پنجمین کنفرانس ملی مهندسی و مدیریت محیط زیست
The 5th National Conference on Environmental Engineering and Management (5CEEM) -31 May 2023
۱۰ خرداد ۱۴۰۲
موسسه آموزش عالی آبتین
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
مرکز تحقیقات مهندسی محیط زیست مازندآب
ISC

ارزیابی فنی و اقتصادی احداث آب شیرین کن های غشایی خورشیدی غیرمتمرکز در استان خراسان رضوی

سید احسان مجتبوی[1*]، علیرضا بلوری افشار[2]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه تهران، ehsanmojtabavi@ut.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه تهران، arb.afshar@ut.ac.ir

چکیده

ایران با میانگین بارش پایینتر از میانگین جهانی در گروه کشورهای با اقلیم خشک و کم آب طبقه بندی می‌شود. علاوه بر این، تغییرات اقلیم و مدیریت ناکارامد منابع آبی کشور، موضوع کم آبی را در سالهای اخیر به بحران کم آبی مبدل ساخته است. استان خراسان رضوی با میانگین بارش سالیانه ۱۶۳ میلیمتر از استانهای خشک و کم بارش کشور به شمار می‌آید. وسعت بالای استان خراسان رضوی و تابش مناسب خورشید در فصول مختلف، گزینه تأمین و مدیریت آب آشامیدنی را برای شهرهای کوچک و دورافتاده از منابع آب زیر زمینی مطرح می‌نماید. لیکن کاهش سطح آب زیر زمینی در اکثر شهرهای استان و بعضاً وجود آلودگیهای باکتریایی ضرورت تصفیه و شیرین سازی آب را برای مصارف شرب مشخص می‌کند. فناوری جداسازی غشایی اسمز معکوس به دلیل قابلیت طراحی و اجرای مدولار، اقتصادی ترین گزینه جهت ساخت آب‌شیرین‌کن های کانتینری به صورت غیرمتمرکز است. آنالیز آب چاه نیمه عمیق شهر تربت جام به عنوان شهر پایلوت و شبیه سازی فرایند اسمز معکوس با نرم افزار wave قابلیت فنی تولید آب آشامیدنی با کیفیت را با TDS کمتر از ۱۰۰ میلیگرم بر لیتر نشان می‌دهد. آب تولیدی در فرایند اسمز معکوس در مرحله تصفیه نهایی ضد عفونی شده و با عبور از بستر کربنات کلسیم، غلظت یون کلسیم آن برای مصرف آشامیدنی مناسب سازی می‌شود. ارزیابی اقتصادی طرح نشان می‌دهد که براورد هزینه سرمایه گذاری اولیه طراحی و ساخت آب شیرین کن کانتینری با احتساب هزینه بالاسری و راه اندازی برای تولید آب آشامیدنی با ظرفیت ۱۲۰،۰۰۰ لیتر در شبانه روز در شهر تربت جام برابر با ۱۱۹،۵۰۰ دلار است. براورد هزینه سرمایه گذاری اولیه مزرعه خورشیدی فوتوولتاییک منفصل از شبکه در شهر تربت جام با ظرفیت متناسب با احتساب هزینه‌های طراحی، نصب، راه اندازی، بالاسری و آموزش بهره برداری نیز برابر با ۱۹۹،۵۰۰ دلار می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آب‌شیرین‌کن خورشیدی، اسمز معکوس، مزرعه خورشیدی، فوتوولتاییک، فرایند غشایی

۱- مقدمه

ایران با میانگین بارش سالیانه حدود ۲۶۰ میلیمتر در مقایسه با میانگین جهانی ۳۶۰ میلیمتر، در گروه کشورهای با اقلیم خشک و کم آب طبقه‌بندی می‌شود. استان خراسان رضوی مشتمل بر شهرهای مشهد، قوچان، تربت‌جام، سبزوار، تربت‌حیدریه، نیشابور، و غیره با بارش میانگین سالیانه ۱۶۳ میلیمتر نیز از استانهای خشک و کم‌بارش کشور شمرده می‌شود.

تأمین آب آشامیدنی پایدار مهم‌ترین اولویت و چالش در شهرهای دچار کم‌آبی در استان خراسان رضوی است. مدیریت منابع تجدیدپذیر آب‌های زیرزمینی به‌منظور تأمین بخشی از آب شرب موردنیاز ساکنین یکی از راهکارهای تأمین آب خصوصاً در شهرهای کوچک استان می‌باشد. لیکن به دلیل کاهش قابل‌توجه سطح آبهای زیر زمینی، آب چاه اغلب مناطق این استان شور می‌باشد.

شیرین‌سازی آب‌شور منابع آب زیر زمینی در کنار محافظت از این منابع آبی، مهم‌ترین چالش‌های تأمین آب به شمار می‌آید. انتخاب فناوری مناسب شیرین‌سازی و برداشت غیرمتمرکز آب از منابع زیر زمینی یکی از گزینه‌های پیش رو برای غلبه بر بحران کم‌آبی در استان خراسان رضوی است. آب‌شیرین‌کن‌های غیرمتمرکز خورشیدی در ظرفیت‌های پایین به دلیل سرعت بالای نصب و راه‌اندازی و استقلال از شبکه برق سراسری یکی از گزینه‌های مناسب تأمین آب خصوصاً در شهرهای کوچک و کم‌برخوردار به شمار می‌رود.

توسعه فناوری غشایی در شیرین‌سازی آب‌های شور در دهه گذشته، این فناوری را به‌عنوان اقتصادی‌ترین فرایند در مقیاس تجاری مطرح نموده است. پیشرفت قابل‌توجه فناوری تولید غشا نیز منجر به کاهش بهای آب شیرین تولیدی در فرایند اسمز معکوس شده است. لیکن هنوز بخش اصلی بهای تمام شده آب تولیدی در آب‌شیرین‌کن های صنعتی مربوط به هزینه سرمایه‌گذاری اولیه تجهیزات الکترومکانیکال مصرف‌کننده انرژی الکتریکی و هزینه‌های انرژی مصرفی مرتبط با آن می‌باشد.

ارزیابی آب‌شیرین‌کن های خورشیدی غیرمتمرکز و مستقل از شبکه سراسری برق به‌عنوان یکی از گزینه‌های تأمین آب آشامیدنی در استان خراسان رضوی مستلزم امکان‌سنجی اولیه و ارزیابی فنی و اقتصادی می‌باشد. انجام ارزیابی فنی مشتمل بر دو بخش فناوری شیرین‌سازی و سلول‌های فوتوولتاییک بوده و بررسی اقتصادی مربوط به هزینه سرمایه‌گذاری اولیه در هر بخش می‌باشد.

۲- بحران کم‌آبی و کاهش منابع آب شیرین تجدیدپذیر

کم آبی یکی از معضلات مشترک اکثر کشورهای منطقه MENA(Middle East and North Africa)، واقع در خاورمیانه و شمال آفریقا است. مدیریت صحیح منابع آبی و شیرین سازی آبهای شور و آب دریا، راهکارهای اصلی اغلب این کشورها برای مواجه با چالش کم آبی در سالهای گذشته بوده است. سیاست گذاری و وضع قوانین سختگیرانه برای بهره وری از منابع آب شیرین تجدید پذیر در بخشهای مختلف تقاضا اعم از خانگی، صنعتی و کشاورزی، اولین گام برای مواجهه با بحران کم آبی است. از اینرو ضرورت تخصیص بهینه منابع آب در مناطق دچار کم آبی به منظور دستیابی به حداکثر کارایی در بخش مصرف و کاهش تعارضات بر سر دسترسی به منابع از اهم اولویت های سیاست گذاری در زمینه مدیریت کارامد منابع آبی است.

دسترسی به دریاهای آزاد و منابع آب زیرزمینی پایدار یک فرصت ارزشمند برای مقابله با تهدید کم‌آبی در مناطق مختلف است. شیرین‌سازی آب دریا یا منابع آب زیرزمینی مبتنی بر تحلیل هزینه - فایده، راهکاری فناوری محور برای پاسخ به تقاضای آب آشامیدنی در کشورهای با اقلیم گرم و خشک و مواجه با بحران کم‌آبی در کنار مدیریت منابع آبی است. از این رو در چند دهه گذشته فناوری‌های تجاری شیرین‌سازی آب‌های شور توسعه پیدا کرده‌اند.

توسعه آب‌شیرین‌کن های صنعتی در اقصی‌نقاط دنیا سبب شده است که امروز ظرفیت شیرین‌سازی آب‌های شور در دنیا از ۱۲۰ میلیون مترمکعب در روز تجاوز کند. رشد سریع واحدهای نمک‌زدایی در ده سال اخیر منجر به دوبرابر شدن ظرفیت تولید آب شیرین طی یک دهه شده است. این بدان معناست که سیاست شیرین‌سازی آب‌های شور و به طور اخص آب دریا، یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر برای رویارویی با چالش کم‌آبی است.

کشورهای حاشیه خلیج‌فارس طی دو دهه گذشته در توسعه ظرفیت‌های شیرین‌سازی آب دریا در دنیا پیشگام بوده‌اند. جدول زیر ظرفیت تولید شیرین‌سازی آب دریا طی سالهای ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۷ را در کشورهای عربی حاشیه خلیج‌فارس نشان می‌دهد. رشد سریع ظرفیت تولید در این منطقه نشانگر حجم بالای سرمایه گذاریهای انجام شده در این حوزه است.

شیرین‌سازی آب‌شور منابع آب زیر زمینی و محافظت از این منابع آبی مهم‌ترین چالش‌های تأمین آب به شمار می‌آید.

جدول ۱: ظرفیت تولید آب‌شیرین‌کن های کشورهای عربی حاشیه خلیج‌فارس (میلیون مترمکعب بر روز)

سال	میزان تولید کل آب شیرین	امارات	بحرین	عربستان سعودی	عمان	قطر	کویت
۲۰۰۷	۳۵۴۱,۳ (MCM/yr)	۱۵۱۴,۶	۱۰۶,۳	۱۰۶۷,۰	۸۷,۵	۲۵۱,۰	۵۱۴,۹
۲۰۰۸	۳۸۳۹,۹ (MCM /yr)	۱۵۹۴,۱	۱۴۵,۰	۱۱۴۴,۰	۹۱,۰	۳۱۲,۰	۵۵۳,۹
۲۰۰۹	۴۰۴۸,۹ (MCM /yr)	۱۶۵۲,۷	۱۷۵,۹	۱۲۰۰,۰	۱۰۸,۱	۳۴۰,۰	۵۷۲,۲
۲۰۱۰	۴۴۶۸,۰ (MCM /yr)	۱۶۷۹,۶	۱۸۸,۲	۱۴۸۵,۰	۱۴۵,۸	۳۷۴,۰	۵۹۵,۴
۲۰۱۱	۴۷۸۲,۴ (MCM /yr)	۱۷۱۳,۳	۱۸۹,۸	۱۶۸۵,۰	۱۷۲,۰	۴۰۱,۰	۶۲۱,۳
۲۰۱۲	۵۰۳۹,۶ (MCM /yr)	۱۸۱۸,۶	۱۹۷,۰	۱۷۶۴,۰	۱۹۹,۹	۴۲۵,۹	۶۳۴,۲
۲۰۱۳	۵۱۹۴,۵ (MCM /yr)	۱۸۷۴,۶	۲۰۴,۹	۱۸۱۲,۰	۲۱۱,۵	۴۵۳,۲	۶۳۸,۳
۲۰۱۴	۵۴۴۰,۰ (MCM /yr)	۱۹۴۹,۰	۲۱۹,۲	۱۹۱۲,۰	۲۲۳,۹	۴۸۲,۲	۶۵۳,۷
۲۰۱۵	۵۷۴۳,۹ (MCM /yr)	۲۰۰۴,۷	۲۴۱,۶	۲۰۴۸,۰	۲۳۹,۶	۵۳۳,۰	۶۷۷,۰
۲۰۱۶	۶۰۳۶,۷ (MCM /yr)	۲۰۰۴,۹	۲۴۱,۹	۲۲۴۱,۰	۲۷۹,۶	۵۵۷,۰	۷۱۲,۴
۲۰۱۷	۶۲۹۶,۳ (MCM /yr)	۱۹۷۵,۴	۲۳۹,۲	۲۴۵۸,۰	۲۹۸,۲	۶۰۲,۰	۷۲۳,۵

انتخاب فناوری مناسب شیرین‌سازی و برداشت غیرمتمرکز آب از منابع زیر زمینی یکی از گزینه‌های پیش رو برای غلبه بر بحران کم‌آبی در سال‌های اخیر در استان خراسان رضوی است.

۳- شیرین‌سازی آب با فرایند غشایی

فناوری اسمز معکوس بر فرایند جداسازی غشایی استوار شده است. در فرایند اسمز معکوس، انتقال یون‌های متشکله آب میان دو محلول با غلظت‌های مختلف شوری و از غلظت کمتر به غلظت بیشتر انجام می‌شود. این فرایند با اعمال فشار در جهت معکوس پدیده اسمزی از طریق غشای نیمه‌تراوا به وقوع می‌پیوندد. در نتیجه آب‌شور با فشار بالا که متناسب با میزان شوری می‌باشد، از غشای نیمه‌تراوا یا ممبران عبور داده می‌شود.

غشای نیمه‌تراوا با عبور یون‌های هیدروژن و هیدروکسید، آب شیرین را از آب‌شور جداسازی می‌کند. به جز مولکول آب تنها یون‌های با اندازه کوچک و با غلظت پایین می‌توانند از غشای نیمه‌تراوا عبور کنند. اغلب یون‌های محلول در آب که شوری آب را تشکیل می‌دهند، به جریان شورابه هدایت می‌شوند؛ بنابراین در فرایند اسمز معکوس، آب‌شور ورودی به غشای نیمه‌تراوا به دو جریان آب شیرین(Permeate) و جریان آب شورتر (Concentrate) تقسیم می‌شود.

یکی از ویژگی‌های مهم فناوری شیرین‌سازی اسمز معکوس، امکان طراحی و اجرای مدولار فرایند اسمز معکوس است. این قابلیت امکان ساخت آب‌شیرین‌کن با ظرفیت‌های مختلف و به‌صورت غیرمتمرکز را فراهم می‌کند. آب‌شیرین‌کن های صنعتی در ظرفیت‌های کم تا واحدهای عظیم آب‌شیرین‌کن آب دریا با ظرفیت‌های بالای تولید آب شیرین بر مبنای فرایند جداسازی غشایی طراحی و ساخته می‌شوند. یکی از مزایای مهم این قابلیت امکان پیاده‌سازی عملیات شیرین‌سازی در نقاط مختلف جغرافیایی و در مجاورت منابع آب‌های شور است.

۳-۱- مصرف انرژی فرایند اسمز معکوس

انرژی مصرفی در واحدهای نمک‌زدایی اسمز معکوس در بخش‌های برداشت آب خام، پیش‌تصفیه، فرایند اسمز معکوس، تصفیه نهایی و انتقال آب صرف می‌شود که اغلب مربوط به مصرف انرژی الکتریکی در الکتروموتور پمپ‌های مورداستفاده است.

مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر میزان مصرف انرژی در فرایند اسمز معکوس، غلظت شوری آب خام است. با افزایش غلظت شوری، فشار اسمزی افزایش پیدا کرده و به‌تبع آن فشار موردنیاز برای فرایند اسمز معکوس افزایش پیدا می‌کند. ریکاوری یا درصد استحصال آب شیرین از آب خام دومین عامل تعیین‌کننده میزان مصرف انرژی در آب‌شیرین‌کن های غشایی است. با افزایش میزان ریکاوری، انرژی موردنیاز برای شیرین‌سازی آب متناسباً افزایش می‌یابد.

مصرف انرژی واحدهای نمک‌زدایی علاوه بر میزان شوری و درصد بازیافت آب شیرین، متأثر از عوامل متعدد دیگری است. دما، کیفیت آب خروجی، راندمان پمپ‌ها، راندمان الکتروموتورها و برگشت‌ناپذیرهای ترمودینامیکی موجود در فرایند نمک‌زدایی، انرژی ویژه مصرفی واحد نمک‌زدایی را تغییر می‌دهند. به‌عنوان نمونه کاهش هر چه بیشتر یون‌های محلول در آب‌شور و دستیابی به آب‌های با هدایت الکتریکی بسیار پایین، نیازمند فرایند اسمز معکوس دوبار گذر بوده که مصرف انرژی ویژه واحد را افزایش می‌دهد.

کاهش یون‌های محلول در آب با فرایند اسمز معکوس تنها با غلبه به فشار اسمزی ممکن است. افزایش فشار آب خام برای غلبه به فشار اسمزی نیز مستلزم صرف انرژی است. مصرف انرژی ویژه فرایند اسمز معکوس در حالت تئوری برای شیرین‌سازی آب دریا با شوری ۳۵ هزار میلی‌گرم بر لیتر و درصد بازیابی ۵۰ درصد تقریباً برابر ۱ کیلووات ساعت بر مترمکعب آب شیرین است. با افزایش درصد بازیابی آب شیرین به ۷۵ درصد، مصرف انرژی ویژه تئوری فرایند اسمز معکوس به حدود یک و نیم کیلووات ساعت بر مترمکعب افزایش می‌یابد که این انرژی تنها توسط پمپ فشارقوی فرایند اسمز معکوس مصرف می‌شود. در حالت عملیاتی مقدار انرژی لازم به مراتب بیش از محاسبات تئوری است.

پمپ فشارقوی مهم‌ترین مصرف‌کننده انرژی در آب‌شیرین‌کن های آب‌شور است. به طوری که در شیرین‌سازی آب‌های بسیار شور نظیر آب دریا، افزایش فشار آب به بیش از ۶۰ اتمسفر برای غلبه به فشار اسمزی، بخش اصلی مصرف انرژی فرایند نمک‌زدایی است. باتوجه‌به مصرف بالای انرژی در این بخش، نحوه بازیابی فشار شورابه خروجی از غشاهای اسمز معکوس به مهم‌ترین عامل افزایش راندمان مصرف انرژی در دهه‌های گذشته مبدل شده است. توسعه فناوری‌های بازیابی انرژی(ERD) از فشار بالای شورابه خروجی از توربین فرانسیس(FT) به توربین پلتون(PT) تا به فناوری‌های ایزوباریک نظیر تبادل کننده فشار(PX) باهدف افزایش راندمان مصرف انرژی منجر به کاهش قابل‌توجه مصرف انرژی ویژه آب‌شیرین‌کن های صنعتی شده است.

سابقه تاریخی کارکرد آب‌شیرین‌کن های صنعتی در اواخر دهه ۱۹۷۰ نشان می‌دهد که میزان مصرف انرژی ویژه فناوری اسمز معکوس در شرایط واقعی برای شیرین‌سازی آب‌های با شوری بالا حدود ۲۰ کیلووات ساعت به ازای هر مترمکعب بوده است. ولی با توسعه فناوری‌های تولید غشاهای اسمز معکوس، افزایش راندمان پمپ فشارقوی و افزایش راندمان بازیابی انرژی، مصرف انرژی ویژه آب‌شیرین‌کن‌ها در اواسط دهه ۱۹۸۰ به حدود ۸ کیلووات ساعت به ازای هر مترمکعب آب شیرین کاهش پیدا کرده است. امروزه با معرفی فناوری‌های جدید بازیابی انرژی، میزان راندمان بازیابی انرژی به حدود ۹۳ الی ۹۷ درصد افزایش پیدا کرده و انرژی ویژه مصرفی آب‌شیرین‌کن های بزرگ صنعتی برای شیرین‌سازی آب‌های با شوری بالا به حدود ۳ کیلووات ساعت بر مترمکعب کاهش پیدا کرده است که دستاورد بزرگی برای کاهش بهای آب شیرین تولیدی از دریاها است.

امروزه اگرچه پیشرفت‌های چشمگیری در زمینه فرایندهای نمک‌زدایی آب دریا با رویکرد بهینه‌سازی مصرف انرژی حاصل شده است، اما مطالعات مختلف نشان می‌دهد که کماکان ۴۰ تا ۷۵ درصد از کل هزینه بهره‌برداری واحدهای آب‌شیرین‌کن دریایی وابسته به هزینه‌های انرژی در کشورهای مختلف است. در کشور ما به دلیل بهای پایین انرژی الکتریکی نسبت به سایر نقاط دنیا، هزینه مصرف انرژی حدود ۲۵ درصد از هزینه‌های بهره‌برداری واحدهای آب‌شیرین‌کن بزرگ را به خود اختصاص می‌دهد.

۴- شبیه‌سازی فرایند اسمز معکوس

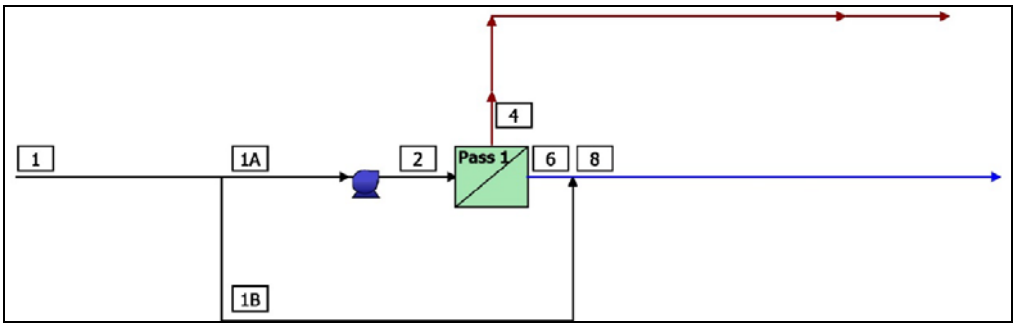
اولین مرحله از شبیه‌سازی فرایند اسمز معکوس، تعیین آنالیز آب خام ورودی به فرایند است. آب خام از یکی از چاه‌های نیمه‌عمیق در شهر تربت‌جام نمونه‌گیری گردید. سپس نمونه آب در کمتر از ۲۴ ساعت به آزمایشگاه اکرودیته سازمان حفاظت از محیط‌زیست جهت آزمون‌های کامل شیمیایی، فیزیکی، بیولوژیکی و میکروبی ارسال گردید.

جدول ۲: آنالیز آب خام

ردیف	عنوان آزمایش	واحد	نتیجه	نوع روش	شماره روش
۱	دمای نمونه هنگام آزمایش	^oC	۲۵,۰	Laboratory and Field	۲۵۵۰ B
۲	کدورت	NTU	۰,۶۷	Nephelometric	۲۱۳۰ B
۳	PH	-	۷,۴۶	Electrometric	۴۵۰۰-H^+ B
۴	هدایت الکتریکی	µmhos/cm	۱۴۰۰	Platinum Electrode	۲۵۱۰ B
۵	کل جامدات محلول در ^oC(۱۸۰)	mg/lit	۹۳۰	Electrical Conductivity	----------
۶	کل مواد معلق در ^oC (۱۰۳-۱۰۵)	mg/lit	Nil	Gravimetric	۲۵۴۰ D
۷	اکسیژن مورد نیاز بیو شیمیایی(BOD_5)	mg/lit O_2	۰	Respirometric	۵۲۱۰ D
۸	اکسیژن مورد نیاز شیمیایی(COD)	mg/lit O_2	<۱	Closed Reflux Titrimetric	۵۲۲۰ C
۹	سختی کل	mg/lit $CaCO_3$	۲۷۰	EDTA Titrimetric	۲۳۴۰ C
۱۰	کلسیم	mg/lit $CaCO_3$	۱۲۵	EDTA Titrimetric	۳۵۰۰-Ca B
۱۱	منیزیم	mg/lit $CaCO_3$	۱۴۵	EDTA Titrimetric	۳۵۰۰-Mg B
۱۲	سدیم	mg/lit Na^+	۱۹۸,۰	Flame Emission Photometric Method	۳۵۰۰-Na B
۱۳	پتاسیم	mg/lit K^+	۳,۲۰	Flame Emission Photometric Method	۳۵۰۰-K B
۱۴	قلیائیت کل	mg/lit $CaCO_3$	۱۷۶	Titrimetric	۲۳۲۰ B
۱۵	کربنات	mg/lit $CaCO_3$	۰	Titrimetric	۲۳۲۰ B
۱۶	بیکربنات	mg/lit $CaCO_3$	۱۷۶	Titrimetric	۲۳۲۰ B
۱۷	کلراید	mg/lit Cl^-	۱۴۹,۹	Argentometric	۴۵۰۰-Cl^- B
۱۸	سولفات	mg/lit SO_4^{-2}	۲۸۰	Turbidimetric	۴۵۰۰-SO_4^{2-} E
۱۹	سیلیس	mg/lit SiO_2	۱۴,۶۳	Molybdosilicate Colorimetric	۴۵۰۰-SiO_2 C
۲۰	آمونیاک	mg/lit NH_4^+	<۰,۰۱	Nesslerization	ASTM D۱۴۲۶
۲۱	نیترات	mg/lit NO_3^-	۲۶,۰	Brucine	EPA ۳۵۲,۱
۲۲	شمارش باکتری های هتروتروف	CFU/ml	۵۰	Pour Plate Method	۹۲۱۵ B

شبیه‌سازی فرایند اسمز معکوس با نرم‌افزار Wave ۱,۸۲ بر مبنای فرایند اسمز معکوس تک‌مرحله‌ای و تک پاس برای تولید آب آشامیدنی با ظرفیت ۵ مترمکعب بر ساعت انجام شده است. شبیه‌سازی بر اساس مخلوط سازی بخشی از آب خام با جریان آب Permeate باهدف افزایش TDS آب آشامیدنی انجام شده است.

نمودار ۱: نمودار شبیه‌سازی تک‌مرحله‌ای/ تک پاس فرایند اسمز معکوس



نتایج شبیه‌سازی مشتمل بر دبی، غلظت و فشار هر یک از جریان‌های نمایش داده در نمودار شماره (۱) در جدول (۳) نمایش داده شده است.

جدول۳: خروجی شبیه‌سازی فرایند اسمز معکوس با نرم‌افزار Wave

شماره جریان	نوع جریان	جریان (m^3/h)	(PPM) TDS	فشار (بار)
۱	آب خام ورودی به فرایند اسمز معکوس	۹,۷۹	۱۰۴۹	۹,۷۹
۱A	آب خوراک به پاس اول بعد از جریان کنار گذر	۹,۳۹	۱۰۴۹	۹,۳۹
۱B	جریان کنار گذر از پاس اول به خروجی آب شیرین	۰,۴۰	۱۰۴۹	۰,۴
۲	جریان خالص خوراک	۹,۳۸	۱۰۴۹	۹,۳۸
۴	مجموع جریان شورابه	۴,۷۸	۲۰۴۸	۴,۷۸
۶	جریان خالص خروجی از فرایند اسمزمعکوس	۴,۶	۸,۲۸	۴,۶
۸	جریان مخلوط کنار گذر و خروجی فرایند اسمز معکوس	۵	۹۱,۶۱	۵,۰۰

نتایج شبیه سازی فرایند اسمز معکوس در نرم افزار wave مبتنی بر شاخص های طراحی فرایند نظیر فلاکس، حداقل میزان شورابه در هر ممبران و حداکثر جریان permeate ، ضرورت بکارگیری تعداد ۴ عدد ممبران اسمز معکوس با فشار طراحی ۹,۳۸ را مشخص می کند.(جدول۴)

جدول ۴:شاخص‌های طراحی فرایند اسمز معکوس

شرح	واحد	مقدار
تعداد ممبران	عدد	۴
نوع ممبران		Filmtec BW۳۰-۴۰۰
مجموع سطح غشای نیمه تراوا	متر مربع	۱۴۹
فاکتور جریان		۰,۷۵
میانگین فلاکس	LMH	۳۰,۹
ریکاوری فرایند اسمز معکوس	درصد	۴۹
انرژی ویژه فرایند اسمز معکوس	kwh/m۳	۰,۸۹
خالص ریکاوری بعد جریان کنار گذر	درصد	۵,۰۱

۴-۱- انرژی مصرفی آب‌شیرین‌کن غیرمتمرکز شهر تربت‌جام

نتایج شبیه‌سازی فرایند اسمز معکوس میزان دبی و فشار جریان‌های مختلف را تعیین می‌کند. انتخاب ظرفیت مناسب مخازن و تجهیزات الکترومکانیکال باتوجه‌به نتایج شبیه‌سازی، توان متناظر هر یک از مصرف‌کنندگان انرژی را تعیین می‌کند. جدول شماره (۵) توان موردنیاز و انرژی مصرفی مصرف‌کنندگان انرژی را در آب‌شیرین‌کن غشایی شهر تربت‌جام مشخص می‌کند.

جدول۵: تفکیک مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی آب‌شیرین‌کن شهر تربت‌جام

ردیف	مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی	ولتاژ	توان نصب شده (kw)	توان مصرفی روزانه (kwh)	توان مصرفی ماهانه (kwh)
۱	پمپ فشار قوی	۳۸۰	۵,۵	۱۳۲	۴۰۹۲
۲	پمپ تغذیه آب خام	۳۸۰	۳	۷۲	۲۲۳۲
۳	پمپ های تزریق	۲۲۰	۰,۴	۹,۶	۲۹۷,۶
۴	پمپ انتقال آب تصفیه شده	۳۸۰	۱,۸	۴۳,۲	۱۳۳۹,۲
۵	هواکش	۲۲۰	۰,۴	۹,۶	۲۹۷,۶
۶	تهویه مطبوع	۳۸۰	۲,۵	۶۰	۱۸۶۰
۷	روشنایی	۲۲۰	۱	۲۴	۷۴۴
۸	متفرقه	۲۲۰	۰,۷	۱۶,۸	۵۲۰,۸
مجموع			۱۵,۳	۳۶۷,۲	۱۱۳۸۳,۲

مهم‌ترین مصرف‌کننده انرژی در آب‌شیرین‌کن های غشایی، پمپ فشارقوی فرایند اسمز معکوس است. توان مصرفی پمپ فشارقوی وابسته به کیفیت آب خام، ریکاوری و تأسیسات جانبی آب‌شیرین‌کن، ۲۵ تا ۴۵ درصد توان مصرفی واحد شیرین‌سازی را به خود اختصاص می‌دهد.

۵- ارزیابی فنی آب‌شیرین‌کن خورشیدی در استان خراسان رضوی

امروزه به‌کارگیری سلول‌های فتوولتاییک (PV) برای تولید انرژی الکتریکی از تابش خورشیدی به شکل تجاری در دنیا توسعه‌یافته است. در سلول‌های فتوولتاییک، پرتو خورشید توسط ماده نیمه‌رسانا نظیر سلول‌های سیلیکونی، با ایجاد اختلاف پتانسیل الکتریکی، انرژی خورشیدی را به انرژی الکتریکی مبدل می‌کند.

باتوجه‌به وضعیت تابش مناسب خورشید در مناطق مختلف استان خراسان رضوی، امکان تأمین انرژی الکتریکی موردنیاز تجهیزات آب‌شیرین‌کن توسط مزرعه خورشیدی وجود دارد. در این صورت راه‌اندازی آب‌شیرین‌کن های غیرمتمرکز در سریع ترین زمان و مستقل از امکان دسترسی به شبکه سراسری برق امکان‌پذیر خواهد بود.

ارزیابی فنی مزرعه خورشیدی بر اساس به‌کارگیری از پنل‌های فتوولتاییک شرکت AE Solar (مدل AE۵۵۰MD-۱۴۴) انجام شده است که مشخصات فنی آن در جدول (۶) نمایش داده شده است.

جدول ۶: مشخصات پنل‌های فتوولتائیک

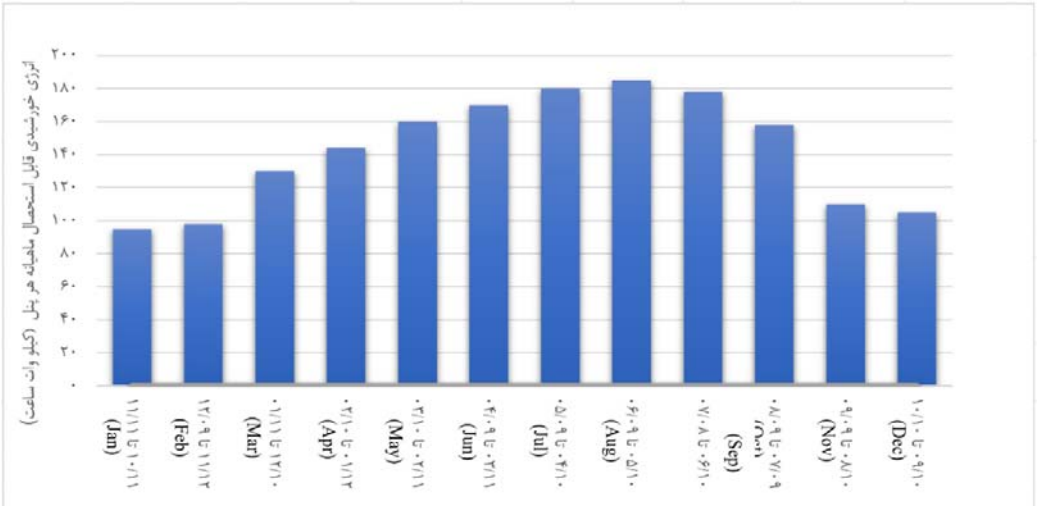
ابعاد	عرض	mm	۱۱۳۳
	طول	mm	۲۲۷۸
	ضخامت	mm	۳۰
حداکثر توان تولیدی در شرایط استاندارد		Wp	۵۵۰
توان تولیدی در شرایط نرمال		Wp	٤١٤
جریان تولیدی در شرایط استاندارد		A	۱۲,۹۲
جریان تولیدی در شرایط نرمال		A	۱۰,۳٦
ولتاژ تولیدی در شرایط استاندارد		V	٤۲,۵۷
ولتاژ تولیدی در شرایط نرمال		V	٤۰,۱۰

طراحی سامانه‌های فتوولتاییک به‌صورت متصل و منفصل از شبکه سراسری برق امکان‌پذیر است. در سامانه‌های متصل به شبکه، سامانه فتوولتاییک به طور متصل به شبکه برق سراسری عمل می‌نمایند. یکی از اجزاء اصلی سامانه‌های فتوولتائی متصل به شبکه، مبدل‌ها هستند که برق DC تولیدی توسط سلول‌های خورشیدی را متناسب با ولتاژ و توان شبکه برق منطقه‌ای به AC تبدیل نموده و در هنگام عدم نیاز، آن را به شبکه سراسری منتقل میکنند. به‌طورکلی ارتباطی دوجانبه میان سلول‌های فتوولتائیک و شبکه برق سراسری وجود دارد. بطوریکه که اگر برق DC تولیدی توسط سامانه‌های فتوولتائیک بیش از نیاز سایت باشد، مازاد آن به شبکه برق سراسری تغذیه می‌گردد و در هنگام شب که امکان استفاده از نور خورشید وجود ندارد، بار الکتریکی موردنیاز آب‌شیرین‌کن توسط شبکه برق سراسری تأمین می‌گردد.

سامانه‌های فتوولتاییک منفصل از شبکه به‌صورت مستقل از شبکه برق سراسری عمل می‌کنند. در این سامانه‌ها توان نصب شده پنل‌های فتوولتاییک باهدف ذخیره‌سازی انرژی در مدت‌زمان روز، بیشتر از توان مصرفی آب‌شیرین‌کن در نظر گرفته می‌شود و توان مازاد تولیدی برای تأمین انرژی مصرفی تجهیزات در طول مدت شب از باتری‌های شارژ شده در طول روز، تأمین می‌گردد.

شهر تربت‌جام به‌عنوان شهر منتخب استان خراسان رضوی در طول جغرافیایی ۶۰,۶۲۴ و عرض جغرافیایی ۳۵,۲۴۳ قرار دارد. به طور طبیعی شدت و میزان تابش در ماه‌های مختلف سال متفاوت است. طراحی منفصل سامانه فتوولتاییک برای آب‌شیرین‌کن غیرمتمرکز در شهر تربت‌جام مستلزم پیش‌بینی توان فوتوولتاییک در بدترین ماه سال از منظر انرژی قابل استحصال خورشیدی است. نمودار (۲) تغییرات مربوط به انرژی قابل استحصال خورشیدی را در ماه‌های مختلف سال در شهر تربت‌جام بر اساس داده‌های نرم‌افزار Meteonorm ۸,۱ نشان می‌دهد.

نمودار ۲:تغییرات میزان انرژی خورشیدی قابل استحصال توسط پنل های خورشیدی در فصول مختلف شهر تربت جام



جدول(۷) مشخصات سامانه فتوولتائیک منفصل از شبکه که نیازمندی‌های انرژی تجهیزات آب‌شیرین‌کن را در طول مدت شب توسط انرژی ذخیره شده در باتری تأمین می‌کند را نشان می‌دهد.

جدول ۷: مشخصات سامانه فتوولتائیک منفصل از شبکه

شرح	واحد	مقدار
توان خروجی تولید سلول‌های فتوولتائیک	kwp	۱۴۴,۱
سطح سلول‌های PV	m^2	۶۷۲,۲
تعداد سلول‌های PV	PCS	۲۶۲
تعداد اینورتر(مبدل)	PCS	۴
تعداد باتری	PCS	۱۲۰

جدول(۸) نتایج شبیه‌سازی سامانه فوتوولتاییک منفصل از شبکه را بر اساس شدت و زاویه تابش خورشید در شهر تربت‌جام را نشان می‌دهد.

جدول ۸: شبیه‌سازی سامانه فتوولتائیک

مشخصات	واحد	مقدار
خروجی سلول‌های فتوولتائیک	kwp	۱۴۶۰۱
بازده ویژه سالیانه	kwh/kWp	۱,۶۲۷,۰۷
نسبت عملکرد (PR)		۸۶,۶٪
حداکثر انرژی فتوولتائیک تئوری	kwh/year	۲۳۴,۵۵۵
انرژی خورشیدی قابل‌استفاده	kwh/year	۹۸,۸۳۷
سهم تأمین انرژی مستقیم	kwh/year	۳۱,۸۷۹
سهم تأمین انرژی با باتری	kwh/year	۶۶,۹۵۸
بازده کلی سیستم		۳۷,۷٪
کاهش تولید گاز دی‌اکسیدکربن	kg/year	۴۱,۵۹۸

جدول(۹) مشخصات فنی باتری‌های مربوط به مزرعه خورشیدی فوتوولتاییک را نمایش می‌دهد. باتری های پیش بینی شده توانایی تأمین انرژی تجهیزات آب شیرین کن را به مدت ۱۶,۸ ساعت دارد. بدیهی است در صورت کاهش ظرفیت باتری ها مدت زمان پشتیبانی و هزینه سرمایه گذاری اولیه نیز کاهش پیدا می‌کند.

جدول ۹: مشخصات مجموعه باتری مزرعه فتوولتائیک

مجموع توان	kw	۱۹,۵
ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی	kwh	۳۰۷,۲
حداکثر ساعات تأمین برق	h	۱۶,۸
نوع باتری	فسفات آهن	لیتیوم

۶- ارزیابی اقتصادی

هزینه سرمایه‌گذاری اولیه احداث آب شیرین‌های خورشیدی مشتمل بر هزینه‌های مربوط به بخش آب‌شیرین‌کن صنعتی و بخش مزرعه خورشیدی می‌باشد. باتوجه‌به ضرورت نصب و راه‌اندازی سریع آب‌شیرین‌کن‌های با ظرفیت پایین، طراحی و ساخت آب‌شیرین‌کن کانتینری باهدف قابل‌حمل بودن و راه‌اندازی در کمترین زمان ممکن نسبت به گزینه‌های دیگر ارجح است.

برآورد هزینه سرمایه‌گذاری اولیه احداث آب‌شیرین‌کن کانتینری بر اساس تجهیزات موردنیاز برای فرایند پیش‌تصفیه، اسمز معکوس و تصفیه نهایی انجام می‌شود. برآورد هزینه‌های مربوط به مهندسی، نصب، راه‌اندازی، مخازن ذخیره‌سازی آب، سیستم توزیع آب آشامیدنی، آموزش بهره‌برداری و بالاسری شامل بیمه، مالیات، هزینه حمل‌ونقل و غیره به این هزینه‌ها افزوده می‌شود.

بخش پیش‌تصفیه شامل بسترهای مختلط فیلتراسیون متشکل از سیلیس، آنتراسیت، کربن فعال و در ادامه میکروفیلتراسیون می‌باشد. تصفیه میانی یا بخش اسمز معکوس نیز شامل هزینه‌های مربوط به پمپ فشارقوی، ممبران، استوانه‌های تحت‌فشار بوده که عملیات اصلی شیرین‌سازی آب را انجام می‌دهد. آب شیرین تولید شده در بخش تصفیه نهایی نیز ضدعفونی شده و املاح ضروری به آن افزوده می‌شود.

هزینه سرمایه گذاری اولیه طراحی و ساخت آب شیرین کن کانتینری با احتساب هزینه بالاسری و راه اندازی برای تولید آب آشامیدنی با ظرفیت ۱۲۰،۰۰۰ لیتر در شبانه روز در شهر تربت جام برابر با ۱۱۹،۵۰۰ دلار است. (با توجه نوسانات نرخ تسعیر ارز) براورد ارزی انجام شده است.

برآورد هزینه مزرعه خورشیدی موردنیاز برای تأمین انرژی آب‌شیرین‌کن بر اساس نتایج شبیه‌سازی انجام می‌شود. بخش اول هزینه سرمایه‌گذاری اولیه مشتمل بر هزینه آماده‌سازی زمین، محوطه‌سازی و حفاظت فیزیکی از سامانه فوتوولتاییک می‌باشد. بخش دوم هزینه مربوط به هزینه خرید پنل‌های خورشیدی، پایه‌های نگهدارنده، مبدل جریان، باتری و کابل‌های ارتباطی است.

برآورد هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای احداث مزرعه خورشیدی فوتوولتاییک منفصل از شبکه برق سراسری در شهر تربت‌جام با ظرفیت نصب شده ۱۴۴ کیلووات ساعت پیک و ظرفیت ذخیره‌سازی باتری ۳۰۷ کیلووات ساعت با احتساب هزینه‌های طراحی، نصب، راه‌اندازی، بالاسری و آموزش بهره‌برداری برابر با ۱۹۹،۵۰۰ دلار می‌باشد.

باتوجه‌به رویکرد غیرمتمرکز تأمین آب آشامیدنی توسط آب‌شیرین‌کن‌های کانتینری با ظرفیت پایین، مدت‌زمان احداث واحد حایز اهمیت است. باتوجه‌به تجربیات موفق شرکت‌های ایرانی در طراحی و ساخت آب‌شیرین‌کن، امکان اجرای این واحدها در شهرهای مختلف استان خراسان رضوی در کمتر از ۶۰ روز وجود دارد.

۷- نتیجه‌گیری

تأمین آب آشامیدنی پایدار مهم‌ترین اولویت و چالش تأمین آب در شهرهای دچار کم‌آبی در استان خراسان رضوی است. بهره‌گیری از منابع آب زیر زمینی به دلیل شوری بالا و بعضاً وجود آلودگی‌های میکروبی برای مصارف شرب نیازمند تصفیه آب می‌باشد. از طرف دیگر احداث آب‌شیرین‌کن‌های متمرکز با ظرفیت بالا به دلیل مساحت بالای استان خراسان رضوی، علاوه بر هزینه‌های مربوط به انتقال آب، نشتی‌های اجتناب‌ناپذیر خطوط لوله را به همراه دارد.

فرایند جداسازی غشایی اقتصادی‌ترین گزینه شیرین‌سازی و تصفیه آب‌های شور در ظرفیت‌های مختلف می‌باشد. فناوری اسمز معکوس به دلیل قابلیت طراحی و اجرای مدولار امکان احداث آب‌شیرین‌کن با ظرفیت‌های مختلف را به‌صورت غیرمتمرکز فراهم می‌کند.

بهره‌گیری از سامانه‌های خورشیدی فوتوولتاییک منفصل از شبکه، امکان احداث آب‌شیرین‌کن های صنعتی غیرمتمرکز را در شهرهای دورافتاده و کم‌برخوردار فراهم می‌کند. مزرعه خورشیدی فوتوولتایک به همراه انرژی ذخیره شده در باتری‌ها، انرژی موردنیاز آب‌شیرین‌کن را برای کارکرد ۲۴ ساعته فراهم می‌کند.

براورد هزینه سرمایه گذاری اولیه طراحی و ساخت آب شیرین کن کانتینری با احتساب هزینه بالاسری و راه اندازی برای تولید آب آشامیدنی با ظرفیت ۱۲۰،۰۰۰ لیتر در شبانه روز در شهر تربت جام برابر با ۱۱۹،۵۰۰ دلار است. براورد هزینه سرمایه گذاری اولیه مزرعه خورشیدی فوتوولتاییک منفصل از شبکه در شهر تربت جام با ظرفیت متناسب با احتساب هزینه‌های طراحی، نصب، راه اندازی، بالاسری و آموزش بهره برداری برابر با ۱۹۹،۵۰۰ دلار می‌باشد.

نتایج امکان‌سنجی اولیه احداث آب‌شیرین‌کن‌های غیرمتمرکز خورشیدی در استان خراسان رضوی نشان می‌دهد که باتوجه‌به امکان احداث سریع آب شیرین‌های خورشیدی با ظرفیت پایین، امکان به‌کارگیری این فناوری در شهرهای دورافتاده و دارای محدودیت دسترسی مناسب به شبکه برق سراسری وجود دارد. احداث نیروگاه‌های کوچک خورشیدی که سیاست‌های وزارت نیرو برای افزایش تولید انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد، می‌تواند علاوه بر کاهش گازهای گلخانه‌ای به پایدارسازی شبکه سراسری کمک کند.

مراجع

[۱] Oliver Roy P. Mangosing, Harvey Jade T. Ang, Kirk Angelo Manuel L. Galarrita, Sanny Jay R. Sable, Pamela Mae L. Ucab, Hercules R. Cascon, Techno-economic analysis on the production of domestic water using solar-driven membrane seawater desalination device in the Philippines, Case Studies in Thermal Engineering Journal, ۲۰۲۳

[۲] Anang Bhagwati [a], Manan Shah [b,*], Mitul Prajapati, Emerging technologies to sustainability: A comprehensive study on solar desalination for sustainable development, Sustainable Manufacturing and Service Economics Journal, ۲۰۲۳

[۳] Agustín M. Delgado-Torres, Lourdes García-Rodríguez, Off-grid SeaWater Reverse Osmosis (SWRO) desalination driven by hybrid tidal range/solar PV systems: Sensitivity analysis and criteria for preliminary design, Sustainable Energy Technologies and Assessments journal, ۲۰۲۲

[٤] Mudhar A. Al-Obaidi, Kouther Hasheem Rasn, S.H. Aladwani, Flexible design and operation of multi-stage reverse osmosis desalination process for producing different grades of water with maintenance and cleaning opportunity, Chemical Engineering Research and Design Journal, ۲۰۲۲

[٥] S.H. Aladwani, M.A Al-obaidi, I.M. Mojtaba, Performance of reverse osmosis based desalination process using spiral wound membrane: Sensitivity study of operating parameters under variable seawater conditions, Cleaner Engineering and Technology Journal, ۲۰۲۱

[٦] Jane Kucera, Reverse Osmosis, Design, Processes and Application for Engineers, ISBN ۹۷۸-۰-٤۷۰-٦۱۸٤۳۱,۲۰۱۰