



مروری بر فرایند شیرین سازی آب دریا به روش هیدرات گازی

علی غلامی^۱، محمد حسین جهانگیر^۲

۱. دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

a.gholami27@ut.ac.ir

۲. استادیار گروه انرژی های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

چکیده

آب نقش بسزایی در زندگی بشر دارد و از این رو تأمین آن نیازمند توجه ویژه است. با رشد جمعیت و روند صنعتی شدن کشورها کمبود آب در جهان و بویژه در برخی کشورهای در حال توسعه به یک بحران جدی تبدیل شده است. آب دریا منبعی بسیار عظیم برای تولید آب شیرین بشمار می‌رود. علیرغم بلوغ فناوری‌های شیرین‌سازی، این فرآیندها به‌منظور توجیه‌پذیری اقتصادی همچنان نیازمند توسعه بیشتر هستند. یکی از روش‌های بهبود فرآیندهای شیرین سازی آب از نظر اقتصادی استفاده از هیدرات‌های گازی است. هیدرات‌های گازی ترکیبات بلورینی هستند که از آب و مولکول‌های گازی مانند متان، کربن دی‌اکسید، نیتروژن و ... تشکیل شده‌اند. این مولکول‌های گازی در داخل حفره های حاصل از پیوند هیدروژنی مولکول‌های آب قرار می‌گیرند. این ترکیبات تاکنون در حوزه‌های گوناگون مهندسی اعم از جداسازی گاز، جداسازی کربن دی‌اکسید، ذخیره‌سازی و انتقال گاز، تبرید و شیرین‌سازی آب شور با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اساس فرآیند شیرین‌سازی آب با استفاده از هیدرات‌های گازی تغییر فاز مایع به جامد است. در مقاله حاضر به بررسی روند استفاده از هیدرات‌های گازی در شیرین سازی آب دریا، اصول استفاده از این فناوری، جنبه های مهندسی و اقتصادی و در نهایت چشم انداز آینده این فناوری پرداخته شده است.

کلمات کلیدی: نمک‌زدایی، شیرین‌سازی آب، هیدرات گازی، تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای، اسمز معکوس.

مقدمه

تغییرات آب و هوایی، افزایش جمعیت و توسعه ناپایدار در آینده‌ای نه چندان دور منجر به بروز معضل کمبود آب شیرین در سطح جهان خواهد شد. (Kang و همکاران، ۲۰۱۴) در چند دهه اخیر، سطح آب‌های زیرزمینی به شدت کاهش یافته و ذخایر آب شیرین در دسترس کمتر از ۵٪ کل ذخایر آب کره زمین را تشکیل می‌دهد. (Sangwai و همکاران، ۲۰۱۳) آب دریا به دلیل وفور آن بر روی کره زمین، به منبعی مهم برای تأمین آب شیرین تبدیل شده است. لذا به منظور تضمین امنیت منابع آب، در حال حاضر بسیاری از محققان فعالیت خود را بر روی توسعه فناوری‌های شیرین‌سازی آب دریا متمرکز نموده‌اند. (Kang و همکاران، ۲۰۱۴)



نمک‌زدایی عبارت است از حذف نمک از آب شور و تبدیل آن به آب شیرین با استفاده از فرآیندهای مقرون به صرفه اقتصادی. امروزه کشورهای زیادی بویژه در منطقه خاورمیانه به منظور تأمین آب شیرین مورد نیاز خود به فرآیندهای نمک‌زدایی وابسته هستند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در حال حاضر آب شیرین مورد نیاز بیش از ۷۵ میلیون نفر در سراسر جهان با استفاده از نمک‌زدایی آب دریا یا دیگر منابع آب شور تأمین می‌گردد. کشورهای پیشرو در زمینه ظرفیت نمک‌زدایی به ترتیب عربستان سعودی (۱۷/۴٪)، ایالات متحده (۱۶/۲٪)، امارات متحده عربی (۱۴/۷٪)، اسپانیا (۶/۴٪) و کویت (۵/۸٪) هستند. تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای و اسمز معکوس مهمترین فرآیندهای تجاری نمک‌زدایی محسوب می‌شوند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تقطیر ناگهانی و اسمز معکوس به ترتیب ۴۰٪ و ۵۰٪ از کل ظرفیت نمک‌زدایی از آب در جهان را به خود اختصاص داده‌اند. از فناوری تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای در مقیاس صنعتی و ظرفیت بیش از ۵۰۰۰ متر مکعب در روز استفاده می‌شود در حالیکه اسمز معکوس بیشتر در مقیاس کوچک کاربرد دارد. با این حال به دلیل سادگی عملیات و هزینه کمتر، اهمیت این فناوری هر روز بیشتر می‌شود. (Sangwai و همکاران، ۲۰۱۳)

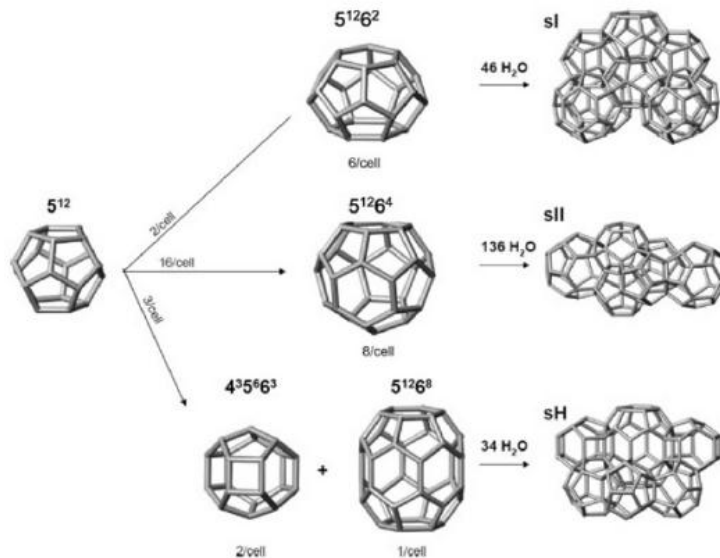
فرآیند نمک‌زدایی به روش تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای با تبخیر آب در دمای بالا و فشار پایین همراه است. در هر یک از مخازن فلاش آب دریا، جریان بخار با جریان ورودی آب دریا تبادل حرارت می‌نماید. این امر موجب استفاده حداکثر از گرمای جریان شده و منجر به صرفه‌جویی در هزینه‌ها می‌گردد. یک واحد تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای معمول شامل بخش‌های ورود، بازیابی و دفع گرما است. این فرآیند بسته به حجمی از آب دریا که در واحد تصفیه می‌شود از ۱۹ الی ۲۴ مرحله تشکیل شده و محدوده دمای عملیاتی آن نیز بین ۹۰ تا ۱۲۰ درجه سانتیگراد است. دمای بالاتر از این مقدار منجر به رسوبگذاری و تشدید خوردگی در تجهیزات فرآیندی شده و ایمنی و صرفه اقتصادی واحد را به چالش می‌کشد. از سوی دیگر، در فرآیند اسمز معکوس از یک غشای نیمه تراوا برای جداسازی نمک از آب استفاده می‌شود. در این روش به منظور غلبه بر فشار اسمزی، یک فشار خارجی بر غشا اعمال می‌شود که نیروی محرکه آن پتانسیل شیمیایی است. حل شونده (نمک و یون‌های محلول) در سمتی از غشا که فشار بالاتری دارد باقیمانده و آب خالص به سمت دیگر نفوذ می‌نماید. در این روش نیازی به گرمایش یا جداسازی فاز نیست و بیشتر انرژی مورد نیاز به افزایش فشار آب دریا به عنوان ورودی فرآیند مربوط می‌شود. عامل کلیدی در جداسازی هر چه بهتر املاح و آب خالص، انتخاب غشای مناسب است. یک واحد اسمز معکوس معمول شامل مراحل پیش تصفیه آب، پمپاژ در فشار بالا، جداسازی غشایی و تصفیه مواد نفوذی است. (Sangwai و همکاران، ۲۰۱۳) اگرچه روش‌های فوق در قیاس با دیگر روش‌های نمک‌زدایی از اعتبار بیشتری برخوردار هستند، با این حال نیاز به توجه بیشتر در بخش تحقیق و توسعه به منظور حصول فناوری‌های اقتصادی‌تر همچنان وجود دارد. (Kalogirou, ۲۰۰۵ و Park و همکاران، ۲۰۱۱) استفاده از هیدرات‌های گازی، یکی از روش‌های جایگزین برای نمک‌زدایی آب دریا است که امکان حصول آب شیرین با صرفه اقتصادی مناسب را فراهم می‌آورد. (Park و همکاران، ۲۰۱۱)

روش کار

الف) معرفی هیدرات‌های گازی و نمک‌زدایی



هیدرات‌ها ترکیبات بلورینی هستند که از آب (گونه غالب) و یک مولکول میهمان (گونه مغلوب) در شرایط دما و فشار معینی که به نوع مولکول میهمان بستگی دارد، به طور خود به خود تشکیل می‌شوند. دمای تثبیت هیدرات‌ها معمولاً کمی بالاتر از نقطه انجماد آب است، اگرچه برخی از مولکول‌های میهمان توانایی تثبیت هیدرات‌هایی در دمای محیط را دارند. هیدرات‌ها با سه ساختار بلورین به نام‌های I، II و H متمایز می‌شوند که تشکیل این ساختارها به نوع مولکول میهمان بستگی دارد. هر کدام از این ساختارهای بلورین از زیرساختارهای قفسی متشکل از مولکول‌های آب تشکیل می‌گردند. این زیرساختارهای قفسی مولکول‌های میهمان را در خود حبس می‌نمایند. نحوه قرار گرفتن مولکول‌های آب در زیرساختارهای هر یک از این سه ساختار در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که از شکل مشخص است این ساختارها از ساختار شش وجهی معمول آب در حالت جامد (یخ) کاملاً متمایز هستند. هیدرات‌های با ساختار I (sI) از سلول‌های واحدی با ۴۶ مولکول آب و ۶ قفس تشکیل شده است که می‌تواند مولکول‌های گازی کوچک مثل متان و اتان را در خود جای دهد. سلول واحد هیدرات‌هایی با ساختار II (sII) متشکل از ۱۳۶ مولکول آب و ۲۴ قفس است که می‌تواند مولکول‌های گازی بزرگتری مثل پروپان و ایزوبوتان را محبوس نماید.



شکل ۱- ساختار هیدرات‌های sI، sII و sH. مولکول‌های آب در رئوس زیرساختارهای قفسی قرار دارند.

مولکول‌های آب در شبکه توسط پیوند هیدروژنی به یکدیگر متصل می‌شوند و مولکول‌های میهمان در داخل قفس‌ها با نیروی واندروالس تثبیت می‌گردند. پس از اشغال تعداد کافی قفس توسط مولکول‌های میهمان (۷۰ تا ۷۵٪) ساختاری بلورین با سلول واحدی که از نظر ترمودینامیکی پایدار است، تشکیل می‌شود. این هیدرات‌ها اغلب به هیدرات‌های گازی موسوم‌اند و شامل مولکول‌های میهمانی هستند که به طور عمده در دما و فشار استاندارد در فاز گاز حضور دارند. عمده‌ترین هیدرات‌های گازی که تشکیل آن به طور طبیعی رخ می‌دهد، هیدرات‌های گازی متان است. اما گازهای دیگر مثل کربن دی‌اکسید، هیدروژن سولفید، اتان، اتیلن و پروپان نیز قادر به تشکیل هیدرات هستند. به طور کلی تاکنون تعداد زیادی مولکول میهمان شناسایی شده است که برای قرار گرفتن در داخل زیرساختارهای قفسی و تشکیل هیدرات، به اندازه کافی کوچک هستند. (Bradshaw و همکاران، ۲۰۰۸)



بررسی‌ها نشان می‌دهد که در صورت تجزیه ۱ متر مکعب هیدرات‌های گازی، تا ۱۶۴ متر مکعب گاز و ۰/۸ متر مکعب آب خالص در دما و فشار استاندارد تولید می‌شود. با توجه به مقدار آب خالص تولیدی به ازای هر متر مکعب قرص هیدرات‌های گازی، این فرآیند در نمک‌زدایی از پتانسیل خوبی برخوردار است. تشکیل هیدرات‌های گازی معمولاً در شرایط دمایی پایین (کمتر از ۲۰ درجه سانتیگراد) و فشار بالا (بیش از ۳۰ بار) رخ می‌دهد. شرایط لازم برای تشکیل هیدرات‌های گازی پروپان و کربن دی‌اکسید نسبت به دیگر مولکول‌های گازی میهمان متعادل‌تر بوده و در نتیجه این هیدرات‌ها از پتانسیل خوبی برای استفاده در فناوری‌های نمک‌زدایی برخوردارند. هیدرات‌ها ترکیباتی غیر استوکیومتری هستند. به عنوان مثال یک مول هیدرات‌های گازی متان حاوی ۸۵/۶۹٪ آب و ۱۴/۳۱٪ متان است. به دلیل وجود مقدار زیادی آب در ساختار هیدرات‌ها، خواص فیزیکی (مثل چگالی و ضریب شکست) و خواص گرمایی (مثل گرمای ویژه) این ترکیبات شبیه به یخ است. هیدرات‌های گازی تا کنون در حوزه‌های مختلف مهندسی اعم از جداسازی گاز، جداسازی کربن دی‌اکسید، ذخیره‌سازی و انتقال گاز، تبرید و نمک‌زدایی از آب شور با موفقیت بکار گرفته شده‌اند. (Sangwai و همکاران، ۲۰۱۳)

استفاده از هیدرات‌های گازی به عنوان گامی در توسعه روش‌های تولید آب شیرین از آب دریا، اولین بار در دهه پنجاه میلادی پیشنهاد شد و پس از آن در دهه‌های شصت و هفتاد توجه زیادی را به خود جلب نمود. در دهه هفتاد شرکت Koppers فرآیند شیرین‌سازی به روش هیدرات‌های گازی و با استفاده از گاز پروپان را توسعه داد. شرکت توسعه آب شیرین نیز شرکت دیگری بود که مطالعاتی را بر روی این روش انجام داد. هر دو شرکت با حمایت دفتر آب شور ایالات متحده واحدهای پایلوت خود را احداث نمودند. Barduhn و همکاران (۱۹۶۲ و ۱۹۶۷ تا ۱۹۶۸) بر روی ترکیبات مختلف برای تشکیل هیدرات و نیز سینتیک و جداسازی در سیستم‌های جریان پیوسته متمرکز شدند و همچنین توسعه فرآیند شیرین‌سازی را توسط انجماد و تشکیل هیدرات‌های گازی مورد بازنگری قرار دادند.

در دهه‌های هفتاد و هشتاد میلادی چندین فرآیند شیرین‌سازی آب دریا با استفاده از هیدرات‌های گازی در مقیاس پایلوت اجرا شد اما هیچ کدام به مقیاس صنعتی تبدیل نگردید. دلیل اصلی این امر جداسازی دشوار بلورهای هیدرات از محلول غلیظ نمک و نیز حذف عامل تشکیل‌دهنده هیدرات از آب نهایی بود. (Seide و Rautenbach، ۱۹۷۸؛ Park و همکاران، ۲۰۱۱)

Englezos و Ngon (۱۹۹۶) بازیابی آب از خروجی واحد تولید خمیر کاغذ و تشکیل هیدرات از محلول ۲/۵ درصد وزنی سدیم کلرید را مورد بررسی قرار دادند. در این فرآیند هسته‌زایی، رشد، جداسازی و ذوب هیدرات در یک ظرف انجام شد. میانگین کاهش محتوای نمک در آب بازیابی شده نسبت به محلول سدیم کلرید اولیه ۳۱ درصد گزارش شد. مطالعات نشان داد که با استفاده از هیدرات‌های گازی، نمک‌زدایی آب شور با هزینه ۰/۴۶ تا ۰/۵۲ دلار در هر متر مکعب امکان‌پذیر است. (Anderson و McCormack، ۱۹۹۵) تلاش‌های اخیر منجر به ابداع یک واحد نمک‌زدایی جدید بر مبنای روش هیدرات‌های گازی شد. این روش پتانسیل خوبی در جداسازی هیدرات‌های گازی و یون‌های موجود در آب دریا از رآکتور حاوی دوغاب هیدرات‌های نشان داد. (Park و همکاران، ۲۰۱۱) در نهایت ثابت شد که با استفاده از این روش، مشکل جداسازی بلورهای هیدرات از محلول نمکی غلیظ تا حد زیادی برطرف می‌شود و بنابراین به منظور انجام فرآیند نمک‌زدایی از آب دریا به طور مؤثری می‌توان آن را بکار برد. (Park و همکاران، ۲۰۱۱) آن‌ها همچنین تاثیر شعاع و بار یونی کاتیون‌های موجود در آب دریا را بر روی بازدهی نمک‌زدایی بررسی نمودند. Sarshar و

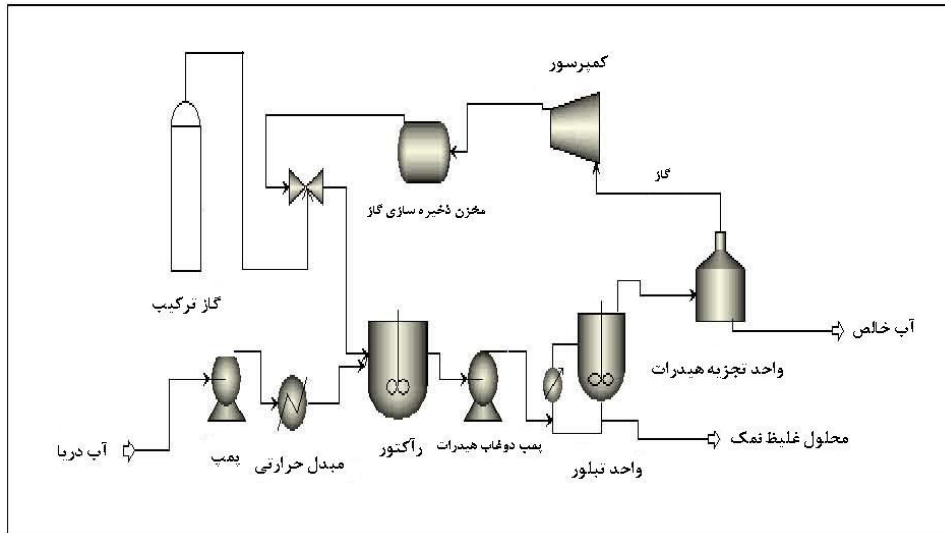


Sharafi (۲۰۱۱) مطالعات آزمایشی بر روی نمک‌زدایی و تولید گاز کربن دی اکسید با استفاده از روش هیدرات گازی را به طور همزمان انجام داده و با بررسی شرایط فرآیندی در تشکیل هیدرات گازی کربن دی اکسید به بازدهی ۶ الی ۵۲٪ در نمک‌زدایی از آب خلیج فارس دست یافتند. Colten و همکاران (۱۹۷۲) اتلافات اقتصادی ناشی از هیدرولیز عامل هیدرات ساز مورد استفاده در نمک‌زدایی آب دریا به روش هیدرات گازی را مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی از چند هیدروکربن هالوژنه به عنوان عوامل هیدرات‌ساز استفاده شد. Younos و Tulou (۲۰۰۵) بررسی مروری بر فناوری‌های نمک‌زدایی متعارف از قبیل تقطیر، اسمز معکوس و تبادل یون انجام دادند. آن‌ها همچنین تعدادی از فناوری‌های نمک‌زدایی دیگر که در آن زمان در مرحله تحقیق و توسعه قرار داشتند را معرفی نموده و پتانسیل مناسب روش هیدرات گازی در شیرین‌سازی آب دریا را متذکر شدند. Sebil و همکاران (۲۰۱۰) بر روی سینتیک تشکیل هیدرات کربن دی اکسید خالص و مخلوط آن با تترا هیدرو فوران در محلول آب و سدیم کلرید مطالعه نمودند. حضور تتراهیدروفوران در سیستم هیدرات مصرف کربن دی اکسید را به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. مطالعات ترمودینامیکی سیستم هیدرات F-22 در محلول سدیم کلرید نیز مورد بررسی قرار گرفت. Barduhn و Lee (۱۹۷۸) این محققان داده‌های ترمودینامیکی نظیر شرایط تجزیه هیدرات و نقاط ثابت مانند نقطه یوتکتیک را در فرآیند نمک‌زدایی آب دریا با استفاده از هیدرات F-22 ارائه نمودند. Corak و همکاران (۲۰۱۱) داده‌های ترمودینامیکی و سینتیکی هیدرات سیکلوپنتان در آب شور را بدست آوردند. آن‌ها همچنین اثر فوق سرمایه‌ش و مقدار سیکلوپنتان در تشکیل هیدرات را مورد بررسی قرار دادند. Aliev و همکاران (۲۰۱۱) مدل‌سازی ریاضی سیستم هیدرات فرئون و آب را انجام دادند. به منظور تشکیل هیدرات در این سیستم از یک رآکتور ستونی با صفحه مشبک برای مجاورسازی گاز-مایع استفاده شد. آن‌ها همچنین مطالعاتی را در زمینه تعیین شرایط بهینه طراحی در فرآیند های نمک‌زدایی بر پایه فناوری هیدرات انجام دادند. Kang و همکاران (۲۰۱۴) نخستین بار بازدهی حذف کاتیون‌ها و آنیون‌های موجود در یک نمونه آب دریا به روش هیدرات گازی و با استفاده از یک رآکتور سیلندر و پیستونی را ارائه کردند. بر طبق یافته‌های آن‌ها بازدهی برداشت یون‌های موجود در آب دریا به نوع گاز هیدرات‌ساز و فشار هیدرولیک مورد نیاز برای تشکیل قرص‌های هیدرات بستگی دارد.

(ب) فرآیند نمک‌زدایی به روش هیدرات گازی

فرآیند نمک‌زدایی با استفاده از هیدرات‌های گازی در شکل ۲ نشان داده شده است. (Sangwai و همکاران، ۲۰۱۳) این فناوری بر مبنای فرآیند تغییر فاز استوار است که در آن آب مایع به هیدرات جامد تبدیل می‌شود. در این روش به منظور تشکیل هیدرات و در نتیجه جداسازی آب از املاح، به جریان گاز هیدرات‌ساز نیاز می‌باشد. قبل از ورود آب دریا به داخل رآکتور گرمای آن در مبدل حرارتی گرفته می‌شود. جریان گاز مورد نیاز رآکتور از طریق مخزن ذخیره سازی گاز میهمان تأمین می‌گردد. به منظور جبران اتلاف گاز در طی فرآیند از یک مخزن گاز ترکیبی تازه استفاده می‌شود. آب دریا و گاز میهمان در داخل رآکتور به کمک یک همزن با دور معین کاملاً با یکدیگر مخلوط می‌شوند و در دما و فشار مناسب پیوند بین آب و مولکول‌های گاز برقرار شده و منجر به تشکیل هیدرات‌های گازی می‌گردد. دوغاب هیدرات تشکیل شده توسط پمپ دوغاب هیدرات به واحد تبلور فرستاده می‌شود. خروجی واحد تبلور جامدی با ساختار بلورین به همراه محلول غلیظی از نمک است. محلول غلیظ نمک از داخل واحد تبلور تخلیه شده و جامد بلورین هیدرات گازی به واحد تجزیه فرستاده می‌شود. در این واحد جامد بلورین مجدداً با جذب حرارت به گاز و آب

تبدیل می‌گردد. گاز فوقانی واحد تجزیه به مخزن ذخیره‌سازی گاز فرستاده می‌شود و محصول تحتانی که همان آب خالص است را می‌توان به منظور استفاده در مصارف روزانه خانگی و صنعتی مورد بهره‌برداری قرار داد.

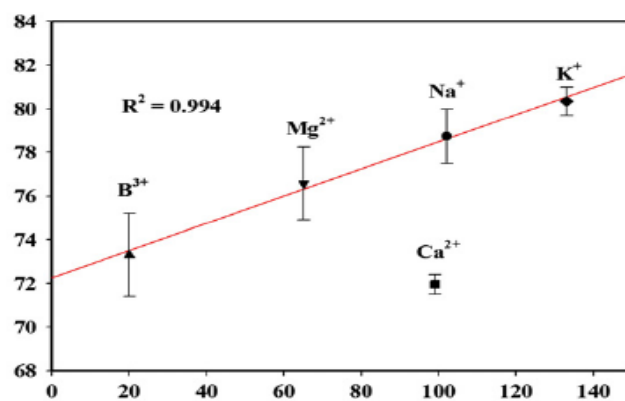


شکل ۲- فرآیند کلی نمک‌زدایی از آب دریا به روش هیدرات گازی

(ج) ارزیابی اقتصادی

یکی از عوامل بسیار مهم در امکان‌سنجی فرآیند هیدرات گازی، مطالعات اقتصادی است. در فناوری هیدرات گازی هزینه‌های عملیاتی به عوامل زیادی از قبیل دمای آب، مقدار نمک، میزان پویایی^۱ نمک و بازده بستگی دارد. (Moshfeghian و Javanmardi، ۲۰۰۳) بازده نمک‌زدایی واحد به شعاع و بار یونی کاتیون‌های موجود در آب دریا بستگی دارد. (Park و همکاران، ۲۰۱۱) همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، با افزایش اندازه کاتیون و کاهش بار آن بازدهی نمک‌زدایی به روش هیدرات گازی افزایش می‌یابد.

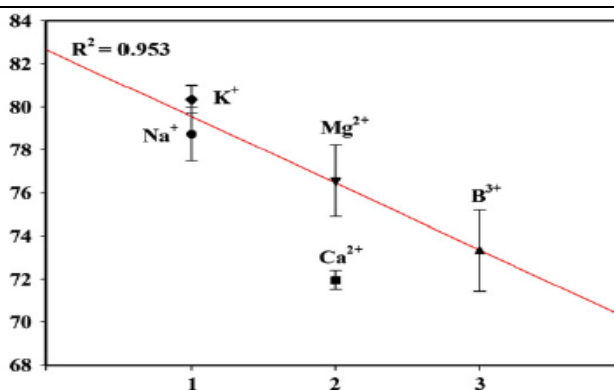
بازده (درصد)



شعاع یونی (پیکومتر)



بازده (درصد)



بار یونی

شکل ۳- بازدهی برداشت هر یک از کاتیون‌های محلول در آب دریا بر حسب شعاع و بار یونی آن‌ها (Park و همکاران،

۲۰۱۱)

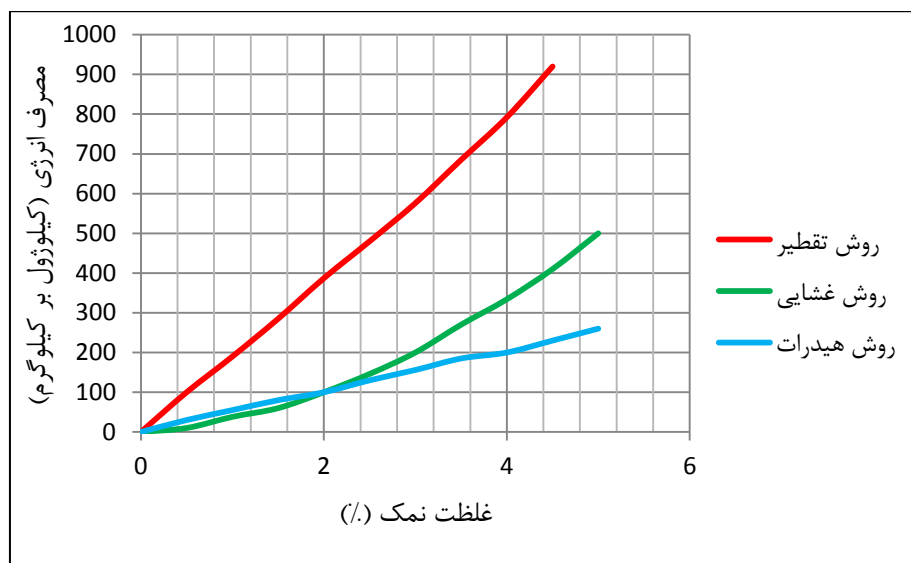
جدول ۱ مقایسه شرایط عملیاتی برای فرآیند نمک‌زدایی به سه روش تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای، اسمز معکوس و هیدرات گازی را نشان می‌دهد. (Sangwai و همکاران، ۲۰۱۳) محدوده دمای عملیاتی در روش تقطیر ناگهانی در مقایسه با دو روش دیگر زیاد است. از سوی دیگر، میزان فشار مورد نیاز در روش تقطیر ناگهانی نسبت به روش‌های اسمز معکوس و هیدرات گازی کمتر است. هزینه سرمایه‌گذاری در روش هیدرات بیشتر از روش‌های دیگر بوده اما هزینه‌های عملیاتی آن کمتر از روش‌های اسمز معکوس و تقطیر ناگهانی می‌باشد. کل هزینه تولید به ازای هر تن آب نمک‌زدایی شده در روش هیدرات نسبت به دو روش دیگر کمتر است.

جدول ۱- مقایسه فناوری‌های تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای، اسمز معکوس و هیدرات گازی

مشخصه	تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای	اسمز معکوس	هیدرات گازی
اصل شیمی - فیزیکی	تبخیر ناگهانی	نفوذ حل شونده	تغییر فاز
دما (درجه سانتیگراد)	۹۰ تا ۱۲۰	۲۰ تا ۳۵	حدود ۰
فشار (بار)	کمتر از ۱	۵۵ تا ۷۰	۴/۵ تا ۶/۵ (هیدرات پروپان)
ظرفیت (تن در روز)	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰
هزینه سرمایه‌گذاری (میلیون دلار)	۲/۹۳	۲/۳	۵/۴۶
هزینه عملیاتی (دلار بر تن)	۲	۳/۲۳	۱/۲
کل هزینه تولید (دلار بر تن)	۳/۲۶	۴/۴۷	۲/۷۶
ملزومات تعمیر و نگهداری	مشکل خوردگی	تعویض غشا	-



میزان مصرف انرژی (کیلوژول بر کیلوگرم) بر حسب میزان نمک موجود در آب در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- میزان مصرف انرژی در فرآیندهای تقطیر، غشایی و هیدرات گازی

همانطور که مشاهده می‌شود فرآیند نمک‌زدایی با استفاده از روش هیدرات گازی نسبت به تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای و اسمز معکوس به انرژی کمتری نیاز دارد. با مقایسه سه روش مذکور، اگرچه در صورت استفاده از روش هیدرات گازی هزینه سرمایه‌گذاری بیشتری باید پرداخته شود، لیکن هزینه‌های عملیاتی آن کمتر از روش‌های دیگر است. همچنین با استفاده از پروموتورهای غیرسمی مناسب می‌توان هزینه‌های عملیاتی این روش را کاهش داد. در نهایت کل هزینه تولید با استفاده از فناوری هیدرات در مقایسه با فناوری‌های متعارف قابل رقابت است و انتظار می‌رود با تحقیقات بیشتر در این زمینه در آینده نزدیک بتوان به صرفه‌جویی مناسبی در هزینه سرمایه‌گذاری این فناوری دست یافت. (Sangwai و همکاران، ۲۰۱۳)

بحث و نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر فناوری‌های مهم نمک‌زدایی آب دریا مورد بررسی قرار گرفت. با مشاهده جنبه‌های اقتصادی یک واحد نمک‌زدایی بر مبنای فناوری هیدرات گازی می‌توان نتیجه گرفت که فرآیند نمک‌زدایی به روش هیدرات گازی جایگزین مناسبی برای فناوری‌های متعارف از قبیل تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای و اسمز معکوس است. از آنجا که یکی از عوامل مهم در فرآیند تشکیل هیدرات‌های گازی دمای پایین عملیاتی می‌باشد، تأسیس و بکارگیری این فناوری در مناطق سرد به بهبود اقتصاد فرآیند کمک می‌نماید. بدین ترتیب در هزینه انرژی مورد نیاز برای سرمایه‌گذاری آب دریا و کاهش دمای آن صرفه‌جویی می‌شود. یکی از راهکارهای موجود به منظور بهبود روش هیدرات گازی به لحاظ اقتصادی، استفاده از پروموتورهای ارزان و در دسترس تشکیل هیدرات بوده و تحقیق در این زمینه در دست اجرا است. (Sangwai و همکاران، ۲۰۱۳)



منابع

- Javanmardi, J. and Moshfeghian, M. (2003). Energy consumption and economic evaluation of water desalination by hydrate phenomenon. *Applied Thermal Engineering*, 23, 845–857. -۱
- Kyung Chan Kang, Praveen Linga, Kyeong-nam Park, Sang-June Choi, Ju Dong Lee. (2014). Seawater desalination by gas hydrate process and removal characteristics of dissolved ions. *Desalination*, 353, 84-90. -۲
- Kyeong-nam Park, Sang Yeon Hong, Jin Woo Lee, Kyung Chan Kang, Young Cheol Lee, Myung-Gyu Ha, Ju Dong Lee. (2011). A new apparatus for seawater desalination by gas hydrate process and removal characteristics of dissolved minerals. *Desalination*, 274, 91-96. -۳
- Jitendra S. Sangwai, Rachit S. Patel, Prathyusha Mekala, Deepjyoti Mech, Marc Busch. (2013). Desalination of seawater using gas hydrate technology – current status and future direction. XVIII Conference on Hydraulics, Water Resources, Coastal and Environmental Engineering, December Chennai, India. -۴
- Robert W. Bradshaw, Jeffrey A. Greathouse, Randall T. Cygan, Blake A. Simmons, Daniel E. Dedrick, and Eric H. Majzoub. (2008). *Desalination Utilizing Clathrate Hydrates (LDRD Final Report)*, Sandia National Laboratories. -۵