

Research Paper

مقاله پژوهشی

Performance Evaluation of Ceramic  
Membranes in the Pre-treatment of Reverse  
Osmosis for the Removal of Suspended  
Solids and Organic Matter from Well Water

Hannaneh Estabar<sup>1</sup> and Mohammad Saleh  
Shafeeyan<sup>2\*</sup>

1- M.Sc., Department of Chemical Engineering,  
Faculty of Engineering, Golestan University, Aliabad  
Katoul, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Chemical  
Engineering, Faculty of Engineering, Golestan  
University, Aliabad Katoul, Iran.

\* Corresponding Author, Email:  
[ms.shafeeyan@gmail.com](mailto:ms.shafeeyan@gmail.com)

Received: 24/06/2024

Revised: 07/08/2024

Accepted: 21/08/2024

© IWWA

Abstract

This study evaluates the effectiveness of ceramic membranes in the pre-treatment of Reverse Osmosis (RO) systems for the removal of suspended solids and organic matter from well water. Initially, the Silt Density Index (SDI) was measured without chemical injection, using only a multimedia filter containing activated carbon to assess the quality of the feed water entering the RO unit. This resulted in an SDI value of 4.9, exceeding the threshold of 3, which indicates poor water quality that could elevate fouling potential and reduce the lifespan of the RO unit. A combined pre-treatment strategy, comprising aeration, ferric chloride injection, extended retention time in the sedimentation basin, and final filtration through a ceramic membrane with a pore size of 0.1 microns, successfully reduced the SDI to 0.1. This approach significantly lowered the iron content from 0.11 to 0.05 ppm, Chemical Oxygen Demand (COD) from 35 to 29.78 ppm, Biological Oxygen Demand (BOD) from 15.8 to 10.58 ppm, Total Suspended Solids (TSS) from 117 to 1 ppm, and turbidity from 15 to 0.5 NTU.

**Keywords:** Reverse osmosis; Ceramic membrane; Silt density index, Turbidity index, Well water

ارزیابی عملکرد غشای سرامیکی در پیش تصفیه  
اسمز معکوس برای حذف ذرات معلق و مواد آلی از  
آب چاه

حنانه اصطبار<sup>۱</sup> و محمد صالح شفیعیان<sup>۲\*</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده  
مهندسی، دانشگاه گلستان، علی‌آباد کتول، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه گلستان،  
علی‌آباد کتول، ایران.

\* نویسنده مسئول، ایمیل: [ms.shafeeyan@gmail.com](mailto:ms.shafeeyan@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۴

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۳/۰۵/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۳۱

© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

در این مقاله عملکرد غشای سرامیکی مورد استفاده در پیش تصفیه اسمز معکوس (RO) برای حذف ذرات معلق و مواد آلی موجود در آب چاه بررسی شد. در ابتدا به منظور ارزیابی کیفیت آب خام ورودی به RO، شاخص گرفتگی فیلترهای اسمز معکوس "شاخص چگالی سیلت (SDI)"<sup>۲</sup>، بدون تزریق هیچ‌گونه ماده شیمیایی و فقط با عبور از فیلتر چندبستری حاوی کربن فعال محاسبه شد که مقدار ۴/۹ به دست آمد. بیشتر بودن این شاخص از ۳ به منزله نامناسب بودن شرایط آب ورودی و افزایش پتانسیل ایجاد رسوب و کاهش طول عمر واحد اسمز معکوس است. استفاده از پیش تصفیه چند مرحله‌ای شامل هوادهی، تزریق کلرید فریک، افزایش زمان ماند در حوضچه‌ی ته‌نشینی و در نهایت عبور از غشای سرامیکی با اندازه منافذ ۰/۱ میکرون میزان SDI را به ۰/۱ کاهش داد. با استفاده از این روش میزان آهن موجود در آب از ۰/۱۱ به ۰/۰۵، مقدار اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD)<sup>۳</sup> از ۳۵ به ۲۹/۷۸، میزان اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی (BOD)<sup>۴</sup> از ۱۵/۸ به ۱۰/۵۸، مقدار کل مواد معلق (TSS)<sup>۵</sup> از ۱۱۷ به ۱ ppm و میزان کدورت از ۱۵ به ۰/۵ NTU<sup>۶</sup> کاهش یافت.

**کلمات کلیدی:** اسمز معکوس، غشای سرامیکی، شاخص SDI، شاخص کدورت، آب چاه.

روش اخیر (پیش‌تصفیه غشایی RO) مزایای بسیاری نسبت به سایر روش‌های مرسوم پیش‌تصفیه دارند. با این حال، انرژی مورد نیاز و هزینه سرمایه‌گذاری در آن‌ها به مراتب بیشتر است. با استفاده از فناوری پیش‌تصفیه غشایی امکان تولید آب صنعتی با  $SDI < 2$  و کدورت تا کمتر از  $0.5$  NTU فراهم می‌شود (Greenlee et al., 2009). با در نظر گرفتن مشکلات عملیاتی ناشی از نامطلوب بودن کیفیت آب ورودی به این واحدها و پرهزینه بودن شیرین‌سازی آب بی‌کیفیت و نیاز اساسی به وجود تأسیسات پیش‌تصفیه ویژه، استفاده از غشاهای سرامیکی به دلیل ماندگاری بالا، پایداری حرارتی و مکانیکی، مقاومت در برابر باکتری‌ها، قابلیت بک‌فلاشینگ و سهولت در تمیز کردن می‌تواند انتخاب مناسبی برای استفاده به‌عنوان پیش‌تصفیه در مقایسه با سایر روش‌های متداول باشد.

امروزه غشاهای سرامیکی در زمینه‌هایی مانند محیط‌زیست و انرژی بسیار مورد توجه هستند. در واقع، بسته به ماهیت اکسیدی یا غیر اکسیدی، ساختار متخلخل و بلورینگی آن‌ها، در کاربردهای مختلف صنعتی و جداسازی و تصفیه جامد و گاز استفاده می‌شوند. در مقایسه با انواع غشاهای اکسیدی، غشاهای سیلیکون کربید (SiC) به دلیل برخورداری از چندین قابلیت متفاوت برتری ویژه‌ای دارند. از جمله فوق‌العاده آب‌دوست هستند و با کاهش زاویه تماس با آب، نفوذپذیری مناسبی ارائه می‌دهند. تحمل اختلاف فشار در محیط‌های بسیار خشن و تهاجمی که عملاً همه اکسیدها در این شرایط ناکارآمد هستند و همچنین نفوذپذیری قابل تنظیم که با اهداف کاربردی خاص مطابقت داشته باشد از جمله قابلیت‌هایی هستند که مورد توجه پژوهشگران واقع شده‌اند. سرامیک‌های متخلخل SiC با روش‌های متفاوتی از جمله اکستروژن، ریخته‌گری لغزشی و نواری و تفجوشی ساخته می‌شوند (Chauhan, 2023).

برای کاربردهای خاص، لازم است غشاهای سرامیکی در شکل‌های مختلف بسته‌بندی شوند. این سرامیک‌ها می‌توانند به صورت تخت، استوانه‌ای و اشکال دیگر ساخته شوند. به منظور تصفیه پساب صنعتی، شکل استوانه با لوله‌های یک و چندکاناله و هولوفایبرها (الیاف تو خالی) مناسب‌تر هستند. زیرا در مقایسه با شکل‌های سرامیکی تخت آب‌بندی راحت‌تر، پایداری مکانیکی بیشتر و قابلیت کنترل سرعت جریان در مقاطع بالاتری را دارند. غشاهای لوله‌ای تک‌کاناله برای جداسازی ورودی‌هایی با کدورت بالا و مقدار زیاد ذرات جامد معلق مناسب هستند. به علت قطر زیاد و استحکام بالایی که دارند به راحتی به صورت مکانیکی تمیز می‌شوند و در سرعت بالای مقطع جریان می‌تواند برای کنترل

آب، فراوان‌ترین منبع طبیعی در این سیاره است؛ اما تنها درصد کمی از آن در دسترس و مناسب برای حفظ زندگی انسان است. رشد روزافزون جمعیت و کاهش ذخایر آب قابل شرب به یکی از چالش‌های اساسی و جدی در دنیای امروز مبدل شده است (پسندیده‌پور و همکاران، ۱۴۰۲؛ طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۲). استفاده مجدد از پساب‌ها به‌عنوان یک راه‌حل از سوی پژوهشگران حوزه آب و محیط‌زیست پیشنهاد شده است. در میان روش‌هایی که برای تصفیه پیشرفته آب‌های آلوده به کار می‌روند، استفاده از فرایند اسمز معکوس (RO) به دلیل کاربرد آسان‌تر، انرژی مورد نیاز کمتر، بهره‌برداری و نگهداری ساده‌تر و همچنین سازگاری بیشتر با استانداردهای محیط‌زیستی به سرعت در حال افزایش است (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵). اسمز معکوس یک فرایند غشایی است که از آن برای نمک‌زدایی و حذف آلاینده‌ها از آب استفاده می‌شود. این فرایند از یک غشای نیمه‌تراوا استفاده می‌کند که امکان عبور آب از طریق آن فراهم است، اما نمک‌ها و سایر آلاینده‌ها از آن عبور نمی‌کنند (موسوی نسب و همکاران، ۱۴۰۲).

آب‌های سطحی، فاضلاب‌ها و آب‌های زیرزمینی می‌توانند به سهولت برای تامین نیاز در بخش خانگی با استفاده از فناوری RO تصفیه شوند. این نوع آب‌ها حاوی ذرات معلق، مواد آلی و سایر ناخالصی‌های غیر آلی هستند که عملکرد فرایندهای غشایی را مختل می‌کنند. برای جلوگیری از گرفتگی‌های زود هنگام و افزایش طول عمر واحد اسمز معکوس، به کار بردن تمهیدات گسترده‌تر از جمله طراحی بهینه پیش‌تصفیه امری ضروری است (Qasim et al., 2019). هدف یک سامانه پیش‌تصفیه، تامین آب ورودی به RO با کمیت و کیفیت مناسب است که امکان عملکرد پایدار تجهیزات در پایین‌دست را فراهم و آن‌ها را از رسوبات احتمالی موجود در آب ورودی محافظت کند. پیش‌تصفیه مناسب نقش مهمی در عملکرد، طول عمر تجهیزات و هزینه نگهداری واحد اسمز معکوس ایفا می‌کند. از آن‌جا که استفاده نادرست باعث ایجاد رسوب در غشا می‌شود، هدف اولیه پیش‌تصفیه سازگار نمودن آب ورودی به RO با غشا مورد استفاده است (Gao et al., 2023).

از روش‌های متداول پیش‌تصفیه اسمز معکوس در صنعت می‌توان به انعقاد یا لخته‌سازی، فیلترهای چندبستری، شناورسازی هوای محلول و اولترا، میکرو (Malayeri et al., 2018) و نانوفیلتراسیون غشایی اشاره کرد (Anis et al., 2019). هر سه

مواد آلی را نشان داد که حاکی از برهمکنش‌های پیچیده بین غشا و رسوب‌ها است.

در همین زمینه، Cui et al. (2011) استفاده از غشای سرامیکی را برای پیش تصفیه آب خلیج تیانجین در فرآیند اسمز معکوس آب دریا (SWRO)، با اتخاذ یک روش انعقاد بهینه در بازه‌ای طولانی مدت مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان داد که نسبت حذف کدورت محصول، قابل قبول است و کیفیت آب نفوذی ارائه شده توسط غشای سرامیکی برای ورود به فرآیند SWRO مناسب است. روش انعقاد بهینه مورد استفاده در فیلتراسیون غشای سرامیکی، عملیات ته‌نشینی طبیعی لخته‌سازی بود. عملیات بدون انعقاد برای فیلتراسیون غشای سرامیکی آب دریا مناسب نبود. زیرا رسوب به جا مانده باعث کاهش نفوذپذیری می‌شود. سامانه غشای سرامیکی نفوذپذیری پایدار را در طول آزمایش طولانی مدت، حتی در دماهای پایین (۳-۶ درجه سانتی‌گراد) حفظ کرد.

Dey et al. (2013) استفاده از یک ماژول سرامیکی توخالی را برای تصفیه آب دریا در عربستان بررسی کردند. در این تحقیق از غشای MF سرامیکی مبتنی بر آلومینا، با پیکربندی ۱۹ کانالی و اندازه ۰/۱ میکرومتر استفاده شد. نتایج نشان داد که اندازه منافذ، صرف نظر از نوع رسوب‌ها و اجزای معلق مانند بارگذاری جامد، ذرات کلونیدی، باکتری‌ها و غیره انتخاب مناسبی برای پیش تصفیه واحدهای RO است. شار تراوش غشایی MF به دست آمده در حدود ۳۵۰-۳۷۰ لیتر بر ساعت بر مترمربع با کدورت کمتر از ۱ NTU و SDI کمتر از ۰/۳ گزارش شد. مزیت سیستم پیش تصفیه با استفاده از غشای MF سرامیکی نسبت به غشای MF پلیمری در طول عمر بیشتر و توانایی تحمل تغییرات شدید pH، کاهش زمان توقف کارخانه، پایداری بیشتر عملیات RO، افزایش نرخ شار و در نهایت کیفیت بهتر آب تصفیه شده است.

Hamad et al. (2013) یک مطالعه آزمایشی با استفاده از سرامیک‌های تخت به صورت غشای یکپارچه آلومینا با اندازه منافذ حدود ۰/۱ میکرومتر انجام دادند. براساس نتایج، SDI آب دریای سرخ پس از چندین آزمایش تکراری به طور میانگین ۶/۱ گزارش شد. این نشان می‌دهد که آب دریای سرخ قبل از استفاده در سیستم SWRO باید تحت فرآیند پیش تصفیه قرار گیرد. غشای میکروفیلتراسیون سرامیکی، به عنوان یک مرحله پیش تصفیه، توانست مقدار SDI را به میانگین ۲/۱ کاهش دهد که برای خوراک SWRO قابل قبول است. از این رو، غشای MF سرامیکی مقادیر SDI مورد نیاز برای خوراک SWRO را فراهم کرد. این

آلودگی به کار روند. مدول هولوفایبرها سطح مقطع مؤثر بالایی را ارائه می‌دهند. این غشاها نازک هستند و می‌توانند با استفاده از بک‌واش و فوروارد فلاشینگ به راحتی تمیز شوند (Pabby et al., 2008).

غشاهای سرامیکی تخت می‌توانند به صورت دیسک یا صفحه باشند. حجم بسته‌بندی غشاهای دیسکی به طور کلی کم بوده و به همین دلیل اغلب در مقیاس کوچک صنعتی، پزشکی و کاربردهای آزمایشگاهی استفاده می‌شود. سرامیک‌های تخت می‌توانند چندکاناله باشند، به راحتی قابل تعویض هستند و هم چنین توانایی کنترل کدورت زیاد آب ورودی را دارند. تمیز کردن مکانیکی سرامیک‌های تخت به سهولت انجام می‌شود؛ زیرا می‌توانند فشار هوا، بک‌واش و واترجت را حین شست‌وشو تحمل کنند و در مقایسه با غشاهای پلیمری از این حیث ماندگاری بیشتری دارند (Jarrar et al., 2024).

Ahmad and Mariadas (2008) استفاده از غشای سرامیکی لوله‌ای تک کاناله با اندازه منافذ ۰/۲ میکرومتر به عنوان پیش تصفیه آب خوراک قبل از غشاهای اسمز معکوس برای کاهش رسوب در فرآیند نمک زدایی را بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد استفاده از بافل مارپیچی که در میکروفیلتر (MF) غشایی قرارداد می‌شود نقش به‌سزایی در کنترل گرفتگی و بهبود شار نفوذ خوراک ایفا می‌کند. اغتشاش ناشی از وجود این جداسازها باعث کاهش میزان انباشتگی مایع در مسیر خوراک، افزایش سرعت سیال و نرخ برشی دیواره و ایجاد جریان‌های ثانویه یا ناپایداری‌ها می‌شود. حالت بهینه میکروفیلتراسیون با هندسه بافل ۴ دور در طول ۵۰ میلی‌متر توانست شار متوسط نفوذی را تا ۱۰۴/۹ درصد در مقایسه با میکروفیلتراسیون بدون بافل افزایش دهد.

در تحقیقی دیگر، Xu et al. (2010) عملکرد اولترا فیلتر (UF) سرامیکی با اندازه منافذ ۰/۰۵ میکرومتر را در شیرین‌سازی آب دریا به روش اسمز معکوس طی شرایط عملیاتی مختلف مورد ارزیابی قرار دادند. غشای معدنی (سرامیکی) مورد استفاده در مقایسه با همتای آلی (پلیمری)، از نظر شار نفوذ و پتانسیل گرفتگی نتایج بهتری نشان داد. در حالی که دوام و مقاومت شیمیایی بالاتری را در فیلتراسیون آب دریا ارائه کرد. این غشا در سرعت جریان متقاطع ۳/۷-۴/۲ m/s، گرادیان فشار ۰/۱۴ MPa-۰/۱۸، دمای ۲۵-۳۰ °C و pH آب دریا ۸/۰-۹/۰، شار نفوذ قابل توجهی در محدوده ۴۲۰-۴۵۰ L/m<sup>2</sup>.h با حذف کدورت ۹۹-۹۹/۵٪ و COD<sub>Mn</sub> ۲۲-۳۵٪ نشان داد. بررسی کیفیت نفوذ تحت شرایط عملیاتی مختلف، راندمان‌های متفاوت حذف ذرات معلق و

سرامیکی است که به صورت موازی کار می‌کنند. هر قطار می‌تواند نرخ جریان فیلتراسیون جداگانه خود را داشته باشد که ممکن است در طول فرآیند فیلتراسیون در یک قاب معین کاهش یابد. این بدان معنی است که قطارهای در حال کار می‌توانند جریان معینی از یک قطار متوقف شده را با افزایش نرخ جریان قطار در حال فیلتراسیون پوشش دهند. هر قطار می‌تواند در هر زمان توسط اپراتور متوقف و راه اندازی مجدد شود. کل مساحت فیلترهای سرامیکی موجود در مجموعه ۱۶۸۰ متر مربع است که توزیع اندازه منافذ غشای سرامیکی مشخص و اندازه منافذ به‌طور یکنواخت ۰/۱ میکرومتر را نشان می‌دهد. یک صفحه سرامیکی ابعاد ۶۱×۱۵ سانتی‌متر دارد و در مجموع مساحت سطح فعال هر صفحه حدود ۰/۱۷۷ مترمربع است که هر دو طرف صفحه برای افزایش جریان آب به کار می‌رود. تعداد ۳۴ عدد صفحه سرامیکی را مدول و ۷ طبقه مدول را یک تاور یا برج می‌نامند.

## ۲-۲- خصوصیات آب خام ورودی به RO

منبع تأمین آب خام این پژوهش شش حلقه چاه نیمه‌عمیق در محدوده شهرستان بندرترکمن است. عمق هر حلقه چاه حدود ۱۳۰ متر و از سفره‌های آب زیرزمینی نامتعارف برداشت می‌شود. کلیه آب برداشتی از چاه‌ها با خطوط انتقال به سایت آب‌شیرین‌کن منتقل شده و در استخر هوادهی به حجم ۴۰ مترمکعب با ۲۰ عدد نازل ۱۲ اینچی هوادهی می‌شود. سپس آب از یک کانال ۱ مترمکعبی شامل میکسر به‌همراه افزودنی‌های مورد نیاز (کلرید فریک و پلیمرهای ذکر شده) عبور داده شده و نهایتاً در استخر ماریپیچی به حجم ۲۲۵ مترمکعب ته‌نشین می‌شود. اطلاعات مندرج در جدول ۱ در ورودی همین استخر اندازه‌گیری شده و آنالیز SDI در خروجی استخر انجام شده است. برای یافتن مناسب‌ترین پیش‌تصفیه در ابتدا نیاز به دانستن مشخصات آب خام ورودی است که به اختصار در جدول ۱ قابل مشاهده است.

جدول ۱- مشخصات آب خام ورودی به سایت آب‌شیرین‌کن بندر

ترکمن تهیه شده در ۲۴ بهمن ۱۴۰۱

مشخصه	مقدار	واحد
Fe	۰/۱۱	ppm
Mn	۰/۰۵	ppm
BOD	۱۵/۸	ppm
COD	۳۵	ppm
TSS	۱۱۷	ppm
Turbidity	۱۵	NTU
pH	۷/۶	-
TDS <sup>۷</sup>	۱۹۴۵	ppm

آزمایش نشان داد که سیستم‌های میکروفیلتراسیون می‌توانند مقدار SDI را به کمتر از ۳ کاهش دهند. علاوه بر این، فیلتراسیون غشایی سرامیکی کدورت آب دریا را از ۰/۶ به ۰/۰۵ NTU کاهش داد.

در تحقیق حاضر، کارایی غشای سرامیکی در تصفیه مقدماتی فرآیند اسمز معکوس برای حذف ذرات معلق و مواد آلی بررسی می‌شود. در این راستا میزان اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD)، بیولوژیکی (BOD) و پارامتر میزان مواد معلق آب خروجی (TSS) ارزیابی و کیفیت آن برای ورود به واحد اسمز معکوس با شاخص SDI سنجیده می‌شود.

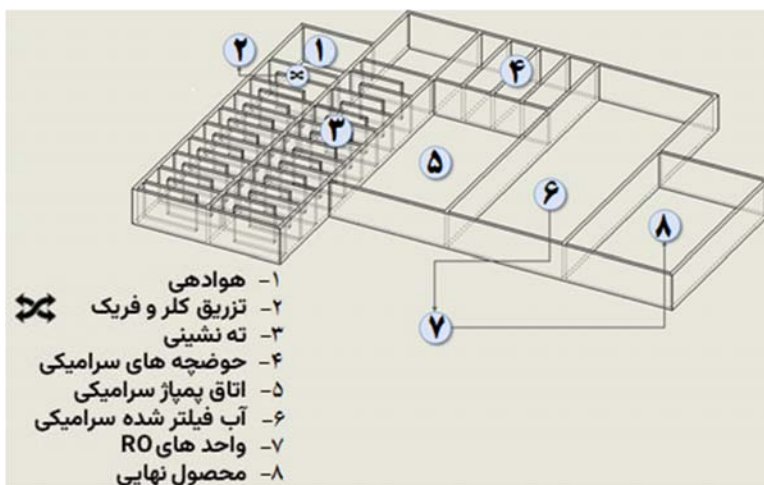
## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد

این پژوهش از نوع بنیادی-کاربردی بود که در مقیاس صنعتی در آب شیرین‌کن بندر ترکمن انجام شد. در اغلب آب شیرین‌کن‌ها برای افزایش رسوب در استخرهای ته‌نشینی پیش از ورود به واحدهای RO از مواد منعقد کننده استفاده می‌شود (مرادی و همکاران، ۱۴۰۲). مواد منعقد کننده مورد استفاده در تحقیق حاضر (شامل کلرید فریک، آلومینیوم سولفات و دو نوع پلیمر آنیونی و کاتیونی) توسط واحد خرید کالای شرکت مهندسی رعد آب جنوب تهیه و برای انجام آزمایش‌ها در اختیار قرار گرفت. فیلترهای سرامیکی به کار رفته در این پژوهش به‌عنوان پیش‌تصفیه واحد RO، از نوع فیلترهای سرامیکی تخت با لایه غشایی فعال در بیرون غشا هستند که توسط شرکت CERAFILTEC کشور آلمان ساخته شده‌اند. صفحه سرامیکی تکی مورد استفاده با یک لایه فعال فیلتر در قسمت بیرونی غشا عملیات تصفیه را انجام می‌دهد. درحالی‌که آب تمیز از بدنه غشا عبور می‌کند و در دو کلاهدک انتهایی جمع می‌شود، جامدات معلق روی سطح غشا یک لایه کیک تشکیل می‌دهند. آب فیلتر شده از هر صفحه منفرد در داخل محفظه ماژول جمع‌آوری شده و از طریق ۴ کانال آب فیلتر شده که در هر دو طرف محفظه ماژول یکپارچه شده‌اند به مجموعه هدر منتقل می‌شود.

برج‌های فیلتراسیون به‌طور کامل در یک مخزن (قطار فیلتراسیون) که حاوی آب خام ورودی است غوطه‌ور می‌شوند. همه برج‌ها در بالا با یک لوله هدر مشترک به یکدیگر متصل می‌شوند. آب تصفیه شده از طریق مجموعه هدر هر برج به بالا و از آن‌جا از طریق لوله هدر مشترک به مخزن خارج منتقل می‌شود که در آن یک پمپ فیلتراسیون برای انتقال آب تمیز به مخزن آب فیلتر شده وصل شده است. سامانه متشکل از ۴ قطار

بخش‌های بعد نتایج حاصل از آن‌ها بررسی خواهد شد. شکل ۱، نمای کلی از مراحل فرآیند تصفیه در آب شیرین کن بندر ترکمن را نمایش می‌دهد. نمونه‌گیری‌ها پس از عبور از مراحل ۱ تا ۶ و در انتهای تکمیل فرآیند پیش تصفیه و قبل از ورود به واحدهای RO انجام شد. شایان ذکر است هر یک از نمونه‌گیری‌ها ۶ بار طی ۷۲ ساعت (شامل ۲ آزمایش در هر روز) انجام شد و میانگین ۶ سری آزمایش ملاک قرار گرفت.



شکل ۱- دیاگرام کلی مراحل فرآیند تصفیه در آب شیرین کن بندر ترکمن

می‌کنند. اندازه‌گیری SDI براساس نرخ گرفتگی فیلتر کاغذی کلاس واتمن (۴۷ میلی‌متر قطر) با اندازه منافذ  $0.45 \mu\text{m}$  انجام شد. SDI در فشار ۳۰ psi با استفاده از روش استاندارد D-4189- Xu and Drewes, (2002) 95 طبق رابطه (۱) اندازه‌گیری شد (2006):

$$SDI = \left( \frac{\%P_{30}}{T} \right) = \left[ 1 - \left( \frac{T_i}{T_f} \right) \right] \times \frac{100}{T} \quad (1)$$

که  $\%P_{30}$ : درصد انسداد غشا در فشار ۳۰ psi،  $T_i$ : مدت زمان مورد نیاز برای جمع‌آوری ۵۰۰ میلی‌لیتر اول عبوری از فیلتر و  $T_f$ : مدت زمان جمع‌آوری ۵۰۰ میلی‌لیتر نهایی عبوری از فیلتر پس از سپری شدن ۱۵ دقیقه از زمان فیلتراسیون ( $T$ ) است.

مقدار بالای SDI نشان‌دهنده این است که برخی رسوبات به سرعت در سطح غشا ایجاد شده که منجر به کاهش شدید جریان می‌شوند. مقدار شاخص SDI در محدوده ۳-۵ قابل قبول است، اگرچه برای عملکرد موفقیت‌آمیز غشاهای RO، SDI کمتر از ۳ ارجح است (Xu et al., 2006). نتایج حاصل از اندازه‌گیری کدورت معیار مناسبی برای سنجش آب ورودی به RO نیست، زیرا به SDI مربوط نمی‌شود. با این حال، اندازه‌گیری کدورت

در این پژوهش، پیش از استفاده از غشاهای سرامیکی به‌عنوان پیش تصفیه RO، در ابتدا با توجه به مشخصات آب ورودی روش‌های متداول پیش تصفیه آزمایش شد و پس از اطمینان از عدم حصول نتیجه مناسب، از روش غیر متداول استفاده شد. استفاده از فیلترهای چندبستری حاوی مواد مختلف از جمله سیلیس و کربن فعال، تزریق مواد منعقدکننده مانند کلرید فریک، پلیمرهای آنیونی و کاتیونی در دستور کار قرار گرفت که در

### ۳-۲- روش‌های مشخصه‌یابی

آب ورودی به واحد RO نیازمند داشتن استاندارد و ویژگی‌های مشخصی است. از جمله باید عاری از باکتری باشد و حداکثر بار جامد معلق آن نباید بیشتر از ۱ ppm باشد تا عملکرد پایدار و عمر طولانی‌تر تجهیزات پایین‌دست را به همراه داشته باشد. شاخص چگالی سیلت (SDI) برای چندین دهه در سراسر جهان برای تعیین پتانسیل گرفتگی غشای سیستم‌های اسمز معکوس استفاده شده است و در واقع ملاکی برای تشخیص عملکرد سیستم‌های میکرو و اولترافیلتراسیون است (Xu and Drewes, 2006). ارزیابی رسوب به‌منظور تعیین پتانسیل گرفتگی غشا و پایش کارایی فرآیندهای پیش تصفیه از مهم‌ترین مراحل در تصفیه مقدماتی است. پیش‌بینی دقیق پتانسیل گرفتگی غشا برای اطمینان از عملکرد پایدار یک کارخانه آب شیرین‌کن اسمز معکوس (RO) حیاتی است. بنابراین، استفاده از یک شاخص قابل اعتماد از نظر تکرارپذیری و دقت مناسب، برای تجزیه و تحلیل تمایل رسوب‌گذاری پساب پیش تصفیه برای ورود به سامانه RO یک ضرورت است.

تقریباً همه بهره‌برداران غشاهای RO از شاخص چگالی سیلت (SDI) به‌عنوان معیاری برای ارزیابی آب خام ورودی استفاده

مسیر آب خام ورودی لاملا قرار گرفت تا سرعت آب را کاهش دهد و زمان رسوب‌گذاری بیشتر شود. در این مرحله از هیچ فیلتری استفاده نشد و میزان SDI عدد ۶/۰۹ به دست آمد. نمونه سوم (شکل ۲-ج)، شامل تزریق ۱۰ ppm کلرید فریک به عنوان منعقدکننده بود. پس از سپری شدن زمان ته‌نشینی از فیلتر چندبستری حاوی کربن فعال عبور داده شد. مقدار SDI به دست آمده در این شرایط ۶/۱ بود که هم‌چنان برای واحدهای RO مناسب نیست.

همان‌طور که پیشتر ذکر شد، در بعضی موارد پیش‌تصفیه علاوه بر منعقدکننده نیاز به کمک منعقدکننده هم وجود دارد. در همین رابطه، نتایج پژوهش Asif and Zhang (2021) نشان داد که استفاده از کمک منعقدکننده‌های شیمیایی می‌تواند عملکرد پیش‌تصفیه را بهبود بخشد، اما حذف کامل مواد آلی نیازمند فرآیندهای تصفیه ترکیبی است. در نمونه شماره ۴ (شکل ۲-د)، در کنار تزریق ۱۰ ppm کلرید فریک، میزان ۰/۵ ppm پلیمر آنیونی برای انعقاد بهتر تزریق شد. پس از عبور از استخر ته‌نشینی و گذر از فیلتر چندبستری حاوی کربن فعال، شرایط هم‌چنان برای ورود به RO نامناسب بوده و مقدار SDI ۶/۲ به دست آمد. در نمونه شماره ۵ (شکل ۲-ه) در کنار تزریق کلریدفریک و همان میزان کمک منعقدکننده آنیونی، میزان ppm ۰/۵ پلیمر کاتیونی به عنوان کمک منعقدکننده دیگر نیز اضافه شد. مقدار SDI به دست آمده در این شرایط نیز ۶/۲۳ بود. در تحقیق مشابهی که توسط (Majidi (2000) انجام شد، عملکرد فیلترهای سرامیکی در تصفیه آب حاوی ذرات معلق و مواد آلی با استفاده از ترکیبی از منعقدکننده‌ها و پلیمرهای کمکی بررسی شد. نتایج نشان داد که استفاده از ترکیب کلرید فریک و پلیمرهای کاتیونی و آنیونی، مقدار SDI را از ۶/۴ در آب خام ورودی به ۴/۱ پس از تصفیه کاهش داد.

پس از آن‌که همگی موارد فوق‌الذکر کیفیت آب خام ورودی را به حدی تغییر نداد که بتواند به‌عنوان خوراک مناسب واحد RO استفاده شود، از فیلترهای سرامیکی تخت به‌عنوان پیش استفاده شد. در نمونه شماره ۶ (شکل ۲-و)، آب خام ورودی بدون هیچ تزریقی از فیلترهای سرامیکی عبور داده شد که میزان SDI نهایی ۱/۹ به دست آمد. نتایج مشابهی در تولید آب بازیافتی با خلوص بالا برای کاربردهای صنعتی با استفاده از میکروفیلتراسیون و اسمز معکوس توسط Ramanathan et al. (2006) گزارش شد که نشان می‌دهد فیلترهای سرامیکی بدون کمک شیمیایی قادر به کاهش SDI به کمتر از ۲ هستند. هم‌چنین، نتایج حاصل از پژوهش Hamad et al. (2013) در

همراه با SDI توسط بسیاری از محققان به‌عنوان شواهد تکمیلی گزارش شده است (Fayaz et al., 2019).

برای تعیین میزان کدورت از دستگاه کدورت‌سنج مدل Q-2100 ساخت شرکت HACH کشور آمریکا و روش ASTM D-1889 براساس کتاب روش‌های استاندارد آزمایش‌های آب و فاضلاب استفاده شد (Rice et al., 2012). اندازه‌گیری pH و هدایت الکتریکی (EC) نمونه‌ها با استفاده از pH متر مدل ۶۹۱ و EC متر مدل ۷۱۳ ساخت شرکت METROHM کشور سوئیس انجام شد. سنجش میزان آهن و منیزیم با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر مدل DR-1900 ساخت شرکت HACH کشور آمریکا و محاسبه BOD و COD برپایه استاندارد (APHA (2017) انجام شد. آزمون طیف سنجی مادون قرمز با استفاده از دستگاه FTIR مدل AVATAR ساخت شرکت THERMO کشور آمریکا انجام شد. مورفولوژی سطح نمونه‌ها با استفاده از دستگاه میکروسکوب الکترونی نشر میدانی (FESEM) مدل VEGA3 ساخت شرکت TESCAN کشور جمهوری چک ارزیابی شد. شناسایی عناصر تشکیل‌دهنده نمونه‌ها از طریق آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX)<sup>۱</sup> و با افزودن دیتکتور SAMX ساخت کشور فرانسه به دستگاه FESEM فوق‌الذکر انجام شد.

برای بررسی اولیه و ارزیابی اثربخشی مواد منعقدکننده پیشنهادی از دستگاه جارتست استفاده شد. این دستگاه شامل شش بشر یک لیتری با هم‌زن‌های کاملاً یکسان است که توسط یک موتور می‌چرخند. شرایط در تمامی بشرها مشابه است به‌نحوی که حجم نمونه اولیه یک لیتر و سرعت هم‌زن‌ها برابر است. مواد منعقدکننده شامل کلریدفریک و آلومینیوم سولفات در ظرف‌های جدا به نمونه اولیه اضافه شد. هم‌چنین دو پلیمر آنیونی و کاتیونی در ظرف‌های مجزا به هر کدام از آن‌ها اضافه شد. در نهایت کلریدفریک، کلریدفریک به‌همراه پلیمر آنیونی و هم‌چنین کلریدفریک به‌همراه پلیمر کاتیونی بهترین ته‌نشینی را نشان دادند.

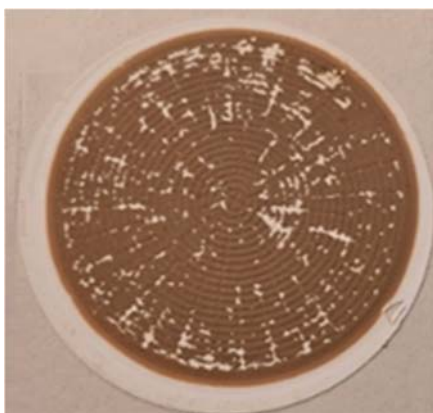
### ۳- نتایج و بحث

در ابتدا هیچ ماده شیمیایی به آب خام ورودی اضافه نشد. برای نمونه اول (شکل ۲-الف)، آب ورودی پس از ته‌نشینی از فیلتر چندبستری حاوی کربن فعال، از فیلتر کارتریج عبور کرده و SDI محاسبه شد. به‌دلیل رسوب زیاد ذرات روی سطح غشای سلولزی مقدار SDI ۴/۹ به دست آمد. برای نمونه دوم (شکل ۲-ب)، در

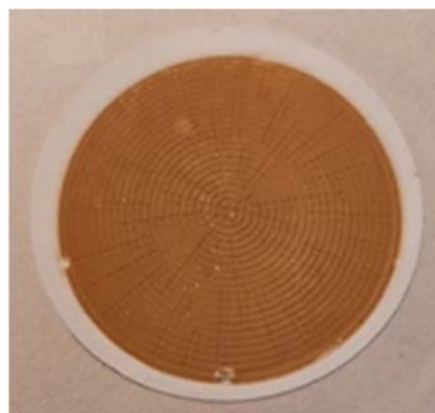
بی‌هوای، در قسمت ابتدایی استخر ته‌نشینی افشانک هوا برای از بین بردن این آلودگی‌ها تعبیه شد. در ادامه، تزریق کلر برای ضدعفونی کردن با تزریق ۳ ppm کلریدریک انجام شد. افزایش مراحل پیش تصفیه معمول برای آب خام ورودی باعث بهبود عملکرد فیلترهای سرامیکی شد و نمونه شماره ۷ (شکل ۲-ز) حاصل از شرایط مذکور با SDI به مقدار ۰/۱ حاصل شد. در مطالعه‌ای مشابه، Kang et al. (2016) عملکرد غشای سرامیکی در پیش تصفیه آب دریا برای فرآیند اسمز معکوس را بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزودن ماده منعقدکننده به غشای سرامیکی باعث بهبود قابل توجهی در کیفیت آب خروجی و کاهش فشار عبوری می‌شود. غشای سرامیکی بدون منعقدکننده مقدار SDI را به کمتر از ۳ و کدورت را به کمتر از ۰/۱ NTU کاهش داد. این درحالی است که با افزودن ۶ میلی‌گرم بر لیتر منعقدکننده، مقدار SDI به ۰/۹ و کدورت به ۰/۰۷۶ NTU کاهش یافت که تقریباً با نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر هم‌سویی دارد. در جدول ۲ خلاصه نتایج به دست آمده برای ۷ نمونه فوق درج شده است.

استفاده از فیلترسرامیکی برای تصفیه آب دریا نشان داد که غشاهای میکروفیلتراسیون سرامیکی پتانسیل تولید آب خوراک موردنیاز برای واحدهای RO را دارا هستند. میانگین مقدار SDI پس از عبور آب دریا از فیلتراسیون غشایی سرامیکی ۲/۱ (و در محدوده مقدار توصیه شده کمتر از ۳) اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، میزان کدورت از ۰/۶ به ۰/۰۵ NTU بهبود یافت. البته لازم به ذکر است که میزان تاثیر هر مرحله از مراحل پیش تصفیه شدیداً به کیفیت و شرایط آب خام ورودی از جمله مقدار شوری و سایر املاح و ترکیبات موجود در آن بستگی دارد و در بسیاری از موارد عملکرد یک یا چند مرحله در شرایط مختلف می‌تواند بسیار متفاوت باشد.

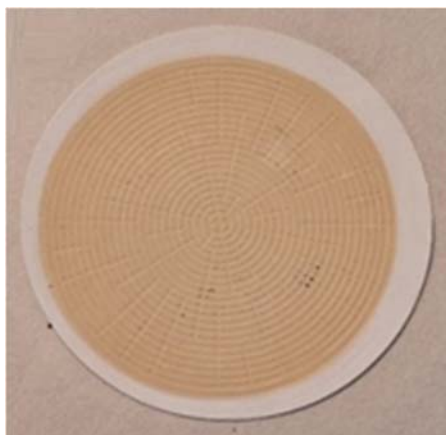
تا این‌جا مشخص شد که فیلترهای سرامیکی توانسته با حذف بخش زیادی از ذرات معلق، کیفیت مناسب آب خام برای ورود به RO را فراهم کند. پس از آن که مشخص شد فیلترهای سرامیکی مناسب‌ترین پیش تصفیه برای بهبود کیفیت آب چاه است، برای ارتقای عملکرد فیلترها در کاهش شستشوی معکوس نیاز مبرم به استفاده هم‌زمان از سرامیک و پیش تصفیه‌های متداول احساس شد. بدین منظور با توجه به وجود گاز متان در آب و باکتری‌های



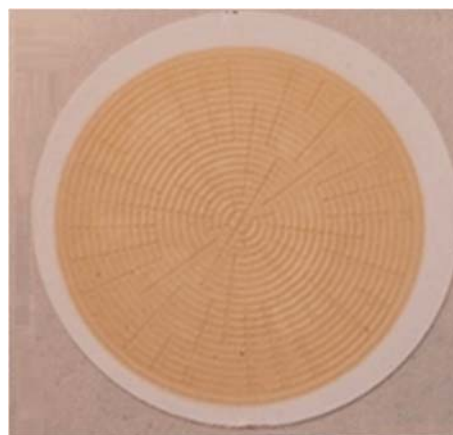
(ب)



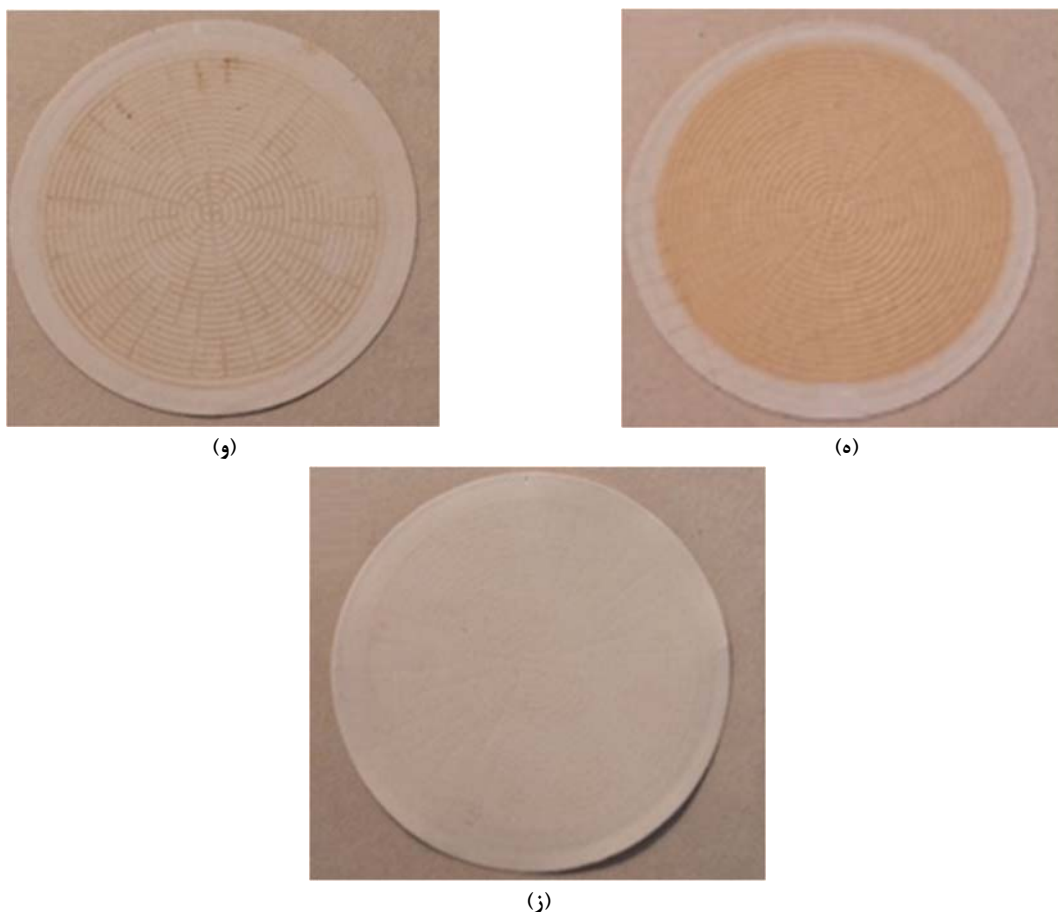
(الف)



(د)



(ج)



شکل ۲- تصویر مقطع فیلترهای SDI: الف) نمونه شماره ۱؛ ب) نمونه شماره ۲؛ ج) نمونه شماره ۳؛ د) نمونه شماره ۴؛ ه) نمونه شماره ۵؛ و) نمونه شماره ۶ و ز) نمونه شماره ۷

جدول ۲- خلاصه نتایج آزمایش‌ها

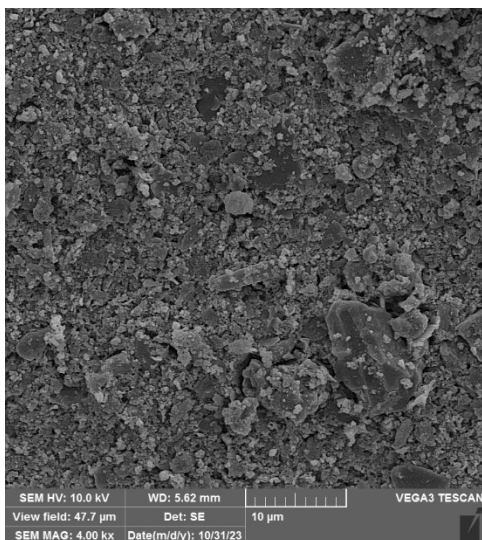
شماره نمونه	*T <sub>f</sub> (s)	*T <sub>i</sub> (s)	SDI	*Tu <sub>1</sub> (NTU)	*Tu <sub>2</sub> (NTU)	pH	EC (μS/cm)
۱	۱۰۲	۲۶	۴/۹۰	۱۶/۳	۱۲	۷/۹۵	۳۷۶۹
۲	۳۰۳	۲۶	۶/۰۹	۱۲/۹	۹/۵	۸/۲۱	۳۶۷۸
۳	۳۸۷	۳۱	۶/۱۰	۱۰	۸/۳	۷/۷۹	۳۶۳۰
۴	۷۶۱	۵۲	۶/۲۰	۱۷/۲	۱۱/۱	۷/۸۱	۳۸۹۸
۵	۵۹۳	۳۸	۶/۲۳	۱۰/۱	۷/۶	۷/۸۶	۳۸۶۶
۶	۴۲	۳۰	۱/۹۰	۱۲	۰/۹	۷/۸۵	۳۸۸۲
۷	۲۹	۲۸	۰/۱۰	۱۰/۵	۰/۵	۷/۸۵	۳۷۸۰

میزان کدورت آب خام ورودی و کدورت آب پس از مراحل پیش‌تصفیه: \*Tu<sub>1</sub> and Tu<sub>2</sub>: مدت زمان اندازه‌گیری ۵۰۰ میلی‌لیتر اولیه و نهایی برای اندازه‌گیری SDI: \*T<sub>f</sub> and T<sub>i</sub>

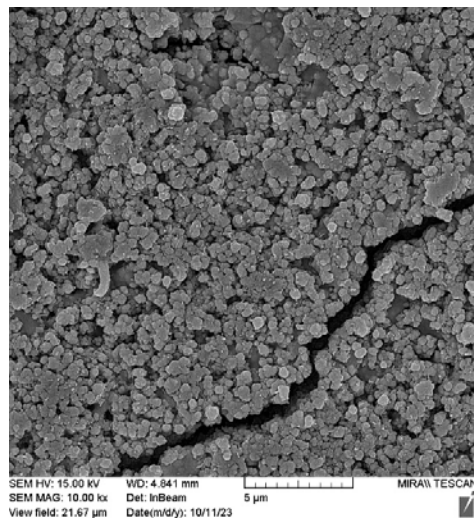
همان‌طور که در تصاویر مشخص است، در تمامی نمونه‌ها به‌دلیل حذف نشدن مناسب باکتری‌ها و ذرات جامد معلق، رسوب روی سطح فیلتر دیده می‌شود ولی در نمونه شماره ۷ با حذف همه ذرات توسط فیلترهای سرامیکی رسوبی روی فیلتر مشاهده نمی‌شود. این امر تاییدی بر پایین بودن میزان SDI بعد از عبور از سرامیک‌ها است.

### ۳-۱- بررسی مورفولوژی سطح فیلترها با استفاده از آنالیز FE-SEM<sup>۹</sup>

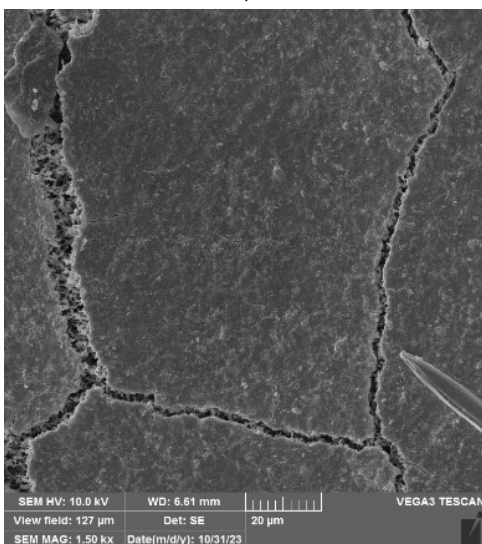
به‌منظور بررسی مورفولوژی سطح فیلترهای به‌دست آمده در شرایط مختلف، بر روی تمامی نمونه‌ها در سطح و در مقطع آنالیز FE-SEM انجام شد. شکل ۳-الف تا ۳-ز آنالیز سطح و شکل ۴-الف تا ۴-ز آنالیز مقطع از کلیه نمونه‌ها را نمایش می‌دهد.



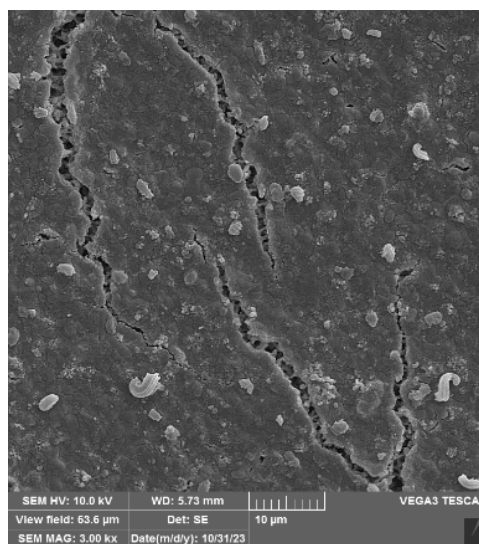
(ب)



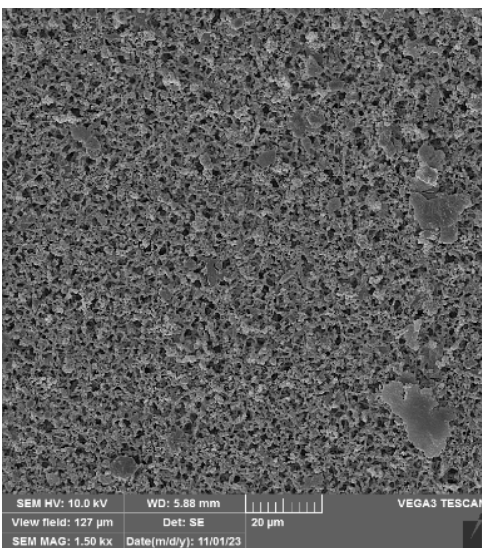
(الف)



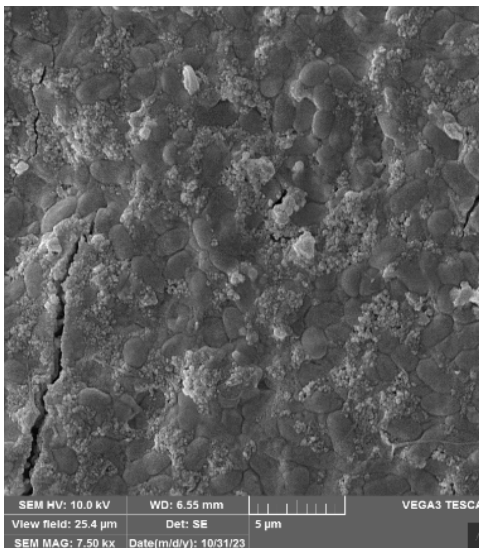
(د)



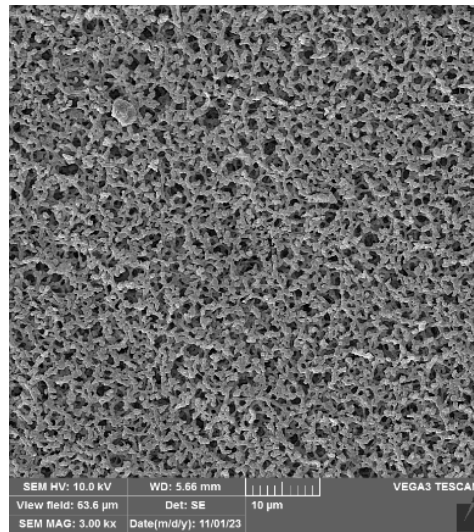
(ج)



(و)

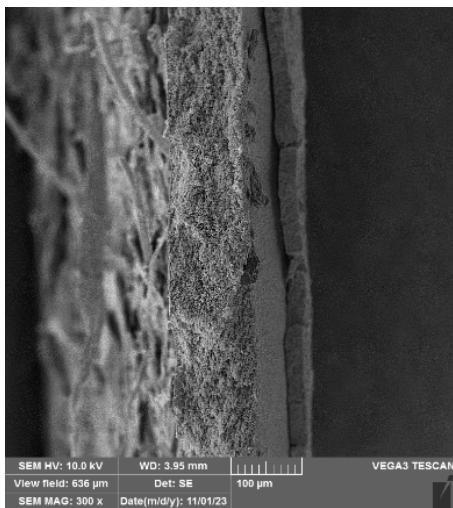


(ه)

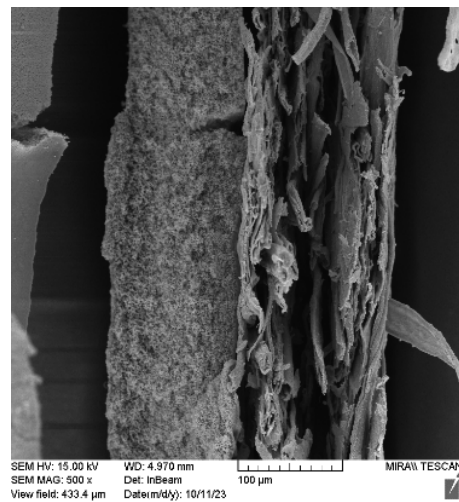


(ز)

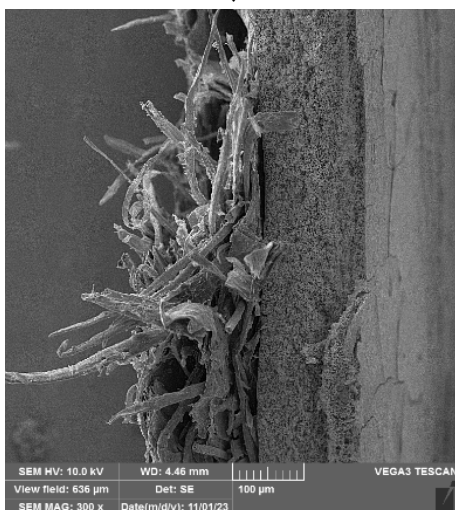
شکل ۳- تصویر FE-SEM از سطح فیلترهای SDI: الف) نمونه شماره ۱؛ ب) نمونه شماره ۲؛ ج) نمونه شماره ۳؛ د) نمونه شماره ۴؛ ه) نمونه شماره ۵؛ و) نمونه شماره ۶ و ز) نمونه شماره ۷



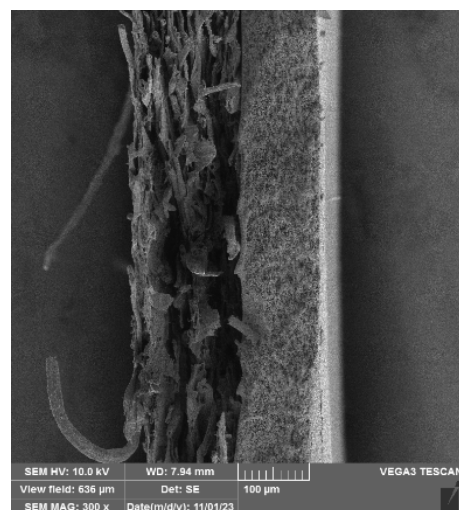
(ب)



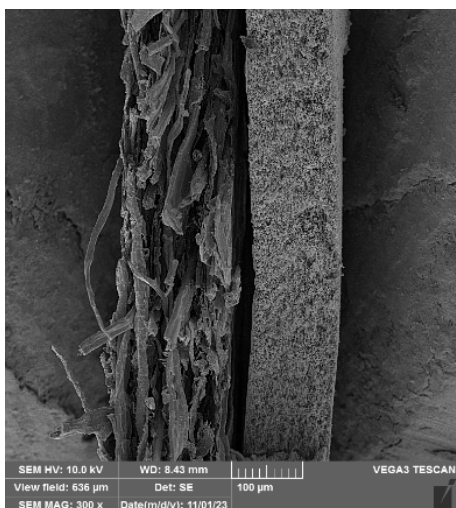
(الف)



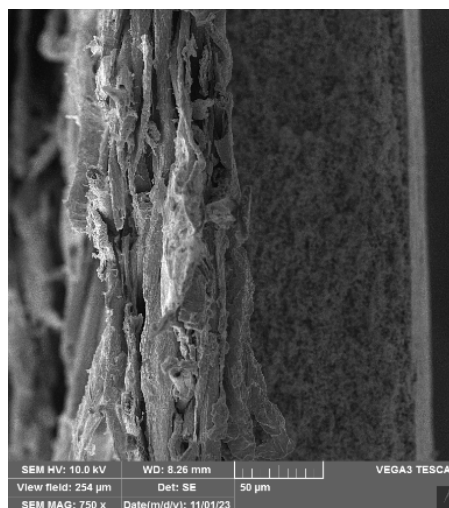
(د)



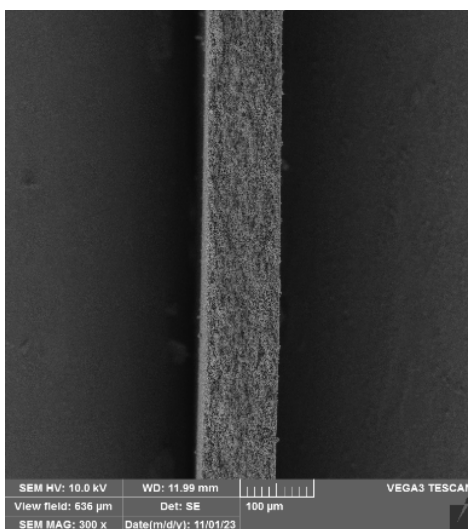
(ج)



(گ)



(ه)



(ز)

شکل ۴- تصویر FE-SEM از مقطع فیلترهای SDI: الف) نمونه شماره ۱؛ ب) نمونه شماره ۲؛ ج) نمونه شماره ۳؛ د) نمونه شماره ۴؛ ه) نمونه شماره ۵؛ و) نمونه شماره ۶؛ ز) نمونه شماره ۷

بازه مربوط به ارتعاش کششی C-H است. در برخی نمونه‌ها در این بازه دو پیک دیده می‌شود که ممکن است به دلیل وجود تنوعی از اتصالات C-H موجود در نمونه‌ها باشد. ولی در نمونه آخر این پیک دیده نمی‌شود. در نمونه‌های ۳ تا ۶ پیکی در محدوده ۲۳۰۰ تا ۲۴۰۰ بر سانتی‌متر دیده می‌شود. این پیک ممکن است مربوط به ترکیبات آلی موجود در آب و همچنین به دلیل تزریق کلرید فریک به وجود آمده باشد. کلریدفریک می‌تواند با مواد آلی موجود در آب واکنش نشان دهد و ترکیبات جدیدی ایجاد کند. این ترکیبات می‌تواند حاوی گروه‌های کربونیل باشد که پیک C=O را در این طیف ایجاد کند. ولی در نمونه شماره ۷ این پیک دیده نمی‌شود که احتمال دارد فیلتر سرامیکی آن را حذف کرده باشد (Deborde

### ۳-۲- بررسی ساختاری به کمک آنالیز FT-IR<sup>۱</sup>

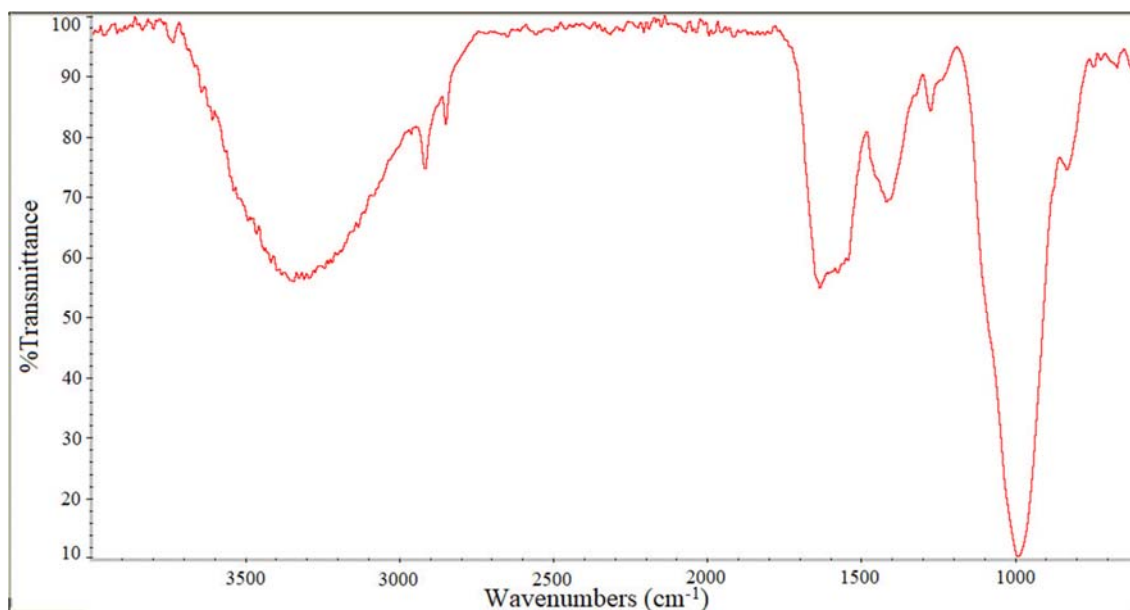
شکل ۵- الف تا ۵- ز طیف‌های تهیه شده از ۷ نمونه مورد آزمایش را نشان می‌دهد. در همه نمونه‌ها پیک‌هایی در محدوده ۳۲۰۰ تا ۳۶۰۰ بر سانتی‌متر دیده می‌شود که جذب براساس گروه عاملی H و پیوند کششی O-H است و نشان‌دهنده وجود رطوبت در نمونه است (Cozzolino, 2014). در هر دو نمونه ۴ و ۵ پیکی در بازه بیشتر از ۳۶۰۰ بر سانتی‌متر دیده می‌شود. این پیک ممکن است مربوط به پیوندها و گروه‌های خاصی در پلیمر تزریق شده باشد. همچنین در نمونه آخر در محدوده ۳۱۳۰ بر سانتی‌متر پیکی دیده می‌شود که احتمال دارد به دلیل تزریق کلر به آب و ایجاد HClO به وجود آمده باشد (Dutta, 2017). در همه نمونه‌ها پیکی در محدوده ۲۸۰۰ تا ۳۰۰۰ بر سانتی‌متر وجود دارد. این

آخر پیکری در این بازه مشاهده نمی‌شود. و در نهایت تمامی پیک‌های باقی مانده در محدوده زیر ۱۰۰۰ بر سانتی‌متر نیز ترکیبات آلی حاوی ترکیبات آلیفاتیک و آروماتیک با پیوندهای خمشی C-C، C-H و C-O هستند (Pan et al., 2016).

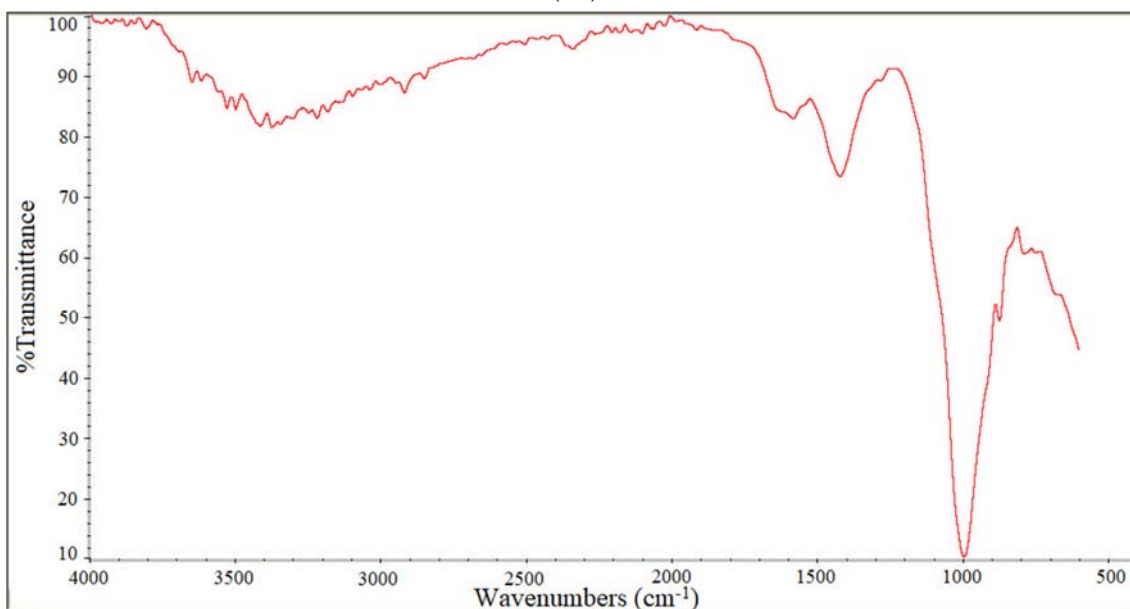
### ۳-۳- بررسی آنالیز ساختاری به کمک آنالیز EDX<sup>۱</sup>

شکل ۶-الف تا ۶-ز نمودارهای حاصل از آنالیز EDX برای هر ۷ نمونه مورد آزمایش را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمونه‌ها دیده می‌شود بیشترین درصد مربوط به عناصر اکسیژن و کربن است.

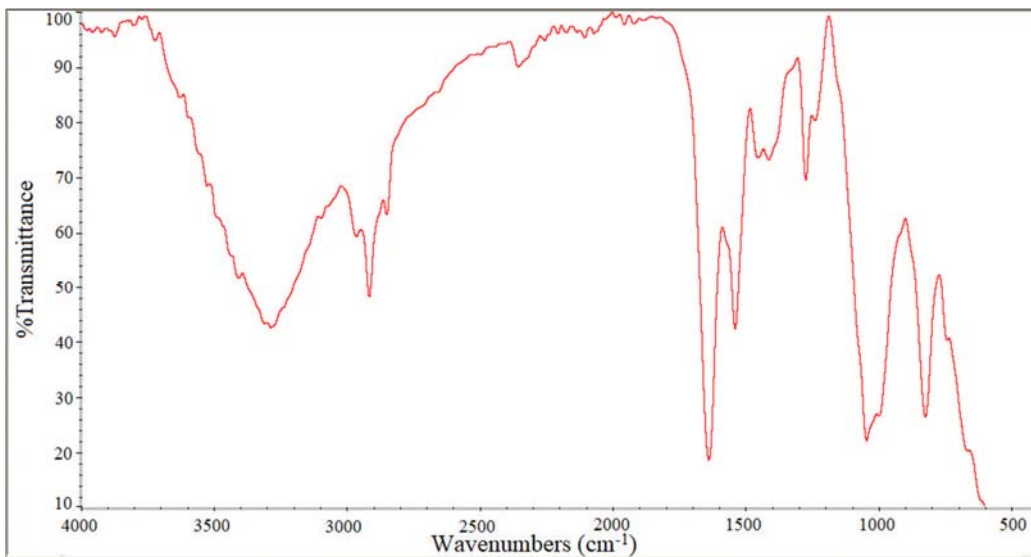
(and Von Gunten, 2008). در همه نمونه‌ها در بازه ۱۴۰۰ تا ۱۸۰۰ بر سانتی‌متر پیک‌هایی دیده می‌شود. همه پیک‌های این بازه نشان دهنده وجود ترکیبات آلی در نمونه‌ها است. پیوندهای خمشی C-H در ۱۶۰۰ تا ۱۷۰۰ بر سانتی‌متر و مابقی پیوندهای C=O، C=C و C≡O در ۱۶۰۰ تا ۱۸۰۰ بر سانتی‌متر هستند. محدوده ۱۲۰۰ تا ۱۳۰۰ بر سانتی‌متر نیز پیوندهای C=O، C-O و C=C دیده می‌شوند که در ترکیبات کششی آلیفاتیک و آروماتیک وجود دارند. این گروه مواد آلی خطی و زنجیری هستند که در ساخت آن‌ها حلقه‌ای دیده نمی‌شود. این ترکیبات نیز احتمالاً توسط فیلترهای سرامیکی حذف می‌شوند زیرا در نمونه



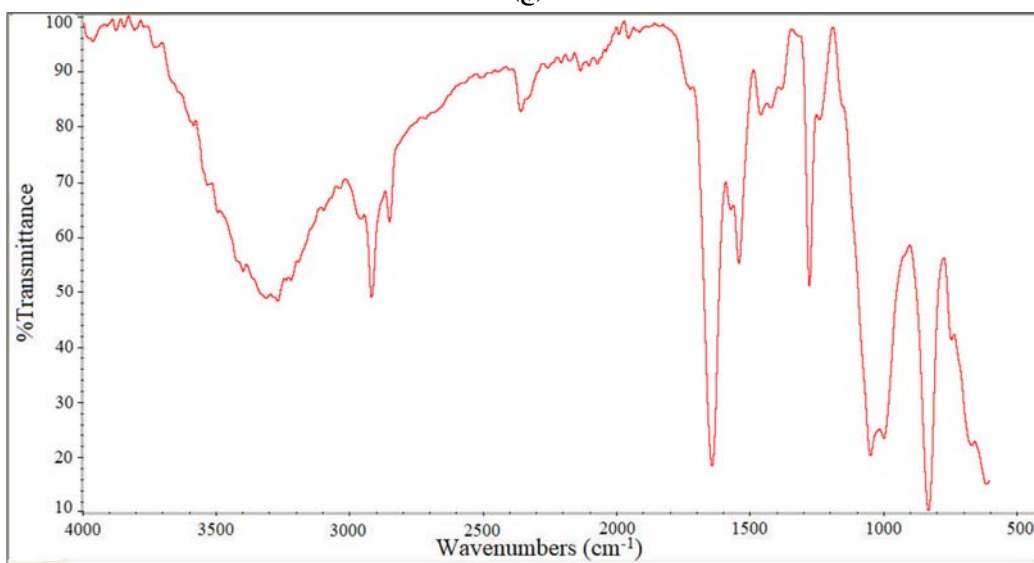
(الف)



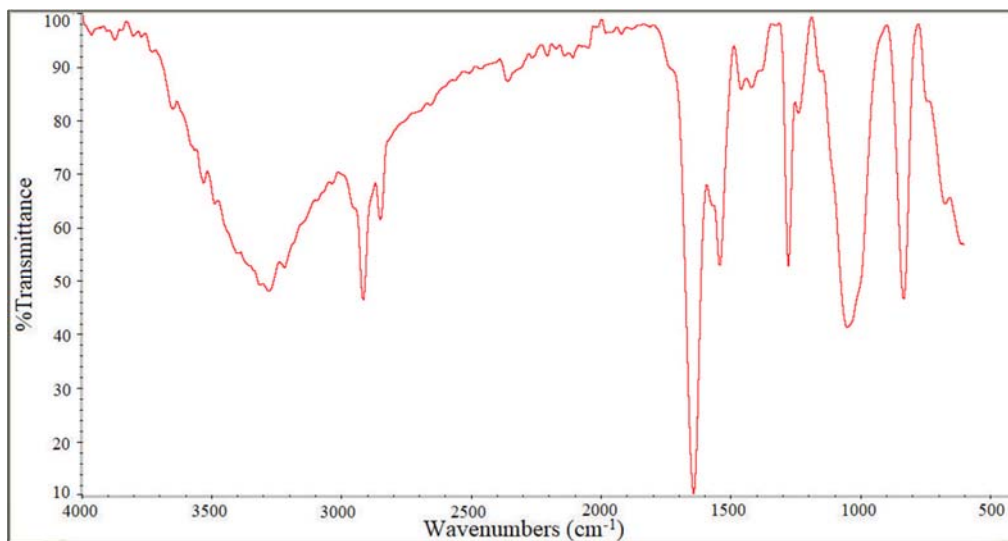
(ب)



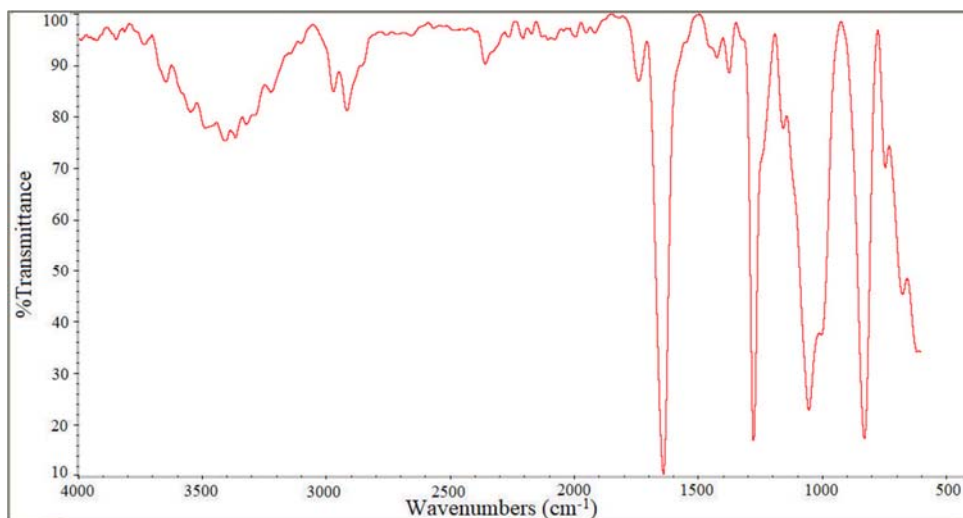
(ج)



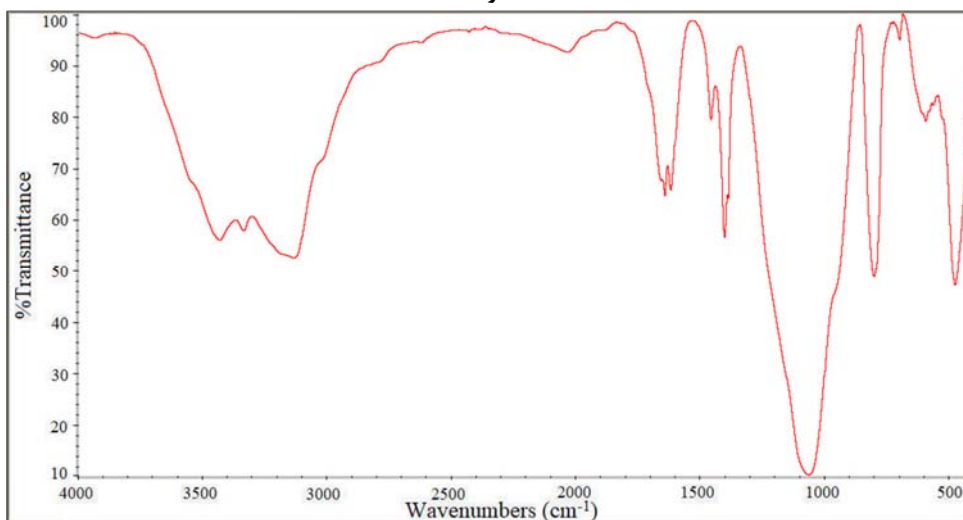
(د)



(ه)

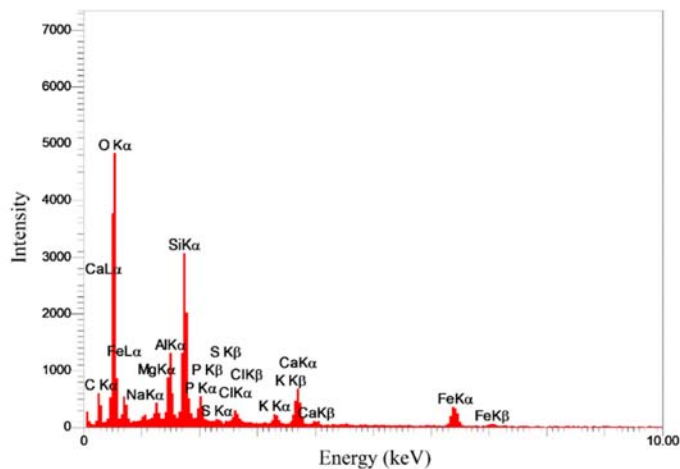


(و)

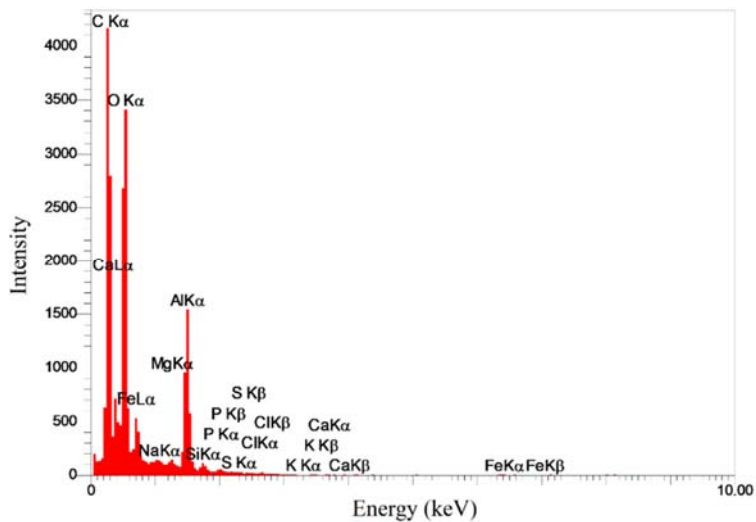


(ز)

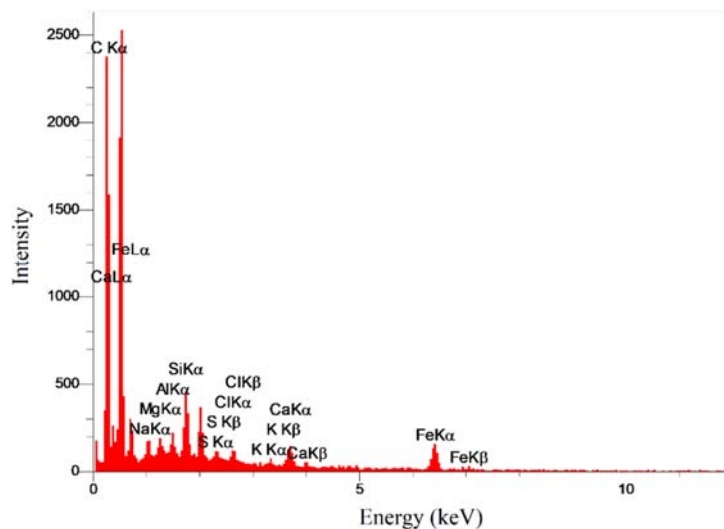
شکل ۵- تصویر FT-IR از همه فیلترهای مورد بررسی: الف) نمونه شماره ۱؛ ب) نمونه شماره ۲؛ ج) نمونه شماره ۳؛ د) نمونه شماره ۴؛ ه) نمونه شماره ۵؛ و) نمونه شماره ۶ و ز) نمونه شماره ۷



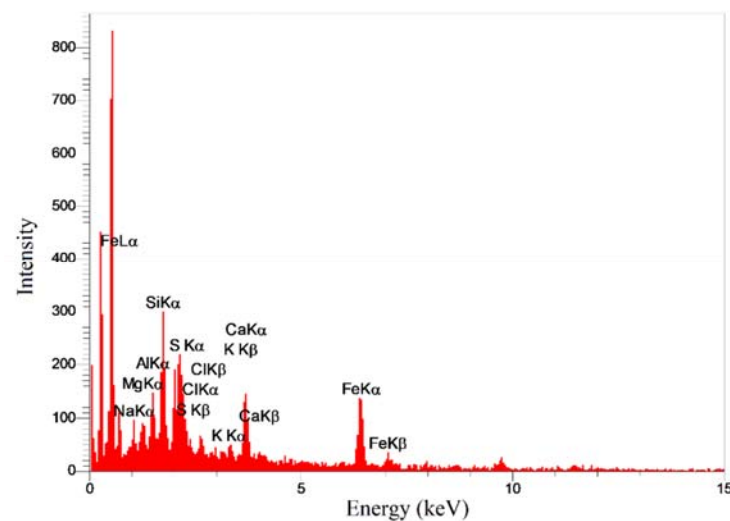
(الف)



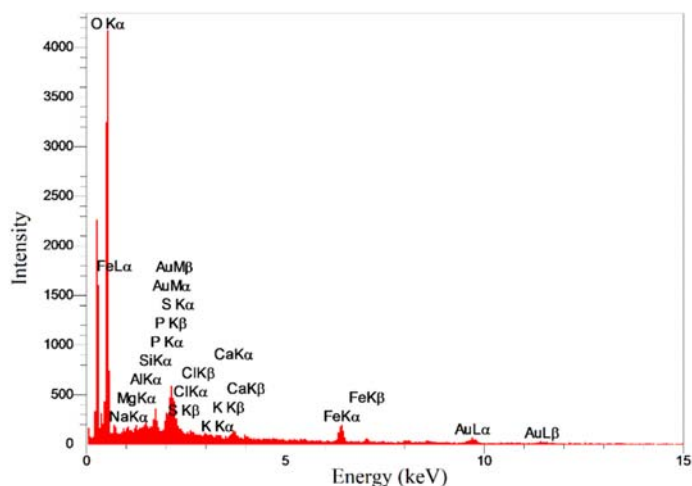
(ب)



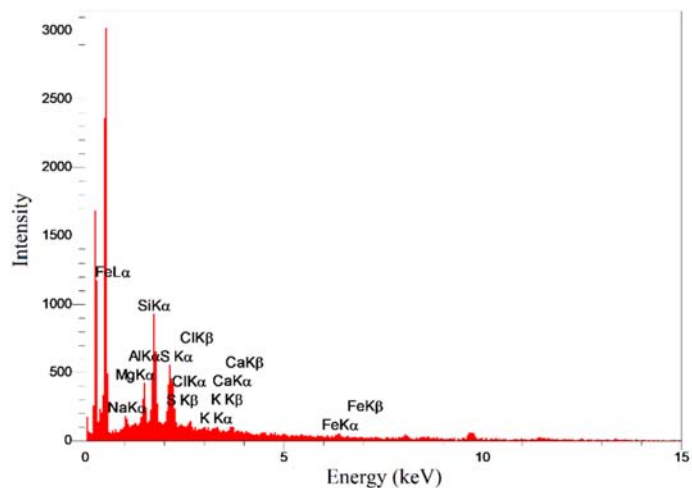
(ج)



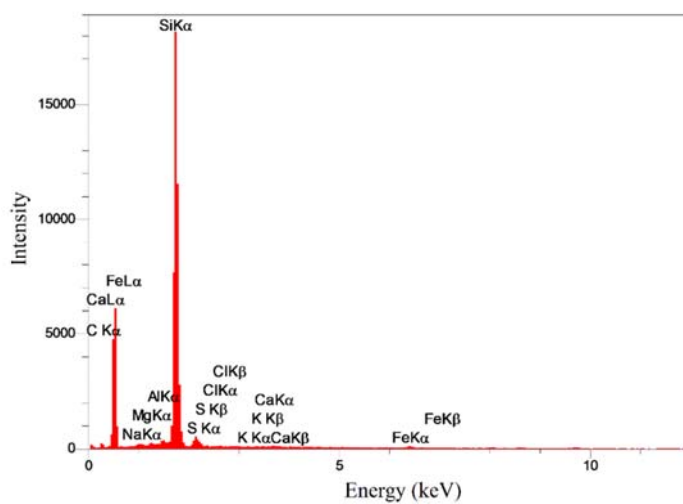
(د)



(ه)



(و)



(ز)

شکل ۶- تصویر EDX از همه فیلترهای SDI: الف) نمونه شماره ۱؛ ب) نمونه شماره ۲؛ ج) نمونه شماره ۳؛ د) نمونه شماره ۴؛ ه) نمونه شماره ۵؛ و) نمونه شماره ۶ و ز) نمونه شماره ۷

جدول ۴ مقایسه نهایی تأثیر فیلترهای سرامیکی و تفاوت کیفیت آب خام اولیه و خروجی از فیلترهای سرامیکی را به طور خلاصه نشان می‌دهد.

در جدول ۳ درصد‌های وزنی و اتمی نمودارهای موجود در شکل ۶ مشاهده می‌شود. براساس این نتایج بیشترین درصد وزنی مربوط به اکسیژن و کربن است که نشان‌دهنده وجود مواد آلی در آب است.

جدول ۳- درصد وزنی و اتمی عناصر موجود در فیلترها: الف) نمونه شماره ۱؛ ب) نمونه شماره ۲؛ ج) نمونه شماره ۳؛ د) نمونه شماره ۴؛ ه) نمونه شماره ۵؛ و) نمونه شماره ۶؛ ز) نمونه شماره ۷

(د)			(ج)			(ب)			(الف)		
عنصر	درصد وزنی %	درصد اتمی %	عنصر	درصد وزنی %	درصد اتمی %	عنصر	درصد وزنی %	درصد اتمی %	عنصر	درصد وزنی %	درصد اتمی %
C	۳۱/۵۷	۳۳/۹۴	C	۵۵/۱۸	۶۳/۰۲	C	۵۲/۹۵	۶۰/۶۶	C	۲۵/۹۸	۳۳/۹۴
O	۲۲/۸۶	۵۹/۶۲	O	۴۱/۴۷	۳۵/۵۵	O	۴۴/۰۳	۳۷/۸۷	O	۶۰/۷۹	۵۹/۶۲
Na	۰/۶۶	۰/۳۰	Na	۰/۴۴	۰/۲۶	Na	۰/۵۲	۰/۳۱	Na	۰/۴۴	۰/۳۰
Mg	۰/۶۸	۰/۴۱	Mg	۰/۲۹	۰/۱۶	Mg	۰/۳۵	۰/۲۶	Mg	۰/۶۴	۰/۴۱
Al	۱/۰۷	۱/۱۶	Al	۰/۲۶	۰/۱۳	Al	۰/۹۰	۰/۴۶	Al	۱/۹۹	۱/۱۶
Si	۲/۱۰	۲/۴۰	Si	۰/۵۴	۰/۲۶	Si	۰/۳۰	۰/۱۵	Si	۴/۳۰	۲/۴۰
P	۱/۲۱	۰/۴۲	P	۰/۴۱	۰/۱۸	P	۰/۲۷	۰/۱۲	P	۰/۸۲	۰/۴۲
S	۰/۴۹	۰/۰۸	S	۰/۱۳	۰/۰۶	S	۰/۱۶	۰/۰۷	S	۰/۱۷	۰/۰۸
Cl	۰/۸۷	۰/۲۱	Cl	۰/۱۶	۰/۰۶	Cl	۰/۱۶	۰/۰۶	Cl	۰/۴۸	۰/۲۱
K	۰/۶۳	۰/۱۷	K	۰/۰۶	۰/۰۲	K	۰/۰۵	۰/۰۲	K	۰/۴۲	۰/۱۷
Ca	۳/۳۷	۰/۶۰	Ca	۰/۲۷	۰/۰۹	Ca	۰/۱۳	۰/۰۵	Ca	۱/۵۴	۰/۶۰
Fe	۲۴/۰۵	۰/۶۸	Fe	۳۳/۹۴	۰/۲۰	Fe	۰/۱۸	۰/۰۴	Fe	۲/۴۳	۰/۶۸
Au	۱۰/۴۴	۱/۰۸		۱۰/۰۰	۱۰/۰۰		۱۰/۰۰	۱۰/۰۰		۱۰/۰۰	۱۰/۰۰
	۰	۰		۰	۰		۰	۰		۰	۰

عنصر	درصد وزنی %	درصد اتمی %
C	۳۰/۱۳	۵۱/۲۳
Na	۰/۶۴	۰/۵۷
Mg	۰/۶۶	۰/۵۵
Al	۱/۲۲	۰/۹۲
Si	۵۷/۵۶	۴۱/۸۵
S	۳/۵۲	۲/۲۴
Cl	۰/۶۳	۰/۳۶
K	۰/۴۹	۰/۲۶
Ca	۰/۹۱	۰/۴۶
Fe	۴/۲۴	۱/۵۵
	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰

عنصر	درصد وزنی %	درصد اتمی %
C	۴۲/۱۵	۵۷/۳۰
O	۳۶/۱۶	۳۶/۹۰
Na	۰/۵۷	۰/۴۱
Mg	۰/۳۳	۰/۲۲
Al	۱/۲۶	۰/۷۶
Si	۲/۹۱	۱/۶۹
P	۰/۲۲	۰/۱۲
S	۰/۳۰	۰/۱۵
Cl	۰/۸۵	۰/۳۹
K	۰/۸۴	۰/۳۵
Ca	۰/۹۰	۰/۳۷
Fe	۱/۰۵	۰/۳۱
Au	۱۲/۴۵	۱/۰۳
	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰

عنصر	درصد وزنی %	درصد اتمی %
C	۴۱/۴۳	۵۷/۰۶
O	۳۵/۹۷	۳۶/۹۸
Na	۰/۴۳	۰/۳۱
Mg	۰/۳۵	۰/۲۴
Al	۰/۴۸	۰/۲۹
Si	۰/۷۲	۰/۴۲
P	۰/۵۲	۰/۲۸
S	۰/۴۸	۰/۲۵
Cl	۰/۵۱	۰/۲۴
K	۰/۳۴	۰/۱۴
Ca	۰/۷۵	۰/۳۱
Fe	۹/۱۸	۲/۷۲
Au	۹/۰۴	۰/۷۶
	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰

جدول ۴- مقایسه نهایی تأثیر فیلترهای سرامیکی و تفاوت کیفیت آب خام اولیه و خروجی

واحد	مقدار خروجی	مقدار ورودی	مشخصه
ppm	۰/۰۵	۰/۱۱	Fe
ppm	۰/۰۲	۰/۰۵	Mn
ppm	۲۹/۷۸	۳۵	COD
ppm	۱۰/۵۸	۱۵/۸	BOD
ppm	۱	۱۱۷	TSS
NTU	۰/۵	۱۵	Turbidity
-	۷/۶	۷/۶	pH
ppm	۱۹۴۵	۱۹۴۵	TDS

#### ۴- نتیجه‌گیری

مهندس قول‌بیگی کمال تشکر و قدردانی می‌نماید.

#### ۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Reverse Osmosis (RO)
- 2- Silt Density Index (SDI)
- 3- Chemical Oxygen Demand (COD)
- 4- Biochemical Oxygen Demand (BOD)
- 5- Total Suspended Solids (TSS)
- 6- Nephelometric Turbidimeter Unit (NTU)
- 7- Total Dissolved Solids
- 8- Energy Dispersive X-Ray Analysis (EDX)
- 9- Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM)
- 10- Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

#### ۷- مراجع

پسندیده‌پور، ف.، غلامی، ف.، و اسدی، آ.، (۱۴۰۲)، "مروری بر عملکرد غشاهای نانوفیلتراسیون اصلاح شده با نانومواد معدنی، کربنی و ترکیبی از آنها"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۸ (۱)، ۱۵-۲۸.

<https://doi.org/10.22112/jwwse.2022.316060.1297>.

حسین‌زاده، م.، نبی‌بیدهندی، غ.، ترابیان، ع.، علیمزادی، م.س.، و نایب، ح.، (۱۳۹۵)، "مطالعه پایلوتی برای بررسی کارایی بیوراکتور غشایی در تصفیه پیشرفته پساب صنعتی برای پیش تصفیه اسمز معکوس"، *محیط‌شناسی*، ۴۲ (۲)، ۳۸۷-۳۹۶.

<https://doi.org/10.22059/jes.2016.58740>.

طهماسبی، ع.، صراف‌زاده، م.ح.، و غفاری، س.ب.، (۱۴۰۲)، "بهینه‌سازی فرآیند اکسیداسیون پیشرفته رادیکال سولفات برای کاهش مواد آلی فاضلاب کارخانه خمیر و کاغذ با استفاده از روش سطح پاسخ"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۸ (۳)، ۴۷-۵۸.

با توجه به بحران آب و کمبود ذخایر آب قابل‌شرب در جهان، استفاده از فناوری شیرین‌سازی منابع آب نامتعارف به‌عنوان یک راه‌حل جایگزین در دهه‌های اخیر همواره مطرح بوده است. در راستای حفاظت از تجهیزات و افزایش بازده فرایند نمک‌زدایی، طراحی یک روش پیش‌تصفیه مناسب توصیه شده است. روش مورد استفاده در این پژوهش براساس داده‌های مربوط به کیفیت آب خام ورودی، نصب فیلترهای سرامیکی به‌عنوان پیش‌تصفیه واحد اسمز معکوس بود. با توجه به وجود گاز متان و باکتری‌های بی‌هوازی موجود در آب ورودی، با نصب افشانک‌های هوا در ابتدای استخر ته‌نشینی و تزریق کلر و کلریدفریک به‌عنوان پیش‌تصفیه متداول واحد RO انجام شد. سپس با استفاده از فیلترهای سرامیکی کیفیت آب خام، میزان کدورت و SDI که از مهم‌ترین ملاک‌های عملکرد واحدهای RO است، تا حد مناسبی بهبود یافت. در این پژوهش با توجه به شرایط آب ورودی روش‌های پیش‌تصفیه مختلفی بررسی شد و رسوب روی فیلترها با استفاده از آنالیزهای FE-SEM، FT-IR و EDX مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان داد که فیلترهای سرامیکی به‌دلیل دارا بودن سطح ویژه بالا و پتانسیل زتا منفی در محدوده عملیاتی، قادر به جذب ذرات با بار مثبت و دفع ذرات با بار منفی هستند. بنابراین، این فیلترها بخش زیادی از ذرات معلق جامد و محتویات آبی با بار منفی مانند باکتری‌ها و جلبک‌ها را حذف کرده و زمینه‌ساز بهبود کیفیت آب ورودی به سامانه RO می‌شوند.

#### ۵- قدردانی

بدین‌وسیله از مدیریت محترم شرکت مهندسی رعد آب جنوب که زمینه‌ساز انجام این پژوهش بودند و به‌خصوص جناب آقای

- Dutta, A., (2017), "Fourier transform infrared spectroscopy", In: S. Thomas, R. Thomas, A.K. Zachariah and R.K., Mishra (eds.), *Spectroscopic Methods for Nanomaterials Characterization*, (pp. 73-93), Elsevier, Amsterdam, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-46140-5.00004-2>.
- Fayaz, S.M.H., Mafigholami, R., Razavian, F., and Ghasemipناه, K., (2019), "Correlations between silt density index, turbidity and oxidation-reduction potential parameters in seawater reverse osmosis desalination", *Water Science and Engineering*, 12(2), 115-120, <https://doi.org/10.1016/j.wse.2019.05.006>.
- Gao, Q., Duan, L., Liu, J., Zhang, H. and Zhao, Y., (2023), "Evaluation and optimization of reverse osmosis pretreatment technology using the modified intermediate blocking model", *Journal of Cleaner Production*, 417, 138029, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138029>.
- Greenlee, L.F., Lawler, D.F., Freeman, B.D., Marrot, B., and Moulin, P., (2009), "Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges", *Water Research*, 43(9), 2317-2348, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.010>.
- Hamad, J.Z., Ha, C., Kennedy, M.D., and Amy, G.L., (2013), "Application of ceramic membranes for seawater reverse osmosis (SWRO) pre-treatment", *Desalination and Water Treatment*, 51(25-27), 4881-4891, <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.795211>.
- Jarrar, R., Abbas, M.K.G., and Al-Ejji, M., (2024), "Environmental remediation and the efficacy of ceramic membranes in wastewater treatment, A review", *Emergent Materials*, 7, 1295-1327, <https://doi.org/10.1007/s42247-024-00687-0>.
- Kang, J.S., Sung, S.C., Lee, J.J., and Kim, H.S., (2016), "Application of ceramic membrane for seawater desalination pretreatment", *Desalination and Water Treatment*, 57(55), 26700-26705, <https://doi.org/10.1080/19443994.2016.1189702>.
- Majidi, M., (2000), "Optimization of flocculation process and continuous filtration for sea water primary treatment filtration to reduce SDI for entree to reverse osmosis system", Ph.D. Thesis, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran.
- Malayeri, H.Z., Twardowski, M., Sullivan, J., Moore, T., and Choi, H., (2018), "Correlation of cyanobacterial harmful bloom monitoring parameters: A case study on western Lake Erie", *AIMS Environmental Science*, 5(1), 24-34, <https://doi.org/10.3934/environsci.2018.1.24>.
- Mukherjee, D., and Ghosh, S., (2022), "Ceramic membranes in water treatment: Potential and challenges for technology development", In: S. Moulik, A. Mullick and A. Roy (eds.), *Sustainable Water Treatment: Advances and Technological Interventions*, (pp. 325-381), John Wiley & Sons, New Jersey, <https://doi.org/10.1002/9781119480075.ch8>.
- Pan, Y., Li, H., Zhang, X., and Li, A., (2016), "Characterization of natural organic matter in drinking <https://doi.org/10.22112/JWWSE.2023.370878.1334> مرادی، آ.، نکوئی، ع.ر.، و قلی‌پور، م.، (۱۴۰۲)، "بررسی کارایی منعقدکننده‌های شیمیایی متفاوت در کاهش کدورت، سولفات و آمونیاک در پساب شرکت پتروشیمی زاگرس"، *مجله آب و فاضلاب*، ۳۴(۱)، ۷۸-۹۵، <https://doi.org/10.22093/wvj.2022.357704.3283>.
- موسوی‌نسب، ز.، اسمعیل زاده، ش.، و حقیقی، ا.، (۱۴۰۲)، "مروری بر حذف بور از آب دریا با استفاده از فناوری اسمز معکوس"، *علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۸(۱)، ۳-۱۴، <https://doi.org/10.22112/JWWSE.2022.314769.1296>.
- Ahmad, A.L. and Mariadas, A., (2004), "Baffled microfiltration membrane and its fouling control for feed water of desalination", *Desalination*, 168, 223-230, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.07.002>.
- American Public Health Association (APHA), (2017), *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 23th Edition, University of California, USA, 1268 p.
- Anis, S.F., Hashaikeh, R. and Hilal, N., (2019), "Reverse osmosis pretreatment technologies and future trends: A comprehensive review", *Desalination*, 452, 159-195, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.11.006>.
- Asif, M.B., and Zhang, Z., (2021), "Ceramic membrane technology for water and wastewater treatment: A critical review of performance, full-scale applications, membrane fouling and prospects", *Chemical Engineering Journal*, 418, 129481, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129481>.
- Chauhan, N., Sharma, R., and Singh, S.P., (2023), "Synthesis of ceramic membranes and their application in wastewater treatment and emerging contaminants removal", In: A. Sinha, S.P. Singh and A.B. Gupta (eds.), *Persistent Pollutants in Water and Advanced Treatment Technology*, (pp. 413-446), Springer Nature, Singapore, [https://doi.org/10.1007/978-981-99-2062-4\\_17](https://doi.org/10.1007/978-981-99-2062-4_17).
- Cozzolino, D., (2014), "An overview of the use of infrared spectroscopy and chemometrics in authenticity and traceability of cereals", *Food Research International*, 60, 262-265, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.08.034>.
- Cui, Z., Xing, W., Fan, Y. and Xu, N., (2011), "Pilot study on the ceramic membrane pre-treatment for seawater desalination with reverse osmosis in Tianjin Bohai Bay", *Desalination*, 279(1-3), 190-194, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.06.008>.
- Deborde, M., and Von Gunten, U.R.S., (2008), "Reactions of chlorine with inorganic and organic compounds during water treatment—kinetics and mechanisms: A critical review", *Water Research*, 42(1-2), 13-51, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.07.025>.
- Dey, T., Sahoo, G.C., Roy, S.N., and Bandyopadhyay, S., (2013), "Studies on pre-treatment of seawater using tubular ceramic MF membrane of 19-channel configuration", *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3(10), 1-5.

- water: Sample preparation and analytical approaches”, *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 12, 23-30, <https://doi.org/10.1016/j.teac.2016.11.002>.
- Qasim, M., Badrelzaman, M., Darwish, N.N., Darwish, N.A., and Hilal, N., (2019), “Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review”, *Desalination*, 459, 59-104, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.02.008>.
- Ramanathan, M., Cohn, A., Hake, J., Abraham, K., and Veerapaneni, S., (2006), “Producing high-purity recycled water for industrial applications with microfiltration and reverse osmosis: Lessons learned”, *Proceeding Conference on the Water Environment Federation*, Washington, USA, (pp. 6067-6086), <https://doi.org/10.2175/193864706783775829>.
- Rice, E.W., Baird, R.B., and Eaton, A.D., (2012), *Standard methods for the examination of water and wastewater*, American Public Health Association, Washington, USA.
- Xu, P., and Drewes, J. E., (2006), “Viability of nanofiltration and ultra-low pressure reverse osmosis membranes for multi-beneficial use of methane produced water”, *Separation and Purification Technology*, 52(1), 67-76, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2006.03.019>.
- Xu, J., Chang, C.Y., and Gao, C., (2010), “Performance of a ceramic ultrafiltration membrane system in pretreatment to seawater desalination”, *Separation and Purification Technology*, 75(2), 165-173, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.07.020>.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.