



Semnan University

Applied Chemistry Today

Journal homepage: <https://chemistry.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2981-2437



Research Article

Innovative Sequencing Batch Electrocoagulation Reactors (SBERs) for Brine Treatment in Brackish Water Desalination System

Hossein Ataei Far^a, Lobat Taghavi^{a,*}, Amir Hessam Hassani^a, Mojtaba Fazeli^b,
Abdollah Rashidi Mehrabadi^b

^aDepartment of Environmental Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

^bDepartment of Water, Wastewater and Environmental Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

PAPER INFO

Article history:

Received: 27/Dec/2022

Revised: 25/Apr/2023

Accepted: 28/Apr/2023

Keywords:

Desalination, Brine of RO, Sequencing Batch Electrocoagulation Reactors (SBERs), TDS, green process

ABSTRACT

This study aims to provide a green process implementation method for treating brine in brackish water's desalination system with two reverse osmosis stages. In this study, real samples taken from the first and second stages of the brackish water reverse osmosis (BWRO) plant were utilized to assess the performance of innovative sequencing batch electrocoagulation reactors (SBERs) with complementary processes (addition of chemicals and antiscalants, settling, microfiltration, UV, and ultrafiltration). According to the measurements, the TDS of the brackish water taken from the aquifer ranged from 3,229 to 3,664 mg/L, whereas that of the first-stage RO brine was between 5,500 and 7,700 mg/L, that of the second-stage RO brine was between 9,500 and 10,600 mg/L, and that of tap water was between 278 and 408 mg/L. The results of the study showed that the average removal of TDS, hardness, and ions in direct current (DC) was higher than in alternating current (AC) and that for Al-Al electrodes is more than that for Al-Fe electrodes. The parameters of the electrocoagulation process (retention duration, electrode distance, hydraulic conditions, and applied electric current density) were maintained throughout the study. TDS removal for potable water with a TDS of 282 mg/L (water temperature: 23 °C, pH: 7.8) was extremely low in the SBERs pilot. Brackish water with a TDS of 3734 mg/L, had a TDS removal percentage of 82%; hardness and precursors such as calcium & sulfate, and magnesium had removal percentages of 3%, 13%, and 46%, respectively. For the samples that were taken from the brine to the second stage RO with a TDS level of 9423 mg/L (with an increase in pH to 9 and with a temperature of 11 °C), the amount of TDS removal was 14%, and the amounts of hardness and scaling ions like calcium, magnesium, and sulfate (the amount of sulfate in amounts above 1400 mg/L) were removed equal to 35.5, 29, 35, and 30%, respectively. This leads to the conclusion that TDS can be successfully reduced without the use of chemicals by electrocoagulation and that scale-forming precursor ions can be eliminated by combining electrocoagulation and chemical precipitation. The results of the research showed that the third alternative was more advantageous than the others for the development phase of the desalination system under study after multiple options were analyzed technically, environmentally, and economically. This option will direct brackish water to two RO (one stage)/SBERs processes. The RO desalination plant's brine and the SBER effluent are then combined to provide industrial water or irrigation water for plants that can tolerate salt. This method has been proposed as the best option for desalination system development because it reduces the total volume of rejected brine and increases the water supply (drinking, industrial, or agricultural).

DOI: <https://doi.org/10.22075/CHEM.2023.29429.2136>

This is an open access article under the CC-BY-SA 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

*.Corresponding author: Assistant Professor of Environmental Sciences. E-mail address: l.taghavi@srbiau.ac.ir

How to cite this article: Ataei Far, H., Taghavi, L., Hassani, A.H., Fazeli, M., Rashidi Mehrabadi, A., (2024). Innovative Sequencing Batch Electrocoagulation Reactors (SBERs) for Brine Treatment in Brackish Water Desalination System. *Applied Chemistry Today*, 19(70), 151-180. (in Persian)

طرح نوآورانه راکتورهای الکتروکواگولاسیون ناپیوسته متوالی (SBERS) برای تصفیه

شورابه سامانه نمک زدایی آب لب شور

حسین عطائی فر^۱، لعبت تقوی^{۱*}، امیر حسام حسنی^۱، مجتبی فاضلی^۲، عبدالله رشیدی مهرآبادی^۲
^۱گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
^۲گروه مهندسی آب، فاضلاب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۰۶	هدف از انجام این پژوهش، ارائه راهکار کاربردی برای تصفیه و بازیافت شورابه سامانه نمک زدایی آب لب شور با دو مرحله اسمز معکوس با رویکرد دستیابی به فرآیند سبز است در پژوهش حاضر، به منظور تصفیه شورابه سامانه نمک زدایی با فرآیند اسمز معکوس، عملکرد طرح نوآورانه الکتروکواگولاسیون با چهار راکتور ناپیوسته به صورت متوالی (Sequencing Batch Electrocoagulation Reactors) به همراه تصفیه تکمیلی (افزودن مواد شیمیایی، ته نشینی، پرتوتابی UV، میکروفیلتراسیون و اولترافیلتراسیون) با استفاده از نمونه های واقعی برداشت شده از مرحله اول و دوم سامانه نمک زدایی آب لب شور در دست بهره برداری مورد ارزیابی قرار گرفت. اندازه گیری ها، میزان TDS را به ترتیب برای آب لب شور آبخوان برابر با ۳۲۲۹ تا ۳۶۶۴ میلی گرم در لیتر، برای نمونه های شورابه برداشتی از مرحله اول ۵۵۰۰ تا ۷۵۰۰ میلی گرم در لیتر، برای مرحله دوم سامانه نمک زدایی مورد مطالعه ۹۵۰۰ تا ۱۰۶۰۰ میلی گرم در لیتر و همچنین برای آب شبکه شهری ۲۷۸ تا ۴۰۸ میلی گرم در لیتر نشان داد. نتایج تحقیق نشان داد با ثابت نگهداشتن پارامترهای بهره برداری الکتروکواگولاسیون (مدت زمان، فاصله الکترودها، شرایط هیدرولیکی، دانسیته جریان الکتریکی اعمالی)، میانگین حذف TDS، سختی و یون ها در جریان مستقیم بیشتر از جریان متناوب و برای الکترودهای Al-Al بیش از الکترودهای Al-Fe است. میزان حذف TDS برای آب های با TDS پایین در حد ۲۸۲ میلی گرم در لیتر، بدون تاثیر و برای آب لب شور برابر ۸۲ درصد و میزان حذف یون های پیش ساز رسوب گرفتگی از جمله سختی و کلسیم در حد پایین ۳ درصد و حذف سولفات و منیزیم به ترتیب ۱۳ و ۴۶ درصد است. برای نمونه های برداشتی از شورابه مرحله دوم اسمز معکوس با میزان TDS برابر ۹۴۲۳ میلی گرم در لیتر (با افزایش pH به رقم ۹ و با دمای ۱۱ درجه سانتی گراد)، میزان حذف TDS برابر ۱۴ درصد و حذف عوامل پیش ساز رسوب گرفتگی از جمله سختی، کلسیم، منیزیم و سولفات (میزان سولفات در مقادیر بالای ۱۴۰۰ میلی گرم در لیتر) به ترتیب ۲۵/۵ و ۲۹ و ۳۵ و ۳۰ درصد است. بدین ترتیب نتیجه گیری می شود که فرآیند الکتروکواگولاسیون بدون اضافه شدن مواد شیمیایی برای کاهش TDS و استفاده همزمان این فرآیند با رسوب دهی شیمیایی جهت حذف یون های پیش ساز رسوب گرفتگی می تواند به طور موفقیت آمیزی کاربرد داشته باشد. برای فاز توسعه سامانه نمک زدایی مورد مطالعه، گزینه های مختلف از جنبه های فنی و زیست محیطی و اقتصادی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بررسی ها نشان داد گزینه سوم نسبت به سایر گزینه ها، مزیت بیشتری دارد. در این گزینه، آب لب شور به دو فرآیند موازی شامل غشای اسمز معکوس یک مرحله ای و الکتروکواگولاسیون هدایت می شود. متعاقباً، شورابه RO با آب تصفیه شده توسط SBERS جهت تولید آب صنعتی یا آب برای آبیاری گیاهان شورپسند با هم مخلوط می شوند. این روش برای فاز توسعه سامانه نمک زدایی به منظور کمینه نمودن شورابه دفعی و بیشینه نمودن میزان آب تولیدی (آب شرب، آب صنعتی یا آب کشاورزی) به عنوان گزینه منتخب پیشنهاد می گردد.

DOI: <https://doi.org/10.22075/CHEM.2023.29429.2136>

This is an open access article under the CC-BY-SA 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

۱- مقدمه

رشد سریع جمعیت و شهرنشینی به عنوان دو عامل اصلی برای برداشت بیش از حد منابع آب شیرین متعارف در نقاط مختلف جهان شناخته می شوند به طوری که بر اساس گزارش بانک جهانی، ۲ میلیارد نفر از جمعیت ۴۴ کشور جهان با کمبود آب در سال ۲۰۵۰ مواجه خواهند شد. برای برطرف نمودن بخشی از نیازها، ظرفیت سامانه های نمک زدایی در سطح جهان توسعه یافته، به طوری که مجموع ظرفیت این سامانه ها از ۹۷/۴ میلیون مترمکعب در روز در سال ۲۰۱۸ به ۱۱۵ میلیون مترمکعب در روز در سال ۲۰۲۱ رسیده است [۱ و ۲]. این توسعه برای تامین آب در همه حوزه های کشاورزی، شرب و صنعت، روند رو به افزایش دارد. بر اساس داده های موجود، فرآیند اسمز معکوس، رایج ترین فناوری کاربردی برای تامین آب شرب و صنعتی است که ۷۷ درصد از ظرفیت سامانه ها را در سال ۲۰۲۱ به خود اختصاص داده است [۱]. سامانه های نمک زدایی آب لب شور در این بخش، نقش اساسی در تامین و بهبود کیفیت آب در بسیاری از مناطق جهان با توجه به کمبود آب به عهده دارند. از بین روش های مختلف نمک زدایی، فناوری های نمک زدایی مبتنی بر غشاء بدون استثنا برای آب های زیرزمینی شور استفاده می شوند [۳].

سامانه های نمک زدایی با فرآیند اسمز معکوس از سه بعد افزایش کارایی، کاهش هزینه های سرمایه گذاری و بهره برداری و همچنین مباحث زیست محیطی در برنامه های تحقیق و توسعه مورد توجه قرار گرفته است.

در ارتباط با بعد اول یا افزایش کارایی سامانه های نمک زدایی، تحقیقات مختلفی بر روی نحوه چیدمان مدول های غشایی، بهره گیری از غشاهای نسل نوین، بهبود عملکرد غشاها با کاهش گرفتگی و افزایش ریکاوری آب (از طریق گزینه های مختلف) در دست انجام است [۴].

با تحقیقات انجام شده بر روی غشاها و غشاهای مقاوم به گرفتگی و شبیه سازی آن و عوامل گرفتگی غشاء و همچنین وضعیت گرفتگی سامانه های غشای اسمز معکوس با آب دریا، مجموعه عوامل مختلف در ایجاد گرفتگی غشاها (از جمله گرفتگی بیولوژیکی، مواد آلی، مواد غیرآلی، ذرات و کلوئیدها) و کاهش میزان آب شیرین تولیدی و افزایش هزینه ها شناسایی شدند. برای به حداقل رسیدن مشکل گرفتگی غشاها، مشخص شد که عملیات پیش تصفیه با حذف این عوامل گرفتگی با کاهش تعداد عملیات شستشوی در محل (CIP^۱)، موجب افزایش طول عمر غشاها می گردد. به طور کلی می توان به این نکته تاکید کرد که حتی برای غشاهای مقاوم به گرفتگی، نمی توان به طور کامل از ایجاد این پدیده جلوگیری نمود و بعلاوه معیارهایی همچون بهینه سازی طراحی مدول، یافتن محل های تمیزکننده غشا و پیش تصفیه در این خصوص موثر هستند [۵-۹].

^۱ Cleaning-In-Place (CIP)

در ارتباط با بعد دوم یا کاهش هزینه های سرمایه گذاری و بهره برداری، این موضوع به دلیل نرخ رشد کاربرد سامانه های نمک زدایی در سطح جهان مورد توجه قرار گرفته است [۳ و ۱۰]. در حال حاضر حدود ۷۰ درصد از سامانه های نمک زدایی از سیستم های غشایی است که به دلیل کارایی بالا و مصرف انرژی و هزینه کمتر در مقایسه با فناوری های حرارتی برای تامین آب آشامیدنی میلیون ها نفر استفاده می شود. مصرف انرژی ویژه^۱ در این سامانه ها بستگی به دما و کیفیت منبع آب، شرایط بهره برداری، مقیاس فرآیند و منبع انرژی داشته که در محدوده $1/5 \text{ kWh/m}^3$ تا 15 kWh/m^3 متغیر است. هزینه تولید آب شیرین در سامانه های نمک زدایی بزرگ آب دریا بین $0/35 \text{ US \$/m}^3$ تا $1/87 \text{ US \$/m}^3$ و برای آب شور بین $0/35 \text{ US \$/m}^3$ تا $1/53 \text{ US \$/m}^3$ با سهم ۴۴ درصدی هزینه ها به بخش انرژی مصرفی است [۴].

در ارتباط با بعد سوم یا مباحث زیست محیطی طرح توسعه سامانه های نمک زدایی این است که به رغم دارا بودن مزایای زیاد، یکی از نگرانی های اساسی مرتبط با بهره گیری روزافزون از این فناوری، اثرات احتمالی دفع شورابه آنها به محیط و تبعات ناشی از آن است [۴ و ۱۱]. در این بخش، دستاورد تعدادی از تحقیقات انجام شده بر روی این موضوع ارائه می گردد.

آندرس و همکاران^۲ (سال ۲۰۲۰) با تحقیق بر روی کیفیت خاک منطقه غرب ریو^۳ و بخش جنگلی (محدوده شاهد) با نمونه برداری از سطح تا عمق ۲۰ سانتیمتری و از عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتیمتری (در فاصله محل تخلیه، $0/8$ و $1/6$ متر از محل دفع شورابه سامانه نمک زدایی) مشخص نمودند دفع شورابه باعث افزایش pH، افزایش سطح اشباع پایه و افزایش هدایت الکتریکی خاک و تاثیرگذاری بر خواص فیزیکی و شیمیایی خاک و افزایش بالقوه مخاطرات ناشی از شوری خاک در محدوده پروژه های سامانه های نمک زدایی آب در جوامع روستائی منطقه شده است [۱۲]. بر اساس نتایج تحقیق انجام شده توسط ال فایف و همکاران^۴ (سال ۲۰۱۰) بر روی اثرات شورابه سامانه نمک زدایی آب لب شور در منطقه ریاض کشور عربستان سعودی، دفع شورابه می تواند موجب کاهش قابلیت نفوذ، کاهش میزان هوادهی و متعاقبا تخریب خاک گردد [۱۳].

مطالعات مروری جهت به حداقل رساندن شورابه های سامانه های نمک زدایی درون سرزمینی و کاهش تبعات آن توسط ریو و همکاران^۵ (سال ۲۰۲۰)، انجام و این نتیجه حاصل شد که هزینه های مدیریت پساب این سامانه ها بیش از هزینه های مرتبط با تصفیه شورابه سامانه های اسمز معکوس آب دریا است [۱۴]. یکی از بخش های مهم در توسعه پایدار سامانه های نمک زدایی آب، تبعات زیست محیطی مرتبط با شورابه و تخلیه مواد شیمیایی به محیط های پذیرنده و اکوسیستم است که توسط گودی و همکاران^۶ (سال ۲۰۱۶) مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵]. بر اساس مطالعات بورن و همکاران^۷ (سال ۲۰۱۵)، کنترل و

¹ Specific Energy Consumption (SEC)

² Anders et al.

³ Rio Grande do Norte

⁴ Al-Faif et al.

⁵ Rioyo et al. (2020)

⁶ Gude et al. (2016)

⁷ Buren et al. (2015)

مدیریت شورابه سامانه های نمک زدایی آب لب شور از چالش های موجود در تامین آب درون سرزمینی^۱ محسوب می گردد که به رغم انجام تحقیقات آزمایشگاهی، طرح های فناوری در مقیاس بزرگ به دلیل عدم وجود اطلاعات کافی برای ارزیابی اقتصادی، هنوز عملیاتی نشده است [۱۶].

تحقیقات مختلفی نیز به منظور کاهش تبعات ناشی از دفع شورابه انجام شده است. پاناگپولس و همکاران^۲ (سال ۲۰۲۰)، گزینه های مختلفی برای برنامه راهبردی تصفیه شورابه را ارائه نمودند و لیکن با توجه به هزینه انرژی ۱/۹۳ برابری روش بدون پساب ZLD^۳ نسبت به روش با کمترین پساب MLD^۴، گزینه اقتصادی همان گزینه راهبردی MLD برای تصفیه شورابه، با استفاده از روش الکتروکواگولاسیون EC جهت پیش تغلیظ پساب سامانه های نمک زدایی پیشنهاد گردید [۱۷].

بر اساس تحقیق انجام شده توسط سمبلانته و همکاران^۵ (سال ۲۰۱۸)، برای محافظت غشاها و سایر بخش های فرآیندی و در جهت روش بدون پساب ZLD، پیش تصفیه شورابه ضروری می باشد که از روش های مطرح برای این منظور ترسیب شیمیایی^۶ و الکتروکواگولاسیون و مبادله کننده های یونی^۷، نانوفیلتراسیون^۸ است [۱۸]. در این مقاله، روش های مختلف به شرح ذیل با هم مقایسه شده است.

دانشمندان همچنان به دنبال ابداع راهبردها و فناوری های در جهت به حداقل رساندن شورابه با حجم کم شورابه باقیمانده هستند [۱۹]. سیلوپتا^۹ و همکاران (سال ۲۰۲۱) با بررسی فناوری های تصفیه شورابه با رویکرد تولید حداقل شورابه با استفاده از فناوری روز دنیا^{۱۰} و ارزیابی فنی و اقتصادی^{۱۱} بر این نکته تاکید کرده اند که داده های تصفیه شورابه هنوز ناقص بوده و مدون نشده است [۲۰]. با مطالعات مروری توسط گارسیا-سگورا و همکاران^{۱۲} (سال ۲۰۱۷)، الکتروکواگولاسیون به عنوان فرآیندی عمدتاً از طریق جریان مستقیم و قربانی شدن الکترودها با افزایش غلظت فلز در محلول همراه مطرح شد [۲۱]. در تحقیق انجام شده توسط هکیزیماننا و همکاران^{۱۳} (سال ۲۰۱۶) و همکاران، این نتیجه حاصل شد که الکتروکواگولاسیون به صورت روش پیش تصفیه سامانه نمک زدایی آب دریا سبب حذف ۷۰/۸ درصد کربن آلی محلول DOC^{۱۴} و حذف کامل میکروارگانیزم ها در

¹ In-Land

² Panagopoulos et al. (2020)

³ Zero Liquid Discharge(ZLD)

⁴ Minimum Liquid Discharge(MLD)

⁵ Semblante et al. (2018)

⁶ Chemical precipitation

⁷ Ion exchange

⁸ nanofiltration

⁹ Cipolletta et al. (2017)

¹⁰ State of the art

¹¹ techno-economic assessment

¹² Garcia-Segura et al. (2017)

¹³ Hakizimana et al. (2016)

¹⁴ Dissolved Oxygen Demand(DOC)

چگالی جریان بالا و حذف سختی تا حد ۱۰ درصد می شود [۲۲]. نتایج طرح تحقیقاتی الموکداد و همکاران (سال ۲۰۲۱) در خصوص کاربرد پیش تصفیه الکتروکواگولاسیون با انواع فرآیندهای تصفیه آب نشان داد که بکار بردن روش ترکیبی فرآیندها می تواند باعث بهبود کیفیت آب تصفیه شده و کاهش هزینه های کل به ویژه هزینه های بهره برداری شود [۲۳]. نتایج طرح پژوهشی مروری به همراه مطالعات موردی توسط کاویته و همکاران (سال ۲۰۱۹) در ارتباط با فرآیندهای پیش تصفیه و آماده نمودن کیفیت آب ورودی به سامانه نمک زدایی آب دریا به وسیله اسمز معکوس مشخص نمود با توجه به تغییرات فصلی و تغییر در کیفیت آب ورودی به سامانه، استفاده از فرآیند ترکیبی پیش تصفیه متعارف و غشایی می تواند باعث کاهش هزینه ها گردد [۲۴].

تحقیقات مختلف دیگری توسط سایر محققین برای استفاده از فرآیند الکتروکواگولاسیون برای حذف نترات [۲۵]، حذف غلظت های بالای سیلیکات محلول شورابه [۲۶] و ارزیابی این فرآیند برای پیش تصفیه سامانه نمک زدایی در مقیاس آزمایشگاهی [۲۷] و مطالعات به روز شده کاربرد فناوری الکتروکواگولاسیون برای حذف آلاینده ها [۲۸] صورت گرفته است. روش ترسیب شیمیایی با مصرف زیاد مواد شیمیایی، تاثیرپذیری از نوسانات تغییرات کیفیت شیمیایی شورابه بر عملکرد آن، تولید لجن خطرناک و پرهزینه بودن فرآیند مواجهه بوده در صورتی که الکتروکواگولاسیون (تولید لجن کمتر، حذف مواد افزودنی شیمیایی به فرآیند)، مبادله کننده های یونی و نانوفیلتراسیون دارای ظرفیت خوبی برای حذف عوامل غیرآلی پیش ساز رسوب گرفتگی^۳ (رسوب گرفتگی در غشاها) به حساب می آیند. بعلاوه انعقاد شیمیایی^۴، الکتروکواگولاسیون، نانوفیلتراسیون و فرآیندهای جذب^۵، ظرفیت قابل توجهی برای حذف عوامل گرفتگی غشاها ناشی از مواد آلی^۶ را دارند. امکان سنجی فنی و اقتصادی بکارگیری این فرآیندها به صورت ترکیبی با سایر روش ها برای تصفیه شورابه های مشکل دار (از جمله با منشاء صنعتی با شورابه های با سختی، سیلیس یا مواد آلی بالا) از گزینه های مطرح می باشد. فرآیندهای زیستی از جمله لجن فعال^۷، پیل سوختی میکروبی^۸ و ریزجلبک ها^۹ ظرفیت پایینی را در جهت عملیات پیش تصفیه شورابه به دلیل محدودیت تصفیه (عملکرد پایین این فرآیندها و سمیت شورابه برای میکروارگانیسم ها) دارند.

شایان ذکر است برای حذف فلزات سنگین از محلول های آبی، روش های مختلفی از جمله الکتروکواگولاسیون و انواع جاذب ها و فناوری غشایی و سایر روش ها کاربرد داشته است که در سال های اخیر، پژوهش بر روی انواع نانومواد گسترش پیدا کرده

¹ Almukdad et al. (2021)

² Kavitha et al. (2019)

³ inorganic scale precursors

⁴ chemical coagulation

⁵ adsorption processes

⁶ organic foulants

⁷ activated sludge

⁸ microbial fuel cell

⁹ microalgae

است [۲۹ و ۳۰]. سه دسته از نانومواد شامل نانو جاذب ها، نانو الیاف و نانو فوتوکاتالیست ها به عنوان فن آوری های پیشرفته برای تصفیه آب و فاضلاب جهت حذف بسیاری از آلاینده های محیطی محسوب می شوند [۳۰ - ۳۲]. همچنین در جهت به حداقل رساندن میزان گرفتگی غشاها، علاوه بر استفاده از روش های متعارف پیش تصفیه، تحقیق در خصوص کاربرد نانوذرات اکسید گرافن بر روی انواع غشاها و استفاده از انواع سایر مواد نانو نیز جایگاه ویژه ای پیدا کرده است [۳۳].

براساس نتایج این تحقیق، برای دستیابی به روش بدون پساب ZLD، استفاده از فرآیندهای پیش تصفیه (از جمله گزینه الکتروکواگولاسیون) و برای افزایش بازافت آب بعد از این مرحله پیش تصفیه، گزینه های تکمیلی (گزینه های غشایی) کاربرد دارند [۱۸]. در پیوست (۱)، تعاریف و اصطلاحات مرتبط با موضوع ارائه شده است.

در پژوهش حاضر، کاربرد الکتروکواگولاسیون^۱ در قالب طرح نوآورانه راکتورهای الکتروکواگولاسیون ناپیوسته متوالی^۲ (SBERS) و فرآیندهای تکمیلی تصفیه شورابه برای یک سامانه نمک زدایی آب لب شور اسمز معکوس دو مرحله ای در دست بهره برداری مورد مطالعه قرار گرفت. از نوآوری های پژوهش، دستیابی به فرآیندهای سبز برای رقیق سازی و بهبود کیفیت شورابه از طریق یک مرحله ای نمودن فرآیند اسمز معکوس و اجرای آن به صورت موازی با فرآیند الکتروکواگولاسیون و اختلاط و رقیق سازی شورابه RO با آب خروجی از فرآیند الکتروکواگولاسیون، مناسب برای استفاده در کاربردهای صنعتی و یا کشاورزی است. از سایر نوآوری های تحقیق می توان به طراحی و ساخت پایلوت^۴ (به جای مقیاس آزمایشگاهی^۵) با چهار راکتور الکتروکواگولاسیون ناپیوسته به صورت متوالی (SBERS) و دستیابی به آمپر مصرفی پائین (یک آمپر برای هر راکتور با دانسیته جریان $1/6 \text{ mA/Cm}^2$ و ولتاژ اعمالی ۱۲ ولت)، استفاده از شورابه سامانه واقعی تحت بهره برداری (جایگزین محلول های سنتتیک)؛ استفاده از فرآیند SBERS برای حذف TDS و استفاده توأم الکتروکواگولاسیون با ترسیب شیمیایی برای حذف عوامل پیش ساز رسوب گرفتگی شورابه و ارائه راهکار بهره گیری از تصفیه تکمیلی (مشمول بر اضافه شدن EDTA با ماده آنتی اسکالانت و تنظیم pH و بعلاوه فرآیندهای ته نشینی و میکروفیلتراسیون و اولترافیلتراسیون) برای رفع مشکل گرفتگی غشاها ناشی از آهن باقیمانده آزاد شده از فرآیند الکتروکواگولاسیون اشاره نمود.

۲- بخش تجربی

۲-۱- دستگاه های مورد استفاده

در این تحقیق، دستگاه های مورد استفاده شامل دو بخش ذیل است:

بخش اول: پایلوت پژوهشی الکتروکواگولاسیون و فرآیند تکمیلی:

¹ Electrocoagulation(EC)

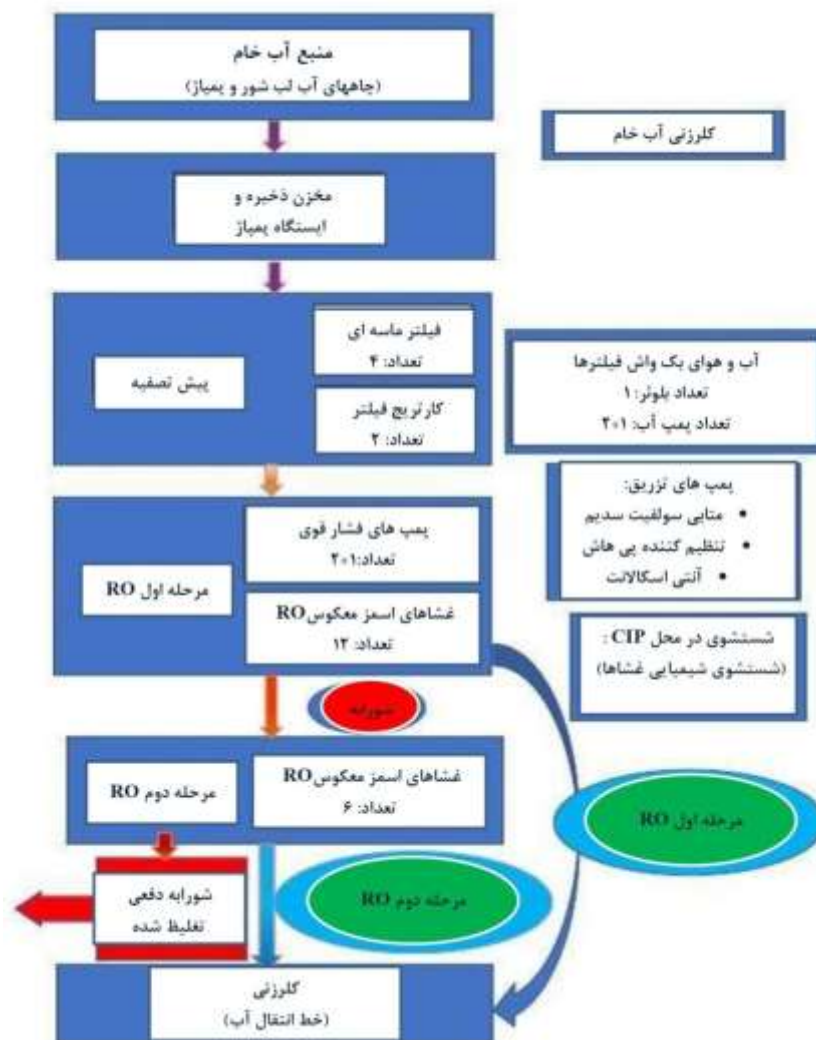
² Sequencing Batch Electrocoagulation Reactors(SBERS)

³ Green Process

⁴ Pilot plant

⁵ Bench-scale

بخش پایلوت پژوهش از اجزای مختلفی تشکیل شده است. این تحقیق با استفاده از نمونه های برداشتی از آب لب شور و شورابه سامانه نمک زدایی آب لب شور در حال بهره برداری دارای سیستم دو مرحله ای اسمز معکوس (شورابه اسمز معکوس مرحله اول به عنوان خوراک اسمز معکوس مرحله دوم) انجام گرفت. شکل (۱)، فرآیند های سامانه نمک زدایی آب لب شور (نمونه گیری واقعی از سایت مورد بهره برداری) را نشان می دهد. میزان درصد پس زنی غشای اسمز معکوس مرحله اول و دوم در مقایسه با کیفیت آب ورودی به سامانه نمک زدایی آب مورد مطالعه در پیوست (۲) ارائه شده است. شایان ذکر است در مقاله، در هر قسمت، سامانه نمک زدایی درج شده است منظور سامانه نمک زدایی آب لب شور مورد مطالعه با ظرفیت $5000 \text{ m}^3/\text{d}$ است. با نصب و راهبری از پایلوت SBERS، تحقیق بر روی نمونه های خوراک با تغییر پارامترهای بهره برداری از پایلوت به منظور دستیابی به شرایط بهینه پیش تصفیه و یا تصفیه میانی (بین دو مرحله اسمز معکوس) انجام شد.



شکل (۱) - فرآیند پیش تصفیه و دو مرحله اسمز معکوس در سامانه نمک زدایی آب لب شور تحت بهره برداری (نمونه برداری ها از آب لب شور ورودی به غشای اسمز معکوس - شورابه مرحله اول و دوم اسمز معکوس - آب برداشتی از شبکه)

مشخصات فرآیندی پایلوت در این تحقیق، مشتمل بر مخزن ذخیره ۲۰۰ لیتری، بخش الکتروکواگولاسیون SBERS و مخزن ته نشینی با حجم ۵۰ لیتر و یک عدد کارتریج فیلتر (به عنوان روش میکروفیلتراسیون) و لامپ UV برای گندزدایی و چهار غشای اولترافیلتراسیون (دو غشا از نوع سرامیکی و دو غشا از نوع پلیمری) و دو غشای اسمز معکوس است. مشخصات واحدهای الکتروکواگولاسیون مطابق جدول (۱) و شکل (۲) و (۳) است. در مرحله اول تحقیق، بررسی بر روی الکتروکواگولاسیون با الکتروکواگولاسیون با آهن-آلومینیوم با آب برداشتی از شبکه توزیع صورت گرفت. در مرحله دوم تحقیق، با ارزیابی مرحله اول نسبت به تغییر جنس الکترودهای واحد الکتروکواگولاسیون به آلومینیوم-آلومینیوم و استفاده از شورابه مرحله اول و دوم سامانه نمک زدایی مورد بهره برداری به عنوان خوراک، اقدام شد. پیوست (۳)، مشخصات اجزای فرآیندی و تجهیزاتی پایلوت مشتمل بر الکتروکواگولاسیون و تصفیه تکمیلی و تغییرات تجهیزات پایلوت در مرحله دوم تحقیق و شکل (۲)، دیگرام فرآیند راکتورهای الکتروکواگولاسیون SEBRs و فرآیندهای تصفیه تکمیلی در پایلوت را ارائه می دهد.

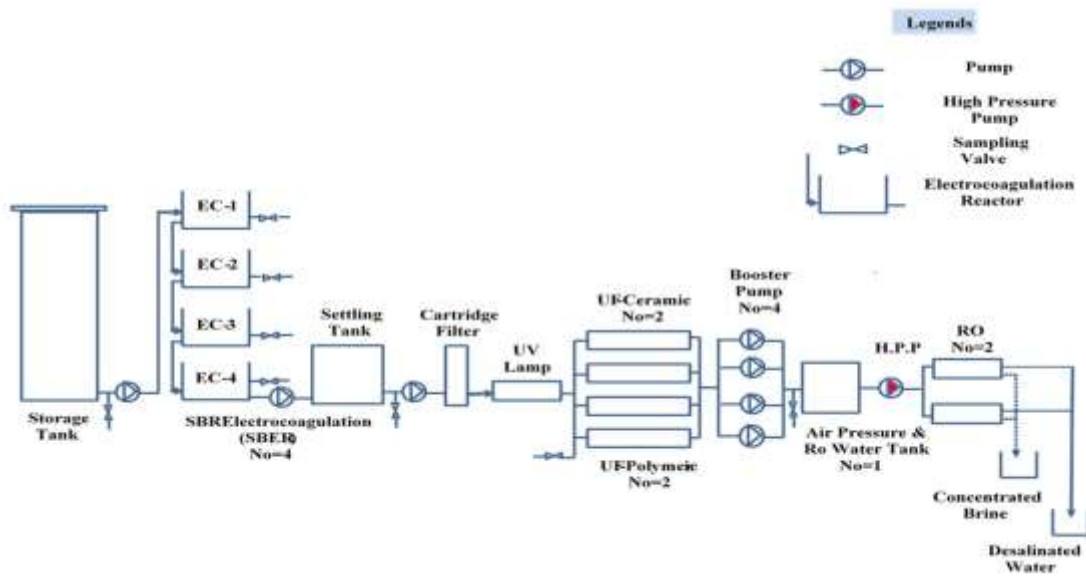
بخش دوم: تجهیزات مورد استفاده در آزمایشگاه:

دستگاهها و تجهیزات و مواد شیمیایی مختلف مورد استفاده در آزمایشگاه آب و فاضلاب برای انجام آزمون ها شامل دستگاه pH متر، دماسنج، کدورت سنج، هدایت سنج رومیزی و پرتابل، آون، اسپکتروفتومتر، فلیم فتومتر، دستگاه جذب اتمی و دستگاه آنالیز TOC، سایر تجهیزات و لوازم آزمایشگاهی و دستگاه سنجش شاخص دانسیته سیلت^۱ در سامانه نمک زدایی است. روش های مختلف بکار گرفته شده مشتمل بر روش اندازه گیری تیتراسیون-دستگاهی و سایر روش ها در انجام آزمون ها در آزمایشگاه مطابق پیوست (۴) است.

جدول (۱)- مشخصات پایلوت تحقیقاتی برای بخش الکتروکواگولاسیون

مشخصات	اجزا
۴ واحد	تعداد واحد
به صورت سری	چیدمان واحدها
۴۰ تا ۶۰ دقیقه	زمان کل فرآیند
۱۰ تا ۱۵ دقیقه	متوسط زمان ماند آب در هر یک از واحد انعقاد الکتریکی
آهن - آلومینیوم و آلومینیوم - آلومینیوم	جنس الکترودها
۲۵*۲۵ سانتیمتر	ابعاد ورق های الکتروکود
۲ عدد	تعداد الکترودها در هر واحد انعقاد الکتریکی

¹ Silt Density Index(SDI)



شکل (۲) - دیاگرام فرآیند راکتورهای الکتروکواگولاسیون SEBRs و فرآیندهای تصفیه تکمیلی در پایلوت



شکل (۳) - چیدمان راکتورهای الکتروکواگولاسیون SEBRs و فرآیندهای تصفیه تکمیلی در پایلوت

۲-۲- مواد شیمیایی مورد استفاده

از مواد شیمیایی و معرف ها برای آزمایشات بر طبق مرجع استاندارد برای آزمون های آب و فاضلاب^۱ و بر اساس روش های مقرر در کد استاندارد هر آزمون وفق پیوست (۴) استفاده شد. از جمله مواد شیمیایی برای انجام آزمون ها، می توان به محلول های استاندارد pH (بافرهای pH)، کدورت، هدایت الکتریکی، TDS، قلیابیت، سختی، کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، کلراید، سولفات، نیتريت، نترات، آهن، TOC اشاره کرد. برای کالیبراسیون در طی آزمایشات، از ماده مرجع گواهی استاندارد (به عنوان نمونه، برای کالیبره کردن آزمون سختی کل آب لب شور یا شورابه، از استاندارد کالیبراسیون CaCO_3 1000mg/L با کد شیمیایی CRM-008-500) استفاده شد.

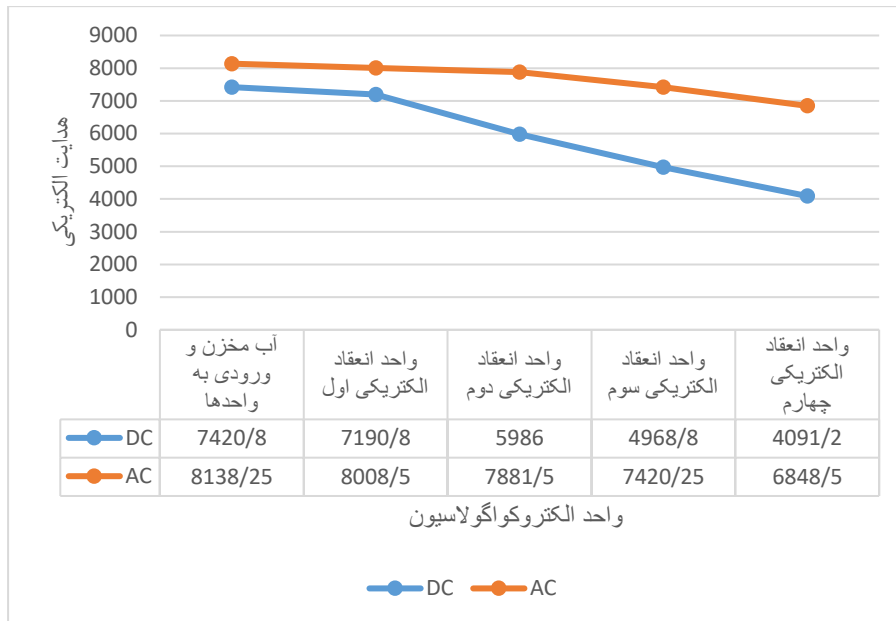
۳- بحث و نتیجه گیری

۳-۱- بحث و نتیجه گیری در ارتباط با آزمایشات بر روی پایلوت

نتایج آزمایشات بر روی کیفیت آب خام و شورابه سامانه نمک زدایی آب مورد مطالعه نشان داد TDS آب لب شور برابر با ۳۲۲۹mg/L تا ۳۶۶۴mg/L، شورابه مرحله اول RO در محدوده ۵۵۰۰mg/L تا ۷۷۰۰mg/L و TDS شورابه مرحله دوم RO در محدوده ۹۵۰۰mg/L تا ۱۰۶۰۰mg/L و TDS آب شبکه شهری مورد آزمایش برابر با ۲۷۸mg/L تا ۴۰۸mg/L است. پایلوت در ۸ سناریوی مختلف مورد بررسی قرار گرفته که نتایج حاصله را می توان به صورت ذیل جمع بندی نمود:

سناریوی اول: میانگین حذف کل مواد جامد محلول، سختی و یون های و هدایت الکتریکی در روش جریان مستقیم بیشتر از جریان متناوب است. برای محدوده کل مواد جامد محلول آب TDS در محدوده ۳۷۰۰mg/L تا ۶۵۰۰mg/L با ثابت نگهداشتن پارامترها (الکترودها Al-Fe ، فاصله الکترودها سه سانتیمتر، زمان ماند برای هر راکتور ۱۵ دقیقه، دانسیته جریان $1/6 \text{ mA/Cm}^2$)، میزان حذف املاح آب در روش جریان مستقیم DC به میزان سه برابر جریان متناوب AC وفق شکل (۴) اندازه گیری شد.

¹ Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 2017, 23rd Ed



شکل (۴) - مقایسه کارایی واحدهای الکتروکواگولاسیون در حذف هدایت الکتریکی برای جریان مستقیم (DC) و متناوب (AC)

سناریوی دوم: در خصوص سنجش تاثیر الکترودهای Al-Al و Al-Fe، با استفاده از آزمون مقایسه میانگین جفتی برای تحلیل بین تاثیر الکترودهای Al-Al و Al-Fe در دو روش DC و AC با توجه به P-VALUE های حاصله ۰/۰۳ و ۰/۰۱۴ در سطح ۹۵ درصد (کمتر از ۰/۰۵)، به این معنا که فرض یکسان بودن کارایی دو روش AC و DC در حذف کل مواد جامد محلول آب TDS رد می شود. همچنین با استفاده از آزمون T-TEST مقایسه میانگین ها در سطح ۹۵ درصد فرضیه تفاوت در هدایت الکتریکی در دو الکترودهای Al-Fe و Al-Al در هر دو تکنیک DC و AC پذیرفته شده و با توجه به نرخ کاهشی در الکترودهای Al-Al این الکترودها در مقایسه با الکترودهای Al-Fe تاثیر گذارتر است.

سناریوی سوم: در عملکرد واحدهای الکتروکواگولاسیون، با افزایش تعداد صفحات آلومینیوم تغییر در حذف یون ها مشهود بوده و بدین معنا که با افزایش صفحات آلومینیومی، حذف یون ها بهتر صورت می گیرد. در خصوص عملکرد واحدهای الکتروکواگولاسیون پایلوت با افزایش تعداد صفحات آلومینیوم بر اساس مقدار P-VALUE حاصله کوچکتر از ۰/۰۵ می توان نتیجه گرفت در هر دو آزمایش، تفاوت بین دو روش AC و DC مشهود بوده به طوری که با افزایش ورقه های آلومینیومی و افزایش سطح الکترودها، میزان حذف یون ها در روش جریان مستقیم، نتیجه بهتری می دهد. برای محدوده TDS برابر 10000 mg/L با ثابت نگهداشتن پارامترها (الکترودهای Al-Fe)، فاصله الکترودها سه سانتیمتر، زمان ماند ۱۵ دقیقه برای هر راکتور، دانسیته جریان $1/6 \text{ mA/Cm}^2$ ، با دو برابر شدن سطح الکترودها (افزایش الکترودها)، میزان حذف املاح آب در روش جریان مستقیم DC به میزان ۳/۵ برابر جریان متناوب AC است. شایان ذکر است از این گزینه، فقط در این مرحله پژوهش استفاده شد و با توجه به اینکه در نظر بود با حداقل دانسیته جریان $1/6 \text{ mA/Cm}^2$ و با کمترین هزینه تعویض الکترودها (دو

صفحه الکتروود به صورت آند و کاتد)، عملیات الکتروکواگولاسیون انجام گیرد لذا در ادامه پژوهش از همان دو الکتروود استفاده شد.

سناریوی چهارم: روند حذف TDS و یون ها در SBERS با استفاده از جریان مستقیم (DC) و جریان متناوب (AC) جهت آب خام با TDS پایین ۲۸۲mg/L تا ۴۳۰ mg/L (آب برداشتی از شبکه توزیع)، نشان می دهد کارائی واحدهای الکتروکواگولاسیون برای آب با حذف TDS و سختی در حد سه درصد بوده و بدین ترتیب می توان نتیجه گرفت واحد الکتروکواگولاسیون برای آب های با TDS پایین (دمای آب ۲۳ درجه سانتی گراد و pH برابر ۷/۸)، کارائی ندارد .

سناریوی پنجم: برای آب لب شور (آب خام) با میزان کل مواد جامد محلول TDS برابر ۳۷۳۴mg/L، pH برابر ۷/۸ و دمای ۱۶ درجه سانتی گراد، میزان کارائی الکتروکواگولاسیون چهار مرحله ای در حذف TDS به میزان ۸۲ درصد بوده و در صورتی که حذف عوامل پیش ساز رسوب گرفتگی از جمله سختی و کلسیم در حد پایین ۳ درصد و حذف سولفات و منیزیم به ترتیب ۱۳ و ۴۶ درصد است. بدین ترتیب می توان نتیجه گرفت کاربرد الکتروکواگولاسیون به تنهایی به منظور پیش تصفیه اسمز معکوس (حذف عوامل رسوب گرفتگی) در حد مطلوبی نمی باشد .

سناریوی ششم: برای نمونه های برداشتی از شورابه مرحله دوم اسمز معکوس سامانه نمک زدایی مورد مطالعه با میزان TDS برابر ۹۴۲۳mg/L و با افزایش سود سوزآور و بالا رفتن pH به ۹ (دمای ۱۱ درجه سانتی گراد) ، میزان کارائی SBERS برای حذف TDS به میزان ۱۴ درصد و حذف عوامل پیش ساز رسوب گرفتگی از جمله سختی ، کلسیم و منیزیم برابر ۳۵/۵ درصد و حذف سولفات ۲۹ درصد (با سولفات در مقادیر بالای ۱۴۰۰ mg/L) است. بدین ترتیب می توان نتیجه گرفت کاربرد همزمان الکتروکواگولاسیون با ترسیب شیمیایی^۱ می تواند بهترین گزینه جهت حذف بخشی از عوامل رسوب گرفتگی و پیش تصفیه فرآیند اسمز باشد. در این سناریو، روند متغیرهای مختلف شامل کل مواد جامد محلول و هدایت الکتریکی، سختی و یون های کلسیم و منیزیم و سولفات به ترتیب از خوراک ورودی به واحد SBERS از راکتور اول تا راکتور چهارم و کارتریج فیلتر، به صورت کاهشی و مقادیر کدورت آب در مراحل SBERS، روند افزایشی داشته است. افزایش کدورت در طی مراحل الکتروکواگولاسیون به دلیل آزاد شدن آهن در این فرآیند بوده که در بخش های تصفیه تکمیلی با حذف آهن آزاد باقیمانده، میزان کدورت نیز کاهش یافته است. با توجه به مقدار SIG برای پارامترهای ذکرشده، روند حذف پارامترهای کیفی بین واحدهای مختلف در پایلوت تایید شده است. جدول (۲)، نتایج پارامترهای کیفی شورابه در پایلوت با فرآیند توام الکتروکواگولاسیون و ترسیب شیمیایی را نشان می دهد.

¹ chemical precipitation

جدول (۲): متوسط مقادیر حاصل از آزمون های پارامترهای کیفیت شورابه در پایلوت با فرآیند توام الکتروکواگولاسیون و ترسیب شیمیایی

ردیف	آزمایش	Tests	شورابه ورودی	واحد انعقاد الکتریکی اول	واحد انعقاد الکتریکی دوم	واحد انعقاد الکتریکی سوم	واحد انعقاد الکتریکی چهارم
۱	دمای آب	Water Temperature at the time of Test (°C)	۱۱	۱۰/۸۹	۱۰/۷۰	۱۰/۵۰	۱۰/۱۵
۲	پی اچ	pH	۸/۸۵	۸/۸۶	۸/۸۷	۸/۹۲	۹/۰
۳	هدایت الکتریکی	Electrical conductivity $\mu\text{mhos/cm}$	۱۴۴۹۰	۱۴۴۸۰	۱۴۴۴۰	۱۳۱۱۰	۱۲۳۹۰
۴	کل جامدات محلول	Total dissolved solids mg/L at 180	۹۴۲۳	۹۴۱۷	۹۳۸۶	۸۵۱۷	۸۰۵۵
۵	قلیائیت نسبت به فنل	Alkalinity to phenolphthalein mg/L CaCO ₃	-	-	-	-	-
۶	قلیائیت کل	Total Alkalinity mg/L CaCO ₃	۹۸/۴	۹۷/۶	۹۰/۴	۷۵	۷۲/۲
۷	سختی کل	Total hardness mg/L (CaCO ₃)	۶۲۴/۴	۶۱۲	۵۹۰/۴	۴۶۶/۲	۴۰۰/۷۶
۸	کلسیم	Calcium (Ca) mg/L	۱۹۸/۵	۱۹۷/۸	۱۸۷/۷	۱۴۸/۲	۱۲۶/۲
۹	منیزیم	Magnesium (Mg) mg/L	۳۱/۱۸	۲۹/۵۲	۲۸/۵۵	۲۳/۲۵	۲۰/۱۹
۱۰	سدیم	Sodium (Na) mg/L	۲۵۲۵	۲۴۷۵	۲۳۰۰	۲۲۰۰	۲۲۰۰
۱۱	پتاسیم	Potassium (K) mg/L	۱۰	۱۰	۱۰	۷/۵	۷/۵
۱۲	سولفات	Sulphate(SO ₄) mg/L	۱۴۲۵	۱۳۵۰	۱۳۰۰	۱۱۰۰	۱۰۰۰

سناریوی هفتم: با توجه به آزاد شدن آهن و آلومینیوم از الکترودها، کارایی استفاده از EDTA^۱ و فلوکون^۲ (به عنوان ضد رسوب یا آنتی اسکالانت) با کاهش pH به حد ۶/۴ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد میزان آهن باقیمانده^۳ به میزان ۵۳ در صد حذف گردیده و به این ترتیب استفاده از EDTA و ایجاد کمپلکس می تواند بخشی از آهن آزاد شده را حذف نماید. بخش میکروفیلتراسیون هم به میزان ۳۶ در صد موجب حذف آهن آزاد شده باقیمانده گردید و به این ترتیب با استفاده از این دو بخش فرآیند تکمیلی، میزان آهن باقیمانده از ۱/۳۷ mg/L به ۰/۴۱ mg/L و همچنین بعد از اضافه کردن اسید و متعاقباً EDTA، قلیائیت آب از ۳۸/۸ mg/L به ۴۸ mg/L رسید. آلومینیوم باقیمانده^۴ از فرآیند الکتروکواگولاسیون با

^۱ Ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA)

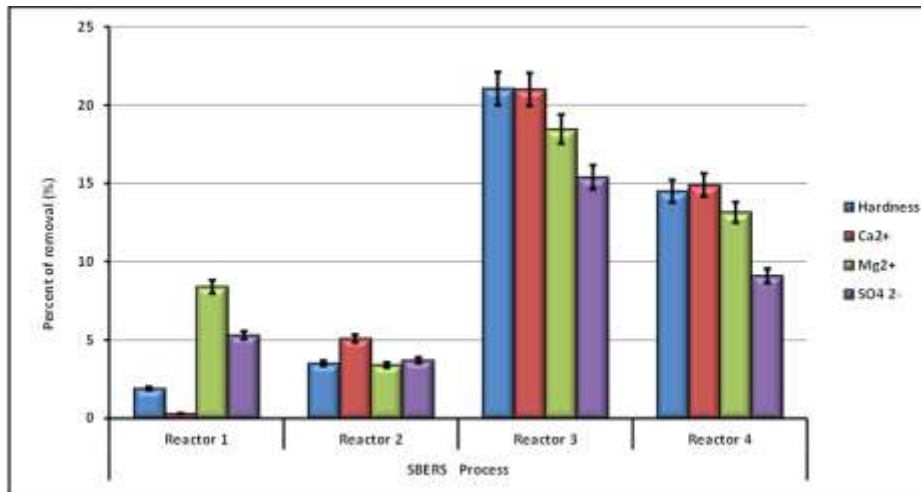
^۲ Flocon Antiscalant

^۳ Residual Fe

^۴ Residual Al

الکتروکواگولاسیون- آلومینیوم- آلومینیوم در مخزن جمع آوری به ۱۰۰ میکروگرم در لیتر رسید که بالاتر از حد مجاز به غشای اسمز معکوس (کمتر از ۵۰ میکروگرم در لیتر) می باشد و به این جهت لازم است میزان آن با استفاده از فرآیندهای مختلف به رقم مجاز رسانده شود.

شکل (۵)، در صد حذف یون های پیش سازی رسوب گرفتگی و سختی خوراک را نشان می دهد. علت بالا بودن و رشد قابل توجه حذف این عوامل در راکتورهای سوم و چهارم به دلیل تنظیم زمان بالاتر برای فرآیند الکتروکواگولاسیون در راکتورهای پایانی و تکمیل زنجیره فرآیند واکنش ها از راکتورهای قبلی بوده است. در مجموع فرآیند توام الکتروکواگولاسیون و ترسیب شیمیایی در چهار راکتور در دمای پایین ۱۱ درجه سانتی گراد سبب حذف سختی، کلسیم، منیزیم، سولفات به ترتیب ۲۹، ۳۵، ۳۰، ۳۵ درصد شده است. کارایی بالای این روش می تواند به عنوان گزینه ای برای پیش تصفیه شورابه اسمز معکوس مرحله اول به همراه تصفیه تکمیلی قبل از ورود آن به اسمز معکوس مرحله دوم مطرح باشد.



شکل (۵): حذف سختی و یون های پیش ساز رسوب گرفتگی (در واحدهای فرآیندی اسمز معکوس) از طریق الکتروکواگولاسیون چند مرحله ای (Feed Quality: TDS = 9423 mg/L, pH = 9 and temperature = 11°C)

شکل (۶)، میزان آهن آزاد شده را در مراحل مختلف الکتروکواگولاسیون و تصفیه تکمیلی را نشان می دهد.



شکل (۶)- میزان آهن آزاد شده از آب خام مراحل اول تا چهارم الکتروکواگولاسیون، کارتریج فیلتر و واحدهای غشای اسمز معکوس در پایلوت

در راستای دستیابی به محدوده مجاز آهن و آلومینیوم باقیمانده از فرآیند الکتروکواگولاسیون (استفاده از این فرآیند به عنوان پیش تصفیه یا تصفیه میانی واحد اسمز معکوس) پیشنهاد می شود در صورت عملیاتی نمودن طرح در مقیاس کامل، تصفیه میانی در قالب تصفیه هیبریدی (استفاده از فرآیند الکتروکواگولاسیون با تصفیه تکمیلی آن در مقیاس کامل) قبل از واحد غشای اسمز معکوس RO طراحی و اجرا گردد.

سناریوی هشتم: نتیجه آزمایشات بر روی پایلوت با غشای اسمز معکوس آب شبکه شهری یا آب لوله کشی^۱ (با ثابت نگه داشتن پارامترهای بهره برداری از جمله میزان بازیافت آب^۲) نشان داد برای TDS برابر ۲۶۹ mg/L تا ۴۰۰ mg/L برای pH ۷/۹، بهترین عملکرد اسمز معکوس (اسمز معکوس آب شهری) به ترتیب برابر ۹۷ تا ۹۸ درصد و حذف سختی ۹۹/۹ درصد است. نتایج این بررسی ها نشان داد غشای اسمز معکوس ویژه آب شبکه می تواند برای آب با TDS در محدوده ۱۱۰۰ میلی گرم در لیتر با کارایی بالای ۹۵ درصد مورد استفاده قرار گیرد.

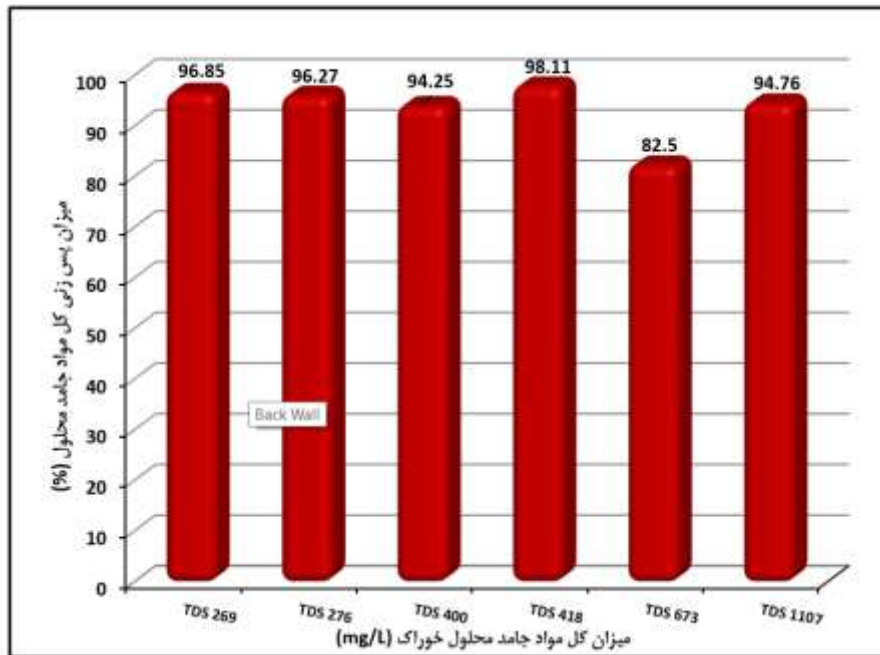
نتیجه آزمایشات بر روی اسمز معکوس پایلوت (با ثابت نگه داشتن بازیافت آب) نشان داد برای TDS برابر ۸۷۰۰ mg/L برای pH برابر ۷/۹ و دمای خوراک ۲۳ درجه سانتی گراد، عملکرد اسمز معکوس (شورابه مرحله دوم اسمز معکوس سامانه نمک زدایی) برای حذف TDS برابر ۸۲ درصد و حذف سختی ۹۴ درصد (با استفاده از غشای اسمز معکوس ویژه آب لب شور^۳ با فشار ورودی خوراک به غشا برابر ۲۰ بار) است.

همچنین مقایسه نتایج آزمایشات بر روی دماهای متفاوت خوراک ۱۰/۵ و ۲۳ درجه سانتی گراد خوراک به غشای اسمز معکوس پایلوت مشخص نمود که برای دو دمای مذکور به ترتیب برای حذف TDS برابر ۶۱ و ۸۲ درصد، حذف سختی برابر ۷۰ و ۹۳/۵ درصد، حذف کلسیم برابر ۴۱ و ۹۶ درصد و حذف منیزیم برابر ۶۰ و ۸۴/۵ درصد با حفظ میزان بازیافت آب بدست آمد. در این ارتباط به رغم افزایش TDS به میزان ۱۷۰۰ mg/L در شورابه ورودی به دلیل افزایش دمای خوراک به میزان ۱۲/۵ درجه سانتی گراد، میزان TDS، سختی، کلسیم و منیزیم به ترتیب به میزان ۲۱ و ۲۳/۵ و ۵۵ و ۲۵ درصد افزایش حذف داشته است. در مجموع این نتیجه گیری حاصل شد که دمای خوراک به عنوان عامل مهمی در کارایی عملکرد اسمز معکوس پایلوت محسوب می گردد. نتایج آزمایشات بر روی اسمز معکوس پایلوت با دو تیپ غشای اسمز معکوس ویژه آب شبکه و آب لب شور به ترتیب با فشار ورودی خوراک ۸ و ۲۰ اتمسفر به غشاء در شکل (۷) تا (۹) نشان داده شده است.

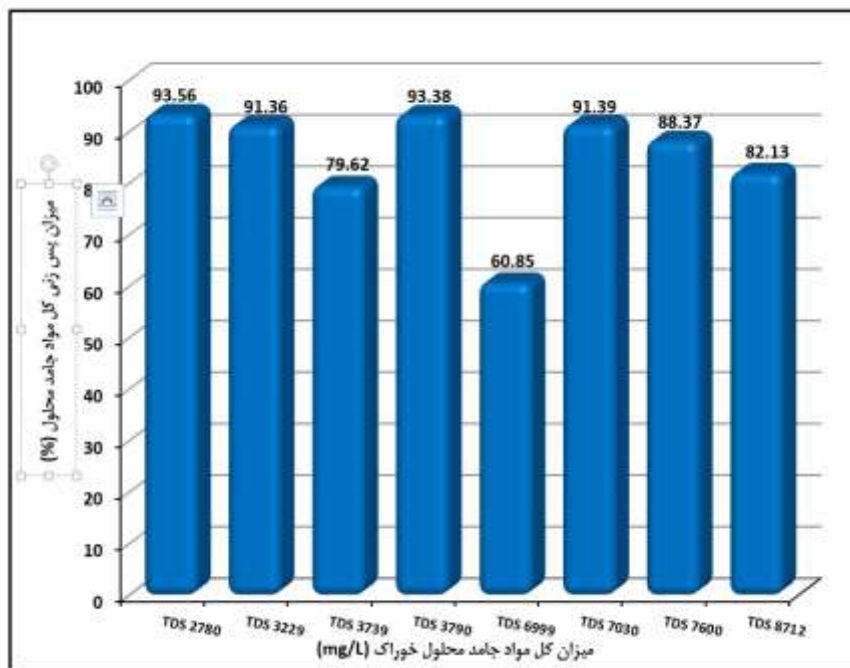
¹ RO-Tap water

² Water Recovery

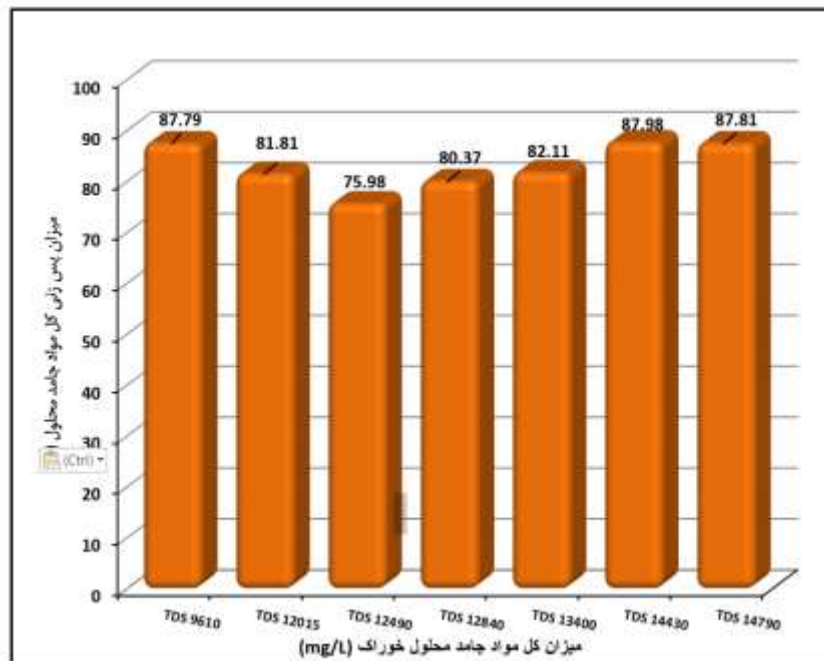
³ RO-Brackish Water



شکل (۷)-میزان حذف TDS در غشاهای اسمز معکوس پایلوت- نمونه های خوراک برداشتی از شبکه توزیع و یکی از منابع آب زیرزمینی (RO-Tap Water, pH = 7.9, Temperature = 24°C)



شکل (۸)-میزان حذف TDS در غشاهای اسمز معکوس پایلوت- نمونه های خوراک برداشتی از آب لب شور ورودی به سامانه (RO-Brackish Water, pH = 7.7, Temperature = 22°C)



شکل (۹)-میزان حذف TDS در غشاهای اسمز معکوس پایلوت- نمونه های خوراک برداشتی از شورابه سامانه (RO-Brackish Water, pH = 7.5, Temperature = 21°C)

با توجه به اینکه غشاهای مورد استفاده در پایلوت از نوع لب شور با محدوده عملکرد تعریف شده آن توسط سازنده در محدوده TDS برابر ۴۰۰۰ mg/L تا ۶۰۰۰ mg/L بوده است بنابراین میزان کارایی آن در مقایسه با آب لب شور دارای TDS برابر ۸۸ تا ۹۷۰۰ mg/L مورد آزمون کاهش یافته است به طوری که مطابق شکل (۹)، میزان حذف TDS در محدوده ۷۶ تا ۸۸ درصد است. برای تصفیه شورابه به ویژه برای شورابه مرحله دوم نیاز به غشاهای اسمز معکوس (با محدوده TDS شورابه تولیدی) با فشار بالاتر بیش از ۲۰ اتمسفر خوراک است تا به کارایی بالاتر بتوان دست یافت و به همین دلیل در مرحله دوم پژوهش، نسبت به تعویض غشاها و نصب پمپ ها با مخزن تحت فشار تصفیه آب برای پایلوت اقدام شد.

۲-۳- مشکلات و راهکارهای طرح و بهره برداری از مجموعه فرآیندهای پایلوت

۳-۲-۱- واحد SBERS

۳-۲-۱-۱- یکی از موارد مهم در عملیات الکتروکواگولاسیون، مصرف انرژی الکتریکی در SBERS است. در طرح پایلوت با انجام تحقیق و در جهت دستیابی به کارایی بالا، پارامترهای بهینه شده مذکور ارائه گردید.

۳-۲-۱-۲- یکی از موارد مهم در عملیات الکتروکواگولاسیون، اعمال جریان یکنواخت در چهار واحد الکتروکواگولاسیون است که به همین منظور، تابلوی برق دقیقاً در کنار واحد SBERS و در حداقل فاصله به فرآیند جهت اعمال جریان یکنواخت، طراحی و بهره برداری گردیده و از طریق تابلوی پارامترهای کیفی، میزان آمپر مصرفی نیز به صورت دائم پایش شد.

۳-۲-۱-۳- پدیده غیر فعال شدن الکترودها^۱ از مشکلات مرتبط با فرآیندهای الکتروشیمیایی است. با توجه به راهکارهای مختلف ارائه شده، برای راهبری از الکتروکواگولاسیون پایلوت، به منظور جلوگیری از نشست رسوبات بر روی الکترودها، نسبت به تخلیه راکتورها و پاکسازی الکترودها و راکتورها از رسوبات به صورت دوره ای اقدام شد.

شایان ذکر است موضوع استفاده از گزینه مناسب برای جلوگیری از این پدیده توسط الساهوی و همکاران^۲ (سال ۲۰۲۰) نیز مورد تاکید قرار گرفته است [۳۴]. باندارو و همکاران^۳ (سال ۲۰۲۰)، راهکار عملی و گزینه مطلوب به منظور جلوگیری از پدیده غیر فعال شدن الکترودها را عملیات نگهداری مستمر از فرآیند الکتروکواگولاسیون با تمیز کردن و رسوب زدایی از الکترودها پیشنهاد کرده اند. نتایج ارائه شده توسط این محققین نشان داد پاکسازی مکانیکی الکترودها در تصفیه خانه با فرآیند الکتروکواگولاسیون با ظرفیت ۱۰۰۰۰ L/d موجب افزایش کارایی، کاهش انرژی و کاهش مصرف الکترودها شده است [۳۵].

۳-۲-۲-۳- واحدهای فرآیند تکمیلی

۳-۲-۲-۱- واحدهای ته نشینی همراه با تزریق مواد شیمیایی، میکروفیلتراسیون و اولترافیلتراسیون

بررسی های به عمل آمده بر روی پایلوت نشان داد این سه بخش، نقش موثری در کاهش گرفتگی غشاهای اسمز معکوس داشته است. به طوری که عملکرد مطلوب این واحدها، موجب افزایش میزان آب شیرین تولیدی از اسمز معکوس پایلوت می شود.

۳-۲-۲-۲- کنترل گرفتگی غشاها به ویژه غشاهای اسمز معکوس

یکی از مشکلات غشاها، موضوع انواع گرفتگی های غشاهای اسمز معکوس است که در این خصوص، می توان با تعیین شاخص های پایداری آب، تعیین ماده و میزان تزریق ضد رسوب^۴ مناسب، تنظیم میزان بازیافت آب، ارزیابی پارامترهای مهم کیفیت آب تولیدی و شورابه، پایش مستمر وضعیت فشار و افت فشار در محفظه های فشار^۵ نسبت به کنترل وضعیت گرفتگی غشاها در سامانه نمک زدایی اقدام نمود. در پیوست (۵) و (۵-۱) موارد مختلف شامل گرفتگی^۶ و رسوب گرفتگی^۷ غشاها و نتایج حاصله از ارزیابی پارامترهای موثر کیفیت آب و شورابه در سامانه نمک زدایی و پایلوت از جمله شاخص کدورت و شاخص دانسیته سیلت^۸، شاخص مواد آلی، شاخص پایداری لانتزلیه^۹ و شاخص رایزنر^{۱۰}، ارزیابی گرفتگی غشاها با آهن و آلومینیوم و گرفتگی غشاها با سیلیکا و فلوراید ارائه شده است.

¹ passivation of the electrodes

² Elshawi et al. (2020)

³ Siva Bandaru et al. (2020)

⁴ Antiscalant

⁵ Pressure vessel

⁶ fouling

⁷ Scaling

⁸ Silt Density Index(SDI)

⁹ Langelier index

¹⁰ Rayznar index

با توجه به جزئیات پیوست (۵)، مشکل گرفتگی غشاها در سامانه و پایلوت در ارتباط با عوامل مختلف گرفتگی (بیولوژیکی، آلی، ذرات و کلوئیدی). به ویژه عوامل پیش ساز رسوب گرفتگی غشاها (کلسیم، منیزیم، سولفات و غیره) و همچنین سیلیکات و فلوراید وجود نداشته است. در ارتباط با فرآیند توام الکتروکواگولاسیون و ترسیب شیمیایی برای TDS معادل ۸۰۵۵ mg/L، به رغم بالا بودن کل مواد جامد محلول و همچنین و وضعیت pH نمونه در حد ۹، به دلیل حذف عوامل رسوب گیری، از لحاظ شاخص لائزلیه، کمی رسوبگذار و به لحاظ شاخص رایزنر هم غیر رسوبگذار است. از طرف دیگر برای نمونه شورابه با pH معادل ۴، مشخص شد به رغم بالا بودن میزان TDS برابر ۱۲۶۶۰ mg/L و میزان یون کلسیم برابر ۱۴۰۲ mg/L، وضعیت شورابه از لحاظ شاخص های پایداری به سبب پایین آمدن pH آن و اضافه شدن ماده ضد رسوب، غیر رسوبگذار است.

در مجموع می توان نتیجه گرفت مشکل رسوب گرفتگی ناشی از وضعیت کیفیت خوراک را می توان با روش های مختلف کنترل نمود. مشکل اساسی گرفتگی بخش کاتریج فیلتر، اولترافیلتر و به ویژه اسمز معکوس پایلوت، به دلیل وجود آهن آزاد باقیمانده در خوراک این واحدها بوده است. برای این منظور از روش تزریق اسید و EDTA و فلوکون و فرآیندهای ته نشینی، میکروفیلتراسیون و اولترافیلتراسیون برای حذف آهن آزاد شده باقیمانده استفاده شد.

تحقیقات انجام شده توسط ساری و همکاران^۱ (سال ۲۰۱۶) نشان داد غشای اسمز معکوس به دلیل باقیمانده ماده منعقدکننده مصرفی آلومینیوم دار در فرآیند بازیافت آب دچار گرفتگی شده که استفاده از EDTA برای رفع این مشکل پیشنهاد شده است [۳۶]. راهبردهای کنترل فولینگ در غشاهای اسمز معکوس توسط جیانگ^۲ (سال ۲۰۱۷) به صورت مروری مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است [۳۷]. بر اساس مقاله احمد و همکاران^۳ (سال ۲۰۲۰) مقادیر آهن در شکل احیاء شده^۴ و به شکل اکسید شده به ترتیب بیش از ۲ و ۰/۰۵ mg/L باعث گرفتگی غشای اسمز معکوس می شود [۳۸]. گابلیک و همکاران^۵ (سال ۲۰۰۵)، میزان کل آلومینیوم باقیمانده در خوراک غشای اسمز معکوس جهت جلوگیری از گرفتگی غشاء را رقم کمتر از ۵۰ µg/L اعلام نمودند [۳۹].

بر اساس تحقیق یوان هو^۶ و همکاران (سال ۲۰۲۲) در خصوص انتخاب مواد ضد رسوب و راهبرد کنترل رسوب گیری در غشای تقطیری تماس مستقیم^۷ بر روی خوراک آب خنک کننده تغلیظ شده قلیایی مشخص نمود که اسیدی نمودن خوراک^۸ باعث بهبود عملکرد غشاها (کنترل رسوب کربنات کلسیم) شده و اضافه کردن ماده ضد رسوب با کاهش اولیه pH (کنترل رسوب

¹ Sari et al. (2016)

² S Jiang et al (2017)

³ Ahmed et al. (2020)

⁴ Iron in reduced form (Fe²⁺)

⁵ Gabelich et al. (2005)

⁶ Yuan Hu et al. (2022)

⁷ Direct Contact Membrane Distillation (DCMD)

⁸ Acidization

سولفات کلسیم) و شستشوی غشاها توسط آب دیونیزه نیز سبب افزایش کارایی فرآیند می گردد. نتایج آزمایشات نشان داد EDTA در مقایسه با مواد آنتی اسکالانت تجاری، عملکرد عالی ضد رسوب^۱ داشته و مبادله کننده و نرم کننده های شیمیایی (فرآیند پیش تصفیه برای حذف کلسیم و منیزیم)، هم باعث بهبود عملکرد غشاها می شوند. با توجه به بررسی ها در ارتباط با هزینه مواد شیمیایی و مواد ضد رسوب (EDTA و آنتی اسکالانت تجاری)، استفاده از این مواد به عنوان بهترین راهبرد برای کنترل عوامل رسوبگذار پیشنهاد گردید [۴۰].

در مجموع، دستاوردهای این پژوهش در خصوص استفاده همزمان ماده EDTA با ماده ضد رسوب فلوکون (کنترل موثر آهن محلول و غیر محلول بر اساس مشخصات سازنده) با تنظیم pH و مطابقت آن با نتایج سایر پژوهشگران، این موضوع را اثبات می کند که گزینه مذکور به عنوان راهکار اساسی در بهبود عملکرد حذف عوامل رسوبگذار غشاها و کاهش آنتی اسکالانت مصرفی در سامانه های نمک زدایی آب محسوب می شود.

۳-۳-۳-۳-۳ ارائه راهکار عملیاتی برای کمینه نمودن شورابه دفعی طرح توسعه سامانه نمک زدایی تحت بهره برداری

۳-۳-۱-۳-۳-۱ بررسی فنی و زیست محیطی

با توجه به ظرفیت موجود سامانه نمک زدایی آب مورد مطالعه به ظرفیت $5000 \text{ m}^3/\text{d}$ ، ظرفیت فاز توسعه با لحاظ نیازهای آب در منطقه برای سناریوی با ظرفیت $20000 \text{ m}^3/\text{d}$ و به ترتیب با هدفگذاری برای تامین آب شرب و آب صنعتی یا آب شرب و آبیاری محصولات کشاورزی در نظر گرفته شده است که به صورت فرآیندهای ذیل پیشنهاد می گردد:

الف- گزینه اول: استفاده از دو مرحله اسمز معکوس مشابه فرآیند موجود سامانه نمک زدایی تحت بهره برداری.

ب- گزینه دوم: استفاده از SBERS به عنوان تصفیه میانی واحدهای اسمز معکوس مرحله اول و مرحله دوم.

در این گزینه با توجه به نتایج پژوهش، لازم است فرآیند الکتروکواگولاسیون با فرآیند تصفیه تکمیلی در طرح توسعه سامانه نمک زدایی در نظر گرفته شود تا مشکل ناشی از گرفتگی غشاها با آهن و آلومینیوم ایجاد نشود.

ج- گزینه سوم: استفاده از واحد اسمز معکوس یک مرحله ای و فرآیند SBERS به صورت موازی و اختلاط شورابه واحد اسمز معکوس با آب تصفیه شده از الکتروکواگولاسیون.

بر اساس ارزیابی صورت گرفته شده، آب تولیدی از دو مسیر فرآیندی برای مصرف شرب (بخش فرآیند اسمز معکوس) و مصرف صنعتی یا کشاورزی (بخش فرآیند الکتروکواگولاسیون و اختلاط آب خروجی از آن با شورابه اسمز معکوس) مطابق تصویر (۱) در پیوست (۳) استفاده نمود. تحقیقی توسط سانچز و همکاران^۲ (سال ۲۰۱۵) در خصوص استفاده از شورابه سامانه نمک زدایی درون سرزمینی برای پرورش ماهی (تیلاپیا)، کشت اسپیرولینا و آبیاری علوفه ای هالوفیت و محصولات زراعی انجام شده است.

¹ excellent scale-inhibition performance

² Sánchez et al. 2015

بعلاوه نتایج این تحقیق مشخص نمود که گیاه آفتابگردان گونه هلیانثوس^۱ با ارزش اقتصادی برای آب دارای شوری mS/cm ۰/۵ تا ۵ mS/cm^۲ و به علاوه گیاه آفتابگردان^۲ به صورت کشت هیدروپونیک، قابلیت آبیاری با شوره ۰/۵ mS/cm تا ۱۶/۴ را دارد [۴۱]. استفاده از شوره سامانه نمک زدایی RO برای کشت هیدروپونیک توسط جیمز-زیاسا^۳ (سال ۲۰۲۲) مورد بررسی قرار گرفته است که از جمله اهداف آن می توان به جلوگیری از تخریب خاک به دلیل وجود بالای یون ها با این روش اشاره نمود [۴۲].

در ارتباط با استفاده آب تولیدی از طرح توسعه سامانه در صنعت، امکان استفاده از آب تولیدی حاصل از تصفیه شوره وجود دارد. برای استفاده از آب تولیدی از اختلاط آب فرآیند الکتروکواگولاسیون و شوره اسمز معکوس (گزینه سوم) با نسبت ۶۷ و ۳۳ درصد برای آبیاری، سه فاکتور مهم از جمله میزان هدایت الکتریکی و میزان جذب سدیم SAR و میزان درصد سدیم مطابق جدول (۲) در پیوست (۶) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد برای آبیاری گیاهان شور پسند (کشت پسته و سایر گیاهان) مناسب است. بر اساس نتایج تحقیق دهقانی و همکاران^۴ (سال ۲۰۱۶) روش آبیاری قطره ای زیر سطحی^۵ را می توان برای آبیاری آب های شور با در نظر گرفتن الزامات (آبیاری سطحی در پایان دوره آبیاری و سایر) بکار برد [۴۳]. روش آبیاری قطره ای زیر سطحی هوادهی شده با سه درصد کاهش مصرف آب برای پسته از جمله نتایج تحقیق و پیشنهاد سیفی و همکاران^۶ (سال ۲۰۲۰) است [۴۴].

در صورتی که از گزینه تولید آب کشاورزی از طریق جریان دو فرآیند موازی الکتروکواگولاسیون با اسمز معکوس استفاده شود به دلیل اینکه از آب تولیدی از الکتروکواگولاسیون به عنوان خوراک اسمز معکوس استفاده نمی شود به این دلیل، مشکل رسوب گرفتگی برای این فرآیند به خصوص به دلیل یک مرحله ای شدن واحد اسمز معکوس وجود ندارد. بعلاوه به سبب یک مرحله ای شدن RO، مصرف آنتی اسکالانت و مصرف انرژی به دلیل تغلیظ نشدن شوره در مقایسه با استفاده از فرآیند دو مرحله ای اسمز معکوس، کاهش یافته که این موضوع از لحاظ زیست محیطی و حتی هزینه های بهره برداری طرح از اهمیت زیادی برخوردار است. در مجموع، استفاده از گزینه سوم جهت آبیاری محصولات شور پسند بر اساس روش های علمی برای آبیاری، به عنوان گزینه برتر برای استفاده از آب تولیدی فرآیند به لحاظ فنی و زیست محیطی (با بیشینه شدن میزان آب تولیدی و کمینه نمودن شوره دفعی و تلفات آب) محسوب می گردد.

¹ Helianthus annuus L.

² Red Sun variety

³ David Jiménez-Ariasa et al. 2022

⁴ Dehghanisani, H et al. 2016

⁵ Sub-Surface Drip Irrigation

⁶ Aerated Subsurface Drip Irrigation

⁷ Seifi et al. 2020

۲-۳-۳- بررسی اقتصادی

پس از ارزیابی فنی و زیست محیطی، لازم است گزینه‌ها از لحاظ اقتصادی با همدیگر مقایسه شوند. با توجه به اینکه، شرکت‌های خصوصی برای طرح‌های سامانه نمک زدایی آب در کشور که دارای طرح توجیهی و شاخص‌های اقتصادی برجسته و مناسب باشد سرمایه‌گذاری می‌کنند به این جهت در این طرح پژوهشی هم از مدل‌های مالی برای مقایسه سودآوری طرح‌ها و بهره‌برداری فاز دوم توسعه نمک زدایی مورد مطالعه با مالکیت بخش خصوصی استفاده شد. بر اساس نتایج مدل بر طبق سه شاخص ارزش فعلی خالص^۱ (با بیشترین رقم) و نرخ بازده داخلی^۲ (با بیشترین رقم) و دوره بازگشت سرمایه^۳ (با کمترین رقم یا در صورت بالا بودن دو شاخص قبلی با یکسان بودن دوره)، شرکت‌های خصوصی تصمیم به سرمایه‌گذاری در طرح می‌کنند. برای فاز دوم توسعه نمک زدایی آب لب شور مورد مطالعه، با توجه به هزینه‌های مختلف در احداث و بهره‌برداری و بر اساس شاخص‌های مطرح در ارزیابی اقتصادی، آنالیز مدل مالی برای سه گزینه مطابق پیوست (۷) و (۷-۱) انجام شد. نتایج نشان داد گزینه سوم به عنوان گزینه برتر از لحاظ اقتصادی و دارای توجیه برای سرمایه‌گذاری است. با اطلاعات حاصل از این پژوهش، می‌توان برآورد نمود با تولید آب حاصل از تصفیه آب لب شور و اختلاط آن با شورابه به میزان m^3/d ۱۰۰۰۰، کشاورزان منطقه می‌توانند حدود یک هکتار را تحت پوشش کشت برده و با لحاظ همین سیاستگذاری، سود خالص ۵۳۴/۶ میلیون ریال (۱۷۸۲ دلار) حاصل از فروش محصول (به عنوان نمونه - پسته) را کسب کنند. بر اساس تحقیق انجام شده توسط پلارپالی و همکاران (سال ۲۰۱۳)^۴، هزینه پمپاژ آب از منابع زیرزمینی، رقم یک تا ۲۰ سنت به ازای هر مترمکعب آب اعلام شده است [۴۵]. سایر محققین کشور هم موضوع اقتصاد آب در کشاورزی را مورد بررسی قرار داده‌اند [۴۶-۴۸]. با توجه به اینکه در مدل آنالیز مالی این پژوهش، تعرفه آب کشاورزی ۱۲ سنت به ازای هر مترمکعب آب در نظر گرفته شده است پس با محدوده هزینه تامین آب ارائه شده توسط سایر محققین مطابقت دارد.

در مجموع، بر اساس نتایج پژوهش در مقیاس پایلوت و ارزیابی فنی و زیست محیطی و تهیه مدل مالی سه گزینه مورد بررسی، مشخص گردید گزینه سوم به عنوان گزینه برتر و منتخب است.

۴- جمع بندی نتایج

موضوع تصفیه شورابه سامانه‌های نمک زدایی اسمز معکوس به ویژه برای سامانه‌های درون سرزمینی با لحاظ حفظ محیط زیست و پیشگیری از آلودگی منابع و همچنین نیاز به بازیافت هرچه بیشتر آب، به ویژه برای سامانه نمک زدایی مورد مطالعه به عنوان یک ضرورت اساسی محسوب می‌شود. در طرح پژوهشی انجام شده، عملکرد فرآیند الکتروکواگولاسیون چهار مرحله‌ای

¹ Net present value: NPV

² Internal Rate of Return :IRR

³ Payback Period :PP

⁴ Plappally AK et al.2013

SBERS بر روی نمونه های واقعی شامل آب شبکه توزیع، آب لب شور و نمونه های شورابه برداشتی از مرحله اول و دوم سامانه نمک زدایی آب در مقیاس پیلوت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد عملکرد الکتروکواگولاسیون چهار مرحله ای SBERS جهت حذف TDS و سختی در جریان مستقیم بیش از جریان متناوب و برای الکترودهای Al-Al بیش از الکترودهای Al-Fe است. کارایی این فرآیند برای حذف TDS آب شبکه شهری با TDS کمتر از ۴۵۰ mg/L، حداقل و بدون کارایی و برای آب لب شور با TDS برابر ۳۷۳۴ mg/L برابر ۸۲ درصد است. بیشترین حذف عوامل پیش ساز رسوب گرفتگی (یون های کلسیم و منیزیم و سولفات و سایر) با عملیات همزمان الکتروکواگولاسیون و رسوب دهی شیمیایی برای نمونه های برداشتی از شورابه مرحله دوم اسمز معکوس با میزان TDS برابر ۹۴۲۳ mg/L با pH برابر ۹ حاصل شد. به این ترتیب روش الکتروکواگولاسیون برای حذف TDS و فرآیند توأم الکتروکواگولاسیون و رسوب دهی شیمیایی برای حذف عوامل پیش ساز رسوب گرفتگی در تصفیه شورابه سامانه نمک زدایی مورد مطالعه کاربرد دارند. لکتروکواگولاسیون به عنوان روش پیش تصفیه یا تصفیه میانی (بین مرحله اول و دوم اسمز معکوس)، دارای پتانسیل ها و محدودیت های مختلفی است. از جمله پتانسیل های این روش، کارایی مناسب برای تصفیه شورابه و همچنین حذف عوامل پیش ساز رسوب گرفتگی غشاهای اسمز معکوس (روش همزمان الکتروکواگولاسیون با رسوب دهی شیمیایی متعارف با کمترین آمپر مصرفی به میزان یک آمپر برای هر راکتور) می باشد که از نتایج آن می توان به کاهش مصرف آنتی اسکالانت و افزایش بازیافت آب و همچنین کاهش مصرف انرژی (به دلیل یک مرحله ای شدن مدول غشای اسمز معکوس) اشاره کرد.

از جمله چالش های کاربرد الکتروکواگولاسیون پیلوت می توان به افزایش میزان آهن و آلومینیوم به دلیل آزاد شدن در فرآیند (میزان آهن محلول ۱/۸ میلی گرم در لیتر و آلومینیوم برابر ۱۰۰ میکروگرم در لیتر در آب خروجی از مخزن ته نشینی) اشاره نمود. استفاده از EDTA و فلوکون (به عنوان آنتی اسکالانت) به همراه اضافه کردن اسید (کاهش pH به ۶/۴)، سبب کاهش آهن باقیمانده به میزان ۵۳ درصد (ایجاد کمپلکس آهن با EDTA) شد. بررسی های حاصله این تحقیق نشان داد فرآیند الکتروکواگولاسیون چهار مرحله ای SBERS با کاهش عوامل پیش ساز رسوب گرفتگی، می تواند به عنوان تصفیه میانی (فیما بین واحد اسمز معکوس مرحله اول با اسمز معکوس مرحله دوم) عمل نماید که در این خصوص، نیاز به تصفیه تکمیلی برای حذف آهن یا آلومینیوم اضافی آب مخزن ته نشینی قبل از هدایت آن به واحد اسمز معکوس است.

در مجموع، نوآوری اصلی این پژوهش، "دستیابی به فرآیند سبز با تصفیه شورابه سامانه های نمک زدایی آب لب شور اسمز معکوس دو مرحله ای با کمینه شدن میزان شورابه دفعی (هدف گذاری جهت روش با حداقل پساب MLD) و به حداقل رساندن تلفات آب از یک طرف و کارایی بالا برای تولید آب برای مصارف شرب و صنعت یا شرب و کشاورزی (محصولات شور پسند) است. از سایر موارد مهم نوآوری در این پژوهش می توان به طراحی و ساخت وبهره برداری از چهار راکتور ناپیوسته به صورت

متوالی (SBERs) به جای یک واحد الکتروکواگولاسیون در مقیاس پایلوت با کمترین جریان برق مصرفی (یک آمپر برای هر راکتور با استفاده از نمونه های واقعی و با دانسیته جریان $1/6 \text{ mA/Cm}^2$ با ولتاژ اعمالی ۱۲ ولت) و امکان استفاده از روش توام الکتروکواگولاسیون و ترسیب شیمیایی (بالا بردن pH) برای حذف عوامل رسوب گرفتگی از خوراک و استفاده از EDTA و ماده ضد رسوب با تنظیم pH برای حذف آهن آزاد شده باقیمانده از عملیات الکتروکواگولاسیون اشاره نمود.

به منظور ارائه راهکار علمی و کاربردی بر اساس دستاوردهای این تحقیق و با بررسی های فنی، ریست محیطی و اقتصادی بر روی سه گزینه جهت طرح توسعه سامانه نمک زدایی آب لب شور مورد مطالعه، مشخص شد گزینه سوم (تصفیه آب لب شور توسط دو فرآیند موازی اسمز معکوس یک مرحله ای و الکتروکواگولاسیون و اختلاط شورابه RO با آب خروجی از فرآیند SBERs)، از لحاظ فنی و زیست محیطی به دلیل کمترین میزان شورابه دفعی و به حداقل رساندن تلفات آب و همچنین کاهش میزان مصرف انرژی و ماده ضد رسوب (حذف مرحله دوم اسمز معکوس و کاهش درصد تغلیظ شورابه) به عنوان فرآیند سبز است. با آنالیز مدل مالی هم مشخص شد این گزینه به دلیل دارا بودن بیشترین شاخص ارزش فعلی خالص و نرخ بازده داخلی (به رغم دوره بازگشت سرمایه مساوی با گزینه اول)، هم به عنوان گزینه برتر ارزیابی شد و لذا در جمع بندی، روش سوم به عنوان گزینه منتخب جهت طرح توسعه سامانه نمک زدایی آب لب شور پیشنهاد می گردد.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از حمایت های شرکت آب و فاضلاب استان البرز صمیمانه تشکر می نمایند.

۶-مراجع

- [1] Dhakal, N., Salinas-Rodriguez, S. G., Hamdani, J., Abushaban, A., Sawalha, H., Schippers, J. C., & Kennedy, M. D. (2022). Is desalination a solution to freshwater scarcity in developing countries? *Membranes*, 12(4), 381.
- [2] Fayyaz, S., Masjedi, S. K., Kazemi, A., Khaki, E., Moeinaddini, M., & Olsen, S. I. (2023). Life cycle assessment of reverse osmosis for high-salinity seawater desalination process: Potable and industrial water production. *Journal of Cleaner Production*, 382, 135299.
- [3] Ahdab, Y. D., & Lienhard, J. H. (2021). Desalination of brackish groundwater to improve water quality and water supply. In *Global Groundwater* (pp. 559-575).
- [4] Feria-Díaz, J. J., Correa-Mahecha, F., López-Méndez, M. C., Rodríguez-Miranda, J. P., & Barrera-Rojas, J. (2021). Recent desalination technologies by hybridization and integration with reverse osmosis: A review. *Water*, 13(10), 1369.
- [5] Rezakazemi, M., Khajeh, A., & Mesbah, M. (2018). Membrane filtration of wastewater from gas and oil production. *Environmental Chemistry Letters*, 16, 367-388.
- [6] Rezakazemi, M., Dashti, A., Riasat Harami, H., & Hajilari, N. (2018). Fouling-resistant membranes for water reuse. *Environmental Chemistry Letters*, 16, 715-763.

- [7] Rezakazemi, M. (2018). CFD simulation of seawater purification using direct contact membrane desalination (DCMD) system. *Desalination*, 443, 323-332.
- [8] Tofighy, M. A., & Mohammadi, T. (2021). Membrane Fouling in Desalination. *Sustainable Materials and Systems for Water Desalination*, 39-52.
- [9] Rezaei, L., Dehghani, M., Hassani, A. H., & Alipour, V. (2020). Seawater reverse osmosis membrane fouling causes in a full scale desalination plant; through the analysis of environmental issues: raw water quality. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 7(2), 119-126.
- [10] Pearson, J. L., Michael, P. R., Ghaffour, N., & Missimer, T. M. (2021). Economics and energy consumption of brackish water reverse osmosis desalination: innovations and impacts of feedwater quality. *Membranes*, 11(8), 616.
- [11] Panagopoulos, A., & Haralambous, K. J. (2020). Environmental impacts of desalination and brine treatment-Challenges and mitigation measures. *Marine Pollution Bulletin*, 161, 111773.
- [12] Anders, C. R., SantosFernandes, C., da Silva Dias, N., da Silva Gomes, J. W., de Souza Melo, M. R., de Souza, B. G. A., ... & de Sousa Junior, F. S. (2020). Environmental impacts of reject brine disposal from desalination plants. *Desalination and Water Treatment*, 181, 17-26.
- [13] Al-Faifi, H., Al-Omran, A. M., Nadeem, M., El-Eter, A., Khater, H. A., & El-Maghraby, S. E. (2010). Soil deterioration as influenced by land disposal of reject brine from Salbukh water desalination plant at Riyadh, Saudi Arabia. *Desalination*, 250(2), 479-484.
- [14] Rioyo, J., Aravinthan, V., Bundschuh, J., & Lynch, M. (2017). A review of strategies for RO brine minimization in inland desalination plants. *Desalination and Water Treatment*, 90, 110-123.
- [15] Gude, V. G. (2016). Desalination and sustainability—an appraisal and current perspective. *Water research*, 89, 87-106.
- [16] De Buren, L., & Sharbat, A. (2015). Inland Desalination and Brine Management: Salt Recovery and Beneficial Uses of Brine, *In World Environmental and Water Resources Congress 2015* (pp. 1219-1230).
- [17] Panagopoulos, A., & Haralambous, K. J. (2020). Minimal Liquid Discharge (MLD) and Zero Liquid Discharge (ZLD) strategies for wastewater management and resource recovery—Analysis, challenges and prospects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104418.
- [18] Semblante, G. U., Lee, J. Z., Lee, L. Y., Ong, S. L., & Ng, H. Y. (2018). Brine pre-treatment technologies for zero liquid discharge systems. *Desalination*, 441, 96-111.
- [19] Giwa, A., Dufour, V., Al Marzooqi, F., Al Kaabi, M., & Hasan, S. W. (2017). Brine management methods: Recent innovations and current status. *Desalination*, 407, 1-23.
- [20] Cipolletta, G., Lancioni, N., Akyol, Ç, Eusebi, A. L., & Fatone, F. (2021). Brine treatment technologies towards minimum/zero liquid discharge and resource recovery: State of the art and techno-economic assessment. *Journal of Environmental Management*, 300, 113681.

- [21] Garcia-Segura, S., Eiband, M. M. S., de Melo, J. V., & Martínez-Huitle, C. A. (2017). Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 801, 267-299.
- [22] Hakizimana, J. N., Gourich, B., Vial, C., Drogui, P., Oumani, A., Naja, J., & Hilali, L. (2016). Assessment of hardness, microorganism and organic matter removal from seawater by electrocoagulation as a pretreatment of desalination by reverse osmosis. *Desalination*, 393, 90-101.
- [23] Almukdad, A., Hafiz, M., Yasir, A. T., Alfahel, R., & Hawari, A. H. (2021). Unlocking the application potential of electrocoagulation process through hybrid processes. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101956.
- [24] Kavitha, J., Rajalakshmi, M., Phani, A. R., & Padaki, M. (2019). Pretreatment processes for seawater reverse osmosis desalination systems-A review. *Journal of Water Process Engineering*, 32, 100926.
- [25] Berkani, I., Belkacem, M., Trari, M., Lopicque, F., & Bensadok, K. (2019). Assessment of electrocoagulation based on nitrate removal, for treating and recycling the Saharan groundwater desalination reverse osmosis concentrate for a sustainable management of Albién resource. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(2), 102951.
- [26] Ashraf, S. N., Rajapakse, J., Dawes, L. A., & Millar, G. J. (2019). Electrocoagulation for the purification of highly concentrated brine produced from reverse osmosis desalination of coal seam gas associated water. *Journal of Water Process Engineering*, 28, 300-310.
- [27] Sefatjoo, P., Moghaddam, M. R. A., & Mehrabadi, A. R. (2020). Evaluating electrocoagulation pretreatment prior to reverse osmosis system for simultaneous scaling and colloidal fouling mitigation: Application of RSM in performance and cost optimization. *Journal of Water Process Engineering*, 35, 101201.
- [28] Mousazadeh, M., Naghdali, Z., Al-Qodah, Z., Alizadeh, S. M., Niaragh, E. K., Malekmohammadi, S. & Emamjomeh, M. M. (2021). A systematic diagnosis of state of the art in the use of electrocoagulation as a sustainable technology for pollutant treatment: An updated review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101353.
- [29] Bazrafshan, E., Mohammadi, L., Ansari-Moghaddam, A., & Mahvi, A. H. (2015). Heavy metals removal from aqueous environments by electrocoagulation process—a systematic review. *Journal of environmental health science and engineering*, 13, 1-16.
- [30] Mazarji, M., Esmaili, H., Bidhendi, G. N., Mahmoodi, N. M., Minkina, T., Sushkova, S. & Bhatnagar, A. (2021). Green synthesis of reduced graphene oxide-CoFe₂O₄ nanocomposite as a highly efficient visible-light-driven catalyst in photocatalysis and photo Fenton-like reaction. *Materials Science and Engineering: B*, 270, 115223.

- [31] Esmailpour, M., Ghahraman Afshar, M., & Kazemnejadi, M. (2023). Preparation, characterization, and adsorption properties of bis-salophen schiff base ligand immobilized on Fe₃O₄@SiO₂ nanoparticles for removal of lead (II) from aqueous solutions. *Applied Chemistry*, 18(66), 125-146 [In Persian].
- [32] Abbasi, N., Aberoomand Azar, P., Tehrani, M. S., & Mokhtari Aliabad, J. (2023). Study the absorption process of cadmium ions by Fe₃O₄/L-methionine/graphene oxide and graphene Aerogel nanocomposites from aqueous environments. *Applied Chemistry* [In Persian].
- [33] Gholami, N., & Mahdavi, H. (2023). Synthesis and application of graphene oxide and sulfonated graphene oxide nanoparticles for using in nanofiltration membranes polyether sulfone. *Journal of Applied Chemistry*, 18(66), 225-244 [In Persian].
- [34] Elsahwi, E. S., Ruda, H. E., & Dawson, F. P. (2020). Principles and design of an integrated magnetics structure for electrochemical applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(5), 5645-5655.
- [35] Bandaru, S. R., Roy, A., Gadgil, A. J., & van Genuchten, C. M. (2020). Long-term electrode behavior during treatment of arsenic contaminated groundwater by a pilot-scale iron electrocoagulation system. *Water Research*, 175, 115668.
- [36] Sari, M. A., & Chellam, S. (2016). Reverse osmosis fouling during pilot-scale municipal water reuse: Evidence for aluminum coagulant carryover. *Journal of Membrane Science*, 520, 231-239.
- [37] Jiang, S., Li, Y., & Ladewig, B. P. (2017). A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies. *Science of the total environment*, 595, 567-583.
- [38] Ahmed, J., Jamal, Y., & Shujaatullah, M. (2020). Recovery of cooling tower blowdown water through reverse osmosis (RO): review of water parameters affecting membrane fouling and pretreatment schemes. *Desalin. Water Treat*, 189, 9-17.
- [39] Gabelich, C. J., Ishida, K. P., Geringer, F. W., Evangelista, R., & Kalyan, M. (2006). Control of residual aluminum from conventional treatment to improve reverse osmosis performance. *Desalination, performance. Desalination*, 190(1-3), 147-160.
- [40] Hu, Y., Xu, Y., Xie, M., Huang, M., & Chen, G. (2022). Characterization of scalants and strategies for scaling mitigation in membrane distillation of alkaline concentrated circulating cooling water. *Desalination*, 527, 115534.
- [41] Sánchez, A. S., Nogueira, I. B. R., & Kalid, R. A. (2015). Uses of the reject brine from inland desalination for fish farming, Spirulina cultivation, and irrigation of forage shrub and crops. *Desalination*, 364, 96-107.
- [42] Jiménez-Arias, D., Sierra, S. M., García-Machado, F. J., García-García, A. L., Borges, A. A., & Luis, J. C. (2022). Exploring the agricultural reutilisation of desalination reject brine from reverse osmosis technology. *Desalination*, 529, 115644.

- [43] Dehghanisani, H., & Bozorgi, F. H. A., (2016). Improvement in sub-surface drip irrigation Pistachio under saline water use, *2nd World Irrigation Forum (WIF2)*, Chiang Mai, Thailand.
- [44] Seifi, A., & Mirlatifi, M. (2020). Irrigation Water Use Efficiency and Yield of Pistachio under Aerated Subsurface Drip Irrigation System. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 22(6), 1655-1670.
- [45] Plappally, A. K., & Lienhard, J. H. (2013). Costs for water supply, treatment, end-use and reclamation. *Desalination and Water Treatment*, 51(1-3), 200-232.
- [46] Tahamipour, M., Kalashami, M. K., & Chizari, A. (2015). Irrigation water pricing in Iran: the gap between theory and practice. *International Journal of Agricultural Management and Development (IJAMAD)*, 5(1047-2017-1608), 109-116.
- [47] Mobasheri, M. H., Hosseini-Yekani, S. A., & Amirnejad, H. (2019), Effect of Water Market Development and Improvement of Irrigation Technology on Farmers' Cropping Pattern and Income (Hashtgerd Plain, Alborz Province), *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research (IJAEDR)*, 50(4).
- [48] Mohseni, S., Zare Mehrjerdi, M. R., Abdolahi Ezzatabadi, M., & Mehrabi Boshrahadi, H. (2022). Irrigation water demand management with emphasis on pricing policy. *Water Policy*, 24(7), 1095-1108.

