی به ترتیب برای کلسیم، منیزیم و سیلیس گزینه مناسب برای حذف سیلیس بود. گزینه هیدروکسید سدیم (500 mg.L^{-1}) و سولفات آلومینیوم (100 mg.L^{-1}) باعث حذف ۸۸/۲ و ۱۰۰ درصد به ترتیب برای کلسیم و منیزیم شد. بنابراین برای حذف سیلیس گزینه هیدروکسید سدیم (500 mg.L^{-1}) و آلومینات سدیم (200 mg.L^{-1}) و برای حذف کلسیم و منیزیم گزینه هیدروکسید سدیم (500 mg.L^{-1}) و سولفات آلومینیوم (100 mg.L^{-1}) مناسب بود.

اما در نهایت با ترکیب فرآیند جذب املاح و ترسیب شیمیایی (ترکیب مواد شیمیایی) در چهار تیمار موجود، حالت ترکیب غلظت‌های بهینه هیدروکسید سدیم (mg.L^{-1}) 500^1 و آلومینات سدیم (200 mg.L^{-1}) و افزودن آن‌ها به بستر کریستالی سیال در بارگذاری سطحی $1/94 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ دارای بیشترین بازدهی حذف و بالاترین بارگذاری سطحی حرکتی بود که کلسیم، منیزیم و سیلیس به ترتیب ۹۵/۸، ۹۷/۹ و ۹۴/۴ درصد کاهش یافتند؛ بنابراین گزینه بهینه ZLD همین گزینه است که می‌تواند هر سه عنصر مزاحم را همزمان حذف کند. در پژوهش شیبانی و نوشادی (۱۳۹۵) در تصفیه آب دریا، حذف کلسیم، منیزیم، سختی کل، سیلیسیم و باریم بررسی و تحلیل شد و با توجه به اینکه کیفیت آب ورودی به RO و همچنین کیفیت پساب آن، تفاوت زیادی با این پژوهش داشت، فرآیند بهینه ZLD شامل "بستر سیال کریستالی با آلومینای فعال (1 g/L) با آلوم (100 mg/L)" بود. در پژوهش نوشادی و کاظمی‌زاده (۲۰۱۳) گزینه بهینه ZLD "فرآیند بستر کریستالی سیال با افزودن هیدروکسید سدیم (500 mg/L)" بود که به نتایج این تحقیق نزدیک‌تر است.

بنابراین باید توجه داشت که فرآیند ZLD یک فرایند ثابت نیست و تابع پارامترهای کیفیت آب ورودی به RO و

7. Vergili I. Kaya Y. Sen U. Gönder Z. B. and Aydiner C. 2012. Techno-economic analysis of textile dye bath wastewater treatment by integrated membrane processes under the zero liquid discharge approach. *Resources, Conservation and Recycling*. 58: 25-35.
8. Vishnu G. Palanisamy S. and Joseph K. 2008. Assessment of field scale zero liquid discharge treatment systems for recovery of water and salt from textile effluents. *Journal of Cleaner Production*. 16(10): 1081-1089.

