



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

مقاله پژوهشی

ارزیابی کارایی ازن‌زنی و فیلتراسیون غشایی به عنوان جایگزین فرآیند کلرزنی در گندزدایی آب آشامیدنی از منبع رودخانه مارون بهبهان

محمد جندکاری پور^۱، مهدی الیاسی کجاباد^{۱*}، راهله حقیقی^{۲،۳}

- ۱- گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران
- ۲- گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز، اهواز، ایران
- ۳- شرکت آب و فاضلاب استان خوزستان، تصفیه‌خانه آب شرب شهرستان بهبهان - واحد کنترل کیفیت و فرآیند، بهبهان، ایران

اطلاعات مقاله:

چکیده

زمینه و هدف: نگرانی‌های فزاینده در مورد محصولات جانبی گندزدایی (DBPs) ناشی از کلرزنی متعارف، نیازمند رویکردهای جایگزین در تصفیه آب است. این مطالعه به بررسی کارایی سیستم ترکیبی ازن‌زنی و فیلتراسیون غشایی سرامیکی برای تصفیه آب آشامیدنی می‌پردازد.

روش بررسی: غشای سرامیکی با استفاده از روش ریخته‌گری تولید، مشخصه‌یابی و ارزیابی گردید. کارایی ازن‌زنی نیز با تزریق ۱ g ازن به مدت ۳ min به ۲/۵ L نمونه (غلظت ۰/۰۲ g/L) بررسی شد. کیفیت آب با سنجش پارامترهای کدورت و کل مواد جامد محلول (TDS) و آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی و شاخص‌های میکروبیولوژیکی شامل باکتری‌های کلیفرم و اشرشیاکلی بررسی شد.

یافته‌ها: بررسی مورفولوژی غشایی متخلخل بودن غشا را تایید کرده و نتایج حاصل از ارزیابی شار عبوری نشان داد شار عبوری غشا از ۴۷۵ Lmh به ۳۱۳ Lmh کاهش یافت که با شستشوی معکوس ۹۶ درصد بازیابی داشت. غشا باعث کاهش کدورت از ۱/۷۲ NTU به ۰/۵ NTU شد که بیانگر بازده ۷۱ درصدی نسبت به نمونه قبل از فیلتراسیون بود. ازن‌زنی تاثیری بر کدورت آب نداشت، اما باعث حذف کامل باکتری‌های کلیفرم و اشرشیاکلی بود. فیلتراسیون غشایی در حذف ۶۶ درصدی این باکتری‌ها موفق بود.

نتیجه‌گیری: فیلتراسیون غشایی به عنوان روش مکمل برای هر یک از دو روش ازن‌زنی یا کلرزنی، بخش عمده آلودگی را حذف کرده و استفاده از یک ضدعفونی سبک در ادامه کافی است. ترکیب استفاده از ازن‌زنی و کلرزنی با غلظت‌های کم در کنار هم به عنوان دو روش مکمل، از تشکیل DBPs جلوگیری کرده که گامی به سوی تأمین آب آشامیدنی ایمن‌تر و سالم‌تر خواهد بود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۲۶

واژگان کلیدی: تصفیه آب، ازن‌زنی، فیلتراسیون غشایی، آب آشامیدنی

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:
m.elyasi@bktu.ac.ir

Please cite this article as: Jandkaripour M, Elyasi Kojabad M, Haghighi R. Evaluating the efficacy of ozonation and membrane filtration as alternatives to chlorination for disinfecting drinking water from the Behbahan Maroon river source. Iranian Journal of Health and Environment. 2026;19(1):87-106.



مقدمه

تامین آب آشامیدنی سالم و مطمئن، که عاری از عوامل بیماری‌زا و آلاینده‌های شیمیایی خطرناک باشد، نه تنها یک نیاز اولیه بشر، بلکه یکی از ارکان اساسی توسعه پایدار و حفظ سلامت جامعه محسوب می‌شود (۱). دستیابی به این هدف حیاتی، مستلزم بهره‌گیری از سیستم‌های تصفیه آب کارآمد و چندمرحله‌ای است که در این میان، فرآیند گندزدایی به عنوان آخرین و بی‌تردید حیاتی‌ترین حلقه در زنجیره تصفیه آب، نقشی غیرقابل انکار و تعیین‌کننده در نابودی پاتوژن‌ها، ویروس‌ها و میکروارگانیسم‌های بیماری‌زای مقاوم ایفا می‌کند (۲). این مرحله، سد نهایی در برابر تهدیدات میکروبی است که کیفیت نهایی آب را تضمین می‌نماید (۳).

برای دهه‌های متمادی، کلر و ترکیبات آن به دلایل متعددی از جمله هزینه عملیاتی و سرمایه‌گذاری نسبتاً پایین، کارایی اثبات شده در گندزدایی طیف وسیعی از میکروارگانیسم‌ها و مهم‌تر از همه، به دلیل دارا بودن اثر باقیمانده قوی، به عنوان گزینه غالب و جهانی در فرآیند گندزدایی آب در اکثر تصفیه‌خانه‌های جهان مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۴، ۵). این اثر باقیمانده، که به وجود کلر آزاد در آب حتی پس از خروج از تصفیه‌خانه اشاره دارد، یک لایه محافظتی مستمر و ارزشمند در طول شبکه گسترده توزیع آب ایجاد می‌کند و به طور مؤثری از رشد مجدد میکروب‌ها و وقوع آلودگی‌های ثانویه در مسیر طولانی تا نقطه مصرف نهایی جلوگیری به عمل می‌آورد (۵، ۶). این مزیت کلیدی، برای دهه‌های طولانی، جایگاه کلر را به عنوان سنگ‌بنای گندزدایی در صنعت آب تثبیت کرده بود (۷، ۸). با این وجود، استفاده گسترده و دیرپای کلر، علی‌رغم مزایای آشکار آن، خالی از چالش‌های جدی و نگرانی‌های فزاینده نبوده است. مهم‌ترین نقیصه این روش، پدیده‌ای است که هنگام واکنش کلر با پیش‌سازهای آلی، عمدتاً مواد آلی طبیعی مانند اسیدهای هیومیک و فولویک موجود در منبع آب، رخ می‌دهد. این واکنش شیمیایی اجتناب‌ناپذیر منجر به تشکیل طیف وسیعی از ترکیبات شیمیایی ناخواسته

و بالقوه خطرناک تحت عنوان محصولات جانبی گندزدایی (DBPs) می‌گردد. بدین صورت که کلر به عنوان یک عامل اکسیدکننده و جانشین‌کننده قوی، به ساختار مولکولی مواد آلی حمله کرده و اتم‌های هالوژن (مانند کلر) را به آن متصل می‌سازد که حاصل نهایی این فرآیند، ایجاد ترکیبات هالوژنه است (۹، ۱۰). به عبارتی فرآیند کلرزنی به‌عنوان روش متعارف گندزدایی، با تشکیل محصولات جانبی آلی کلردار و برم‌دار نظیر تری‌هالومتان‌ها (THMs) و هالواستیک اسیدها (HAAs) همراه است که از واکنش کلر با مواد آلی طبیعی آب حاصل می‌شوند. مطالعات اپیدمیولوژیک، این ترکیبات را با پیامدهای نامطلوب سلامت از جمله افزایش خطر ابتلا به انواع خاصی از سرطان‌ها به ویژه سرطان مثانه و روده بزرگ، آسیب‌های کبدی و کلیوی، اختلالات سیستم عصبی مرکزی، مشکلات تولیدمثلی و ناهنجاری‌های رشد جنینی است. این یافته‌ها، که توسط نهادهای معتبر تأیید شده‌اند، زنگ خطری برای متخصصان حوزه آب به صدا درآوردند (۱۱). در نتیجه، این نگرانی‌های بهداشتی جدی، به همراه چالش‌های دیگری از جمله ایجاد طعم و بوی نامطلوب در آب انگیزه‌ای قوی و فوری را در جامعه علمی و مهندسی جهان برای جست‌وجو، توسعه و به کارگیری فناوری‌های گندزدایی جایگزین و ایمن‌تر که بتوانند همزمان کارایی ضدعفونی‌کنندگی بالا را حفظ کرده و هم از تشکیل DBPs جلوگیری کنند، ایجاد کرده است (۱۲). در این میان، ازن‌زنی و فیلتراسیون غشایی به عنوان دو فناوری پیشرفته و امیدبخش مطرح هستند که هر یک به صورت مجزا پتانسیل بالایی برای جایگزینی یا تکمیل فرآیند مرسوم کلرزنی نهایی از خود نشان داده‌اند (۱۳). ازن به عنوان یکی از قوی‌ترین اکسیدکننده‌های موجود در صنعت تصفیه آب، دارای مکانیسم عمل کاملاً متفاوتی است. این گاز نه تنها به دلیل قدرت اکسیداسیون فوق‌العاده بالا، بلکه به دلیل ماهیت ناپایداری که دارد و تجزیه آن به اکسیژن معمولی، یک گندزدای سازگار با محیط زیست محسوب می‌شود (۱۴، ۱۵). توانایی بی‌نظیر ازن در غیرفعال‌سازی طیف وسیعی از پاتوژن‌ها،

۷۶ درصد آلاینده‌های آلی شد. در حالی که مطالعات پیشین به بررسی کارایی فناوری‌های مختلف پرداخته‌اند، تمایز اصلی این پژوهش در انجام یک مطالعه تطبیقی مستقل و موازی بر روی هر دو فناوری به عنوان جایگزین‌های مستقل برای فرآیند کلرزی متعارف، بر روی یک نمونه آب واقعی (رودخانه مارون) با ویژگی‌های خاص فیزیکوشیمیایی است. در این مطالعه، هر دو فرآیند به طور جداگانه و در شرایط یکسان مورد ارزیابی قرار گرفتند. علاوه بر سنجش کارایی گندزدایی، بررسی دقیق پدیده گرفتگی غشا و بازیافت شار آن به صورت عملی و همچنین پایش تغییرات پارامترهای فیزیکوشیمیایی کلیدی پس از اعمال هر فرآیند، از دیگر وجوه تمایز این مطالعه است. تمرکز این مطالعه بر روی آب خام رودخانه مارون در شهرستان بهبهان است. این منبع آبی، به عنوان شریان اصلی تأمین آب آشامیدنی، در معرض انواع آلاینده‌های میکروبی و شیمیایی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و رواناب سطحی قرار دارد. در تصفیه‌خانه کنونی، کلرزی پایانی روش اصلی گندزدایی است. در این مطالعه، نمونه‌ها بلافاصله قبل از مرحله کلرزی نهایی، از خروجی واحدهای تصفیه قبلی یعنی زلال‌سازها و فیلترهای شنی اخذ شده‌اند تا امکان مقایسه مستقیم بین کارایی روش کلرزی و دو روش پیشنهادی از ن و فیلتراسیون غشایی بر روی آبی با کیفیت یکسان فراهم گردد.

مواد و روش‌ها

— مواد شیمیایی مورد استفاده

در این پژوهش، به منظور ساخت غشاهای سرامیکی مورد استفاده در فرآیند فیلتراسیون، از مواد شیمیایی با درجه خلوص بالا استفاده گردید. ماده پایه اصلی برای ساخت غشا، پودر آلومینا (Al_2O_3) با خلوص ۹۶ درصد بود که از شرکت نسوز خوزستان تهیه شد. به عنوان افزودنی‌های فرآیند ساخت، از سدیم هیدروکسید (NaOH) با خلوص ۹۸ درصد به عنوان عامل کمک ذوب و کنترل کننده pH، و همچنین از پیش ماده‌های پلیمری شامل آکریل آمید (C_3H_5NO),

از جمله باکتری‌ها و ویروس‌ها آن را به گزینه‌ای بسیار جذاب تبدیل کرده است. علاوه بر این، ازن به طور مؤثری قادر است بسیاری از ترکیبات آلی و معدنی مولد طعم و بو، رنگ‌دانه‌ها و حتی برخی از آلاینده‌های نوظهور را تجزیه و اکسید نماید، که این خود به بهبود کیفیت ظاهری و شیمیایی آب منجر می‌شود (۱۶). از سوی دیگر، فیلتراسیون غشایی رویکردی کاملاً فیزیکی و مکانیکی را برای حذف آلاینده‌ها دنبال می‌کند. این فناوری با بهره‌گیری از منافذ بسیار ریز، عملاً به عنوان یک صافی مطلق عمل می‌کند. این مکانیسم بر پایه اندازه، سدی تقریباً غیرقابل نفوذ در برابر ذرات کلوئیدی، کدورت، باکتری‌ها، کیست‌ها و حتی برخی از ویروس‌های درشت ایجاد می‌کند، بدون آنکه نیاز به افزودن مواد شیمیایی و نگرانی از تشکیل محصولات جانبی باشد (۱۷). بزرگ‌ترین مزیت این سیستم، حذف فیزیکی و پایدار میکروارگانیسم‌هاست، به طوری که احتمال بازگشت یا فعال‌سازی مجدد آنها را به حداقل می‌رساند (۱۸، ۱۹). مطالعات متعددی به صورت جداگانه به بررسی روش‌های مختلف گندزدایی آب پرداخته‌اند. در این میان، Huang و همکاران (۹) فناوری ترکیبی فوتوالکتروشیمیایی-جوشاندن را برای حذف DBPs از آب آشامیدنی ارائه کردند. در حالی که جوشاندن سنتی تنها قادر به حذف کمتر از ۱۰ درصد از برخی از DBPs بود، این فناوری با ترکیب فرآیندهای فوتوالکتروشیمیایی و حرارتی به راندمان حذف بالای ۷۰ درصد دست یافت. بر اساس مطالعه‌ای در زمینه فناوری غشا، Tupe و همکاران (۲۰) به بررسی غشاهای ساخته شده از پلی‌سولفون با افزودنی‌های طبیعی پرداختند. نتایج نشان داد که غشاهای حاوی ۰/۱۵ درصد پودر برگ موز بالاترین کارایی را از نظر نفوذپذیری آب، تخلخل، مقاومت در برابر گرفتگی و استحکام مکانیکی دارند. اندازه منافذ این غشاها کوچکتر از باکتری‌های رایجی مانند اشرشیاکلی بوده و برای شرایط محیطی با فشار و دمای بالا مناسب هستند. Shen و همکاران (۲۱) یک فناوری نوین کربن فعال دانه‌ای-نانو ازن را معرفی کردند. این روش موجب افزایش ۶ درصدی ظرفیت جذب کربن و حذف بیش از

افزودن آغازگر (که زمان لازم برای آغاز واکنش پلیمریزاسیون بود)، عملیات قالب‌ریزی در قالب‌های استوانه‌ای استاندارد انجام پذیرفت. در نهایت، نمونه‌های قالب‌گیری شده تحت یک پروفیل حرارتی برنامه‌ریزی شده در کوره الکتریکی قرار گرفتند. این پروفیل شامل مرحله خشک کردن در 100°C به مدت ۲ h و سپس عملیات سینترینگ (Sintering) در دمای نهایی 1000°C به مدت ۳ h با نرخ گرمایش و سرمایش $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ بود تا ساختار نهایی غشای سرامیکی متراکم و مستحکم حاصل شود (۲۲). مورفولوژی غشاهای تهیه شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) با مدل LMU TESCAN BRNO-Mira3 مورد بررسی قرار گرفت.

– فرایند تصفیه

سامانه مورد استفاده در این مطالعه، یک سامانه ناپیوسته بود که به طور شماتیک در شکل ۱-الف نشان داده شده است. این سامانه از بخش‌های اصلی واحد اکسیژن‌ساز با ظرفیت L/min ۵، واحد تولید ازن با ظرفیت g/h ۲۵ و راکتور تماس ازن با ظرفیت L $2/5$ تشکیل شده است. نحوه کار سیستم ازن‌زنی به این شکل است که ابتدا دستگاه اکسیژن‌ساز، هوای محیط را گرفته و با حذف نیتروژن و سایر گازها، گاز خروجی با خلوص بالای اکسیژن تولید می‌کند. در ادامه گاز اکسیژن تولید شده توسط اکسیژن‌ساز، به یک دستگاه مولد ازن از نوع تخلیه الکتریکی هدایت شده و در این محفظه، با ایجاد میدان الکتریکی قوی مولکول‌های اکسیژن شکسته شده و اتم‌های اکسیژن فعال تشکیل می‌گردد. این اتم‌ها با اتصال به مولکول‌های دیگر اکسیژن، ازن را تولید می‌کنند. دستگاه به منظور تولید g/h ۱ ازن تنظیم شده و مخلوط گاز حاوی ازن تولید شده به مدت 3 min از انتهای یک راکتور استوانه‌ای شیشه‌ای با حجم L $2/5$ و از طریق یک دیفیوزر با تخلخل ریز به داخل نمونه آب تزریق شد (غلظت g/L 0.2). وظیفه دیفیوزر، تولید حباب‌های ریز و یکنواخت برای حداکثر کردن سطح تماس گاز-مایع و افزایش راندمان انتقال جرم ازن به فاز

پتاسیم متابیسولفیت ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$) و دی‌آمونیم فسفات ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$) همگی با خلوص ۹۹ درصد (تهیه شده از شرکت مرک آلمان) به ترتیب به عنوان منومر، آغازگر و عامل تقویت کننده شبکه پلیمری در روش ژل‌کستینگ استفاده شد. همچنین، نمونه‌های آب مورد استفاده در این مطالعه، از خروجی واحدهای پیش از گندزدایی نهایی تصفیه‌خانه شهرستان بهبهان اخذ گردید. این آب که از منبع سطحی رودخانه مارون تأمین می‌شود، پس از گذراندن مراحل متعارف تصفیه شامل انعقاد، ته نشینی و فیلتراسیون شنی و قبل از افزودن کلر جمع‌آوری شد تا بتوان اثر فرآیندهای جایگزین گندزدایی ازن و فیلتراسیون غشایی را بر روی آبی با کیفیت یکسان و قابل مقایسه با آب ورودی به مرحله کلرزنی متعارف، به دقت مورد ارزیابی قرار داد.

– تهیه غشای سرامیکی

در گام نخست، مقدار معینی آب مقطر به عنوان حلال درون یک بشر پیرکس ریخته شد. سپس، آکریل آمید به عنوان منومر اصلی به آن افزوده گردید و با استفاده از همزن مغناطیسی تا حصول یک محلول شفاف و کاملاً یکنواخت تحت همزدن قرار گرفت. در مرحله بعد، به منظور ایجاد شرایط بهینه برای واکنش‌های بعدی، pH محلول با افزودن قطره‌ای محلول سدیم هیدروکسید 1 M (NaOH) دقیقاً بر روی ۹ تنظیم شد. متعاقباً، پتاسیم متابیسولفیت ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$) به عنوان یک عامل کاهنده برای آغاز و تسهیل واکنش تشکیل شبکه پلیمری و سپس پودر آلومینا (Al_2O_3) با خلوص ۹۶ درصد به صورت تدریجی و گام‌به‌گام به مخلوط اضافه شدند. سوسپانسیون حاصل به مدت 48 h تحت همزن مکانیکی قرار گرفت تا ضمن جلوگیری از ته‌نشینی ذرات، یک سوسپانسیون کاملاً همگن و پایدار حاصل گردد. پس از اطمینان از همگنی، دمای سوسپانسیون با استفاده از یک حمام آب کنترل شده به 50°C افزایش یافت. در این دما، دی‌آمونیم فسفات ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$) به عنوان آغازگر واکنش پلیمریزاسیون رادیکالی به سیستم افزوده شد. پس از گذشت 5 min از

مخزن خوراک به صورت پیوسته از غشا عبور داده می‌شود، حجم نمونه مورد بررسی در هر آزمایش قابل توجه بوده که با دو بار تکرار صورت گرفت. سازوکار عملکرد غشای سرامیکی به این شکل است که به دلیل داشتن ساختار متخلخل ذرات معلق و برخی آلاینده‌های میکروبی پشت حفرات مانده و آب تصفیه شده از داخل حفرات رد شده و بعنوان جریان عبور کرده جمع آوری می‌شود. عامل اصلی عبور آب از داخل حفرات غشا، اختلاف فشاری (۰/۵ atm) است که در دمای محیط توسط پمپ اعمال می‌شود. علاوه بر این در فرایند مورد نظر یک سیستم شستشو تعبیه شده که در صورت کاهش شار عبوری از غشا و تجمع ذرات بر روی سطح حفرات، شستشوی سطح غشا توسط این سیستم صورت گیرد تا عبوردهی غشا بهبود یابد. لازم به ذکر است که خروجی پمپ که آب تصفیه شده است در بازه‌های زمانی مختلف با استفاده از استوانه مدرج اندازه‌گیری شده و بر این اساس شار جریان خروجی از غشا برحسب L/h m^2 (Lmh) با استفاده از رابطه ۱ بدست می‌آید (۲۳).

$$J = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

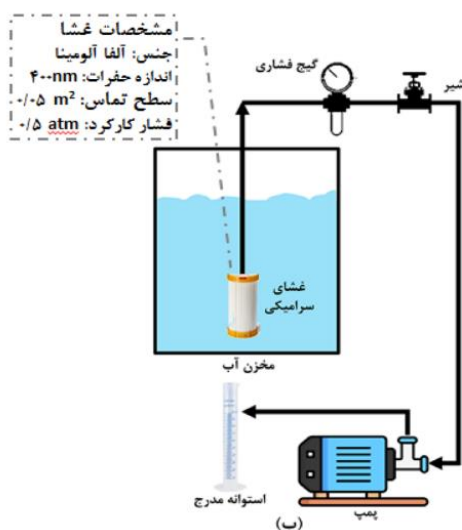
که در آن Q دبی حجمی جریان عبور کرده برحسب L/h و A نشان‌دهنده سطح مقطع غشایی برحسب m^2 است.

آبی بود. لازم به ذکر است به منظور افزایش زماند ماند گاز ازن در داخل آب و حداقل کردن مولکول‌های ازنی که وارد واکنش نشده‌اند از یک راکتور با ارتفاع زیاد ۲ m و قطر کم ۴ cm استفاده شد تا مولکول‌های ازن زمان کافی برای واکنش را داشته باشند.

شکل ۱-ب شماتیکی از سیستم مربوط به فیلتراسیون غشایی را نشان می‌دهد. مطابق شکل، این سیستم شامل اجزای اصلی مخزن خوراک حاوی آب پیش تصفیه شده، پمپ دیافراگمی برند هیدون مدل JET-50 ایجاد کننده نیروی محرکه اختلاف فشار لازم برای عبور فاز سیال از منافذ غشا و غشای سرامیکی با ساختار نامتقارن و تخلخل ریز (حدود ۴۰۰ nm) که در بخش قبل مراحل ساخت آن شرح داده شده، است. اساس کار این سامانه بر الک کردن سطحی استوار است. بدین صورت که ذرات، میکروارگانیسم‌ها و مولکول‌هایی که اندازه آنها از اندازه منافذ غشا بزرگ‌تر باشد، به طور کامل در سطح غشا جمع می‌شوند و تنها آب و مواد محلول با اندازه کوچک‌تر از منافذ غشا عبور می‌کنند. مراحل اصلی این فرآیند به این ترتیب است که ابتدا، آب آشامیدنی خروجی از تصفیه‌خانه قبل از مرحله کلرزنی در یک مخزن ذخیره جمع‌آوری شده و سپس، تصفیه با استفاده از غشای سرامیکی انجام پذیرفت. از آنجایی که این روش به صورت پیوسته انجام می‌گرفت و آب ریخته شده به



شکل ۱- شماتیک فرایند ازن زنی (الف) و فیلتراسیون غشایی (ب)



ادامه شکل ۱- شماتیک فرایند ازن‌زنی (الف) و فیلتراسیون غشایی (ب)

امکان مقایسه کمی کارایی هر یک از فرآیندهای مورد مطالعه ازن‌زنی و فیلتراسیون غشایی را در حذف آلاینده‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی فراهم نمودند دوبار تکرار شده و مقدار متوسط مقادیر بدست آمده، گزارش شدند.

یافته‌ها

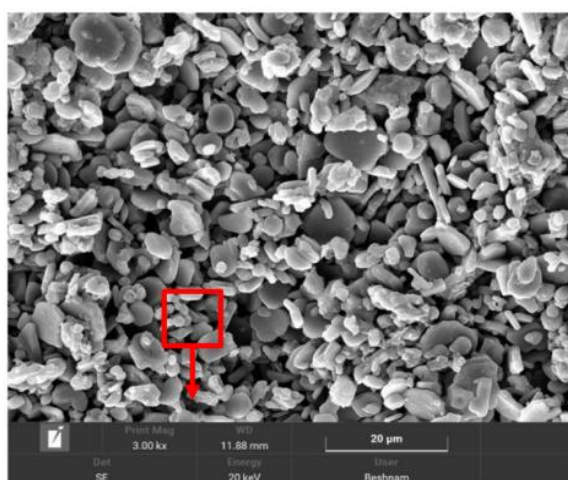
به منظور بررسی مورفولوژی سطح و تعیین توزیع اندازه حفره‌های غشای سرامیکی ساخته شده، از آنالیز FESEM استفاده شد. تصاویر به دست آمده در دو بزرگنمایی مختلف، اطلاعات ارزشمندی را از ریزساختار غشا فراهم می‌نمایند (شکل ۲). مشاهدات در بزرگنمایی پایین، تصویری از یکنواختی سطح، توزیع یکنواخت ذرات و عدم وجود ترک‌ها یا عیوب ماکروسکوپی را به خوبی نشان می‌دهد. این تصویر تأیید می‌کند که فرآیند ساخت (شامل اختلاط، قالب‌گیری و سینترینگ) به درستی انجام شده و به یک ساختار یکپارچه و بدون ناپیوستگی منجر گردیده است. در بزرگنمایی بالاتر، جزئیات دقیق‌تری از نحوه آرایش و اتصال ذرات آشکار می‌گردد. همانطور که در شکل ۲ مشهود است، ذرات اولیه آلومینا که دارای اشکال چندضلعی و اندازه‌های نسبتاً یکنواخت هستند، به صورت کاملاً فشرده در

_ خواص فیزیکوشیمیایی و میکروبیولوژیکی

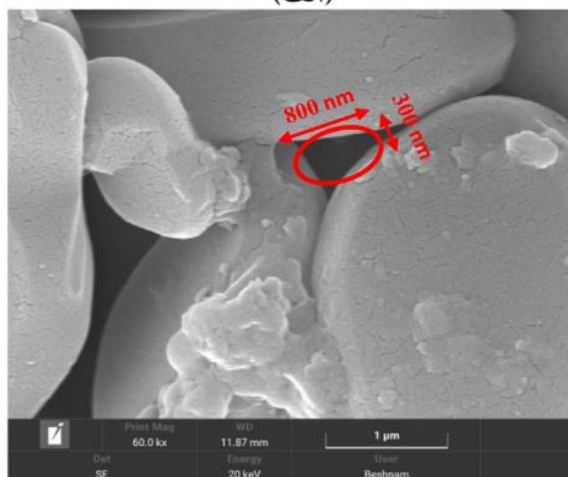
برای ارزیابی دقیق کارایی فرآیندهای تصفیه، آنالیزهای فیزیکوشیمیایی و میکروبیولوژیکی جامعی بر روی نمونه‌های آب در مراحل مختلف تصفیه (قبل از کلرزی و بعد از کلرزی، ازن‌زنی و فیلتراسیون غشایی) مطابق با استانداردهای متداول انجام پذیرفت. پارامترهای فیزیکوشیمیایی کلیدی با استفاده از روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شدند. کدورت بر حسب واحد کدورت نفلومتری (NTU) و کل مواد جامد محلول (TDS) به روش وزنی سنجش شدند. غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی با استفاده از اسپکتروفتومتری و تیتراسیون مطابق با پروتکل‌های استاندارد مبتنی بر معرف اندازه‌گیری شد. کلیه دستگاه‌ها پیش از آنالیز با استفاده از استانداردهای مرجع کالیبره شدند و از نمونه‌های بلانک و استاندارد برای کنترل کیفیت و اطمینان از صحت نتایج استفاده گردید. به موازات آن، بررسی باکتری‌های شاخص کلیفرم و اشرشیاکلی به روش تخمیر چند لوله‌ای مطابق با استاندارد متداول انجام شد. نتایج کیفی بر اساس الگوی لوله‌های مثبت و با استفاده از جدول استاندارد MPN، به صورت محتمل‌ترین عدد در ۱۰۰ mL (MPN/100mL) گزارش گردید. این آنالیزها که

غشایی در نمودار ۱ آورده شده است که کاملاً مشخص است که حفرات با اندازه 400 nm بیشترین بخش حفرات غشایی را تشکیل می‌دهند. این ساختار متخلخل نانومتری، شرط لازم برای عملکرد انتخابی غشا و توانایی آن در حذف فیزیکی ذرات کلوئیدی، باکتری‌ها و حتی برخی ویروس‌ها را فراهم می‌آورد. این مشاهدات به طور مستقیم کارایی بالای غشای ساخته شده را در فرآیند جداسازی پیش‌بینی می‌نماید (۲۴).

کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند و یک شبکه متخلخل سه‌بعدی را تشکیل داده‌اند. فازهای متراکم شده و نقاط تماس بین ذرات حاصل فرآیند سینترینگ موفقیت‌آمیز است، به وضوح قابل تشخیص است. مهم‌تر آنکه، فضای خالی بین این ذرات متراکم شده، حفره‌های بی‌قاعده اما به هم پیوسته‌ای را ایجاد کرده است که کانال‌های عبور سیال را تشکیل می‌دهند. اندازه این حفره‌ها در محدوده نانومتری قرار دارد. توزیع اندازه حفرات

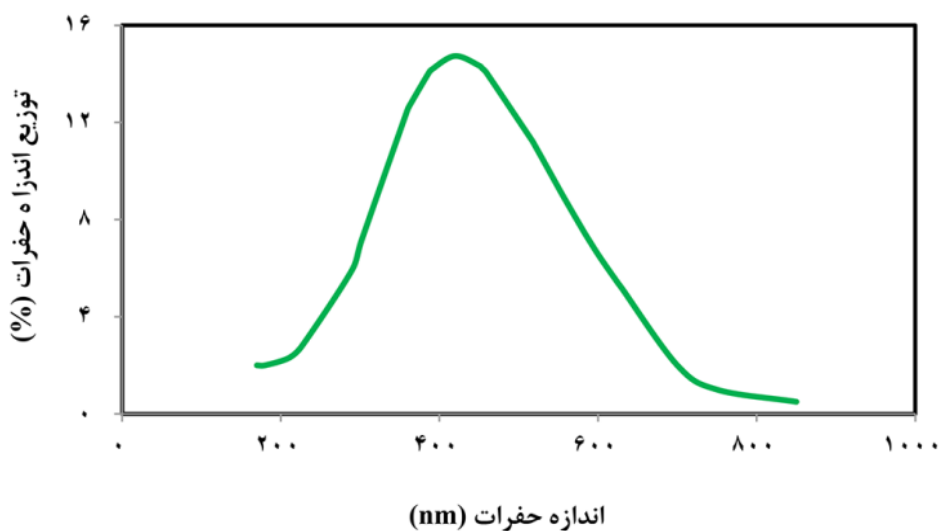


(الف)



(ب)

شکل ۲- تصویر FESEM از سطح غشای سرامیکی با دو بزرگنمایی (الف) $3000\times$ و (ب) $6000\times$



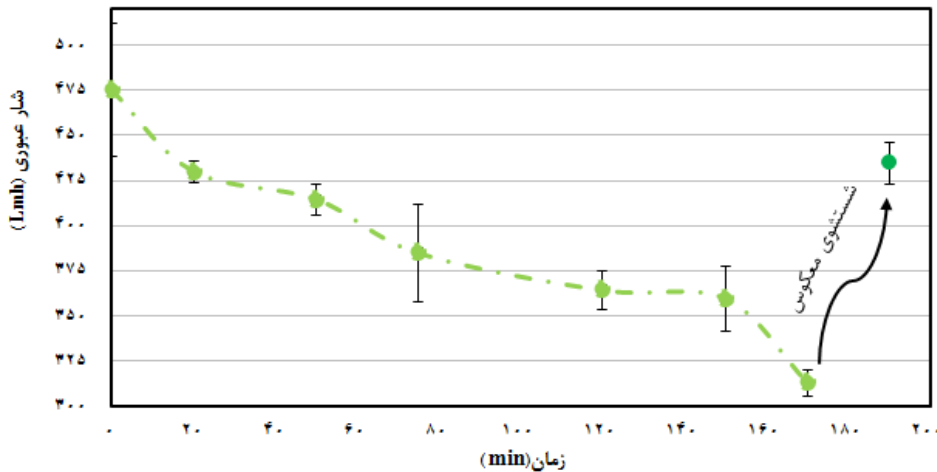
نمودار ۱- توزیع اندازه حفرات غشای سرامیکی

می‌دهند (۲۵). پس از ۱۷۰ min عملکرد، عملیات شستشوی معکوس اعمال گردید. نتیجه این عملیات، بازیابی قابل توجه شار عبوری تا مقدار ۴۵۶ Lmh بود که حدود ۹۶ درصد از شار اولیه را مجدداً احیا نمود. این بازیابی چشمگیر، دو نکته کلیدی را آشکار می‌سازد: نخست آنکه غالب مکانیسم گرفتگی از نوع قابل برگشت بوده که عمدتاً ناشی از رسوبات سطحی است که بر روی حفرات قرار گرفته و مانع از عبور آب می‌شوند و به راحتی با اعمال نیروی هیدرولیکی معکوس قابل حذف است. دوم، استحکام ساختاری بالای غشای سرامیکی است که در برابر تنش‌های هیدرولیکی عملیات شستشوی معکوس مقاومت نموده و دچار آسیب ساختاری نشده است. این نتایج به وضوح کارایی بالای غشاهای سرامیکی در تصفیه آب آشامیدنی و همچنین فرایندپذیری آسان آنها را نشان می‌دهد. توانایی اعمال شستشوی معکوس مؤثر بدون تخریب غشا، یک مزیت عمده برای کاربردهای طولانی مدت و مقیاس صنعتی محسوب می‌شود، چرا که امکان حفظ کارایی سیستم و کاهش هزینه‌های عملیاتی ناشی از تعویض مکرر غشا را فراهم می‌آورد. شکل ۳ تصویر ظاهری غشای سرامیکی مورد

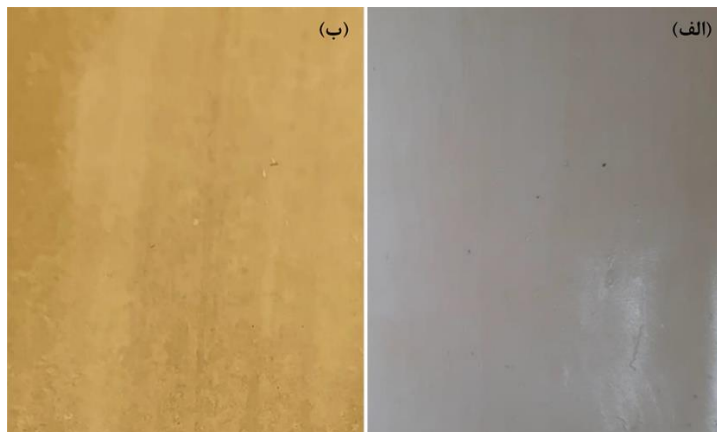
به منظور بررسی کارایی و پایداری غشا در شرایط عملیاتی شار عبوری غشای تهیه شده در بازه‌های زمانی مختلف اندازه‌گیری شده و در نمودار ۲ آورده شده است. مطابق این نمودار، در زمان صفر، شار اولیه ۴۷۵ Lmh ثبت گردید که نشان‌دهنده عبوردهی بسیار مطلوب غشای ساخته شده است. با گذشت زمان، روند کاهش شار عبوری مشاهده می‌شود به طوری که بعد از زمان ۱۷۰ min شار عبوری به ۳۱۳ Lmh رسیده است. این کاهش تدریجی شار، که تقریباً ۳۴ درصد از شار اولیه را شامل می‌شود، به طور مستقیم به پدیده گرفتگی غشا نسبت داده می‌شود. مکانیسم‌های مختلفی در این گرفتگی نقش دارند. در مراحل اولیه، گرفتگی سطحی ناشی از رسوب و تجمع ذرات کلوئیدی، مواد آلی طبیعی و سایر آلاینده‌های موجود در آب آشامیدنی بر روی سطح غشا رخ می‌دهد. این لایه رسوبی با ایجاد یک سد اضافی در برابر عبور جریان، عامل اصلی کاهش اولیه شار است. با تداوم فرآیند، گرفتگی داخلی نیز اتفاق می‌افتد که طی آن ذرات ریزتر به درون منافذ نانومتری غشا نفوذ کرده و با مسدود کردن کانال‌های عبور، مقاومت هیدرولیکی سیستم را به طور قابل توجهی افزایش

در فرآیند تصفیه آب رودخانه مارون نمایش می‌دهد. تشکیل لایه‌ای از مواد معلق و آلاینده‌ها بر روی سطح غشا به وضوح قابل مشاهده است. این پدیده که به صورت تجمع ذرات و تغییر رنگ ظاهری غشا تظاهر یافته، تایید کننده مستقیم وقوع پدیده گرفتگی در طی عملیات فیلتراسیون است. این گرفتگی ظاهری کاملاً با روند کاهش تدریجی شار عبوری از ۴۷۵ Lmh به ۳۱۳ Lmh در مدت ۱۷۰ min مطابقت دارد. مقایسه این دو تصویر به صورت ملموس مکانیسم گرفتگی غشا و تاثیر آن بر عملکرد فیلتراسیون را نمایش می‌دهد.

استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. در شکل ۳-الف، غشای سرامیکی در حالت اولیه و قبل از به کارگیری در فرآیند فیلتراسیون مشاهده می‌شود. همانطور که مشهود است، سطح غشا دارای بافت یکنواخت و عاری از هرگونه آلودگی یا رسوب است که نشان‌دهنده شرایط ایده‌آل برای آغاز فرآیند تصفیه است. این وضعیت مطلوب ظاهری با عملکرد هیدرولیکی بهینه غشا در مراحل اولیه فیلتراسیون، که منجر به کسب شار اولیه ۴۷۵ Lmh گردید، همخوانی کامل دارد. در مقابل، شکل ۳-ب تصویر ظاهری همان غشا را پس از استفاده



نمودار ۲- عملکرد جداسازی غشای سرامیکی با گذشت زمان



شکل ۳- شکل ظاهری غشای سرامیکی (الف) قبل از استفاده و (ب) بعد از استفاده

جدول ۱ خواص فیزیکوشیمیایی مربوطه به نمونه آب آشامیدنی تهیه شده بعد از کلرزنی، ازن‌زنی و فیلتراسیون غشایی را نشان می‌دهد. بر اساس داده‌های به دست آمده، TDS برابر با 1393 mg/L است که نشان‌دهنده غلظت نسبتاً بالای املاح محلول در این منبع آبی است. این مقدار در رده آب‌های با املاح بالا طبقه‌بندی می‌شود. ترکیب یونی اصلی آب نشان‌دهنده غلظت قابل توجه سدیم و سولفات است که سهم عمده‌ای در مقدار TDS دارند. سختی کل آب که عمدتاً ناشی از غلظت کلسیم و منیزیم است، در محدوده آب‌های سخت قرار دارد. این سطح از سختی می‌تواند بر طعم آب تأثیر گذاشته و در مصارف صنعتی و خانگی ایجاد مشکل نماید. از نظر سلامت عمومی، غلظت نیترات و نیتریت در محدوده ایمن و بسیار پایین‌تر از حد مجاز استانداردها قرار دارد که نشان‌دهنده عدم آلودگی شدید نیتراتی در این منبع آبی است. میزان فلوراید نیز در محدوده مجاز قرار دارد. مقدار آهن بسیار پایین و در محدوده مطلوب است که نشان‌دهنده عدم مشکل حاد در سیستم توزیع از نظر رسوب‌گذاری اکسید آهن است. کدورت اندازه‌گیری شده نشان‌دهنده وجود مقداری مواد معلق در آب است که نیاز به بهینه‌سازی فرآیندهای تصفیه دارد.

بررسی پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب خروجی از سه فرآیند مختلف تصفیه (فیلتراسیون غشایی، ازن‌زنی و کلرزنی) نتایج قابل تأملی را در خصوص کارایی هر یک از این روش‌ها آشکار می‌سازد. آنالیز یون‌های اصلی موجود در آب، شامل آنیون‌ها (فلوراید، کلرید، سولفات، بیکربنات، نیترات، نیتریت) و کاتیون‌ها (کلسیم، منیزیم، سدیم، آهن) و همچنین TDS نشان می‌دهد که هیچ یک از سه فرآیند مورد مطالعه تأثیر قابل توجهی بر غلظت این پارامترها نداشته‌اند. به عبارتی مقادیر یکسان و بدون تغییر این یون‌ها به وضوح نشان می‌دهد که فرآیندهای غشایی، اکسیداسیون با ازن و گندزدایی با کلر، قادر به حذف یا تغییر مواد معدنی محلول در آب نیستند. این مشاهده که کاملاً منطبق بر اصول تئوریک و مکانیسم‌های عمل این فرآیندهاست، در واقع بیانگر چندین مزیت کلیدی

و طراحی هدفمند سیستم تصفیه پیشنهادی است. این نتایج گویای گزینش‌پذیری بالا و عملگرایی هدفمند فناوری ترکیبی مورد مطالعه است. غشای سرامیکی با مکانیسم غربالی سطحی، صرفاً ذرات و میکروارگانیسم‌های با اندازه بزرگ‌تر از منافذ خود را حذف می‌نماید و قادر به جداسازی یون‌های محلول با ابعاد آنگسترومی نیست. همزمان، فرآیندهای ازن‌زنی و کلرزنی عمدتاً نقش اکسیدکنندگی و گندزدایی داشته و فاقد مکانیسم مؤثر برای حذف املاح معدنی هستند. بنابراین، سیستم به‌صورت ذاتی تنها بر حذف آلاینده‌های هدف متمرکز شده و ترکیب شیمیایی پایه آب را دست‌نخورده باقی می‌گذارد. حفظ یون‌های مفیدی چون کلسیم و منیزیم نه‌تنها برای سلامت عمومی سودمند است، بلکه در پذیرش طعم و مطلوبیت نیز نقش بسزایی دارد. علاوه بر این، ثبات پارامترهای یونی و TDS نشان‌دهنده پایداری شیمیایی و عدم ایجاد اثرات جانبی نامطلوب در کیفیت آب تصفیه شده است. تغییرات محسوس در ترکیب یونی آب می‌تواند پتانسیل خوردگی آن در شبکه توزیع را تحت تأثیر قرار دهد. ثبات این پارامترها حاکی از آن است که سیستم پیشنهادی فاقد تأثیرات مخرب بر خواص خوردگی و تعادل اشباعیت آب است که از لحاظ مهندسی و مدیریت پایدار شبکه توزیع حائز اهمیت فراوان است. بنابراین، ثبات غلظت یون‌های معدنی نه تنها یک کاستی محسوب نمی‌شود، بلکه شاهدهی بر هوشمندی طراحی، گزینش‌پذیری مناسب و تناسب فناوری با اهداف مشخص پژوهش است. در مقابل، داده‌های مربوط به کدورت تفاوت معناداری را بین عملکرد فرآیندها نشان می‌دهد. در حالی که آب خروجی از واحد ازن‌زنی و کلرزنی دارای کدورتی معادل $1/72 \text{ NTU}$ هستند، این مقدار برای آب عبور کرده از غشای سرامیکی به $0/5 \text{ NTU}$ کاهش یافته است. این کاهش چشمگیر (۷۱ درصدی) به وضوح کارایی برتر فیلتراسیون فیزیکی توسط غشای سرامیکی را در حذف ذرات کلوئیدی، مواد معلق و سایر عوامل ایجادکننده کدورت اثبات می‌کند. مکانیسم حذف در این فرآیند، اساساً بر پایه الک کردن سطحی و جذب ذرات در سطح و درون منافذ

و بنابراین احتمال ایجاد طعم و بوی نامطلوب ناشی از تغییر املاح را ندارند. از طرفی، برتری غشا در حذف کدورت که خود عاملی برای محافظت از میکروارگانیسم‌ها و کاهش کارایی گندزداها است نقش آن را به عنوان یک سد فیزیکی بسیار مؤثر برجسته می‌سازد. این کاهش کدورت می‌تواند به طور غیرمستقیم کارایی مراحل بعدی گندزدایی (مانند ازن یا کلر) را نیز از طریق افزایش نفوذپذیری و در دسترس بودن بیشتر عوامل گندزدا بهبود بخشد (۲۶).

نانومتري غشا استوار است. نتایج این بخش به خوبی نشان می‌دهد که اگر هدف اصلی، حذف املاح معدنی و کاهش TDS باشد، هیچ یک از این سه فرآیند به تنهایی کارایی ندارند و به روش‌هایی مانند اسمز معکوس یا تبادل یونی نیاز خواهد بود. با توجه به هدف این مطالعه که تمرکز بر گندزدایی و حذف آلاینده‌های میکروبی است، این نتایج حائز اهمیت هستند. پایداری غلظت یون‌ها نشان می‌دهد که فرآیندهای جایگزین پیشنهادی تغییری در ترکیب شیمیایی آب ایجاد نمی‌کنند

جدول ۱- خواص فیزیکی شیمیایی نمونه آب تهیه شده بعد از کلرزی، ازن زنی و فیلتراسیون غشایی

پارامتر	آب ورودی به فرایندهای تصفیه نهایی	آب خروجی از کلرزی	آب خروجی از ازن زنی	آب خروجی از غشا	حداکثر مقدار مجاز
F (mg/L)	۰/۷±۰/۰۵	۰/۷±۰/۰۵	۰/۷±۰/۰۵	۰/۷±۰/۰۵	-
Cl (mg/L)	۲۱۷±۸	۲۱۷±۸	۲۱۷±۸	۲۱۷±۸	۶۰۰
SO ₄ (mg/L)	۵۰۰±۴	۵۰۰±۴	۵۰۰±۴	۵۰۰±۴	۴۰۰
NO ₃ (mg/L)	۳/۵۲±۰/۱	۳/۵۲±۰/۱	۳/۵۲±۰/۱	۳/۵۲±۰/۱	۴/۵
NO ₂ (mg/L)	۰/۰۲±۰	۰/۰۲±۰	۰/۰۲±۰	۰/۰۲±۰	۰/۰۰۴
Ca (mg/L)	۱۷۶/۲±۲	۱۷۶/۲±۲	۱۷۶/۲±۲	۱۷۶/۲±۲	۲۰۰
Mg (mg/L)	۵۴/۴±۴	۵۴/۴±۴	۵۴/۴±۴	۵۴/۴±۴	۱۵۰
Fe (mg/L)	۰/۰۱±۰	۰/۰۱±۰	۰/۰۱±۰	۰/۰۱±۰	۱
TDS (mg/L)	۱۳۹۳±۰	۱۳۹۳±۰	۱۳۹۳±۰	۱۳۹۳±۰	-
Total Hardness (mg/L)	۵۲۵±۱۶	۵۲۵±۱۶	۵۲۵±۱۶	۵۲۵±۱۶	۵۰۰
Turbidity (NTU)	۱/۷۲±۰/۰۵	۱/۷۲±۰/۰۵	۱/۷۲±۰/۰۵	۰/۵±۰/۰۲۵	۵

از اعمال فرایند کلرزی و ازن‌زنی، نتایج حاکی از حذف آلودگی میکروبی و کاهش مقدار اشرشیاکلی و کلیفرم به مقداری نزدیک استاندارد آب آشامیدنی بود. علاوه بر این، در نمونه تصفیه شده با فیلتراسیون غشایی، مقادیر میکروبی به وضوح اثربخشی این روش را در غیرفعال‌سازی پاتوژن‌های شاخص به اثبات می‌رساند. فیلتراسیون غشایی با مکانیسم کاملاً فیزیکی و بر پایه حذف فیزیکی میکروارگانیسم‌ها از طریق منافذ نانومتري

نتایج آنالیز میکروبیولوژیکی نمونه‌های آب که در جدول ۲ آورده شده است تصویر گویایی از کارایی سه فرآیند گندزدایی مورد مطالعه، ارائه می‌دهد. همانطور که در داده‌ها مشهود است، نمونه آب آشامیدنی گرفته شده از تصفیه خانه رودخانه مارون (قبل از کلرزی) از آلودگی میکروبی قابل توجهی برخوردار است. این مقادیر به وضوح نشان‌دهنده آلودگی این منبع آبی و لزوم به کارگیری فرآیندهای گندزدایی مؤثر و کارآمد است. پس

در این مطالعه کارایی خود را اثبات کرده، اما با چالش جدی تشکیل DBPs ناشی از واکنش کلر با مواد آلی طبیعی موجود در آب مواجه است. این ترکیبات، به ویژه THMs و HAAs، اثرات سرطان‌زایی و مخاطرات سلامت عمومی بلندمدت دارند (۲۷). با توجه به امکان وجود محصولات جانبی در کلرزنی و ازن‌زنی، در صورتی که فیلتراسیون غشایی به عنوان روش مکمل برای هر یک از این دو روش استفاده شود، فیلتراسیون غشایی بخش عمده آلودگی را حذف کرده و سپس از یک ضدعفونی‌کننده سبک (ازن یا کلر با غلظت کم) تنها برای حذف مقادیر میکروبی ناچیز باقیمانده استفاده می‌شود. این همکاری، امن‌ترین و مطمئن‌ترین راه برای رساندن آبی پاک و سالم به انتهای خط مصرف بوده و از تشکیل DBPs جلوگیری می‌کند.

خود، مانع از عبور بخش اعظمی از باکتری‌ها شده است. این روش بدون نیاز به افزودن مواد شیمیایی، آلودگی میکروبی را حذف می‌کند و بنابراین هیچ گونه DBPs تولید نمی‌نماید. این ویژگی، یک مزیت عمده و کلیدی برای این فناوری محسوب می‌شود. ازن‌زنی نیز با مکانیسم اکسیداسیون قوی و تخریب دیواره سلولی میکروارگانیسم‌ها، کارایی بسیار بالایی از خود نشان داده است. ازن به دلیل قدرت اکسیدکنندگی بسیار بالا (بالاتر از کلر)، قادر است حتی گونه‌های مقاوم‌تر را نیز به طور مؤثر غیرفعال کند. اگرچه ازن می‌تواند در حضور برمید منجر به تشکیل برومات شود، اما در مقایسه با طیف وسیع و غلظت بالای محصولات جانبی ناشی از کلر، این ریسک به مراتب پایین‌تر و قابل کنترل‌تر است. نقطه ضعف اصلی ازن، عدم ایجاد اثر باقیمانده در شبکه توزیع است. در مقابل، کلرزنی اگرچه

جدول ۲- خواص میکروبیولوژی نمونه آب تهیه شده قبل و بعد از کلرزنی، ازن‌زنی و فیلتراسیون غشایی

نمونه	شمارش احتمالی کلیفرم (MPN/100mL)	شمارش تائیدی کلیفرم (MPN/100mL)	اشرشیاکلی (MPN/100mL)
آب رودخانه مارون	۱۲۰	۵۰	۵۰
آب خروجی از کلرزنی	<۱/۱	<۱/۱	<۱/۱
آب خروجی از ازن‌زنی	<۱/۱	<۱/۱	<۱/۱
آب خروجی از غشا	۲۶	۱۷	۱۷
استاندارد آب آشامیدنی	منفی	منفی	منفی

بحث

که معمولاً پس از چندین دوره شستشو دچار کاهش عملکرد غیرقابل برگشت می‌شوند، این ویژگی مزیت رقابتی مهمی برای کاربردهای بلندمدت محسوب می‌شود. عملکرد غشا در حذف کدورت (کاهش از ۱/۷۲ NTU به ۰/۵ NTU معادل ۷۱ درصد) نشان‌دهنده کارایی بالای این فناوری در جداسازی فیزیکی ذرات معلق و کلوئیدی است. این یافته با پژوهش‌های پیشین که بازده حذف کدورت توسط غشاهای سرامیکی با اندازه منافذ زیر میکرون را در محدوده ۶۵ تا ۹۵ درصد گزارش کرده‌اند، همخوانی دارد. بهبود کیفیت ظاهری آب اگرچه خود یک هدف است، اما پیامد مهم‌تری نیز دارد. حذف ذراتی که می‌توانند به‌عنوان پناهگاهی برای میکروارگانیسم‌ها در برابر عوامل گندزدا عمل کنند یا حتی خود حامل باکتری‌ها و ویروس‌ها شوند، به‌طور غیرمستقیم کارایی مراحل بعدی گندزدایی را افزایش می‌دهد. مطالعات نشان داده‌اند که حضور ذرات معلق می‌تواند دوز مورد نیاز گندزداها را تا چندین برابر افزایش دهد. با وجود موفقیت نسبی غشا در حذف باکتری‌های شاخص (۶۶ درصد)، این میزان در مقایسه با حذف تقریباً کامل توسط ازن‌زنی و کلرزنی (بیش از ۹۸ درصد) پایین‌تر است. علت این تفاوت در مکانیسم جداسازی نهفته است. غشای مورد مطالعه با اندازه منافذ حدود ۴۰۰ nm، اگرچه قادر به حذف بخش عمده‌ای از باکتری‌ها است، اما عبور برخی باکتری‌های کوچک‌تر یا باکتری‌هایی که به‌صورت تکی حضور دارند، محتمل است. بنابراین، فیلتراسیون غشایی به‌تنهایی نمی‌تواند به‌عنوان یک سد مطلق میکروبی عمل کند، اما نقش ارزشمند آن در کاهش بار میکروبی ورودی به واحد گندزدایی و حذف انگل‌های مقاوم به کلر غیرقابل انکار است. در جدول ۳ تحلیل مقایسه‌ای هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری فرآیندهای گندزدایی بر اساس مبانی نظری و اطلاعات موجود در منابع علمی و فنی معتبر آورده شده است. بر این اساس، فرآیند کلرزنی از نظر هزینه سرمایه‌گذاری اولیه در پایین‌ترین سطح قرار دارد و تجهیزات آن ساده

یافته‌های این مطالعه، کارایی مطلوب هر سه فرآیند فیلتراسیون غشایی سرامیکی، ازن‌زنی و کلرزنی را در حذف شاخص‌های میکروبی آب رودخانه مارون تأیید می‌کند، به‌گونه‌ای که آب خروجی از هر سه سیستم با استانداردهای میکروبیولوژیکی آب آشامیدنی مطابقت داشت. با این حال، تحلیل عمیق‌تر نتایج و مقایسه آن با پژوهش‌های پیشین، تفاوت‌های بنیادین این فناوری‌ها را در مکانیسم عمل، پیامدهای جانبی و قابلیت تلفیق با یکدیگر آشکار می‌سازد که در ادامه به تفکیک مورد بحث قرار می‌گیرد.

در فیلتراسیون غشایی، مشاهدات حاصل از آنالیز FESEM، ساختاری نانومتری با توزیع منافذ یکنواخت را برای غشای سنتز شده تأیید نمود که با شار اولیه بالای ۴۷۵ Lmh همخوانی کامل دارد. این میزان شار اولیه در محدوده گزارش شده برای غشاهای سرامیکی میکروفیلتراسیون با اندازه منافذ مشابه (حدود ۴۰۰ nm) قرار داشته و نشان‌دهنده کیفیت مطلوب ساختار غشا است (۱۳، ۲۷). کاهش تدریجی شار به ۳۱۳ Lmh در طول فرآیند، پدیده‌ای اجتناب‌ناپذیر در فیلتراسیون غشایی است که عمدتاً ناشی از تجمع ذرات و کلوئیدها بر سطح غشا و درون منافذ آن است. مطالعات متعددی از جمله پژوهش Yang و همکاران (۲۸) بر روی غشاهای سرامیکی در تصفیه آب سطحی، کاهش شار در محدوده ۳۰ تا ۴۰ درصد را در شرایط عملیاتی مشابه گزارش کرده‌اند که با یافته‌های این مطالعه (کاهش حدود ۳۴ درصدی) تطابق دارد. نکته حائز اهمیت، بازیابی ۹۶ درصدی شار اولیه پس از شستشوی معکوس است که دو پیامد مهم را به دنبال دارد. نخست آنکه ماهیت غالب گرفتگی در این سیستم از نوع برگشت‌پذیر و سطحی بوده و عمدتاً به تشکیل لایه کیک محدود می‌شود. دوم آنکه استحکام مکانیکی بالای غشای سرامیکی امکان اعمال شستشوی معکوس مؤثر را بدون آسیب به ساختار متخلخل آن فراهم می‌آورد. در مقایسه با غشاهای پلیمری

و کم‌هزینه است، اما هزینه مواد شیمیایی آن به دلیل نیاز به خرید، حمل، نگهداری و رعایت ملاحظات ایمنی کلر، در سطح متوسط تا بالا قرار می‌گیرد. در مقابل، فرآیند ازن‌زنی نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه بالایی برای تهیه ژنراتور ازن، سیستم خنک‌کننده و راکتور تماس از جنس فولاد ضد زنگ است و مصرف انرژی آن به دلیل تولید ازن با روش تخلیه الکتریکی، بالاترین سطح را در میان سه فرآیند دارد، اما از سوی دیگر هزینه مواد شیمیایی آن صفر است؛ زیرا ازن در محل تولید می‌شود. فیلتراسیون غشایی سرامیکی نیز هزینه سرمایه‌گذاری متوسط تا بالایی دارد که عمدتاً ناشی از هزینه خود غشا، محفظه، پمپ و سیستم شستشو است، مصرف انرژی آن در سطح متوسط قرار می‌گیرد و هزینه مواد شیمیایی آن پایین و عمدتاً محدود به مواد مورد نیاز برای شستشوی دوره‌ای غشا است. اگرچه هر یک از فرآیندهای غشایی و ازن‌زنی به تنهایی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و انرژی بالاتری نسبت به کلر زنی دارند، اما سیستم ترکیبی از منظر هزینه‌های چرخه عمر و هزینه‌های خارجی دارای توجیه اقتصادی بلندمدت است. این توجیه عمدتاً ناشی از کاهش هزینه‌های ناشی از DBPs است، زیرا کلر زنی منجر به تشکیل THMs و HAAs می‌شود که هزینه‌های سنگینی برای پیش، کنترل و اثرات بهداشتی بلندمدت به همراه دارند و سیستم ترکیبی با کاهش مصرف کلر و حذف پیش‌سازها، این هزینه‌های پنهان را به شدت کاهش می‌دهد. همچنین اگرچه ازن‌زنی انرژی‌بر است، اما با حذف نیاز به دوز بالای کلر و کاهش دفعات شستشوی فیلترها، می‌تواند در بهینه‌سازی کلی مصرف انرژی نقش ایفا کند. از سوی دیگر، حضور ازن به عنوان یک اکسیدکننده قوی می‌تواند با تجزیه مواد آلی، از گرفتگی زودرس غشا جلوگیری کرده و هزینه‌های ناشی از توقف خط برای شستشوی شیمیایی را کاهش دهد. علاوه بر این، ازن‌زنی نیاز به حمل و نگهداری مواد شیمیایی خطرناک را حذف می‌کند که اگرچه مستقیماً در صورت‌های مالی منعکس نمی‌شود، اما از منظر مدیریت

ریسک و هزینه‌های ایمنی بسیار حائز اهمیت است. از این رو می‌توان گفت که اگرچه هزینه سرمایه‌گذاری اولیه سیستم ترکیبی ازن‌زنی و فیلتراسیون غشایی به مراتب بالاتر از کلر زنی ساده است، اما این سیستم در بلندمدت با کاهش هزینه‌های بهداشتی، محیط زیستی و عملیاتی، از توجیه اقتصادی مناسبی برخوردار است. علاوه بر موارد فوق، هنگامی که از فرآیندهای ازن‌زنی یا فیلتراسیون غشایی به عنوان پیش‌تصفیه پیش از کلر زنی نهایی استفاده می‌شود، بار آلی و میکروبی آب ورودی به مرحله گندزدایی به شدت کاهش می‌یابد. این موضوع دو پیامد مهم به دنبال دارد. نخست آنکه، نیاز به دوز کلر برای دستیابی به سطح مطلوب گندزدایی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد؛ کاهش مصرف کلر مستقیماً به معنای کاهش هزینه‌های خرید مواد شیمیایی، کاهش هزینه‌های حمل و نگهداری این ماده خطرناک و نیز کاهش مخاطرات ایمنی مرتبط با کار با کلر در تصفیه‌خانه است. این صرفه‌جویی می‌تواند در بلندمدت بخش قابل توجهی از هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه برای راه‌اندازی سیستم ازن‌زنی یا فیلتراسیون غشایی را جبران نماید. دوم و مهم‌تر آنکه، کاهش دوز کلر مصرفی و کاهش همزمان غلظت پیش‌سازهای آلی (که توسط ازن اکسید شده یا توسط غشا حذف شده‌اند)، پتانسیل تشکیل DBPs را به شدت کاهش می‌دهد. این بدان معناست که سیستم ترکیبی نه‌تنها از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه‌تر عمل می‌کند، بلکه از منظر بهداشت عمومی و کاهش هزینه‌های بلندمدت درمانی و پیش کیفیت آب نیز دارای برتری آشکاری نسبت به کاربرد تنهایی کلر است. به عبارت دیگر، اگرچه هزینه سرمایه‌گذاری اولیه در سیستم ترکیبی بالاتر است، اما هزینه‌های چرخه عمر با احتساب هزینه‌های ناشی از محصولات جانبی و اثرات سوء بهداشتی آنها، به نفع سیستم ترکیبی تمام خواهد شد. این رویکرد با اصول توسعه پایدار و تأمین آب آشامیدنی سالم در بلندمدت همخوانی کامل دارد.

جدول ۳- تحلیل مقایسه‌ای هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری فرآیندهای گندزدایی

مؤلفه هزینه‌ای	کلرزنی	ازن‌زنی	فیلتراسیون غشایی (سرامیکی)
هزینه سرمایه‌گذاری اولیه	پایین	بالا (نیاز به ژنراتور ازن، سیستم خنک‌کننده، راکتور تماس از جنس استنلس استیل)	متوسط تا بالا (هزینه غشا، محفظه، پمپ، سیستم شستشو)
هزینه انرژی	پایین (تنها برای پمپ تزریق)	بالا (تولید ازن با تخلیه الکتریکی پرمصرف است)	متوسط (مصرف پمپ برای تأمین فشار و شستشوی معکوس)
هزینه مواد شیمیایی	خرید، حمل، نگهداری و ایمنی کلر)	صفر (ازن در محل تولید می‌شود و نیازی به خرید ماده شیمیایی نیست)	پایین (مواد شیمیایی برای شستشوی دوره‌ای غشا)
هزینه نگهداری و تعمیرات	پایین (تجهیزات ساده)	بالا (تجهیزات پیچیده، نیاز به تخصص فنی بالا)	متوسط (تعویض دوره‌ای غشاها، نگهداری پمپ‌ها و شیرآلات)
هزینه نیروی انسانی	متوسط (نیاز به اپراتور برای حمل کلر)	متوسط (نیاز به اپراتور ماهر)	پایین (سیستم خودکار، نیاز به نیروی اندک)
هزینه مدیریت پسماند/خطر	بالا (مخاطرات ایمنی، نشت کلر، مدیریت محصولات جانبی)	پایین (عدم تولید محصولات جانبی کلردار)	پایین (دفع غشاهای مستعمل)

نتیجه‌گیری

درصدی شار اولیه پس از شستشوی معکوس، بیانگر ماهیت برگشت‌پذیر گرفتگی و استحکام مکانیکی بالای غشای سرامیکی برای کاربردهای بلندمدت است. ازن‌زنی نیز به‌عنوان یک اکسیدکننده قوی، کارایی فوق‌العاده‌ای در غیرفعال‌سازی سریع پاتوژن‌ها نشان داد و برخلاف کلرزنی، محصولات جانبی کلردار تولید نمی‌کند، هرچند پتانسیل تشکیل برومات در حضور یون برمید و فقدان باقیمانده گندزدایی در شبکه توزیع از چالش‌های آن محسوب می‌شود. کلرزنی نیز علیرغم کارایی میکروبی مطلوب و مزیت ماندگاری در شبکه، به دلیل تشکیل محصولات جانبی سرطان‌زا نیازمند بازنگری در الگوی مصرف است. نتیجه نهایی آنکه انتخاب روش گندزدایی باید با

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی امکان‌سنجی جایگزینی فرآیند کلرزنی متعارف با دو فناوری ازن‌زنی و فیلتراسیون غشایی سرامیکی در تصفیه آب آشامیدنی حاصل از رودخانه مارون به‌بهان طراحی و اجرا گردید. یافته‌ها نشان داد تفاوت‌های بنیادینی در مکانیسم عمل، پیامدهای جانبی و قابلیت تلفیق با یکدیگر دارند. فیلتراسیون غشایی سرامیکی سنتز شده با ساختار نانومتری یکنواخت ضمن کاهش ۷۱ درصدی کدورت و بهبود کیفیت فیزیکی آب، توانست با مکانیسم غربالگری فیزیکی، بخش عمده‌ای از میکروارگانیسم‌ها را بدون تشکیل هرگونه محصول جانبی گندزدایی حذف کند. بازایی ۹۶

آلاینده‌های میکروبی و شیمیایی ارائه می‌دهد و گامی مؤثر در جهت تأمین آب آشامیدنی سالم‌تر و ارتقای سطح سلامت جامعه محسوب می‌شود.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل بخشی از پایان نامه با عنوان "بهبود کیفیت آب خروجی از تصفیه خانه بزرگ بهبهان با استفاده از روش ترکیبی ازن‌زنی-فیلتراسیون غشایی" در مقطع کارشناسی ارشد در سال ۱۴۰۴ است که با حمایت دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا (ص) بهبهان اجرا شده است.

نگاهی جامع و با در نظر گرفتن پیامدهای جانبی، هزینه‌های بلندمدت و پایداری فرآیند انجام شود. در این راستا، راهبرد سیستم چند مرحله ای به‌عنوان هوشمندانه‌ترین رویکرد معرفی می‌گردد. در این سیستم تلفیقی، فیلتراسیون غشایی با حذف فیزیکی ذرات، انگل‌ها و بخش عمده باکتری‌ها، بار میکروبی و آلی را کاهش می‌دهد. ازن‌زنی نیز با اکسیداسیون مواد آلی، گندزدایی تکمیلی را انجام داده و از گرفتگی زودرس غشا جلوگیری می‌کند. در نهایت، کلرزنی با دوز پایین صرفاً به‌عنوان گندزدای باقیمانده برای حفاظت از شبکه توزیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. این استراتژی ضمن بهره‌مندی از مزیت ماندگاری کلر، از تشکیل DBPs ناشی از کلرزنی جلوگیری کرده و با کاهش دوز مصرفی ازن، خطر تشکیل برومات را نیز به حداقل می‌رساند. در مجموع، تلفیق هوشمندانه این فناوری‌ها در چارچوب سیستم چند مرحله‌ای، رویکردی پایدارتر، ایمن‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تر برای مدیریت ریسک‌های بهداشتی ناشی از

References

1. Taghipour A, Mahvi A, Vaezi F, Nabizade R, Dehghanzade R. Study the efficiency of the combined system of coagulation and flocculation/ozonation in treatment of fresh landfill leachates in Tabriz city. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2011;4(1):57-64 (in Persian).
2. Liu Y, Guo Y, Yin Z, Yang W. Insights into coagulation, softening and ozonation pre-treatments for reverse osmosis membrane fouling control in reclamation of textile secondary effluent. *Journal of Water Process Engineering*. 2024;58:104764.
3. Bazrafshan E, Kord Mostafapour F, Farzadkia M, Ownagh K, Jaafari Mansurian H. Application of combined chemical coagulation-electro coagulation process for treatment of the Zahedan cattle slaughterhouse wastewater. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2012;5(3):283-294 (in Persian).
4. Jiang T, Wu W, Ma M, Hu Y, Li R. Occurrence and distribution of emerging contaminants in wastewater treatment plants: A globally review over the past two decades. *Science of the Total Environment*. 2024;951:175664.
5. Koley S, Singh GD, Khwairakpam M, Kalamdhad AS. Closing the loop: A circular economy approach to drinking water treatment sludge management. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2025;13(2):116110.
6. Li S, Zhu T, Ji W, Wu Z, Ren T, Zhang S, et al. Catalytic ceramic membranes with ozonation for wastewater treatment: Preparations, mechanisms and applications. *Chemical Engineering Journal*. 2024;501:157689.
7. Zhang L, Shi B, Liu H, Lin X, Shi F. Charge-engineered 2D layered magnetic Cl-CaFe₂O₄/g-C₃N₄ catalyst for catalytic ozonation of norfloxacin: performance, mechanism and ecotoxicological assessment. *Chemical Engineering Journal*. 2025;525:170440.
8. Yang C, Yang L, Wang Z, Li F, Bu X. Revealing the synergistic mechanism of molybdenite (MoS₂) and scheelite (CaWO₄) during their catalytic ozonation process for degrading organic reagents in mineral processing wastewater. *Colloids Surface A: Physicochemical Engineering Aspects*. 2026;729:138863.
9. Huang X, Ao Y, Yang H, Feng M, Wang X, Chen R, et al. A novel approach to healthy water treatment: Boiling-based UV photoelectrochemical oxidation process for the removal of disinfection by-products from drinking water. *Chemical Engineering Journal*. 2025;515:163658.
10. Tariq A, Mushtaq A. Untreated wastewater reasons and causes: a review of most affected areas and cities. *International Journal of Chemical and Biochemical Science*. 2023;23:121-43.
11. Fu W, Tang T, Chen X, Yang Y, Mi B, Yang K, et al. Nano-ceramic membranes combined with ozonation for water treatment: Fundamentals and engineering applications. *Journal of Hazardous Materials Advances*. 2023;10:100279.
12. Foroughi M, Khiadani M, Kakhki S, Kholghi V, Naderi K, Yektay S. Effect of ozonation-based disinfection methods on the removal of antibiotic resistant bacteria and resistance genes (ARB/

- ARGs) in water and wastewater treatment: a systematic review. *Science of the Total Environment*. 2022;811:151404.
13. Elyasi Kojabad M, Aghdami A. The treatment of papermaking effluent with the hybrid process of coagulation-ozonation-membrane filtration in order to recycle and reuse. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2025;18(2):335-48 (in Persian).
14. Barbosa de Farias M, Prediger P, Gurgel M, Vieira A. Phenol degradation by heterogeneous catalytic ozonation over mCS@rGO beads. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2026;158:454-64.
15. Liu J, Yuan X, Dong H, Sans C. Progress in MnO₂/MnO₂-based materials catalytic ozonation process for water and wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*. 2025;383:125493.
16. He H, Wang X, Huang X, Wang X, Zhu H, Chen F, et al. Leveraging almost hydrophobic PVDF membrane and in-situ ozonation in O₃/UF/BAC system for superior anti-fouling and rejection performance in drinking water treatment. *Water Research*. 2025;274:123105.
17. Salehpour A, Alizadeh M, Ajalli N, Azamat J. Arsenic removal from aqueous solution using PWN-type zeolite membrane: A theoretical investigation. *Journal of Molecular Liquids*. 2024;395:123952.
18. Niebla V, Rivera C, Cruz Y, Rodríguez Gonzalez FE, Rodríguez A, Velazquez Tundidor MV, et al. Improved fouling resistance in polysulfone-based ultrafiltration membranes by the addition of polar peptoid oligomers obtained from Ugi-4CR: Synthesis and characterization. *Polymer*. 2025;320:128090.
19. Xie X, Wang L, Wei J, He H, Guo Z, Wang C, et al. Progress in ceramic membrane coupling ozonation process for water and wastewater treatment: A critical review. *Chemical Engineering Journal*. 2024;493:152475.
20. Tupe JV, Khot SM, Padmanabhan D, Rajaguru B. Polysulfone membranes with natural additives for water purification: Fabrication and performance testing. *Polymer*. 2025;338:129070.
21. Shen Y, Chen Z, Shen J, Wang B, Yan P, Kang J, et al. A pilot-scale study of in situ granular activated carbon regeneration via ozone micro-nano bubbles oxidation for long-lasting micropollutant purification in water. *Chemical Engineering Journal*. 2025;523:168434.
22. Aghdami A, Elyasi Kojabad M. Wastewater treatment hybrid process using coagulation-membrane filtration for industrial purposes. *Applied Chemistry Today*. 2024;19(72):269-82 (in Persian).
23. Elyasi Kojabad M, Aghdami A. Investigating the effect of coagulation and ozonation on enhancing the efficacy of membrane filtration for papermaking effluent treatment. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*. 2025;16(1):109-23 (in Persian).
24. Elyasi Kojabad M, Bekhradinassab E, Golizadeh Kahnamouei H. Reinforced facilitated transport PEBA membrane by 2D Fe-doped TiO₂ macroporous nanosheets for CO₂ separation: Utilizing cationic and non-ionic surfactants. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2024;12(5):113963.
25. Ye H, Yan Z, Lou L, Sun J, Zhong J, Zhang L, et al. Fouling in beer clarification using polyethersulfone hollow fiber membranes. *Journal of Food*

Engineering,2025;406:112823.

26. Cabral ALR, Barroca LR, Pedrosa M, Ribeiro ARL, Silva AMT. Drinking water treatment: Removal of pharmaceuticals using a spirulina-based carbon biosorbent. *Journal of Water Process Engineering*. 2025;75:107993.
27. Liang D, Huang J, Zhang H, Fu H, Zhang Y, Chen H. Influencing factors on the performance of tubular ceramic membrane supports prepared by extrusion. *Ceramic International*. 2021;47(8):10464-77.
28. Yang X, Huang G, An C. Removal of arsenic from water through ceramic filter modified by nano-CeO₂: A cost-effective approach for remote areas. *Science of the Total Environment*. 2021;750: 141510.



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

Original Article



Evaluating the efficacy of ozonation and membrane filtration as alternatives to chlorination for disinfecting drinking water from the Behbahan Maroon river source

Mohammad Jandkaripour¹, Mahdi Elyasi Kojabad^{1*}, Raheleh Haghighi^{2,3}

1- Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

2- Department of Environmental Engineering, Islamic Azad University, Ahvaz Branch, Ahvaz, Iran

3- Khuzestan Water and Wastewater Company, Drinking Water Treatment Plant – Quality and Process Control Unit, Behbahan, Iran

ARTICLE INFORMATION:

Received: 10 February 2026

Revised: 2 May 2026

Accepted: 5 May 2026

Published: 16 June 2026

Keywords: Water treatment, Ozonation, Membrane filtration, Drinking water

***Corresponding Author:**

m.elyasi@bktu.ac.ir

ABSTRACT

Background and Objective: Growing concerns over disinfection by-products (DBPs) resulting from conventional chlorination necessitate the exploration of alternative approaches in water treatment. This study investigates the efficiency of a combined system comprising ozonation and ceramic membrane filtration for drinking water treatment.

Materials and Methods: A ceramic membrane was fabricated using the slip-casting method, characterized, and evaluated for performance. Ozonation efficiency was assessed by injecting 1 g of ozone into a 2.5 L sample (concentration of 0.02 g/L) for 3 minutes. Water quality was monitored by measuring turbidity, total dissolved solids (TDS), major anions and cations, as well as microbiological indicators, including coliform bacteria and *Escherichia coli*.

Results: Morphological examination confirmed the porous structure of the membrane. The flux test results showed that the membrane flux decreased from 475 Lmh to 313 Lmh, with 96% recovery through backwashing. The membrane reduced turbidity from 1.72 NTU to 0.5 NTU, representing a 71% removal efficiency compared to the pre-filtration sample. Ozonation had no effect on water turbidity but achieved complete removal of coliform bacteria and *Escherichia coli*. In contrast, membrane filtration achieved 66% removal of these bacteria.

Conclusion: Membrane filtration removes the majority of contaminants when employed as a complementary method to either ozonation or chlorination, allowing for the subsequent use of a mild disinfectant to eliminate remaining trace microbial content. The combined application of low-concentration ozonation and chlorination prevents the formation of DBPs, representing a step toward providing safer and healthier drinking water.

Please cite this article as: Jandkaripour M, Elyasi Kojabad M, Haghighi R. Evaluating the efficacy of ozonation and membrane filtration as alternatives to chlorination for disinfecting drinking water from the Behbahan Maroon river source. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2026;19(1):87-106.

