شیرین سازی آب در نیروگاه های هسته ای

Desalination In Nuclear Power Plants

Gustavo Alonso

Edmoudo Del Valle

Jose Ramon Ramirez

مترجم:

محسن کاظمی

مقدمه مترجم

با آغاز تحول تولید انرژی در جهان در قرن 20 و توسعه سیستم‌های ترکیبی به منظور بهره‌گیری چند جانبه در علوم مهندسی و از سمت دیگر بحران روز افزون آب و انرژی، اندیشمندان را به فکر توسعه و بهبود منابع در دسترس برای کیفیت زندگی بشر وا داشت. از این رو با توجه به احداث نیروگاه‌های هسته‌ای در کنار منابع آبی عظیم و غیر قابل شرب و از طرفی حرارت تولیدی، این فرصت طلایی را ایجاد کرد تا با یک ایده مهندسی بتوان بر مشکلات کمبود آب و انرژی فائق آمد. با توجه به وجود مشکلات فراوان در زمینه آب و انرژی و عدم وجود منابع قابل اتکا در این زمینه مترجم را بر آن داشت تا با ترجمه این کتاب راهنمایی هرچند کوچک برای کمک به مردمان سرزمین عزیزمان ایران باشد.

محسن کاظمی

مقدمه مولفین

دسترسی به آب شیرین برای زندگی انسان‌ها ضروری است. حدود 70% جهان توسط آب پوشیده شده است، اما فقط 3% از این آب قابل شرب است، 97% دیگر آب لب‌شور و آب دریا است. فقط 0/03 % از آب قابل شرب در دسترس است، 2/07% آن در یخچال‌های طبیعی و 0/9% در زیر زمین قرار دارد. علاوه بر این، آب به طور مساوی بر روی زمین توزیع نشده است و مناطق خشک و نیمه خشک زیادی وجود دارد.

آب شیرین یک منبع تجدیدپذیر است. مقدار محاسبه شده آب حدود $93.100.000\ Mm^3$ است، در طول میلیون‌ها سال ثابت مانده و از طریق چرخه آب یا چرخه هیدرولوژیک بازیابی شده است. با این حال، افزایش جمعیت موجب رشد تقاضای آب می‌شود و به چرخه طبیعی اجازه فعالیت نمی‌دهد و در برخی موارد آن را نیز آلوده می‌کند.

در نوامبر 2019، حدود 7/8 میلیارد نفر در زمین زندگی می‌کنند که برای تأمین نیازهای حیاتی خود و همچنین توسعه فعالیت‌های زندگی و صنعتی به آب نیاز دارند. آب شیرین به طور مساوی توزیع نشده است، مناطقی وجود دارند که آب شیرین فراوانی دارند، در همین حال دیگر مناطق به دلیل عوامل طبیعی مانند جغرافیا، آب و هوا یا عوامل سیاسی - اجتماعی تحت عنوان قوانین، دچار تنش آبی هستند.

طبق مطالعات سازمان ملل، تا سال 2025 افراد ساکن در مناطق تحت تنش آب 66 % از کل جمعیت را تشکیل می‌دهند و حدود 1/8 میلیارد انسان در مناطق کم آب زندگی خواهند کرد. یکی از نتایج رشد جمعیت، افزایش تقاضا برای آب شیرین است، علاوه بر این قطع چرخه طبیعی آب شیرین، میزان دسترسی به این منبع را کاهش می‌دهد.

انسان‌ها برای کنار آمدن با این مشکل باید از آب شیرین طبیعی موجود به طور کارآمد استفاده، مدیریت، توزیع و بازیابی کنند و به دنبال منابع مازاد باشند. نمک‌زدایی آب دریا از جمله روش‌های بدست آوردن این منابع مازاد است، اما باید برای جلوگیری از آسیب غیرقابل پیش‌بینی به زندگی دریایی و محیط زیست، این کار به صورت پایدار انجام شود.

نمک‌زدایی آب فناوری کاملی است که از طریق دو اصل کلی نمک‌زدایی حرارتی و نمک-زدایی غشایی توسعه می‌یابد. آب شیرین‌کن حرارتی با استفاده از تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای و تقطیر چند اثره به صورت تجاری در دهه 1930 آغاز شد. در همین حال، اسمز معکوس (فرآیند غشایی) از دهه 1960 آغاز شد. در حال حاضر، 15.906 آب شیرین‌کن با ظرفیت‌های مختلف از نیروگاه‌های کوچک کمتر از $100\ m^3/d$ تا ظرفیت-های عظیم، در سراسر جهان وجود دارد که بزرگترین آن‌ها با ظرفیت $1.036.000\ m^3/d$ است.

آب شیرین‌کن‌های حرارتی از گرما و برق استفاده می‌کنند در حالیکه فرآیند RO به برق نیاز دارد. در ابتدای کار، هر دو آن‌ها از یک نیروگاه خارجی برای تأمین انرژی منبع دیگر استفاده می‌کردند. با ترکیب نیروگاه با آب شیرین‌کن، بازده فرآیند اتصال بیشتر می‌شود و به کاهش هزینه تولید کمک می‌کند. بزرگترین آب شیرین‌کن در حال بهره‌برداری نیروگاه مستقل آب و توان است (IWPP)؛ این نیروگاه در حالت اتصال، از نیروگاه CCGT تأمین کننده توان و آب شیرین‌کن فرآیند ترکیبی MSF-RO تشکیل شده است.

در حال حاضر کل ظرفیت آب شیرین‌کن نصب شده $95/37\ Mm^3/d$ است که سالانه $34.810\ Mm^3$ آب شیرین تولید می‌کند. این مقدار فقط 0/037% از کل آب شیرین موجود در جهان است. نمک‌زدایی آب دریا پتانسیل زیادی برای ایجاد تغییر در دسترسی به آب آشامیدنی دارد. با این حال، هزینه‌های تولید آب شیرین و نگرانی‌های زیست محیطی، از موانع اصلی بهره‌برداری کامل از این فناوری است.

منبع انرژی اکثر نیروگاه‌های آب شیرین‌کن‌های در حال کار سوخت‌های فسیلی است. این نیروگاه‌ها در حال انتشار گازهای گلخانه‌ای هستند. برای فرآیند نمک‌زدایی، در حال حاضر میزان آلودگی به حدود 76 میلیون تن کربن دی اکسید در سال می‌رسد و این مقدار سال به سال با نصب و راه‌اندازی آب شیرین‌کن‌های بیشتری که از منابع فسیلی استفاده می‌کنند، در حال افزایش است. استفاده از منابع انرژی پاک مثل انرژی هسته‌ای

یا انرژی‌های تجدیدپذیر با عدم انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌تواند اثرات زیست محیطی را کاهش دهد.

اگر فقط فرآیند تولید برق به تنهایی مدنظر باشد، منابع هسته‌ای و تجدیدپذیر کربن دی اکسید منتشر نمی‌کنند. در حالیکه، نیروگاه‌های CCGT حدود 0/442 ton/MWh و نیروگاه‌های زغال سنگ حدود 0/442 ton/MWh کربن دی اکسید منتشر می‌کنند. بنابراین یک نیروگاه 1000 مگاواتی نصب شده با ضریب ظرفیت 80%، 8.760.000 MWh/year برق تولید می‌کند و اگر به وسیله نیروگاهCCGT تولید شود، 3.696 میلیون تن کربن دی اکسید در سال تولید می‌شود، اما با استفاده از یک کارخانه زغال سنگ، 8.584 میلیون تن کربن دی اکسید در سال منتشر خواهد شد.

آب شیرین‌کن هسته‌ای گزینه‌ای است که می‌تواند نیازهای پایدار را در تفاوت با IWPP که از انرژی فسیلی استفاده می‌کند، برآورده سازد. با این وجود، ذکر این نکته ضروری است که مشارکت فعلی نیروگاه‌های هسته‌ای بسیار اندک است. فقط 15 مورد از 15906 نیروگاه آب شیرین‌کن عملیاتی انرژی خود را از طریق انرژی هسته‌ای تأمین می‌کنند و منابع تجدیدپذیر ظرفیتی کمی را در اختیار دارند. سوخت‌های فسیلی تأمین‌کننده توان اکثر آب شیرین‌کن‌ها هستند.

نمک‌زدایی به روش هسته‌ای از دهه 1960 آغاز شده است. در بیشتر موارد برای تهیه آب برای استفاده راکتور، از نوع اتصال به فرآیندهای حرارتی بود. آب شیرین‌کن‌های متصل با هدف و استفاده از پساب‌زدایی شده کمتر ازm^3/d 3.000 بود. اتصال نیروگاه به فرآیندهای غشایی نیز برای تولید آب در مقیاس‌های کوچک رخ داده است. راکتور هسته‌ای BN-350 قزاقستان با اتصال به فرآیندهای MED وMSF با ظرفیت کلm^3/d 120.000 یکی از موارد ویژه‌ای بود که بیش از 20 سال به فعالیت خود ادامه داد.

امکان ساخت آب شیرین‌کن هسته‌ای با هر اندازه راکتور وجود دارد. واحدهای بزرگ نسل فعلی راکتورهای هسته‌ای دارای توان خروجی 1100 تا 1600 مگاوات هستند. این نوع پروژه‌ها به دلیل تأخیرهای ساخت و ساز و چالش‌های قوانین غیرمنتظره، دارای سرمایه-

گذاری سنگینی است که خطرات اقتصادی و مالی نیز به همراه دارد. برای غلبه بر ریسک‌های مالی، طرح راکتور جدید در ابعاد کوچکتر، کمتر از 300 مگاوات ارائه شد.

با توجه به اندازه این راکتورها، می‌توان آن‌ها را در مناطق خارج از محدوده شهرهای بزرگ، در مکان‌های جداگانه و در بخش روستایی اختصاص داد. این نوع راکتورها می-توانند کاندیدهای مناسبی برای اتصال آب شیرین‌کن‌ها باشند و از دید کشورهای در حال توسعه نیز مقرون به صرفه هستند.

از جمله مشخصات طراحی این راکتورها تولید آب آشامیدنی و تولید گرما و/ یا برق است. راکتورهای ماژولار کوچک ممکن است به عنوان یک شبکه (چندین واحد) برای تقاضای زیاد برق و تقاضای کم برق در مناطق دور افتاده و کشورهایی با شبکه‌های برقی کوچک گزینه‌های خوبی باشند.

هزینه آب شیرین‌کن یکی از اصلی‌ترین موانع بهره برداری کامل از این فناوری است. ترکیب نیروگاه با آب شیرین‌کن برای کاهش هزینه تولید ضروری است. تحلیل اگزرژی-اقتصادی ابزاری است که امکان کارآمدتر شدن اتصال حرارتی را فراهم می‌کند و در عین حال هزینه تولید رقابتی را حفظ می‌کند.

نوع فرآیند شیرین‌سازی و طراحی سیستم متصل شده نقشی حیاتی در تولید آب آشامیدنی و هزینه آن خواهد داشت. این سیستم باید برق و آب آشامیدنی را با هزینه رقابتی تأمین کند تا قیمت‌های مقرون به صرفه را ثابت نگه دارد.

انتخاب نیروگاه به دلایل اقتصادی به منابع موجود و هزینه‌های آن بستگی دارد. به همین دلیل، نیروگاه‌های فسیلی مبتنی بر گاز طبیعی در منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا اولویت دارند. به طور کلی روش اتصال می‌تواند از دیدگاه اقتصادی بر تولید برق مؤثر باشد.

نمک‌زدایی هسته‌ای این مزیت را دارد که منبعی پاک است و منبع رقابتی برق در منطاق مختلف در سراسر جهان است و در صورت وضع مالیات انتشار کربن دی اکسید می‌تواند در مناطق دیگر نیز رقابتی شود. استفاده مؤثر از منابع اقتصادی و طبیعی وظیفه اصلی

برای تضمین پایداری است. برق و آب دو منبع قابل توجه برای بهبود کیفیت زندگی هستند و نمک‌زدایی هسته‌ای می‌تواند منبع تأمین این دو به روشی اقتصادی و پایدار باشد.

بررسی اجمالی

جهت تأمین نیازهای اولیه سلامت و رفاه بشریت دسترسی به آب آشامیدنی بسیار ضروری است. منابع آب آشامیدنی محدود هستند و به طور مساوی در دنیا توزیع نمی شوند و نیاز آن به طور مداوم در سراسر جهان در حال افزایش است، در صورت عدم اقدامات کافی ممکن است، این تقاضا از میزان عرضه امروز نیز بیشتر شود.
برای مقابله با این وضعیت، بسیاری از کشورها تلاش خود را بر روی نمک‌زدایی آب دریا برای به دست آوردن آب جهت آبیاری یا حتی آب آشامیدنی متمرکز کرده‌اند که می‌تواند نیاز منطقه‌ای به آب را پوشش دهد. با این حال، هزینه آب شیرین شده و نگرانی‌های زیست محیطی از موانع اصلی بهره‌برداری کامل از این فناوری است.
فناوری نمک‌زدایی آب از طریق دو فرآیند توسعه یافته صورت می‌پذیرد: تقطیر حرارتی و فرآیندهای غشایی. استفاده از تقطیر حرارتی در مقیاس تجاری از دهه 1930 آغاز شد و از آن زمان در حال تکامل است و در اواخر دهه 1950 و اوایل دهه 1960 استفاده از فرآیندهای غشایی عمدتاً بر اساس فناوری اسمز معکوس آغاز شده است.
ظرفیت فعلی نمک‌زدایی در سراسر جهان از 15،906 آب شیرین‌کن 95/37 Mm^3/d است. بیشتر آب شیرین‌کن‌ها از فرآیندهای حرارتی، تقطیر چند اثره و تقطیر چند مرحله‌ای استفاده می‌کنند و تا سال 1980 سهم آن‌ها 84% آشامیدنی تولید شده بود. در سال 2000 مقدار آب حاصل از فناوری اسمز معکوس و فرآیندهای حرارتی (MED و MSF) تقریباً برابر بود.
با این حال، با بهینه‌سازی فرآیند اسمز معکوس، هزینه‌های آن کاهش یافته است، بر اساس آمار در سال 2018؛ فرآیند اسمز معکوس 69% آب شیرین تولید شده را به خود اختصاص داده است. علت این افزایش هزینه پایین آن در مقایسه با فرآیندهای نمک-

زدایی حرارتی است. در فرآیندهای حرارتی به انرژی گرمایی و برق، و برای فرآیند RO به برق نیاز است، در هر دو فرآیند منبع انرژی آن‌ها نیروگاه‌های فسیلی است.
کشورهایی که از فناوری‌های نمک‌زدایی استفاده می‌کنند تقاضای آب آشامیدنی را حداقل به طور موقت کاهش می‌دهند، اما با تولید گازهای گلخانه‌ای در اثر آب شیرین-کن‌هایی که از منابع فسیلی استفاده می‌کنند، محیط زیست را آلوده می‌کنند. میزان آلودگی در حال حاضر به حدود 76 میلیون تن کربن دی اکسید در سال می‌رسد و با وجود آب شیرین‌کن‌هایی که از نیروگاه‌های توان سوخت فسیلی استفاده می‌کنند، هر ساله در حال افزایش است.
چندین گزینه برای کاهش هزینه‌های نمک‌زدایی مطرح شده است. در این میان پیشرفت‌هایی در فناوری غشایی، سیستم‌های بازیابی انرژی و تولید همزمان به وسیله اتصال آب شیرین‌کن برای استفاده از حرارت بازگشتی نیروگاه توان در فرآیندهای حرارتی رخ داده است. استفاده از منابع انرژی پاک مانند انرژی هسته‌ای یا انرژی‌های تجدیدپذیر موجب کاهش اثرات زیست محیطی می‌شوند زیرا این منابع گازهای گلخانه‌ای تولید نمی‌کنند.
استفاده از سیستم‌های آب شیرین‌کن متصل به سیستم‌هایی که از راکتورهای هسته‌ای و فرآیندهای حرارتی استفاده می‌کنند، از دهه 1960 با نتایج موفقیت آمیز آغاز شد. با این حال، در بیشتر موارد، آب شیرین‌کن مربوطه کمتر از $3.000 m^3/d$ آب تولید کرده است. فرآیندهای غشایی نیز با یک راکتور هسته‌ای در مقیاس کوچک تولید داشته‌اند. راکتور هسته‌ای BN-350 قزاقستان با اتصال به فرآیندهای MED وMSF با ظرفیت کلm^3/d 120.000 یکی از موارد ویژه‌ای بود که بیش از 20 سال به فعالیت خود ادامه داد.
با این وجود، ذکر این نکته ضروری است که مشارکت فعلی نیروگاه‌های هسته‌ای بسیار اندک است، فقط 15 مورد از 15.906 نیروگاه آب شیرین‌کن عملیاتی از انرژی هسته‌ای تأمین می‌شوند و سوخت‌های فسیلی انرژی دیگر نیروگاه‌ها را تأمین می‌کنند. اولین راکتورهای هسته‌ای مستقر شده کوچک بودند (کمتر از 300 مگاوات) و به دنبال آن راکتورهای متوسط (از 300 تا 700 مگاوات) بود. نیاز به برق در سراسر جهان و اهمیت مقیاس اقتصادی آن باعث ایجاد واحدهای بزرگتر (بیش از 700 مگاوات) از اواسط دهه 1960 تا اوایل دهه 1970 شد. از آن زمان راکتورهای بزرگ اندازه از راکتورهای بزرگ

استفاده شده است و کشورهایی به دلایل امنیت ملی انرژی و استقلال انرژی، برنامه‌های هسته‌ای خود را آزاد کرده‌اند.

از دهه 1980 تا 2000، سرعت استقرار راکتورهای هسته‌ای کاهش یافته است. بسیاری از روش‌های بهینه‌سازی توسط اپراتورهای هسته‌ای به کار گرفته شد که ضریب ظرفیت عملیاتی را از متوسط 60% در سراسر جهان به حدود 80% افزایش داد؛ امروزه برخی از کشورها، این ضریب بیش از 90% است. علاوه بر این، چندین برنامه برای افزایش توان نامی راکتورهای مستقر شده تا 20% در دست اجرا بوده است و با توجه به فناوری قدرتمند، قوانین هسته‌ای امکان کار برخی از راکتورها را از40 به 60 سال افزایش داد.

خروج راکتورهای فرسوده و جایگزینی راکتورها در خطوط جدید همراه با بهبود روش-های عملیاتی و افزایش توان چندین راکتور از رده خارج، جبران شده است؛ این تغییرات منجر به افزایش تقریباً یک سوم ظرفیت هسته‌ای و 60% توان تولیدی از اواخر دهه 1970 تا حدود 2002 شده است.

فناوری انتخابی استفاده شده در استقرار راکتور هسته‌ای، راکتورهای آب سبک حرارتی بوده است. بر طبق گزارشات آژانس بین المللی انرژی اتمی، تعداد راکتورهای آب تحت فشار در حال حاضر تقریباً چهار برابر راکتورهای آب جوشان است. در سال 2019 تعداد 449 راکتور مستقر با ظرفیت خالص برق 397.650 مگاوات به ثبت رسیده است.

از عملکرد بیش از 17.000 راکتور در سال تجاربی وجود دارد، که سهم برق هسته‌ای تقریباً 16% تا 17% از اواسط دهه 1980 تا اوایل سال 2000 ثابت بوده است. در سال 2007 این سهم تا حدود 10/3% در سال 2018 شروع به کاهش کرد. با این وجود، در این مدت 25.602 مگاوات ظرفیت خالص هسته‌ای افزایش داشته است. علاوه بر این، حادثه فوکوشیما در مارس 2011 منجر به خاموش شدن موقتی 55 راکتور هسته‌ای ژاپن شد، که تأثیر منفی در ضریب ظرفیت متوسط داشته است و از آن زمان تاکنون کمی بیشتر از70% کاهش یافته است. همه راکتورهای ژاپنی برای بازگشت در دسترس نخواهند بود و آن‌ها تک تک به مدار باز می‌گردند.

سهم برق و تولید خالص برق به اندازه شبکه ملی برق بستگی دارد. به عنوان مثال، ایالات متحده آمریکا ظرفیت هسته‌ای نصب شده بیشتری دارد. با این حال، سهم هسته‌ای آن

کمتر از 20% است. ساخت راکتورهای جدید نیز کاری مداوم بوده است. در حال حاضر در مناطق آسیا و اروپای شرقی برنامه‌های خشونت آمیزی در حال پیگیری است.
سیاست‌های ملی و بازارهای اقتصاد نیز نقشی اساسی در استقرار راکتورهای هسته‌ای در واحدهای جدید دارند. به عنوان مثال، ایالات متحده آمریکا با خاموشی زودهنگام برخی از راکتورهای خود روبرو است، اگرچه تعدادی از راکتورها مجوز عملیاتی آن‌ها برای 20 سال دیگر (حداکثر 60 سال) تمدید شده بود. این راکتورها در مناطقی با بازارهای آزاد قرار دارند و رقیب اصلی آن‌ها نیروگاه‌های سیکل ترکیبی گاز با ظرفیت بار پایه با قیمت گاز پایین هستند. اگرچه در آن سو، یکی از راکتورها تا 20 سال دیگر برای رسیدن به 80 سال عمر عملیاتی اجازه فعالیت دارد. این راکتور "نقطه ترکیه" نام دارد.
علاوه بر راکتورهای هسته‌ای موجود، نسل جدیدی از راکتورهای هسته‌ای به نام راکتورهای ماژولار کوچک وجود دارد که برای تأمین نیازهای خاص طراحی شده‌اند. از جمله مشخصات طراحی این راکتورها تولید آب آشامیدنی و تولید گرما و / یا برق است. با توجه به اندازه این راکتورها، می‌توان آن‌ها را در مناطق دور افتاده شهرهای بزرگ، در مناطق دوردست و در بخش روستایی استفاده کرد. این نوع راکتورها می‌توانند کاندیدهای مناسبی برای اتصال به آب شیرین‌کن باشند.
راکتورهای ماژولار کوچک (SMR) راکتورهایی هستند که توان خروجی آن‌ها بیش از 300 مگاوات نیست و بخشی از راکتورهای نسل سوم هستند. این راکتورهای ابداعی به عنوان جایگزینی برای تأمین نیازهای مختلف تولید برق به عنوان یک یا چند واحد برای کاهش خطر تأخیر در ساخت و ساز مشاهده شده در راکتورهای بزرگ و همچنین کاهش سرمایه مقدماتی مورد نیاز برای این نوع پروژه ها متولد شدند. SMRها به صورت ماژولار در کارخانه‌ها ساخته می‌شوند و در محل مونتاژ می‌شوند و موجب کاهش زمان ساخت می‌شوند. طراحی استقرار راکتورهای بزرگ برای حدود 60 ماه برنامه ریزی شده است. در همین حال، استقرار SMRها حدود 36 ماه زمان می‌برد.
راکتورهای ماژولار کوچک ممکن است به عنوان یک شبکه (چندین واحد) برای تقاضای زیاد و تقاضای کم برق در مناطق دورافتاده و کشورهایی با شبکه‌های الکتریکی کوچک گزینه‌ای باشد. واحدهای راکتور بزرگ به دلیل صرفه اقتصادی نسبت به واحدهای کوچک ترجیح داده می‌شوند، هزینه یک واحد کوچک 1/7 برابر واحدهای بزرگ است.

با این حال، عوامل زیادی موجب کاهش این نسبت می‌شوند که موجب آن می‌شوند که هزینه یک راکتور ماژولار کوچک فقط بین 1/06 و 1/26 برابر یک راکتور بزرگ باشد. این عوامل با سرمایه‌گذاری اولیه کمتر، این راکتورها را به گزینه‌ای رقابتی‌تر تبدیل می‌کند. به این ترتیب به نظر می‌رسد SMRها گزینه‌ای برای سازش با هزینه سرمایه گذاری بالای استقرار هسته‌ای جدید هستند.

هدف اصلی از اتصال آب شیرین‌کن به راکتورهای هسته‌ای تأمین کل یا قسمتی از انرژی حرارتی تولید شده در راکتور هسته‌ای برای فرآیند نمک‌زدایی حرارتی است. در مورد فرآیندهای نمک‌زدایی غشایی، هیچ اتصالی وجود ندارد؛ این نوع فرآیندها فقط از برق استفاده خواهند کرد. با این حال، می‌توان با استفاده از حرارت بازگشتی از راکتور هسته-ای برای تغذیه پیش‌گرم سیستم اسمز معکوس بهره‌مند شد.

راکتورهای هسته‌ای می‌توانند در حالت تک منظوره یا دو منظوره مورد استفاده قرار گیرند: در حالت اول، امکان تولید برق و یا به طور انحصاری تأمین گرما برای فعالیتی خاص وجود دارد و در حالت دو منظوره، برق و گرما به طور همزمان تولید می‌شوند.

در مورد خاص تولید حرارت برای نمک‌زدایی، انرژی منحصراً برای فرآیند نمک‌زدایی مورد استفاده قرار می‌گیرد و محصول خروجی آب آشامیدنی است. این نوع راکتور برای تولید برق مناسب نیست و در مقایسه با راکتورهای تولید برق در شرایط کم فشار و دمای پایین کار می‌کند.

وقتی از یک راکتور برای تولید برق استفاده می‌شود و بخار فرآیند نمک‌زدایی را تأمین می‌کند، روش اتصال می‌تواند تأثیر اقتصادی بر تولید برق داشته باشد. روش اتصال بهینه به اندازه، نوع راکتور هسته‌ای و مشخصات خاص فرآیند نمک‌زدایی بستگی دارد.

در هر حالت انرژی حرارتی باید به روشی کاملاً کارآمد به سیستم آب شیرین‌کن منتقل شود. نباید هیچگونه نشت رادیواکتیو به سیستم نمک‌زدایی وجود داشته باشد و سیستم نمک‌زدایی نباید محدودیت‌های ایمنی بیشتری برای سیستم راکتور ایجاد کند.

استفاده مؤثر از منابع اقتصادی و طبیعی وظیفه اصلی برای تضمین پایداری است. برق و آب دو منبع مهم برای بهبود کیفیت زندگی هستند؛ آب آشامیدنی برای زندگی حیاتی است؛ با این حال، فقط 2/5% آب شیرین بر روی زمین وجود دارد و تنها 0/03% آن برای مصرف انسان مناسب است. بیشتر آب روی زمین در اقیانوس‌ها و دریاها است و یا آب

شور است. بنابراین نمک‌زدایی می‌تواند نقش مهمی در ایجاد دسترسی به آب آشامیدنی داشته باشد.

روشی طراحی آب شیرین‌کن برای کارآمد ساختن فرآیند از دیدگاه حرارتی حائز اهمیت است. با این حال، از نظر اقتصادی رقابت نیز ضروری است. با یکپارچه سازی تولید آب و برق، منبع برق می‌تواند انرژی حرارتی را برای فرآیند نمک‌زدایی فراهم کند و باعث کارآیی بیشتر فرآیند شود.

انرژی هسته‌ای جهت فراهم کردن انرژی الکتریکی و حرارتی برای فرآیند نمک‌زدایی منبعی را پیشنهاد می‌دهد، و اتصال سیستم را به یک مسئله مهم در طراحی آب شیرین-کن‌های هسته‌ای تبدیل می‌کند. نوع فرآیند نمک‌زدایی و طراحی سیستم نیز نقشی اساسی در تولید آب آشامیدنی و هزینه آن خواهد داشت.

تحلیل‌های ترمودینامیکی و اقتصادی بایستی به صورت همزمان انجام شود تا راه حل-هایی برای پاسخ به این عملکرد چند هدفه بدست آید. تحلیل ترمو اقتصادی، این هدف را محقق می‌کند.

نمک‌زدایی هسته‌ای می‌تواند روشی برای بهینه‌سازی استفاده انرژی در تولید آب آشامیدنی و برق ارائه دهد. همچنین باید با قیمت مناسب و قابل رقابت با سایر منابع توان برای نمک‌زدایی باشد.

تحلیل اگزرژی می‌تواند به بهینه‌سازی استفاده مناسب از انرژی حرارتی در سیستم نمک-زدایی هسته‌ای کمک کند. با این حال، بهترین راه حل از نظر انرژی لزوماً بهترین راه حل اقتصادی نیست. تحلیل اگزرژی- اقتصادی تابعی چند هدفه است که به دنبال گزینه بهتری برای بهینه‌سازی فرآیند حرارتی به همراه هزینه‌های آن است.

برای دست‌یابی به بهترین راه حل برای یک مسئله کاملاً مشخص، بهتر است از روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه استفاده شود. از بهینه‌سازی در بسیاری از بخش‌های مورد مطالعه برای یافتن راه حل‌هایی استفاده می‌شود که برخی از پارامترهای مطالعه را به حداکثر یا حداقل برساند، مانند به حداقل رساندن هزینه‌ها در تولید کالا یا خدمات، به حداکثر رساندن سود به حداقل رساندن مواد اولیه در تولید کالا یا به حداکثر رساندن تولید. با این حال، دامنه و روش‌های مورد استفاده برای حل آن گسترده است.

بیشتر روش‌های شناخته شده در بخش بهینه‌سازی به کاربرد آن بستگی دارد. بنابراین تعیین مسئله برای حل و پیشنهاد مدل ریاضی متناسب با آن و در نظر گرفتن برخی محدودیت‌ها بسیار مهم است. دو روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک (GA) جستجوی تابو (TS) می‌تواند در این نوع مشکل اتصال راه‌گشا باشد.

پایداری اقتصادی یکی از نگرانی‌های مهم برای استقرار آب شیرین‌کن‌های هسته‌ای است، حتی در منطقه‌ای که به برق و آب نیاز داشته باشد. اولاً، لازم است که تقاضای برق و آب منطقه به صورت کمی محاسبه شود، می‌توان دو حالت درنظر گرفت، اگر راکتور هسته‌ای از قبل در آن منطقه فعال باشد یا اگر کل آب شیرین‌کن هسته‌ای باید مستقر شود.

اگر نیروگاه توان هسته‌ای در حال کار باشد، فرض بر این است که نیروگاه برق مورد نیاز را پوشش می‌دهد و به آب آشامیدنی اضافی مورد نیاز است. در این حالت هزینه سرمایه-گذاری مطابق با آب شیرین‌کن و سایر شرایط لازم برای اتصال است. علاوه بر این، تحلیل‌هایی برای تضمین عملکرد ایمنی آب شیرین‌کن هسته‌ای مورد نیاز است.

در صورت نیاز به آب و برق، تقاضا برای برق، بزرگی نیروگاه هسته‌ای را تعیین می‌کند. دو گزینه وجود دارد، راکتورهای نسل III که راکتورهای بزرگ با ظرفیت انرژی 1100–1600 مگاوات هستند و یا SMRها که دارای توان کمتر از 300 مگاوات هستند. SMR برای استقرار در کنار آب شیرین‌کن دارای انعطاف بیشتری است. در این قسمت نیز، آب شیرین‌کن هسته‌ای باید تمام محدودیت‌های ایمنی را که عملکرد ایمن آن را تضمین می‌کند، برآورده سازد.

در هر دو حالت، شرایط خاص منطقه اقتصادی به تعیین دوام اقتصادی پروژه کمک می-کند. از جمله این شرایط می‌توان به محدوده قیمت فروش برق و آب آشامیدنی اشاره کرد.

سرانجام اما در همه موارد، ایمنی نقش اصلی را برای گرفتن مجوز عملیاتی برای آب شیرین‌کن هسته‌ای ایفا می‌کند؛ مجوز توسط نهاد قانون‌گذاری هسته‌ای ملی اعطا می-شود که فراتر از همه محدودیت‌های ایمنی که یک راکتور هسته‌ای باید برطرف کند، سیستم اتصالی نیز بایستی تضمین کند در هر شرایط عملیاتی راکتور هسته‌ای و / یا آب شیرین‌کن، در هیچ شرایطی نمی‌تواند خطری برای مردم ایجاد کند.

نمک‌زدایی هسته‌ای منبع پایدار انرژی و آب آشامیدنی است که با مشکلات فعلی دسترسی به آب آشامیدنی و برق مقابله می‌کند و از جمله منابع پاک و تجدیدپذیر در سیاست‌های عمومی حفظ محیط زیست است.

فهرست مطالب صفحه

فصل۱: مقدمه۲۰
فصل2: راکتورهای هسته‌ای24
2-1 تولید توان26
2-2 راکتورهای شکافت مستقر شده34
2-3 راکتورهای ماژولار کوچک41
2-4 تجارب نمک‌زدایی هسته‌ای47
2-5 کاربردهای توان هسته‌ای54
فصل3: آب شیرین‌کن57
3-1 فرآیندهای نمک‌زدایی غشایی58
3-2 فرآیندهای نمک‌زدایی حرارتی61
3-3 فرآیندهای ترکیبی65
3-4 معادلات موازنه67
فصل4: اتصال آب شیرین‌کن به راکتورهای هسته‌ای72
4-1 نیروگاه توان آب شیرین‌کن هسته‌ای73
4-2 اتصال راکتورهای هسته‌ای به آب شیرین‌کن78
4-3 اتصال برای تولید همزمان آب و برق86
4-4 جنبه‌های ایمنی آب شیرین‌کن هسته‌ای93
4-5 جنبه‌های زیست محیطی و عملکردی100
فصل5: روش‌های بهینه‌سازی106

5-1مقدمه‌ای بر بهینه‌سازی106
5-2 مسائل بهینه سازی چند هدفه108
5-3 الگوریتم ژنتیک112
5-4 جستوجوی تابو120
فصل6: تحلیل ترمودینامیکی122
6-1 تحلیل هزینه ترازشده انرژی122
6-2 تحلیل ترمودینامیکی131
6-3 تحلیل ترمو اقتصادی134
6-4 توابع هدف190
فصل7: پایداری و رقابت‌پذیری198
7-1 جنبه‌های اقتصادی199
7-2 مسائل زیست محیطی218
7-3 پروژه‌های جاری و آینده231
7-4 مطالعات دیگر234
7-5 مطالعه موردی266
7-6 مقایسه فناوری‌های سوخت فسیلی270
7-7 مقایسه فناوری‌های خورشیدی و بادی275
فصل8: ایمنی و مجوز277
8-1 ملاحظات ایمنی278
8-2 قوانین کاربردی286
8-3 مجوز راکتور هسته‌ای290

8-4 مسائل تولید همزمان296

8-5 مسائل مجوز تولید همزمان306

8-6 قوانین اخذ مجوز برای تولید همزمان309

مراجع325

فصل 1: مقدمه

تقاضا برای آب آشامیدنی در سراسر جهان به طور مداوم در حال افزایش است و اگر اقدامات کافی با پیامدهایی مستقیم بر فعالیت‌های اقتصادی و سلامتی و رفاهی انجام نشود، از میزان تقاضای امروز نیز فراتر می‌رود.

بر اساس این سناریوی نه چندان خیالی، بسیاری از کشورها تلاش خود را بر روی نمک-زدایی آب دریا جهت آبیاری یا حتی آب شرب متمرکز کرده‌اند که این امر می‌تواند نیاز منطقه‌ای به آب را پوشش دهد. با این حال، هزینه آب شیرین شده و نگرانی‌های زیست محیطی از موانع اصلی بهره‌برداری کامل از این فناوری است.

فناوری نمک‌زدایی آب از طریق نمک‌زدایی حرارتی و فرآیندهای غشایی توسعه یافته است. نمک‌زدایی حرارتی در مقیاس تجاری از دهه 1930 آغاز شده است و از آن زمان در حال تکامل است، فرآیندهای غشایی براساس فناوری اسمز معکوس در اواخر دهه 1950 و اوایل دهه 1960 آغاز شدند.

ظرفیت فعلی نمک‌زدایی در سراسر جهان از 15906 آب شیرین‌کن 95/37 Mm^3/d است. در ابتدا بیشتر آب شیرین‌کن‌ها از فرآیندهای حرارتی، تقطیر چند اثره و تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای استفاده می‌کردند و تا سال 1980 سهم آنها از آب آشامیدنی تولید شده 84% بود. در سال 2000 مقدار آب تولیدی در فناوری اسمز معکوس و فرآیندهای حرارتی (MED و MSF) تقریباً برابر بود.

با این حال، با بهینه‌سازی فرآیند اسمز معکوس هزینه‌های آن کاهش یافته است، بر اساس آمار در سال 2018؛ فرآیند اسمز معکوس 69% آب شیرین تولید شده را به خود اختصاص داده است. علت رشد استفاده از فرآیند اسمز معکوس قیمت مناسب آن نسبت به فرآیندهای حرارتی است. برای فرآیند حرارتی به انرژی حرارتی و برق و برای فرآیند

RO فقط به برق نیاز است، منبع انرژی در هر دو فرآیند در بیشتر موارد سوخت فسیلی است.

کشورهایی که از فناوری‌های نمک‌زدایی استفاده می‌کنند تقاضای آب آشامیدنی را حداقل به طور موقت کاهش می‌دهند، اما با تولید گازهای گلخانه‌ای در اثر آب شیرین-کن‌هایی که از منابع فسیلی استفاده می‌کنند، محیط زیست را آلوده می‌کنند. میزان آلودگی در حال حاضر به حدود 76 میلیون تن کربن دی اکسید در سال می‌رسد و با وجود آب شیرین‌کن‌هایی که از نیروگاه‌های توان سوخت فسیلی استفاده می‌کنند، هر ساله در حال افزایش است.

گزینه‌هایی برای کاهش هزینه‌های نمک‌زدایی مطرح شده است. در این میان پیشرفت-هایی در فناوری غشایی، سیستم‌های بازیابی انرژی و تولید همزمان به وسیله اتصال آب شیرین‌کن برای استفاده از حرارت بازگشتی نیروگاه توان در فرآیندهای حرارتی وجود دارد. استفاده از منابع انرژی پاک مانند انرژی هسته‌ای یا انرژی‌های تجدیدپذیر موجب کاهش اثرات زیست محیطی می‌شوند زیرا این منابع گازهای گلخانه‌ای منتشر نمی‌کنند.

سیستم‌های نمک‌زدایی متصل که از راکتورهای هسته‌ای و فرآیندهای حرارتی استفاده می‌کنند از دهه 1960 با نتایج موفقیت آمیزی آغاز شد. با این حال، این آب شیرین‌کن‌ها کمتر از $3000\ m^3/d$ آب شیرین تولید می‌کردند.

فرآیندهای غشایی نیز تنها با یک هدف به راکتور هسته‌ای متصل شدند. راکتور هسته‌ای BN-350 قزاقستان با اتصال به فرآیندهای MED وMSF با ظرفیت کل$120.000\ m^3/d$ یکی از موارد ویژه‌ای بود که بیش از 20 سال به فعالیت خود ادامه داد.

با این وجود، ذکر این نکته ضروری است که مشارکت فعلی نیروگاه های هسته‌ای بسیار اندک است، فقط 15 مورد از 15.906 نیروگاه آب شیرین‌کن عملیاتی از انرژی هسته‌ای تأمین می‌شوند و سوخت‌های فسیلی انرژی دیگر نیروگاه‌ها را تأمین می‌کنند. با این وجود، به خوبی روشن است که راکتورهای هسته‌ای، گازگلخانه‌ای تولید نمی‌کنند. بسیار محتمل است که برای سال‌های آینده میزان مشارکت آن‌ها افزایش یابد.

علاوه بر راکتورهای هسته‌ای موجود، نسل جدیدی از راکتورهای هسته‌ای به نام راکتورهای ماژولار کوچک وجود دارد که برای تأمین نیازهای خاص طراحی شده‌اند. از جمله مشخصات طراحی این راکتورها تولید آب آشامیدنی و تولید گرما و / یا برق است. با توجه به اندازه این راکتورها، می‌توان آن‌ها را در مناطق دور افتاده شهرهای بزرگ، در مناطق دوردست و در بخش روستایی استفاده کرد. این نوع راکتورها می‌توانند کاندیدهای مناسبی برای اتصال به آب شیرین‌کن باشند.

این کتاب تلاش می‌کند تا پلی جامع از دانش که توسط مفاهیم و ایده‌های متنوع مبتنی بر طرح‌های راکتورهای هسته‌ای حال حاضر و سایر طرح‌های اخیر که می‌تواند برای شیرین سازی آب دریا در عین تولید همزمان برق و حرارت استفاده شود، فراهم کند. این کتاب جاگزین کتاب‌های کلاسیک فیزیک و مهندسی هسته‌ای نیست، بلکه راهنمایی برای درک نمک‌زدایی هسته‌ای، کاربردها، دامنه، محدودیت‌ها و مزایا و معایب آن است.

در فصل2 توضیحات بسیار اساسی از انرژی هسته‌ای همراه با توضیحات طرح‌های اصلی راکتورهای انرژی هسته‌ای موجود در کشورهای مختلف ارائه شده است. چگونگی تکامل فناوری راکتورها و چشم انداز فناوری‌های آینده راکتورهای هسته‌ای نیز ارائه شده است؛ مسیری که راکتورهای هسته‌ای را در سراسر جهان منتشر کرده شامل تجربیاتی است که در زمینه نمک‌زدایی از طریق استفاده از راکتورهای هسته‌ای به دست آمده است و پایانی برای تجربیات دیگر برنامه‌های راکتور هسته‌ای مانند تأمین حرارت لازم برای فرآیندهای صنعتی و تجاری و گرمایش منطقه‌های مسکونی است.

در فصل3 فرآیندهای اصلی برای نمک‌زدایی آب دریا با فرآیندهای غشایی مانند اسمز معکوس و الکترودیالیز شرح داده می‌شود. نمک‌زدایی حرارتی نیز توضیح داده می‌شود و سه مدل از آب شیرین‌کن‌های حرارتی به نام‌های تقطیر ناگهانی چندمرحله‌ای، تقطیرچند اثره، تراکم بخار(VC)، تراکم حرارتی بخار(TVC) و تراکم مکانیکی بخار(MVC) شرح داده می‌شود. در پایان، برخی از فرآیندهای ترکیبی توضیح داده می-شود.

هنگامی که راکتورهای هسته‌ای و فرآیندهای نمک‌زدایی مختلف معرفی شدند، فصل4 عناصر مختلفی را در ارتباط با اتصال آب شیرین‌کن‌های پیشین ارائه می‌دهد. این فصل جنبه‌هایی از ایمنی هسته‌ای، محیط زیست و عملکرد حالت تولید همزمان آب و برق را نیز نشان می‌دهد. فصل5 بر روش‌های بهینه‌سازی متمرکز است و دنبال آن مسئله بهینه-سازی چند هدفه و دو روش کاربردی بهینه سازی، یعنی الگوریتم ژنتیک و جستجوی تابو، شرح داده می‌شود.

تحلیل ترمو اقتصادی در فصل6 آورده شده است، روش‌های متعددی با توجه به تمرکز بر موضوعاتی مختلف در نظر گرفته شده است: هزینه تراز شده انرژی و ترمودینامیک، ترمو اقتصادی، که توابع هدف و تحلیل حالت پایا تعریف شده‌اند.

فصل7 به مباحث رقابت‌پذیری و پایداری اختصاص یافته است تا ایده‌هایی در مورد جوانب مثبت و منفی نمک‌زدایی به روش هسته‌ای به خواننده ارائه دهد. برای این امر، جنبه‌های اقتصادی، زیست محیطی و به دنبال آن پروژه‌های امروزی و پروژه‌های در حال مطالعه، مورد بررسی قرار می‌گیرند. این فصل با مقایسه فناوری‌های انرژی فسیلی، خورشیدی و بادی پایان می‌پذیرد.

سرانجام، فصل8 به جنبه‌های ایمنی و صدور مجوزهای مربوط به راکتورهای هسته‌ای است که شامل ایمنی، مقررات و مجوز می‌پردازد. به طور خاص، مقررات و مجوزهای نیروگاه‌های هسته‌ای تولید همزمان نیز شرح داده شده است.