



شرکت آب منطقه‌ای مازندران
کمیته تحقیقات و پژوهش‌های کاربردی

خلاصه گزارش طرح
تولید آب شرب از منابع آبی نامتعارف به وسیله تاس دهنده های غشایی

کد طرح
MAI-91019

پژوهشگر
دکتر غلامرضا باکری (دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل)

ناظران طرح
داود علی بابایی، فرهاد خردی، حسینی زبردست رستمی، باقر قاسمیان کرجی، سید مهدی عادی

تاریخ انتشار
پاییز ۱۳۹۸

شناسنامه طرح

این گزارش نتیجه اجرای طرح تحقیقاتی با عنوان «تولید آب شرب از منابع آبی نامتعارف به وسیله تماس دهنده‌های غشایی» می‌باشد که پیشنهاد انجام آن پس از داوری در کمیته تحقیقات آب منطقه‌ای مازندران مورد تایید قرار گرفت.

قرارداد این طرح در تاریخ ۹۳/۰۴/۰۸ به شماره ۸۸۶۸/۵۰۰ بین شرکت آب منطقه‌ای مازندران به عنوان کارفرما و دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل به عنوان مجری (مشاور) تنظیم و با حمایت و پشتیبانی مالی از محل اعتبارات جاری شرکت آب منطقه‌ای مازندران انجام شده و در تاریخ ۹۸/۷/۲۳ خاتمه یافته است.

پژوهشگر این طرح آقای دکتر غلامرضا باکری بوده، داوری نهایی طرح توسط د‌اود علی بابایی، فرهاد خلردی، حسینعلی زبردست رستمی، هاجر قاسمیان گرجی، سید مهدی عمادی انجام گردیده است.

کمیته تحقیقات و پژوهش‌های کاربردی
شرکت آب منطقه‌ای مازندران

تولید آب شرب از منابع آبی نامتعارف به وسیله تماس دهنده‌های غشایی

مجری: دکتر غلامرضا باکری

کد طرح: MAI-91019

چکیده

مشکل تامین آب شیرین یکی از معضلات جوامع بشری امروز می‌باشد که گرم شدن زمین و گسترش آلودگی‌های زیست محیطی این معضل را تشدید نموده است. گسترش فعالیت‌های صنعتی از یک سو و افزایش جمعیت از سوی دیگر باعث شده با کمبود منابع آبی سالم مواجه شویم. از آنجایی که کشور ایران در یک منطقه خشک قرار گرفته با مشکلات بسیاری در تامین آب شرب مناسب علی‌الخصوص در مناطق خشک و جنوبی کشور مواجه می‌باشد و خشکسالی‌های چند سال اخیر نیز بر شدت این مشکلات افزوده است. همچنین گسترش صنعت بویژه صنعت نفت در مناطق جنوبی کشور باعث افزایش آلودگی منابع آبی شده است. اما وجود منابع آبی در شمال و جنوب ایران این امکان را فراهم آورده تا با استفاده از فناوری‌های مناسب بتوان این مشکل را حل نمود. کمبود آب شرب مناسب مشکلی است که اکثر شهرها و روستاهای کشور با آن درگیر هستند. کاهش بارندگی سال‌های اخیر نیز به شدت این مشکلات افزوده است. همچنین تامین آب شرب مناسب برای شهرها و روستاها از معضلات جامعه امروزی ایران می‌باشد که با توجه به کمبود منابع آبی در برخی مناطق، این مشکل بسیار حاد شده است. از آنجایی که آب شرب مناسب نیاز اولیه جوامع می‌باشد بایستی برای رفع آن چاره اندیشی گردد در غیراین صورت مشکلات عدیده‌ای به وجود خواهد آمد. از طرف دیگر عدم دسترسی به برخی فناوری‌ها و محدودیت‌ها و تحریم‌های موجود باعث شده است تا نتوان برخی راه حل‌ها را مورد استفاده قرار داد. همچنین در داخل کشور منابع ارزان قیمت و بعضاً رایگان انرژی حرارتی وجود دارد و این فرصت را به ایران داده است تا بتواند از این مواهب خدادادی برای حل این مشکل استفاده نماید. فرایندهای مختلفی برای شیرین‌سازی آب توسعه یافته‌اند که از آن جمله می‌توان به روش‌های حرارتی و غشایی اشاره کرد که هر یک محدودیت‌ها و مزایای خاص خود را دارند. مصرف انرژی و کیفیت آب شیرین تولیدی دو معیار مهم برای ارزیابی فرایندهای شیرین‌سازی می‌باشد. یکی از روش‌های جدید توسعه یافته فناوری هیبرید حرارتی-غشایی می‌باشد که در آن با

استفاده از تماس دهنده غشایی و غشاهای نانوساختار، شیرین سازی آب انجام می‌شود. بدین صورت که آب ناخالص با دمای بالا و آب خالص با دمای پایین به داخل ماژول غشایی فرستاده شده، فرایند تصفیه انجام می‌پذیرد. با توجه به ساختار نانویی غشا، فلاکس تصفیه بسیار بالاتر از غشاهای RO می‌باشد؛ به طوری که از این فناوری به عنوان رقیبی قدرتمند برای غشاهای RO نام برده می‌شود. همچنین با توجه به مقاومت بسیار بالای حرارتی و شیمیایی پلیمر مورد استفاده می‌توان از این فرایند در تولید آب شرب از هرگونه منبع آبی نظیر آب چاه، آب‌های شور، پساب واحدهای RO، آب قنات و یا حتی آب دریا استفاده کرد ضمن اینکه مشکلات عملیاتی غشاهای RO نظیر گرفتگی و فشار عملیاتی بالا در این گونه غشاها وجود ندارد. همچنین می‌توان این غشاها را در داخل کشور تولید نمود و نیازی به واردات آن از خارج وجود ندارد. ضمناً میزان بازیابی آب ورودی بسیار بالا می‌باشد و می‌توان گفت که ۱۰۰ درصد آب ورودی به سیستم بازیافت می‌شود. مزایای فراوان این فناوری از جمله کیفیت بالای آب تولیدی، مصرف انرژی پایین، عدم تاثیرپذیری از کیفیت آب خام ورودی و سرمایه‌گذاری کم باعث جذاب شدن این فناوری شده است. در این طرح با استفاده از غشاهای نانوساختار و با ترکیب فناوری‌های حرارتی و غشایی، آب شرب از هر نوع منبع آبی تولید خواهد شد و فناوری هیبرید حرارتی-غشایی توسعه یافته و بومی خواهد شد.

کلید واژه‌ها: آب شرب، فناوری غشایی، شیرین سازی، غشا نانوساختار، تماس دهنده غشایی.

مقدمه

رشد سریع جمعیت جهان و در نتیجه رشد سریع صنایع مختلف مصرف‌کننده آب، موجب کاهش قابل ملاحظه منابع آب‌های زیرزمینی و سطحی شده است. یک راه حل مناسب جهت رفع این معضل، استفاده از منابع فراوان آب دریا و آب‌های لب شور و تبدیل آنها به آب شرب و قابل استفاده در صنایع می‌باشد. در مناطقی که نزولات جوی چندان زیاد نیست و یا نزدیک به دریا و اقیانوس هستند، نمک‌زدایی می‌تواند یک راه حل مناسب برای کاهش کمبود آب در این نواحی باشد، لیکن برای نواحی دور از ساحل یا مناطق دارای ارتفاع زیاد از سطح دریا به دلیل هزینه‌های بالای عملیات انتقال و پمپاژ آب، این روش اقتصادی نمی‌باشد (۱).

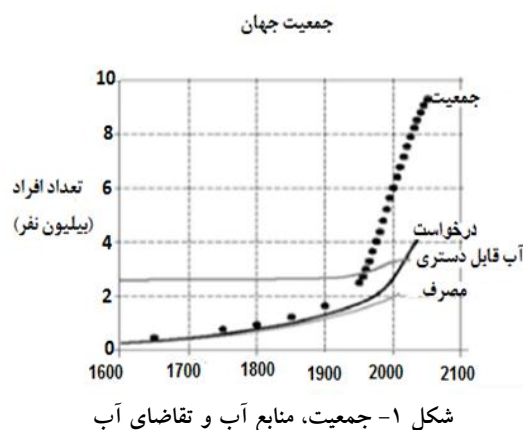
حدود ۷۱ درصد از سطح زمین بصورت دریا و اقیانوس از آب پوشیده شده است، اما کمتر از ۳ درصد آن آب شیرین می‌باشد. با توجه به اینکه مقدار زیادی از منابع آب موجود در دنیا قابل استفاده نیستند (به‌صورت آب شور و یا لب شور هستند) محققان به دنبال راه‌های مختلفی برای تامین آب شیرین از این منابع هستند به گونه‌ای که با کمترین هزینه بتوانند آب موردنیاز را تامین کنند. از این رو در طول ۳۰ سال گذشته برای نمک‌زدایی در بسیاری از مناطق خشک دنیا مثل خاورمیانه و مدیترانه گام‌های بزرگی برداشته شد (۲).

با وجودی که حدود یک درصد از جمعیت جهان در ایران زندگی می‌کنند، تنها حدود ۰/۲۶ درصد از منابع آب شیرین جهان در کشور ما وجود دارد و برآوردهای علمی نشان می‌دهد که با افزایش تدریجی جمعیت، ایران تا دو دهه دیگر به‌طور جدی با مشکل کمبود آب روبه‌رو خواهد شد به گونه‌ای که طبق پیش‌بینی‌ها، سهم سرانه آب هر ایرانی در سال ۱۳۸۵ به ۱۷۵۰ مترمکعب رسید و این مقدار در سال ۱۴۰۰ به ۱۳۰۰ مترمکعب می‌رسد که کاهش این سهم به کمتر از ۱۰۰۰ مترمکعب در سال، کشور را با بحران جدی کم آبی روبه‌رو خواهد کرد. در نتیجه تامین آب شیرین برای مصارف کشاورزی و آشامیدنی در کشور بسیار اهمیت دارد (۳).

از دیرباز مناطق جنوب ایران از کم آبی رنج می‌برد. اگرچه مناطق حاشیه خلیج فارس و دریای عمان به منابع عظیم آبی دسترسی دارند ولی این آب به حدى شور است که چه برای شرب و چه برای کشاورزی نامناسب است. عاملی که می‌تواند به صورت طبیعی این آب را شیرین کند، تبخیر سطحی آب و تشکیل ابر است. اگرچه در این مناطق به‌دلیل وجود گرمای هوا، تبخیر سطحی به میزان زیادی اتفاق می‌افتد اما در عمل حجم قابل توجهی ابر تشکیل نمی‌گردد. چرا که برای تشکیل ابر، رطوبت باید تا لایه‌های بالایی جو، که سردتر هستند بالا برود. ولی این مناطق که اصطلاحاً جنب حاره نامیده می‌شوند، با مشکلی به نام چرخش معکوس روبه‌رو هستند که باعث پایین رفتگی هوا شده و مانع نفوذ به لایه‌های بالایی شده و در نتیجه ابر تشکیل نمی‌گردد و بارش سالیانه کم می‌شود. حدود ۹۷٪ منابع آب روی کره زمین املاحی به میزان بیش از ۳۰۰۰۰ ppm دارند و برای نیازهای روزمره بسیار شور هستند.

طی سال‌های گذشته مجموعه‌ای از انواع آب شیرین کن‌ها با مدل‌ها و سازندگان گوناگون در این مناطق نصب و بهره‌برداری شده است. اما اغلب به دلیل مشکلات، انتظار شایسته از عملکرد

دستگاه‌های آب شیرین کن حاصل نشده است. به‌طور مثال در شهرهای بندرلنگه، بستک، جزیره ابوموسی، جزیره تنب بزرگ، جزیره تنب کوچک، جزیره هنگام و جزیره لارک و ... از تاسیسات آب شیرین کن استفاده می‌شود که شامل روش‌های RO، RH، MSF، MED و VC می‌باشد (۳). پاسخی که برای حل مشکل کم آبی پیش روی بشر پیشنهاد شد، در ابتدا تصفیه فاضلاب‌های شهری و در نهایت شیرین‌سازی آب‌های شور بوده است (۴). تکنولوژی‌های مدرن شیرین‌سازی آب دریا و آب لب شور، روشی موثر در تولید محصولی با کیفیت متنوع را عرضه می‌کنند و گزینه مناسبی هستند تا فاصله بین ظرفیت آب موجود و نیاز رو به رشد به آب را پر کنند و سریعاً تبدیل به یک منبع عظیم تولید آب در بسیاری از مناطق جهان شده‌اند.



تعاریف مورد استفاده در مبحث آب

کل مواد جامد محلول (total dissolved solids): مواد معدنی یا محتوای نمک آب به‌طور معمول با پارامتر کیفیت آب که TDS نامیده می‌شود اندازه‌گیری می‌شوند. غلظت مواد اشباع بر حسب میلی‌گرم در لیتر یا بخش در میلیون بیان می‌شود.

کل مواد جامد معلق (Total Suspended solids): به مقدار مواد جامد معلق در آب اطلاق می‌شود و معمولاً با پارامتر TSS بیان می‌شود. مواد جامد معلق شامل: مواد معدنی، کلوییدها، اجسام بیولوژیکی شامل ویروس‌ها و جلبک‌ها است (۴).

علت نیاز به تصفیه

چه برای مصارف آب آشامیدنی و چه برای مصارف صنعتی معمولاً آب طبیعی احتیاج به تصفیه دارد. تصفیه آب برای مصارف آشامیدنی، هم آسانتر و هم ارزانتر از تصفیه آب برای مصارف صنعتی است. مشکلات اصلی در مورد آب آشامیدنی عبارتند از:

- ۱- وجود باکتری‌های بیماری‌زا در آب.
- ۲- کمبود و یا زیادی غلظت بعضی از یون‌ها که در سلامتی انسان نقش دارند مثل یون فلوئور.
- ۳- وجود ذرات معلق در آب.
- ۴- بو و مزه (۳).

شیرین‌سازی آب

فناوری نمک‌زدایی یا شیرین‌سازی عبارت است از: کاهش غلظت نمک آب و رساندن آن به حد مطلوب جهت شرب و مصارف انسانی (۵). نمک‌زدایی از آب توسط سیستم‌های آب شیرین کن صورت می‌گیرد و شامل مراحل مختلفی شامل پیش تصفیه و تصفیه می‌باشد. اگر فرایند نمک‌زدایی به منظور استحصال آب قابل شرب باشد باید پس از اتمام فرایند نمک‌زدایی، پارامترهای زیر جهت اطمینان از قابل شرب بودن آب بر اساس معیارهای سازمان بهداشت جهانی (WHO) مورد بررسی و کنترل قرار گیرند (۶).

شیرین‌سازی آب به فرایندهایی گفته می‌شود که طی آن شوری و املاح آب کاهش می‌یابد طوری که آب برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعتی مناسب باشد. برای مصارف خانگی و شرب باید غلظت نمک کمتر از ۱۰۰۰ ppm باشد و برای مصارف کشاورزی شوری آب نباید از ۳۰۰۰ ppm بیشتر باشد.

به‌طور کلی روش‌های شیرین‌سازی به‌طور عمده با روش‌های حرارتی و غشایی انجام می‌شود و مساله انتخاب نوع آب شیرین کن نیز مطرح است که با توجه به شرایط جغرافیایی، دوری یا نزدیکی به منابع انرژی مورد استفاده و همچنین مساله اقتصادی بودن طرح محدودیت‌هایی در انتخاب نوع آب شیرین کن ایجاد می‌کند (۶).

روش‌های مختلف شیرین‌سازی

روش‌های شیرین‌سازی آب دریا را می‌توان بر اساس روش کار و نحوه تامین انرژی به دسته‌های مختلفی تقسیم‌بندی کرد. اگر بخواهیم روش‌های شیرین‌سازی را بر اساس نحوه تامین انرژی تقسیم‌بندی کنیم، دسته‌بندی زیر را خواهیم داشت.

۱- الکتریکی، ۲- مکانیکی، ۳- سوختی، ۴- انرژی‌های نو.

سیستم‌های آب شیرین کن را می‌توان از نقطه نظر فرایند به سه دسته کلی، فرایندهای حرارتی، فرایندهای غشایی و فرایندهای خورشیدی دسته‌بندی کرد (۳).

روش‌های حرارتی (تبخیری)

نمک‌زدایی حرارتی یکی از قدیمی‌ترین روش‌های شیرین‌سازی آب دریا می‌باشد که بر فرایند تقطیر استوار است و اساس آن جدایی آب از نمک است. انرژی موردنیاز برای تبخیر آب دریا، از توربین‌های ایستگاه برق تامین می‌شود که با اتلاف انرژی زیادی همراه است. مهم‌ترین فناوری‌های شیرین‌سازی حرارتی آب دریا که به‌صورت تجاری مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از: تقطیر چند مرحله‌ای ناگهانی (MSF)، تقطیر چندمرحله‌ای (MED) و میعان بخار (VC). اساس روش‌های حرارتی چنین است که بخشی از آب خام تبخیر شده و به‌وسیله تراکم، جمع‌آوری شده و سعی می‌شود که در طول عملیات، حداکثر استفاده از انرژی گرمایی به عمل آید و در نهایت نمک‌های حذف شده، جمع‌آوری و سپس به‌صورت محلول غلیظی به نام "شورآب" تخلیه می‌شوند. در روش حرارتی می‌توان انرژی موردنیاز را به صورت‌های مختلفی تامین کرد. بیشترین مشکلات بهره‌برداری آب شیرین کن‌های تبخیری خوردگی است (۳ و ۵).

تبخیر (تقطیر) ناگهانی چند مرحله‌ای (Multi-stage flash Distillation – MSF)

در این روش آب دریا با فشار مشخص از میان لوله‌های بسته که در آن تبادل حرارتی انجام می‌گیرد عبور می‌کند و بخار در بخش بالایی اتاقک مایع می‌شود. سپس با استفاده از سوخت داغ یا بخار خروجی، آب تا بالاترین دمای تعیین شده گرم می‌شود و باعث تبخیر ناگهانی در قسمت پایین اتاقک شده و این روند همراه با کاهش فشار از اتاقی به اتاق دیگر ادامه دارد. در ادامه بخار تولید شده به لوله‌های موجود در اتاقک برخورد کرده و مایع می‌شود. به این ترتیب باعث انتقال حرارت به آب

تولید آب شرب از منابع آبی نامتعارف به وسیله تماس دهنده‌های غشایی

خام می‌شود. بخارهای مایع که همان آب شیرین می‌باشد جمع‌آوری و خارج می‌شود. این روش انرژی و زمان زیادی برای گرم کردن و پمپاژ آب نیاز دارد (۵).

تقطیر چند مرحله‌ای (MED - Multi-Effect Distillation)

کندانس کردن و تبخیر همراه با کاهش تدریجی فشار در ظرف‌های مختلف صورت می‌گیرد که توسط محفظه خلا به وجود می‌آید.

روش میعان بخار (VC - Vapor Compression distillation)

مکانیسم این فرایند شبیه فرایند MED است با این تفاوت که اساس کار آن تراکم بخار از طریق تبخیر آب تا فشار بالاتر می‌باشد. بخار برای تولید حرارت در فرایند تبخیر دوباره استفاده می‌شود (۵).

روش‌های خورشیدی

رطوبت‌دهی خورشیدی (SD)

در این فرایند با استفاده از تابش خورشید منبع آب شور را گرم می‌کنند تا بخار تولید شود. این بخار بر اثر برخورد با سطوح با دمای پایین‌تر، انرژی خود را از دست داده و به صورت مایع درمی‌آید.

روش تقطیر خورشیدی

در این روش با استفاده از یک سلول جمع‌کننده خورشیدی، انرژی خورشیدی را جمع‌آوری کرده و برای گرم کردن آب ورودی در پروسه‌های نمک‌زدایی حرارتی مورد استفاده قرار می‌دهند.

روش انرژی نوری خورشیدی

در این روش با استفاده از سلول‌های فتوولتائیک، برق تولید می‌شود که این انرژی را می‌توان در واحدهایی نظیر اسمز معکوس و الکترودیالیز مورد استفاده قرار داد (۵).

روش‌های غشایی

روش غشایی، فرایند جداسازی املاح از منابع آب با استفاده از غشا نیمه تراوا است. در این روش آب به‌دست آمده به‌صورت مایع است. در روش‌های غشایی آب شور از داخل یک غشا عبور کرده ولی املاح از غشا عبور نمی‌کنند و در بعضی موارد غشا قادر است یون‌های محلول را به‌صورت انتخابی حذف کند (۴). در این‌جا منظور از غشا فیلم نازکی است که دارای منافذی است که آب می‌تواند از آن عبور کند ولی برای مواد مضر و غیر دلخواه امکان عبور وجود ندارد (۶).

الکترودیالیز (Electro Dialysis – ED)

یکی دیگر از فناوری‌های غشایی الکترودیالیز یا پیشرفته‌تر از آن، الکترودیالیز برگشت‌پذیر می‌باشد. به‌دلیل خاصیت یونی نمک‌های محلول در آب و توانایی جذب توسط الکترودهای باردار، می‌توان غشاهایی ساخت که به‌صورت انتخابی مثلاً یون‌های منفی را از خود عبور دهند و از عبور کاتیون‌ها ممانعت کنند که به آن غشای آنیونی گویند (۵).

میکروفیلتراسیون (Microfiltration – MF)

میکروفیلتراسیون ذراتی در ابعاد ۰/۱ تا ۱ میکرون را حذف می‌کند. در این سیستم اجسام معلق و کلوییدهای بزرگ دفع می‌شود. این سیستم جهت حذف باکتری و مواد لخته شده یا مواد جامد معلق در آب (TSS^۱) می‌باشد. میزان فشار لازم برای میکروفیلتراسیون حدود ۰/۷ بار می‌باشد.

اولترافیلتراسیون (Ultrafiltration – UF)

اولترافیلتراسیون، عمل جداسازی ذرات مولکولی بزرگ را انجام می‌دهد که در محدوده ۲۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر قرار می‌گیرند (تا اندازه ۰/۱ میکرون). کارکرد این روش، بر مبنای مکانیزم الک کردن استوار است و املاح موجود در آب را با توجه به سایز آنها دفع می‌نماید. نمک‌های محلول و مولکول‌های کوچکتر از غشا عبور کرده و الباقی شامل کلوییدها، پروتئین‌ها، اجسام آلوده‌کننده میکروبیولوژیکی و مولکول‌های ارگانیک بزرگ جدا می‌شوند. فشار موردنیاز برای اولترافیلتراسیون، حدود ۱ تا ۷ بار می‌باشد.

¹ TSS = Total Suspended Solids

نانوفیلتراسیون (NF – Nanofiltration)

فناوری نانو می‌تواند حفره‌هایی به اندازه کافی کوچک برای فیلتراسیون کوچک‌ترین ذرات بسازد. این سیستم، زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که حذف مواد آلی به میزان بالا و حذف مواد کانی در حد متوسط مورد نظر باشد. در نانوفیلتراسیون نمک‌های محلول در رنج ۲۰ تا ۹۸ درصد دفع می‌شوند. نمک‌های دارای آنیون‌های تک ظرفیتی مثل کلراید سدیم یا کلراید کلسیم، بین ۲۰ تا ۸۰ درصد دفع می‌شوند در حالی که نمک‌های دارای آنیون‌های دو ظرفیتی مثل سولفات منیزیم، دفع بالاتری بالغ بر ۹۰ تا ۹۸ درصد خواهند داشت. فشار مورد نیاز برای NF در حدود ۳/۵ تا ۱۶ بار می‌باشد (۱).

اسمز معکوس (RO – Reverse Osmosis)

اسمز معکوس، حد نهایی فیلتراسیون موجود می‌باشد. غشا RO به‌عنوان سپری برای نمک‌های محلول و مولکول‌های غیرارگانیک عمل می‌کند. در مقابل، مولکول‌های آب به‌طور آزادانه از غشا گذر کرده و یک جریان آب خالص را ایجاد می‌کنند. روش اسمز معکوس در میان فرایندهای غشایی، رشد سریعتری داشته است و روش امیدبخشی برای نمک‌زدایی آب لب شور و آب دریا می‌باشد (۱ و ۵).

روش‌های جدید

روش‌های جدید اغلب به‌صورت ترکیبی از روش‌های قبلی است. در زیر چند مورد از آنها به طور خلاصه بیان شده است.

Electro Deionization (EDI)

این روش ترکیبی از روش تعویض یونی و الکترودیالیز است. جریان الکتریکی به صفحاتی اعمال می‌شود که بیرون آن شامل غشا به همراه رزین است. آب نمک از بین غشا عبور می‌کند، یون‌ها در آب جایگزین شده و از داخل غشا عبور می‌کنند و به سمت صفحات باردار کشیده می‌شوند. سپس آب از میان رزین عبور کرده و عاری از هرگونه یون خواهد بود (۳).

Freeze Separation (FS)

انجماد آب نمک باعث می‌شود تا فقط آب خالص منجمد شود، سپس با ذوب کردن یخ می‌توان آب تمیز به‌دست آورد.

Capacitive Deionization (CDI)

آب از میان صفحاتی می‌گذرد که با کربن سطح ویژه بالا پوشانیده شده است. کربن یونها را جذب کرده و آب قابل مصرف به دست می‌آید.

تقطیر در خلاء (Vacuum Distillation (VD))

با قراردادن آب نمک در خلاء، نقطه جوش آن کاهش می‌یابد. آب در دمای پایین‌تر بخار شده و سپس چگالش می‌یابد تا آب شرب به دست آید (۳).

تقطیر غشایی (Membrane Distillation (MD))

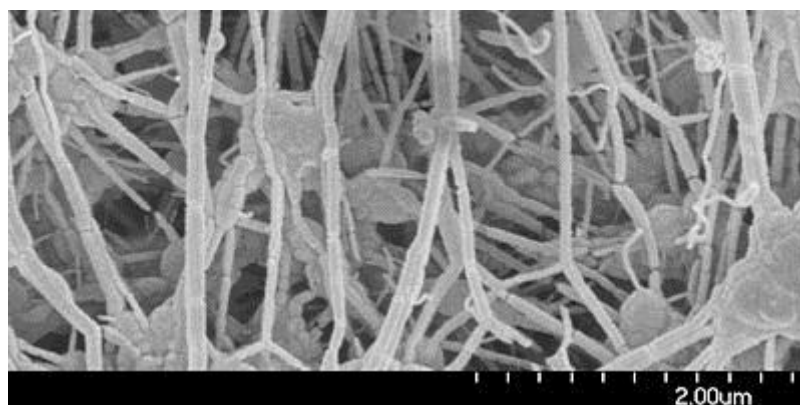
این روش برای آب‌های حاوی TDS در بازه ۱۵,۰۰۰ تا ۳۰,۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر آزمایش شده است. آب به دست آمده از این روش به دلیل خلوص بالا (تقریباً ۱۰۰٪) برای بویلرها، آب آشامیدنی، نوشابه‌سازی، صنایع غذایی و داروسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش از یک غشا متخلخل آب‌گریز از جنس پلی پروپیلن، پلی تترافلورواتیلن و همچنین پلی ونیل دی ان فلوراید که دارای خصوصیات مکانیکی و فیزیکی بالایی است، استفاده می‌شود. غشا دارای حفره‌های با قطر ۱-۰/۱ میکرون است. این فرایند غالباً در دمای ۴۰-۸۰ درجه سانتی‌گراد و فشار اتمسفر کار می‌کند. فرایند تقطیر غشایی بر اساس تعادل گاز-مایع و نفوذ از غشا آب‌گریز استوار است. در این فرایند ابتدا مایع در طرف خوراک گرم تبخیر می‌شود، سپس بخار از طریق غشا عبور کرده و در طرف دیگر غشا، بخار نفوذی چگالش می‌یابد. خوراک ورودی در دمای ۴۰-۸۰ درجه سانتی‌گراد در تماس با غشا قرار می‌گیرد و به دلیل تفاوت فشار بخار در دو طرف غشا که منتج از اختلاف دماست، نفوذ بخار از غشا آب‌گریز صورت می‌گیرد. این فرایند با توجه به مکانیزم چگالش به چهار دسته طبقه‌بندی می‌شود (۱ و ۳).

در فرایند تقطیر غشایی، معمولاً یک فرایند غشایی غیرهمدم استفاده می‌شود که در آن نیروی محرکه یک گرادیان فشار جزئی میان دو طرف یک غشا متخلخل می‌باشد که با مایعات فرایندی مرطوب نمی‌شود و تعادل بخار/مایع اجزای موجود را تغییر نداده، اجازه متراکم شدن را داخل منافذ خود نمی‌دهد و در معرض تماس مستقیم با محلول مایع خوراک داغ مورد تصفیه، قرار می‌گیرد.

تقطیر غشایی به عنوان یک فرایند نوین جداسازی غشایی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. تقطیر غشایی به عنوان یک فرایند جداسازی غشایی با قابلیت جداسازی ذرات در ابعاد نانومتر دارای کاربردهایی چون نمک‌زدایی و شیرین‌سازی آب برای مصارف آشامیدنی و صنعتی و تغلیظ آب میوه،

توجه روزافزونی را به خود جلب کرده است. کارکرد فرایند در دمای پایین بیانگر نیاز به منبع انرژی پایین و داشتن صرفه اقتصادی بالای این روش می‌باشد. مهم‌ترین مزیت این روش، استفاده از منبع انرژی پایین و به‌دست آوردن خلوص بالا می‌باشد. تقطیر غشایی بر اساس روش چگالش بخار نفوذی از غشا به انواع مختلف تقسیم‌بندی می‌شود.

تقطیر غشایی یک فرایند دمایی است که در آن جداسازی بر اساس تغییر فاز صورت می‌گیرد. یک غشای آبریز (مانند PTFE، PVDF و یا PP) با اندازه منافذ حدوداً ۰/۱ تا ۰/۵ میکرومتر نقش یک مانع برای فاز مایع را به نمایش می‌گذارد که اجازه می‌دهد فاز بخار (به‌عنوان مثال بخار آب) از حفرات غشا عبور کنند. نیروی محرکه این فرایند ناشی از یک اختلاف فشار بخار جزیی است که معمولاً توسط یک اختلاف دما ایجاد می‌شود.



شکل ۲- نمایی از ساختار غشای مورد استفاده در فرایند تقطیر غشایی

سیستم‌های تقطیر غشایی را می‌توان به چهار دسته طبق ماهیت و سمت سرد غشا تقسیم‌بندی کرد.

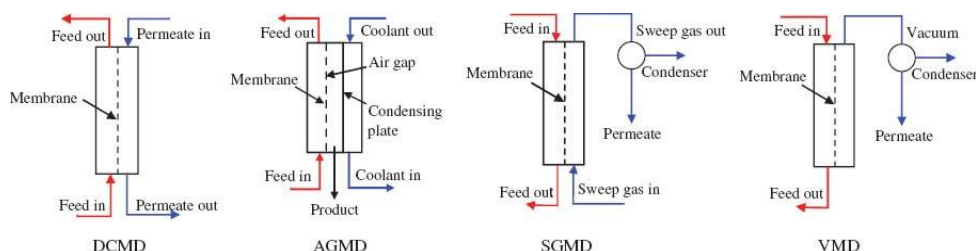
۱- تقطیر غشایی تماس مستقیم^۱ (DCMD) که در آن غشا فقط در تماس مستقیم با فازهای مایع، آب شور در یک طرف و آب شیرین در طرف دیگر قرار دارد.

¹ Direct Contact Membrane Distillation (DCMD)

۲- تقطیر غشایی شکاف هوایی^۱ (AGMD) که در آن یک شکاف هوا بین غشا و سطح تغلیظ شونده وجود دارد.

۳- تقطیر غشایی با گاز جاروکننده^۲ (SGMD) که در آن یک گاز خنثی به عنوان یک حامل برای تولید بخار، به جای خلایی که در VMD استفاده می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴- تقطیر غشایی همراه با خلا^۳ (VMD) که در آن فاز بخار از فاز مایع از طریق غشا خلا می‌شود و اگر لازم بود در یک وسیله جداگانه تغلیظ می‌شود.



شکل ۳- انواع سیستم‌های تقطیر غشایی

در میان فرایندهای جداسازی غشایی، تقطیر غشایی توجه محققان را اخیراً به خود جلب کرده است. در تقطیر غشایی از یک غشا متخلخل آب‌گریز استفاده می‌شود که غشای مورد استفاده در تقطیر غشایی از موادی مانند پلی پروپیلن و پلی تترافلورو اتیلن ساخته می‌شود. همچنین پلی وینیل دی‌ان‌فلوراید که دارای خصوصیات مکانیکی و فیزیکی بالایی است، برای ساخت غشا استفاده می‌شود. غشا دارای حفره‌های با قطر ۰/۱-۱ میکرون می‌باشد که این اندازه شبیه به اندازه حفره‌های غشای مورد استفاده در میکرو فیلتراسیون است. این فرایند در دمای ۴۰-۸۰ درجه سانتی‌گراد و فشار اتمسفریک کار می‌کند. بنابراین به انرژی پایین و نگهداری آسانی نیاز دارد. ارجحیت این روش به‌خصوص در مقیاس کوچک قابل ملاحظه می‌باشد جایی که می‌توان از انرژی‌های زائد و کم اهمیت مانند انرژی گازهای خروجی و انرژی خورشیدی استفاده کرد. با توجه به این‌که ایران در دوران توسعه صنعتی می‌باشد و آب با درصد خلوص بالا برای صنایع با اهمیتی چون صنایع پتروشیمی و غذایی مورد نیاز می‌باشد،

¹ air gap MD (AGMD)

² sweeping gas MD (SGMD)

³ vacuum MD (VMD)

استفاده از تقطیر غشایی به عنوان روشی نوین و با صرفه و تحقیقات بر روی این فرایند توسط پژوهشگران امری لازم به شمار می آید.

مزایای تقطیر غشایی

❖ دستیابی به محصول خالص تقریباً ۱۰۰٪

در اینجا منظور از محصول در واقع بخار نفوذی چگالش یافته در فرایندهای نمکزدایی و شیرین سازی آب می باشد و در تقطیر غشایی در مقایسه با روش های جداسازی مشابه مانند اسمز معکوس که حداکثر خلوص آب ۹۸٪ است به خلوص ۱۰۰٪ نیز می توان دست پیدا کرد.

❖ احتیاج به منبع انرژی کم (دمای پایین و فشار اتمسفریک)

به دلیل اینکه فرایند تقطیر غشایی در دمای پایین (۸۰-۴۰ درجه سانتی گراد) و فشار اتمسفریک عمل می کند، احتیاج به انرژی کمی در مقایسه با روش های مشابه غشایی و همچنین تقطیر معمولی دارد و می توان از انرژی های زائد مانند انرژی موجود در گاز خروجی از موتور و یا انرژی خورشیدی استفاده نمود.

❖ هزینه پایین برای جلوگیری از گرفتگی

به دلیل بزرگی حفره های غشا در تقطیر غشایی در مقایسه با روش های مشابهی چون اسمز معکوس و نانوفیلتراسیون و همچنین عملیات در فشار پایین، گرفتگی و در نتیجه کاهش کارایی غشا کمتر رخ می دهد.

❖ استفاده برای محلول های آژئوتروپ

مکانیزم عمل تقطیر غشایی شامل دو قسمت تبخیر مایع و نفوذ بخار از غشا می باشد و در محلول های آژئوتروپ با توجه به تفاوت نفوذ و ضریب نفوذ مولکول های مختلف از غشا، جداسازی محلول های آژئوتروپ امکان پذیر می باشد.

❖ سایر مزایا

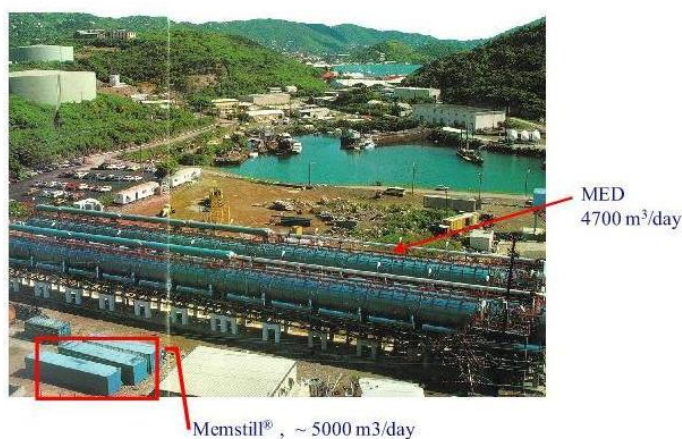
از دیگر مزایای تقطیر غشایی می توان به موارد زیر اشاره کرد.

۱- فلاکس بالا (تا ۱۲ برابر غشاهای اسمز معکوس) که منجر به کاهش ابعاد دستگاه ها خواهد شد.

- ۲- عدم وجود مشکلات عملیاتی نظیر گرفتگی، عدم وجود نشت (leakage)، عدم نیاز به شست‌وشوی دوره‌ای، عدم نیاز به تعویض غشا و ...
- ۳- عدم نیاز به فشارهای عملیاتی بالا (معمولا در فشار کمتر از یک بار کار می‌کند)
- ۴- عدم نیاز به واردات غشا از خارج
- ۵- استفاده از پلیمرهای مقاوم و ارزان قیمت برای ساخت غشا
- ۶- امکان استفاده برای تولید آب خالص از هرگونه منبع آب نظیر آب دریا، آب چاه و ... و تصفیه پساب‌های خانگی و صنعتی
- ۷- بازیافت بالای آب ورودی
- ۸- سادگی و راحتی نگهداری
- ۹- قابلیت اتوماسیون آسان
- ۱۰- عدم احتیاج به استفاده از مواد شیمیایی به‌خصوص برای صنایع غذایی

مقایسه تاسیسات روش‌های حرارتی و روش هیبرید حرارتی - غشایی

در شکل ۴ مشاهده می‌شود که روش هیبرید حرارتی - غشایی دارای حجم کمتری از لحاظ تاسیسات در مقایسه با روش متداول حرارتی MED می‌باشد.



شکل ۴- مقایسه حجم تاسیسات روش‌های حرارتی و روش هیبرید حرارتی - غشایی

تولید آب شرب از منابع آبی نامتعارف به وسیله تماس دهنده‌های غشایی

مقایسه هزینه‌های تولید آب به روش اسمز معکوس با روش هیبرید حرارتی - غشایی

جدول ۱- مقایسه هزینه‌های تولید آب به روش اسمز معکوس با روش هیبرید حرارتی - غشایی

Water production costs Memstill vs. RO sea water – 105.000 m3/day, incl. intake & pre/post treatment

	Memstill		Memstill		RO	RO
	Cogeneration on LP steam	Cogeneration 85 C	Waste heat		"minimum"	"Wif"
Energy costs						
Heat (MJ /m ³) (cost in €/GJ)	231 (2.00)	231 (0.80)	139 (0.80)	231 (0.10)		
Electricity (kWh/m ³)	0.75	0.75	0.75	0.75	2.5	4.5
Heat cost (€/m ³)	0.46	0.19	0.11	0.02		
Electricity cost, 0.07 kWh (€/m ³)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.18	0.32
Fixed costs						
Hardware (excl. membranes) (€ per m ³ -day)	165		165		750	1000
Modules/elements (€ per m ³ -day)	214		233		35	49
Hardware cost (€/m ³)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.23	0.30
Module cost (€/m ³)	0.11	0.11	0.12	0.12	0.02	0.03
Auxiliary: (€/m ³) O&M, chemicals., filters etc.	0.03	0.03	0.03	0.03	0.09	0.09
Water costs-total (€/m³)	0.70	0.43	0.36	0.27	0.52	0.74

مقایسه هزینه‌های روش‌های حرارتی، غشایی و هیبریدی

جدول ۲- مقایسه هزینه‌های روش‌های حرارتی، غشایی و هیبریدی

Table 3: Technology components table

Source: Market evaluation report by Royal Haskoning, 2006

Description	Value	RO	MED	MSF	Memstill
Average turnkey price per installed m ³ /d	USD/m ³ /d	900-1600	1200-1700	1300-1900	380-500
Electrical energy requirement	kW/m ³	3.5-5.0	2-3	3-5	0.1-0.75
Heat requirement	MJ/m ³		270-400	270-400	80-240
Temperature heat source	°C		65-110	65-110	47-90
Distillate quality	µS/cm	20-100	5-20	5-20	1-10
Recovery	%	45-50	10-20	10-20	10-75 ¹
Flexibility		Yes	No	No	Yes
Lay-out requirement		Small	Big	Very big	Very small
Cost price water	USD/m ³	0.75-1.25	0.75-1.75	1.25-2.0	0.42-1.10

Price per m³ depends on seawater salinity

1) Memstill recovery can be selected between 10 and 75%, without scaling problems

هزینه‌های سرمایه‌گذاری فناوری هیبرید حرارتی - غشایی

میزان سرمایه‌گذاری مورد نیاز برای احداث واحد شیرین سازی آب با فناوری هیبرید حرارتی - غشایی عمدتاً به ماژول‌های غشایی مربوط می‌شود که طراحی‌های مختلفی از سوی شرکت‌ها ارائه شده است. غشا نقش اصلی را در این فرایند بازی می‌نماید. عمدتاً شرکت‌ها از غشا صفحه تخت از جنس PTFE استفاده می‌نمایند که قیمت بالایی دارند و باعث افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری می‌شود. به عنوان مثال در جدول ۳ قیمت پیشنهادی دو شرکت در این زمینه ارائه شده است که قیمت‌های بالایی هستند و عمدتاً به دلیل قیمت بالای غشا مورد استفاده در این فرایند می‌باشد.

جدول ۳- قیمت سیستم‌های پیشنهادی بر مبنای فناوری هیبرید حرارتی - غشایی

Company 1	3000 Liter/day	70,000 Euro (transport etc. not included)
Company 2	32 Liter/h (770 Liter/day)	44,400 Euro (delivery EXW Sharjah) #

تحویل در شارجه امارات

کاربردهای فناوری هیبرید حرارتی - غشایی

- استفاده در پالایشگاه‌ها و مراکز صنعتی به منظور کاهش TDS پساب‌های High TDS (پساب‌های سیستم‌های RO و بلودان برج‌های خنک کننده).
- استفاده در نیروگاه‌ها برای تولید آب خالص زیرا در این مراکز هم منابع آبی نامتعارف و هم انرژی حرارتی مازاد موجود است و می‌توان هزینه‌های تولید را به حداقل رساند.
- استفاده در مجتمع‌های فولاد و ذوب آهن برای کاهش TDS آب‌های فرایندی.
- استفاده در سکوها نفتی به منظور تامین آب شرب.
- استفاده در کشاورزی به منظور تولید آب مناسب برای کشاورزی به خصوص از منابع آبی نامتعارف.
- استفاده در کشتی‌ها به منظور تامین آب شرب. فناوری‌هایی که در کشتی‌ها استفاده می‌شود عمدتاً وارداتی و بسیار گران می‌باشند.
- استفاده در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز به منظور تولید آب فوق خالص.



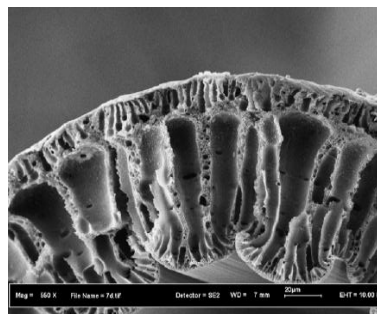
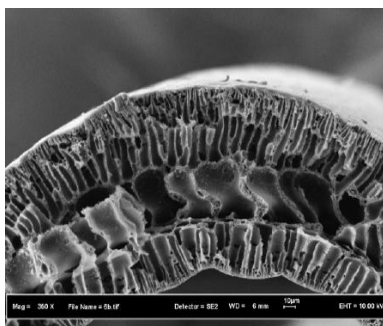
شکل ۵- کاربردهای فناوری هیبرید حرارتی-غشایی.

سیستم تولید آب فوق خالص با فناوری هیبرید حرارتی-غشایی

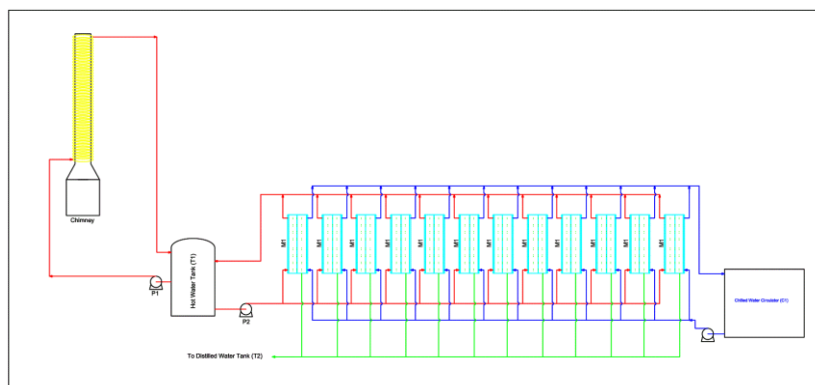
در این بخش سیستمی که بر اساس فناوری هیبرید حرارتی-غشایی برای شرکت گاز و به منظور تولید آب فوق خالص ساخته شده است، ارائه می‌شود. این سیستم وظیفه تولید آب فوق خالص را بر عهده دارد. لازم به ذکر است که بر اساس استاندارد شرکت ملی گاز ایران، معیارهای بالایی برای آب فوق خالص تعیین شده که خوشبختانه سیستم ساخته شده توانسته است که این استانداردها را با موفقیت تامین نماید.

یکی از اقلام مصرفی در شرکت‌های گاز استانی آب خلوص بالا می‌باشد که برای پر نمودن حجم داخلی هیت‌های گازی مورد استفاده قرار می‌گیرد، در حقیقت مخلوط آب و گلیکول به‌عنوان محیط انتقال حرارت در هیت‌ها به‌کار می‌رود. از آنجایی که این هیت‌ها به‌صورت روباز هستند بر اثر تبخیر نیاز به شارژ دوره‌ای آب وجود دارد ضمن این‌که هر چند سال یک‌بار بایستی محتویات داخلی هیت‌ها تخلیه شده و پس از شست‌وشو، با آب خلوص بالا تازه و گلیکول پر شود که در این صورت مقدار آب خلوص بالای موردنیاز بسیار زیاد خواهد بود. در حال حاضر آب خلوص بالا موردنیاز توسط شرکت‌های گاز استانی از برخی شرکت‌های تامین‌کننده خریداری می‌شود که با توجه به قیمت

آن و نیز مشکلات سفارش، خرید و حمل و نقل و نیز کیفیت پایین آب مناسب خواهد بود که شرکت‌های گاز استانی خود به تولید این ماده اقدام نمایند. با توجه به وجود حرارت مازاد در هیترها می‌توان از این مزیت استفاده نمود و آب خلوص بالا مصرفی را در ایستگاه‌های تقلیل فشار تولید نمود. در این طرح، ساخت واحد تولید آب خلوص بالا از حرارت مازاد هیترها در ایستگاه‌های تقلیل فشار با استفاده از فناوری هیبرید حرارتی- غشایی مدنظر بود. در شکل ۷، PFD واحد آب شیرین کن ارایه شده است.



شکل ۶- نمایی از غشاهای نانوساختار استفاده شده در فرایند هیبرید حرارتی-غشایی



شکل ۷- PFD واحد آب شیرین کن

سیستم تصفیه پساب با TDS بالا با فناوری هیبرید حرارتی - غشایی

در این بخش سیستمی که بر اساس فناوری هیبرید حرارتی - غشایی برای پالایشگاه نفت پارس و به منظور تصفیه پساب با TDS بالا ساخته شده است، ارائه می‌شود. این سیستم در پالایشگاه نفت پارس واقع (تهران) نصب شد و هدف از آن اثبات فناوری ارائه شده برای تصفیه پساب‌های خاص بود. لازم به ذکر است که بر اساس استاندارد پالایشگاه نفت پارس، هدف‌گذاری در تصفیه پساب کاهش میزان TDS پساب به حدود ۳۰۰ ppm بود که سیستم ارائه شده توانست میزان TDS را به مقادیری بسیار کمتری برساند.



شکل ۸- پکیج ساخته شده

در این سیستم از بخار آب برای گرم کردن پساب و رساندن به دمای ۷۰ درجه سلسیوس و از آب سرد به منظور خنک سازی استفاده شد. به منظور راستی آزمایی پیشنهاد شد علاوه بر آزمایش پکیج با استفاده از پساب شرکت که دارای TDS حدود ۲۵۰۰ ppm بود، آزمایشی دیگر با استفاده از

پساب سنتزی صورت بگیرد. بدین صورت که TDS پساب موردنظر با استفاده از نمک طعام در حد بالایی افزایش داده شود و سپس آزمایش‌های مختلف انجام شود.

هر دو آزمایش بر روی سیستم تصفیه پساب صورت گرفت که در آزمایش دوم به دلیل استفاده از سیستم‌های پرتابل اندازه‌گیری املاح و محدودیت این سیستم‌ها در اندازه‌گیری TDS (بیشترین مقدار قابل اندازه‌گیری هدایت الکتریکی توسط دستگاه ۲۰۰۰۰ میکروزیمنس بوده است) مقدار TDS را ۱۰۰۰۰ ppm ثبت کرده‌اند؛ در صورتی که در عمل مقدار TDS خیلی بیشتر از این میزان بوده است.

بنا بر گزارش پالایشگاه نفت پارس، سیستم ارایه شده توانسته است میزان املاح پساب پالایشگاه را بیش از ۹۸ درصد کاهش داده، TDS پساب را از ۲۴۰۰ ppm به کمتر از ۴۰ ppm برساند که این نتایج مورد رضایت کامل پالایشگاه نفت پارس واقع شده است. همچنین در آزمایش تکمیلی انجام شده، سیستم ارایه شده توانست میزان املاح پساب سنتزی را از میزان بالاتر از ۱۰۰۰۰ ppm به کمتر از ۴۰ ppm (۹۹/۶ درصد کاهش) برساند و این نتایج نیز مورد رضایت کامل پالایشگاه نفت پارس واقع شده است.

تشکر و قدردانی

این طرح پژوهشی با حمایت مالی کمیته تحقیقات شرکت سهامی آب منطقه‌ای مازندران به انجام رسیده است که به این وسیله تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

- ۱- رستگاری، ا. ۱۳۹۱. بررسی فرآیندهای متداول تصفیه غشایی و معرفی راهکاری نوین جهت رفع محدودیت‌های فرآیندهای متداول. کارگاه بین‌المللی و همایش تخصصی نمک‌زدایی آب‌های لب شور و تصفیه پساب..
- 2- McGraw Hill. 2013. Desalination engineering: planning and design, Nikolay Voutchkov.
- ۳- سعیدی، ا. ۱۳۹۰. نمک زدایی آب. فصلنامه دنیای مواد، شماره ۱۵، صفحه ۲۰.
- ۴- امیدبخش، ا. ۱۳۸۸. تصفیه آب به روش اسمز معکوس (RO). ماهنامه تهویه مطبوع، شماره ۷۸، صفحه ۵۳.
- ۵- احمدی، م. ع. و ع. ر. دهقانی تفتی. ۱۳۹۱. ارزیابی زیست محیطی شیرین‌سازی آب دریای خزر بر اکوسیستم آن. ششمین همایش ملی مهندسی محیط زیست (انجمن مهندسی محیط زیست ایران).
- 6- Buonomenna, M. G., G. Golemme, E. Perrotta. Membrane operations for industrial applications. Advances in Chemical Engineering, Chapter 21.