

بررسی تجربی عملکرد یک سامانه‌ی نمک‌زدایی MSF متصل به متمرکزکننده خورشیدی سهموی بشقابی

علی بابایی بزاز^۱، شیوا گرجیان^{۲*}

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم،

(ali.babaebazaz@modares.ac.ir)

۲. استادیار، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم،

(Gorjian@modares.ac.ir)

چکیده

در سالیان اخیر با توجه افزایش تقاضای جوامع در حال توسعه برای آب و انرژی، توجه ویژه‌ای به تولید این دو به صورت پایدار شده است. استفاده از سوخت‌های فسیلی به منظور پاسخ به این تقاضا به دلیل مشکلات زیست محیطی و افزایش قیمتی که به همراه دارند امری غیرمنطقی، پرخطر و هزینه بر است. بنابراین برای پاسخ به تقاضای آب و انرژی باید به دنبال استفاده از دیگر منابع انرژی و فناوری‌های جدید بود. استفاده از انرژی خورشیدی به‌عنوان در دسترس‌ترین انرژی تجدیدپذیر به منظور نمک‌زدایی خورشیدی می‌تواند یک روش پایدار برای تولید آب آشامیدنی باشد. بنابراین در این پژوهش یک سامانه نمک‌زدایی MSF دو مرحله‌ای متصل به متمرکزکننده خورشیدی سهموی بشقابی به عنوان منبع گرمایش آب شور، طراحی، ساخته و ارزیابی شد. سپس عملکرد متمرکزکننده از دو دیدگاه انرژی و اگسرژی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش دبی آب شور ورودی به متمرکزکننده از ۰/۷ به ۱/۳ لیتر بر دقیقه، میزان آب نمک‌زدایی شده به اندازه ۷۶/۴ درصد کاهش می‌یابد. همچنین اثر ایجاد فشار منفی بر عملکرد سامانه بررسی شد که طبق نتایج بدست آمده، کاهش فشار هوا در سامانه در بهترین حالت باعث افزایش ۸۲/۹۸ درصدی آب گردید. بازده اگسرژی متمرکزکننده در بهترین حالت برابر با ۱/۲۹ درصد محاسبه شد.

کلمات کلیدی:

آب و انرژی، روش پایدار، نمک‌زدایی خورشیدی، متمرکزکننده خورشیدی، بازده اگسرژی.

*نویسنده مسئول

بررسی تجربی عملکرد یک سامانه نمک‌زدایی MSF متصل به متمرکزکننده خورشیدی سهموی

بشقابی

۱- مقدمه

از دیرباز تا کنون انسان‌ها در کنار آب می‌زیستند. به طوری که اولین جوامع انسانی همواره در کنار رودخانه‌ها و منابع آب به‌وجود می‌آمدند. آب در زندگی انسان‌ها، گیاهان و سایر موجودات از اهمیت بسیار ویژه‌ای برخوردار است. با رشد و صنعتی شدن کشورها، تقاضا برای آب مورد نیاز کشاورزی و آب آشامیدنی در حال افزایش است و محدودیت شدید منابع آب آشامیدنی باعث شده تا جوامع بین‌المللی به دنبال منابع دیگری به منظور تامین آب مورد نیاز خود باشند [14]. طبق پیش‌بینی سازمان ملل متحد، تا سال ۲۰۲۵ در حدود ۱۸۰۰ میلیون نفر در سرتاسر جهان دچار مشکل کمبود آب خواهند شد [5]. در حال حاضر یکی از بهترین روش‌های حل مشکل کم‌آبی، استفاده از آب شور دریاها می‌باشد. امروزه در کشورها و مناطقی که با کمبود آب مواجه هستند، نمک‌زدایی آب‌های شوری مانند آب‌های اقیانوس‌ها و آب‌های لب‌شور موجود در دریاچه‌ها و منابع دیگر، در حال انجام است.

نمک‌زدایی حرارتی آب شور فرآیندی است که به انرژی زیادی نیاز دارد. طبق بررسی‌های صورت گرفته، تخمین زده شده است که به منظور نمک‌زدایی یک میلیون مترمکعب آب در روز، سالانه به مقدار ۱۰ میلیون تن نفت مصرف می‌شود [12]. مشکلات زیست محیطی ایجاد شده توسط سوخت‌های فسیلی و همچنین افزایش روز افزون قیمت آن‌ها باعث شده تا استفاده از این نوع سوخت‌ها نگرانی‌هایی را در جوامع بین‌الملل بوجود آورد. از سوی دیگر در حال حاضر سامانه‌های مبتنی بر انرژی که از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌کنند، نسبت به سامانه‌هایی که از انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده می‌کنند، از نظر اقتصادی به‌صرفه تر هستند. اما پیش‌بینی می‌شود با کاهش قیمت فناوری‌های مربوط به انرژی‌های تجدیدپذیر در دهه‌های اخیر، برخی از این نوع انرژی‌ها از نظر اقتصادی توان رقابت با سوخت‌های فسیلی را در آینده نزدیک بدست آورند [3]. از میان انواع انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی تا به امروز فراوان‌ترین منبع انرژی تجدیدپذیر بوده و بالاترین عملکرد فنی ممکن (در حدود 60 Terawatt) را در بین انواع دیگر منابع انرژی تجدیدپذیر دارد [2].

کشور ایران نیز در سال‌های اخیر دچار مشکل کمبود آب شده است. خشکسالی‌های پی در پی و همزمان برداشت بیش از حد آب از منابع آبی کشور و همچنین احداث بی‌رویه سدها باعث شده تا بحران آب در ایران تشدید شود. با توجه به تابش مناسب و همچنین دسترسی به منابع آب شور در شمال و جنوب ایران، استفاده از سامانه‌های نمک‌زدایی حرارتی خورشیدی منطقی به نظر می‌رسد.

تا به امروز پژوهش‌های بسیاری بر روی استفاده از انرژی خورشیدی در فرآیندهای نمک‌زدایی صورت گرفته است. پاکسلی و همکاران فن‌آوری‌های نمک‌زدایی خورشیدی را مورد بررسی قرار دادند. امکان‌سنجی‌های محیطی و اقتصادی بر روی سامانه‌های نمک‌زدایی خورشیدی صورت گرفتند. همچنین، در پژوهش انجام شده کمبود منابع آب، منابع آب شور و سطوح تابش خورشید در نقاط مختلف جهان، با استفاده از روش همبستگی، رده‌بندی شدند [13]. چاندارشکا و یاداو سامانه‌های نمک‌زدایی حرارتی خورشیدی را بررسی کردند و گزارش کردند که سامانه‌های MSF^۱ و MED^۲ از بازدهی بالایی با توجه به هزینه‌شان برخوردار هستند و همچنین گزارش کردند که آب شور می‌تواند حتی در دمای پایین‌تر از ۴۰°C، تا ۳۹ مرحله^۳، تبخیر شود که باعث افزایش تولید آب نمک‌زدایی شده می‌شود [10].

نافی و همکاران یک سامانه‌ی تک‌مرحله‌ای تبخیر ناگهانی خورشیدی در مقیاس آزمایشگاهی ساخته و ارزیابی کردند. این سامانه از کلکتورهای خورشیدی از نوع صفحه تخت با مساحت تقریبی ۲/۳۹ m² و یک و محفظه تبخیر ناگهانی عمودی تشکیل شده بود. همچنین

¹ Multi-stage flash

² Multiple-effect distillation

³ Stage

آن‌ها یک مدل ریاضی برای این سامانه، به منظور بررسی داده‌های بدست آمده تعریف کردند. میزان متوسط آب تولید شده در ماه‌های دسامبر تا ژانویه (زمستان) به صورت میانگین برابر با $1/45 - 1/04$ kg/day/m² و در ماه‌های جولای تا آگوست (تابستان) برابر با $4/7 - 2$ بود. نسبت کارایی در زمستان در بین $0/7 - 0/8$ و در تابستان در حدود $0/9 - 0/8$ بود. آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزایش میزان تابش خورشید، کارایی سامانه افزایش می‌یابد. همچنین نتایج بدست آمده، مطابقت خوبی با نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های ریاضی داشتند [11]. کابیل و الصاید کاربرد یک سامانه‌ی تبخیر ناگهانی مقیاس کوچک تک‌مرحله‌ای متصل به یک کلکتور خورشیدی مجهز به نانو سیال به عنوان منبع حرارتی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در این پژوهش تاثیر دمای آب ورودی و همچنین دمای آب خنک‌کننده را بر کارایی سامانه بررسی کردند. نتایج نشان دادند که سامانه می‌تواند $7/7$ l/m²/day آب تولید کند و مقدار ضریب عملکرد برابر $1/058$ بدست آمد. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که سطح کلکتور خورشیدی نقش زیادی بر کم کردن هزینه‌ی آب تولید شده دارد. همچنین، افزایش حجم ذره‌های نانو در سیال موجود در سیکل کلکتور خورشیدی، تاثیر به‌سزایی بر افزایش تولید آب نمک‌زدایی شده و کاهش هزینه‌ها دارد [9]. هانشیک و همکاران نیز به منظور ارزیابی طراحی و بهبود عملکرد یک سامانه نمک‌زدایی MSF، مطالعه‌ای بر روی یک سامانه موجود انجام دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که با افزایش میزان بیشینه دمای آب شور ورودی به سامانه، کارایی سامانه افزایش یافته و همچنین میزان مصرف انرژی ویژه کاهش خواهد یافت [8].

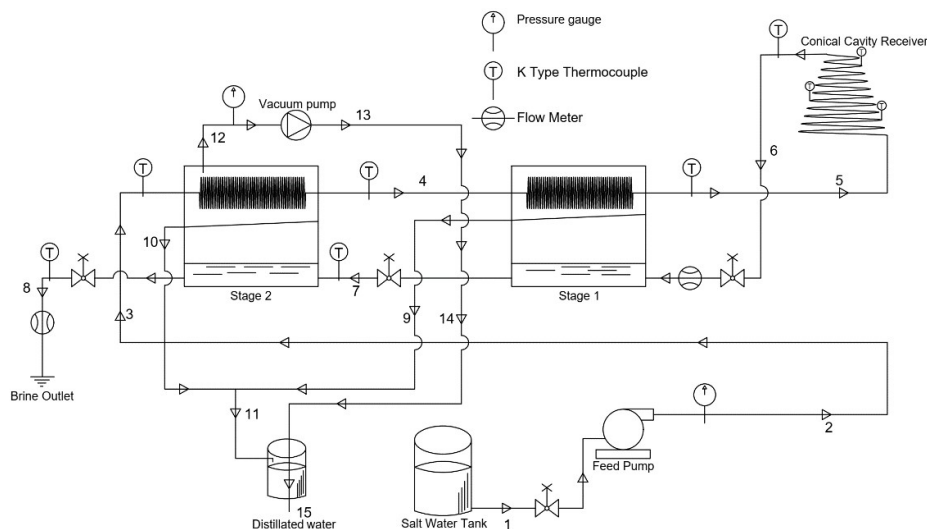
چیوکولانتی و همکاران به بررسی یک سامانه‌ی نمک‌زدایی حرارتی تک‌مرحله‌ای متصل به متمرکزکننده‌ی خورشیدی از نوع نقطه‌ای پرداختند. متمرکزکننده‌ی آن‌ها از 25 آینه‌ی شش ضلعی با مساحت کل $9/5$ m² ساخته شده بود. به منظور ارزیابی بهتر سامانه، آن‌ها سامانه خود را در سه نقطه مختلف مدیترانه‌ای بررسی کردند. بیشترین میزان آب نمک‌زدایی شده سامانه آن‌ها در حدود 75 l/day بود. نتایج حاصل از پژوهش نشان دادند که یکی از مهم‌ترین عوامل در کارایی سامانه، میزان تابش مستقیم خورشید است [4]. داراوش و همکاران نیز یک سامانه‌ی نمک‌زدایی تقطیر ناگهانی تحت خلاء دو مرحله‌ای را مورد ارزیابی قرار دادند. متمرکزکننده این سامانه از نوع صفحه تخت و به مساحت $3/46$ m² بود. نتایج این تحقیق نشان داد که با کاهش 20 درصدی فشار هوای درون محفظه‌های تبخیر ناگهانی، نسبت تقطیر به تبخیر در حدود 53 درصد افزایش و مصرف ویژه انرژی در حدود 35 درصد کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها دریافتند که بهترین نسبت تقطیر به تبخیر برابر با $0/42$ با میزان آب ورودی به مقدار $0/5$ l/min است [5].

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تا کنون پژوهشی بر روی سامانه‌های نمک‌زدایی حرارتی MSF متصل به متمرکزکننده‌های سهموی بشقابی صورت نگرفته است. بنابراین در پژوهش صورت گرفته، یک سامانه نمک‌زدایی حرارتی دو مرحله‌ای MSF در مقیاس آزمایشگاهی طراحی، ساخته و مورد ارزیابی قرار گرفت. ارزیابی سامانه طی شش روز و با سه سطح دبی متفاوت آب شور ورودی صورت گرفت. به منظور بررسی اثر ایجاد فشار منفی بر افزایش کارایی سامانه، نیمی از مدت زمان ارزیابی سامانه در حالت عادی و نیمی دیگر با ایجاد فشار منفی صورت گرفت. همچنین بازده انرژی و اگسرژی متمرکزکننده خورشیدی نیز بررسی شد.

۲- مواد و روش‌ها

در سامانه MSF استفاده شده در این پژوهش آب شور ورودی به مجموعه نمک‌زدایی، ابتدا از چگالنده آخرین مرحله وارد سامانه شده و ضمن پیش گرم شدن از چگالنده اولین مرحله خارج می‌شود. همچنین به دلیل کم‌تر بودن دمای آب جاری در لوله‌های چگالنده، این عمل باعث میعان بخار موجود در هر مرحله بر روی سطح لوله‌های چگالنده شده تا بتوان آن را به‌عنوان آب نمک‌زدایی شده (محصول نهایی) توسط سینی‌های جمع‌آوری از سامانه خارج کرد. سپس آب شور خروجی از چگالنده مرحله اول به منظور رسیدن به بیشینه دما وارد متمرکزکننده خورشیدی شده و پس از خروج از آن به صورت آزادانه وارد قسمت حوضچه شورآبه هر مرحله شده و سپس از سامانه خارج

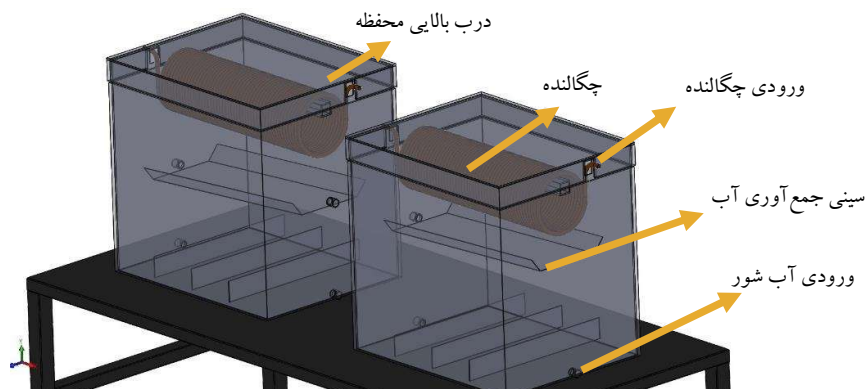
می‌شود، شکل (۱). در این روش برخلاف روش‌هایی که لوله‌های داغ در زیر آب درون حوضچه‌های آب شور قرار دارند، احتمال ایجاد رسوب بسیار کم‌تر است [6].



شکل ۱- شماتیک کلی سامانه نمک‌زدایی

۱-۲- سامانه نمک‌زدایی

سامانه نمک‌زدایی ساخته شده دارای دو مرحله می‌باشد که هر کدام از آن‌ها شامل قسمت‌هایی نظیر روزنه‌های ورودی، خروجی، محفظه‌ی آب شور، سینی جمع‌آوری آب نمک‌زدایی شده و لوله‌های مسی چگالنده می‌باشند. بدنه هر مرحله از ورق گالوانیزه به ضخامت ۴ mm و با ابعاد ۵۰ cm طول، ۴۰ cm عرض و ۵۰ cm ارتفاع ساخته شد. به منظور کاهش پیچیدگی و استفاده کمتر از انرژی، سینی‌های جمع‌آوری آب با شیب ۱۰° درون هر مرحله قرار گرفتند تا نیاز به پمپ جمع‌آوری آب تولید شده برطرف شود. در هر مرحله و در قسمت بالایی آن لوله‌های مسی به‌عنوان چگالنده قرار داده شد. لوله‌های مسی استفاده شد. به منظور ساخت چگالنده از لوله‌ای مسی، با قطر ۱۰ mm استفاده شد. لوله‌ی مسی پس از پیچیده شدن به شکل استوانه درون هر محفظه قرار گرفت. قطر استوانه‌ی چگالنده برابر با ۱۷ cm و طول آن به توجه به طول هر مرحله، ۴۵ cm در نظر گرفته شد شکل (۲). پس از ساخت و مونتاژ هر مرحله، تمامی شکاف‌های هر مرحله با استفاده از چسب سیلیکون پوشانده شدند تا دستگاه به صورت کامل آب‌بندی شود. همچنین به منظور جلوگیری از هدررفت گرمای درون محفظه‌های سامانه، محفظه‌ها با عایق به ضخامت ۶ mm پوشانده شدند.



شکل ۲- محفظه‌های طراحی شده سامانه نمک‌زدایی MSF

۲-۲- متمرکز کننده خورشیدی

افزایش دمای شورآبه ورودی به حوضچه‌های آب شور توسط یک متمرکز کننده سهموی بشقابی با کانون نقطه‌ای صورت گرفت. در این نوع از متمرکز کننده‌ها، پرتوهای خورشید بر گیرنده‌ای که در نقطه‌ی کانونی متمرکز کننده قرار دارد منعکس شده و باعث افزایش دمای سیال درون گیرنده می‌شوند. متمرکز کننده استفاده شده در این پژوهش دارای سیستم ردیاب خورشیدی دو محوره بود که با استفاده از سنسورهای LDR^۴ حرکت خورشید را دنبال می‌کرد.

همچنین به منظور انتقال حرارت خورشید به آب شور ورودی به سامانه نمک‌زدایی از یک گیرنده حفره‌ای مخروطی شکل استفاده شد. جنس این گیرنده از مس بوده که به منظور کاهش تلفات تابشی در داخل حفره‌ی گیرنده، سطح درونی آن توسط یک لایه نازک رنگ مشکی مات نسوز و مقاوم در برابر حرارت‌های بالا تا دمای ۶۵۰ °C پوشش داده شده است. جدول (۱) مشخصات متمرکز کننده خورشیدی و گیرنده مخروطی را نشان می‌دهند.

جدول ۱- مشخصات متمرکز کننده‌ی استفاده شده

مشخصات گیرنده مخروطی		مشخصات متمرکز کننده سهموی بشقابی	
مقدار	مشخصات	مقدار	مشخصات
۱۴۰	قطر دهانه‌ی گیرنده (mm)	۱/۸	قطر دهانه (m)
۱۴۰	طول حفره (mm)	۱/۳۵	فاصله کانونی (m)
۱۰	قطر بیرونی لوله (mm)	۰/۱۵	ارتفاع (m)
۸	قطر داخلی لوله (mm)	۳۶/۸۷	زاویه انحنای (درجه)
۱۲	گام لوله (mm)	۲/۶۱	مساحت سطح متمرکز کننده (m ^۲)
مس	جنس لوله	۲/۵۴	مساحت سطح دهانه متمرکز کننده (m ^۲)

^۴ Light Dependent Resistor

۳-۲- تحلیل انرژی و آگسرژی متمرکزکننده خورشیدی

اولین مرحله در بهبود کارایی یک سامانه حرارتی، عیب یابی و یافتن نقاط ضعف آن می‌باشد. تحلیل انرژی بر اساس قانون اول ترمودینامیک به صورت کامل از کیفیت انرژی چشم‌پوشی می‌کند و فقط مقدار انرژی را در نظر می‌گیرد. روش بهتر برای تحلیل انرژی، تحلیل آگسرژی می‌باشد که علاوه بر قانون اول ترمودینامیک، قانون دوم را نیز شامل می‌باشد. آگسرژی ورودی به متمرکزکننده‌ی خورشیدی برابر است با [7]:

$$Ex_{sun} = AI \left(1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right)^4 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right) \right) \quad (1)$$

که در رابطه (۱)، A ، مقدار سطح متمرکزکننده (m^2)، I مقدار تابش خورشید (W/m^2) و T_a و T_s به ترتیب دمای محیط و دمای خورشید برحسب K هستند که مقدار دمای خورشید برابر با $6000K$ در نظر گرفته شده است.

تابش خورشیدی که بر سطح متمرکزکننده می‌تابد به گرما تبدیل می‌شود. اما تمامی این گرما به آب درون متمرکزکننده منتقل نمی‌شود. آگسرژی ورودی از متمرکزکننده به آب درون متمرکزکننده برابر است با [1]:

$$Ex_{in} = Ex_{c,o} - Ex_{c,i} \quad (2)$$

که در رابطه‌ی (۲)، $Ex_{c,o}$ و $Ex_{c,i}$ به ترتیب برابر با آگسرژی جریان‌های ورودی و خروجی از متمرکزکننده‌ی خورشیدی هستند. به دلیل ثابت بودن دبی ورودی و خروجی از متمرکزکننده، رابطه (۲) را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$Ex_{in} = \dot{m}_{c,i} [h_{c,o} - h_{c,i} - T_0 (s_{c,o} - s_{c,i})] \quad (3)$$

مقادیر \dot{m}_c ، h_c و s_c در رابطه (۳) به ترتیب برابر با دبی جریان ورودی به متمرکزکننده، آنتالپی ویژه جریان، آنتروپی ویژه جریان و دمای محیط می‌باشند. با توجه به رابطه‌های (۱) و (۳) بازده آگسرژی متمرکزکننده برابر است با:

$$\eta_{II,c} = \frac{Ex_{in}}{Ex_{sun}} \times 100 \quad (4)$$

در یک متمرکزکننده‌ی خورشیدی، بازده انرژی برابر است با نسبت انرژی مفید بدست آمده از متمرکزکننده بر میزان تابش ورودی از خورشید بر سطح متمرکزکننده [1]:

$$\eta_{I,c} = \frac{\dot{m}CAT}{AI} \times 100 \quad (5)$$

در رابطه‌ی (۵)، مقادیر \dot{m} ، C و ΔT به ترتیب برابر با دبی جرمی (kg/s)، ظرفیت گرمایی ویژه ($J/Kg.K$) و اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی ($^{\circ}C$) از متمرکزکننده می‌باشند.

۲-۴- روش انجام آزمون و ابزار اندازه گیری

پس از ساخت سامانه نمک زدایی و اتصال آن به متمرکزکننده خورشیدی، ارزیابی کلی سامانه در دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس طی شش روز در تیرماه سال ۱۳۹۹ صورت گرفت (جدول ۲). در ارزیابی های صورت گرفته دبی آب شور ورودی به متمرکزکننده به ترتیب برابر ۰/۷، ۱ و ۱/۳ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شد. همچنین میزان شوری آب ورودی به سامانه نمک زدایی برابر ۴۰۰۰ ppm بود.

جدول ۲- شرایط آزمون در روزهای مختلف ارزیابی

آزمون های انجام شده						شرایط آزمون
آزمون شماره ۶	آزمون شماره ۵	آزمون شماره ۴	آزمون شماره ۳	آزمون شماره ۲	آزمون شماره ۱	
تاریخ انجام آزمون (سال ۱۳۹۹)	۳۰ تیرماه	۲۷ تیرماه	۲۴ تیرماه	۲۲ تیرماه	۲۱ تیرماه	۱۹ تیرماه
دبی آب شور ورودی (L.min ⁻¹)	۱/۳	۱	۰/۷	۱/۳	۱	۰/۷
افت فشار ایجاد شده (kPa)	۱۰	۱۰	۱۰	۰	۰	۰

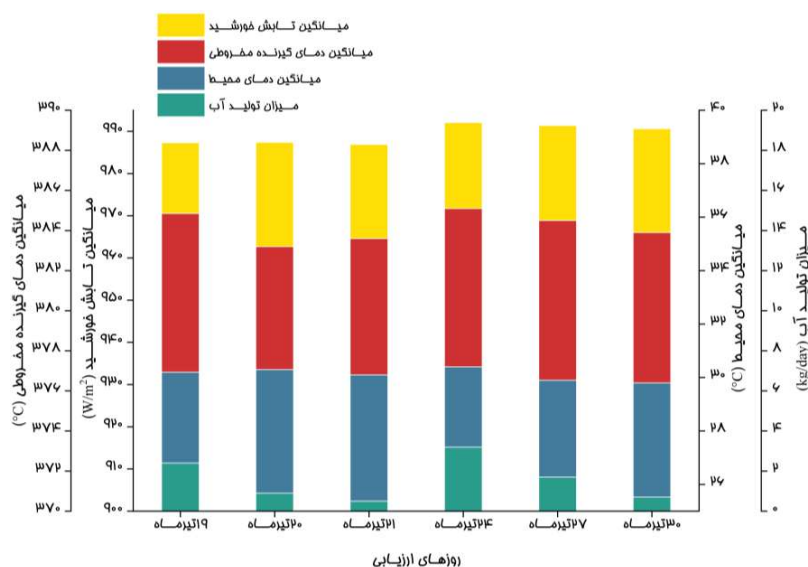
به منظور ارزیابی، مواردی از قبیل: دمای محیط، دمای آب در قسمت های مختلف سامانه، میزان تابش خورشید، سرعت باد و پارامترهای کیفی آب اندازه گیری شدند. در طول آزمون سنجش سرعت باد توسط سرعت سنج پره ای مدل AM-4221 ساخت شرکت Lutron و ثبت میزان تابش خورشید توسط سولارمتر مدل 1333R شرکت TES انجام شد. پارامترهای کیفی آب با استفاده از دستگاه سنجش کیفیت آب WA-2017SD ساخت شرکت Lutron صورت گرفت. دمای آب در شش نقطه از سامانه نمک زدایی و توسط دماسنج های نوع K اندازه گیری شد. به منظور جمع آوری و انتقال داده های دمایی به رایانه، از یک برد Arduino UNO و ماژول های MAX6675 استفاده شد. گردش آب در کل مسیر سامانه توسط یک پمپ تک فاز با قدرت ۰/۵ hp صورت گرفت. همچنین به منظور بررسی تاثیر فشار هوای منفی بر افزایش عملکرد سامانه، در نیمی از روزهای آزمون فشار هوای درون مرحله دوم تا ۱۰kPa- کاهش یافت. کاهش فشار هوا توسط پمپ خلاء مدل DV-42N با قدرت ۱/۲ hp، ساخت شرکت Platinum ایجاد شد.



شکل ۳- نمای کلی سامانه نمک زدایی ساخته شده

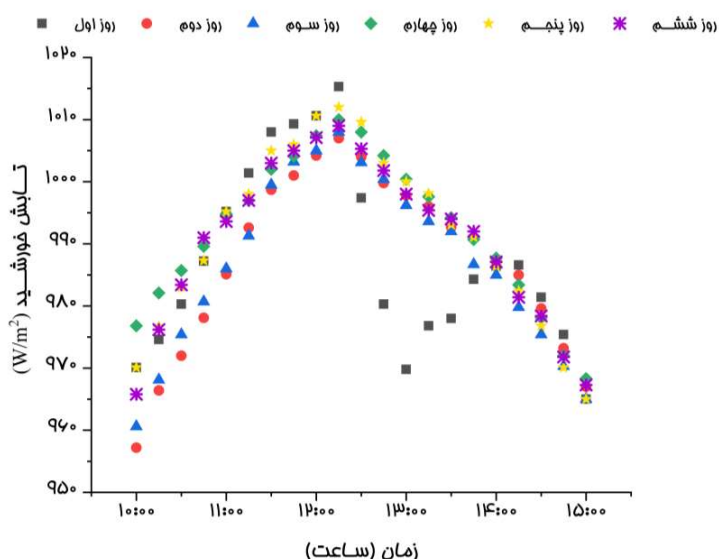
۳- نتایج و بحث

شکل (۴) نشان دهنده میانگین مقادیر اندازه گیری شده عوامل محیطی، میانگین دمای گیرنده حفره ای مخروطی و تولید روزانه آب توسط سامانه می باشد. همانطور که در شکل (۴) مشخص است، افزایش دبی جریان آب شور ورودی به سامانه و ایجاد فشار منفی تاثیر مستقیمی بر مقدار تولید آب دارد. با افزایش دبی آب شور ورودی از ۰/۷ به ۱/۳ لیتر بر دقیقه، مقدار آب تولیدی به میزان ۷۶/۴ درصد کاهش داشته است. همچنین فشار منفی ایجاد شده در سامانه در بهترین حالت (دبی ورودی ۱ لیتر بر دقیقه)، باعث افزایش مقدار تولید آب به میزان ۸۲/۹۸ درصد شده است.



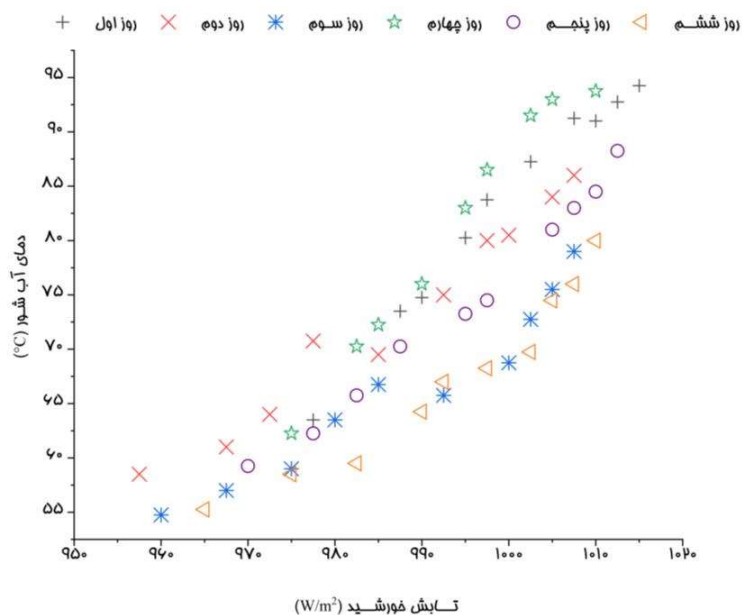
شکل ۴- میانگین دماهای عوامل محیطی ثبت شده و آب تولید شده طی شش روز ارزیابی

شکل های (۵) و (۶) به ترتیب میزان تابش مستقیم ثبت شده طی شش روز و میزان افزایش دمای آب شور خروجی از متمرکز کننده تا میانه روز را نشان می دهند.



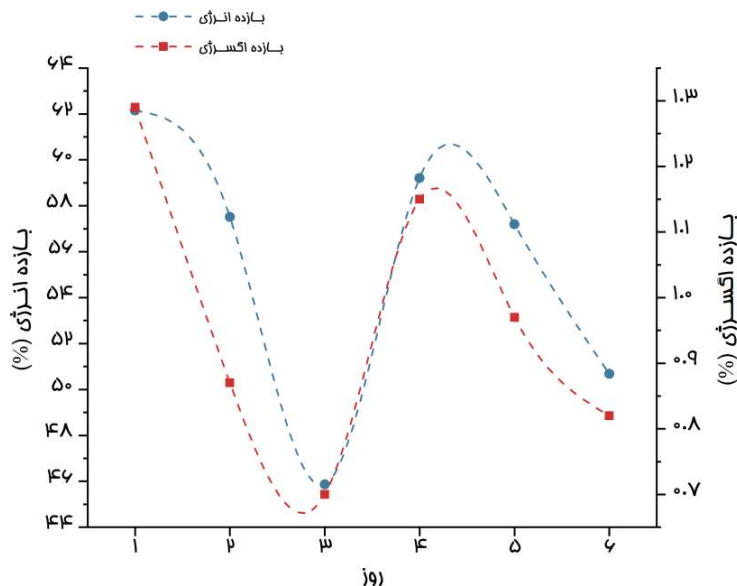
شکل ۵- میزان تابش مستقیم خورشید در طی شش روز آزمون

در طی مدت ارزیابی سامانه، بیشترین میزان تابش خورشیدی ثبت شده در میانه روز (ساعت ۱۲:۱۵) اتفاق افتاد. بیشترین میزان تابش ثبت شده میانه‌روز، در روز اول و برابر با $1015/3 \text{ W/m}^2$ و کمترین مقدار در روز دوم و برابر 1007 W/m^2 ثبت شد. اگرچه متغیرهای محیطی تأثیر به‌سزایی در عملکرد کلی یک سامانه خورشیدی دارند، با این حال طی ارزیابی‌هایی که صورت گرفت، مشاهده شد که تغییرات عواملی همچون دمای محیط و میزان وزش باد تأثیر چندانی بر عملکرد سامانه نداشتند. طبق بررسی‌های صورت گرفته، بیشترین تأثیر بر عملکرد سامانه نمک‌زدایی خورشیدی را تابش مستقیم خورشید داشت (شکل ۶).



شکل ۶- نسبت افزایش دمای آب شور خروجی از متمرکزکننده به میزان تابش مستقیم خورشید طی روزهای مختلف

میانگین بازده انرژی و اگسرژی متمرکزکننده خورشیدی در شکل (۷) نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است، بیشترین بازده انرژی و اگسرژی سامانه در طی شش روز ارزیابی در روز اول و به ترتیب برابر $62/15$ و $1/29$ درصد می‌باشند. درصد بسیار پایین اگسرژی نسبت به انرژی در متمرکزکننده نشان‌دهنده وجود ظرفیت بالایی به منظور بهبود کارایی متمرکزکننده است.



شکل ۲- بازده انرژی و آگسزوی متمرکزکننده طی شش روز ارزیابی

با توجه به شکل (۷) و روابط (۱) تا (۵)، مشاهده می‌شود که میزان تابش خورشیدی و دبی آب در جریان در متمرکزکننده‌ی خورشیدی، از مهم‌ترین عواملی هستند که بر میزان بازده حرارتی متمرکزکننده تاثیر دارند. بنابراین بهینه‌سازی دبی جریان آب ورودی به متمرکزکننده منظور دستیابی به دمای‌های کاری بالاتر از اهمیت بالایی در افزایش راندمان حرارتی سامانه برخوردار است. لازم به ذکر است که عوامل موثر بر راندمان حرارتی یک سامانه محدود به عوامل بررسی شده در پژوهش حاضر نبوده و عوامل دیگری همچون تغییرات دمای محیط، سرعت باد، نحوه ساخت سامانه، عایق بندی مناسب و... بر عملکرد کلی سامانه تاثیر می‌گذارند که در این پژوهش بررسی نشده‌اند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک سامانه نمک‌زدایی MSF دو مرحله‌ای در مقیاس آزمایشگاهی طراحی، ساخته و ارزیابی شد. همچنین تاثیر دبی‌های مختلف آب شور ورودی و ایجاد فشار منفی بر عملکرد سامانه بررسی شده است. سپس تحلیل عملکرد متمرکزکننده سهموی بشقابی بر اساس دو دیدگاه انرژی و آگسزوی صورت گرفت. با توجه به نتایج ارزیابی سامانه طی روزهای مختلف مشاهده شد که مهم‌ترین عامل بر افزایش دمای آب شور خروجی از متمرکزکننده، میزان تابش مستقیم خورشید می‌باشد. همچنین دبی آب شور ورودی به متمرکزکننده نیز یکی دیگر از عوامل تاثیرگذار بر افزایش دمای آب شور درون متمرکزکننده می‌باشد. به طوریکه با افزایش دبی آب، میزان افزایش دمای آن کاهش می‌یابد.

همچنین بررسی فرآیند نمک‌زدایی خورشیدی در پژوهش حاضر، اهمیت وجود یک سامانه ذخیره حرارتی را به منظور کنترل دقیق بیشینه دمای آب شور ورودی به سامانه نمک‌زدایی و افزایش زمان کارکرد سامانه در طول روز را نشان می‌دهد. برخی دیگر از نتایج این پژوهش به صورت زیر بیان می‌شوند:

- بیشترین دمای آب شور خروجی از متمرکزکننده تا میانه روز، در روز اول (دبی 0.7 lit/min) برابر $94/25^\circ\text{C}$ ثبت شد. همچنین کمترین دمای ثبت شده تا میانه روز، در روز سوم (دبی $1/3 \text{ lit/min}$) برابر با 79°C ثبت شد.
- بیشترین مقدار تولید آب نمک‌زدایی شده توسط سامانه در حالت‌های ایجاد فشار منفی و بدون ایجاد فشار منفی به ترتیب روز اول و چهارم برابر با $2/43 \text{ lit}$ و $3/22 \text{ lit}$ در طی ۵ ساعت ارزیابی بوده است. و بیشترین میزان تابش مستقیم در این دو روز به ترتیب برابر با 1010 W/m^2 و $1015/3 \text{ W/m}^2$ ثبت شد.
- با تغییر دبی آب از 0.7 lit/min به $1/3 \text{ lit/min}$ ، میزان آب نمک‌زدایی شده به اندازه $76/4$ درصد کاهش داشت.
- افت فشار ایجاد شده در بهترین حالت باعث افزایش $82/98$ درصدی آب نمک‌زدایی شد.
- بیشترین مقدار بازده انرژی و آگسرژی ثبت شده برای متمرکزکننده خورشیدی در روز اول و به ترتیب برابر $62/15\%$ و $1/29\%$ ثبت شدند.

مراجع

- [1] Banat, F., Jwaied, N. 2008. Exergy analysis of desalination by solar-powered membrane distillation units. *Desalination*. 230:27–40.
- [2] Blanco, J., Malato, S., Fernandez-Ibanez, P., Alarcón, D., Gernjak, W., Maldonado, M. 2009. Review of feasible solar energy applications to water processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13:1437–1445.
- [3] Calise, F., d'Accadia, M. D., Piacentino, A. 2015. Exergetic and exergoeconomic analysis of a renewable polygeneration system and viability study for small isolated communities. *Energy*. 92:290–307.
- [4] Cioccolanti, L., Renzi, M. 2018. Coupling a small-scale concentrated solar power plant with a single effect thermal desalination system: Analysis of the performance. *Applied Thermal Engineering*. 143:1046–1056.
- [5] Darawsheh, I., Islam, M. D., Banat, F. 2019. Experimental characterization of a solar powered MSF desalination process performance. *Thermal Science and Engineering Progress*. 10:154–162.
- [6] El-Dessouky, H. T., Ettouney, H. M. 2002. Chapter 6 - Multi-Stage Flash Desalination. In *Fundamentals of Salt Water Desalination*, eds El-Dessouky, H. T. and Ettouney, H. M., pp 271–407. Elsevier Science B.V., Amsterdam.
- [7] Gholamalizadeh, E., Chung, J. D. 2017. Exergy analysis of a pilot parabolic solar dish-Stirling system. *Entropy*. 19:509.
- [8] Hanshik, C., Jeong, H., Jeong, K.-W., Choi, S.-H. 2016. Improved productivity of the MSF (multi-stage flashing) desalination plant by increasing the TBT (top brine temperature). *Energy*. 107:683–692.
- [9] Kabeel, A. E., El-Said, E. M. S. 2014. Applicability of flashing desalination technique for small scale needs using a novel integrated system coupled with nanofluid-based solar collector. *Desalination*. 333:10–22.
- [10] M., C., Yadav, A. 2017. Water desalination system using solar heat: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 67.:1308–1330.
- [11] Nafey, A. S., Mohamad, M. A., El-Helaby, S. O., Sharaf, M. A. 2007. Theoretical and experimental study of a small unit for solar desalination using flashing process. *Energy Conversion and Management*. 48:528–538.
- [12] Nematollahi, F., Rahimi, A., Gheini, T. T. 2013. Experimental and theoretical energy and exergy analysis for a solar desalination system. *Desalination*. 317:23–31.
- [13] Pugsley, A., Zacharopoulos, A., Mondol, J. D., Smyth, M. 2016. Global applicability of solar desalination. *Renewable Energy*. 88:200–219.
- [14] Shekarchi, N., Shahnia, F. 2019. A comprehensive review of solar-driven desalination technologies for off-grid greenhouses. *International Journal of Energy Research*. 43:1357–1386.

Experimental evaluation of an MSF desalination plant coupled with solar parabolic dish concentrator

Ali Babaebazaz¹, Shiva Gorjian^{2*}

1- Department of Biosystems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Assistant professor, Department of Biosystems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract

In recent years, due to the increasing demand for energy and water in developing societies, particular attention has been paid to the sustainable production of these two. Utilizing fossil fuels to meet this demand is unreasonable, risky, and costly due to environmental problems and rising prices. Therefore, to satisfy the need for water and energy, we must seek to use other energy sources and technologies. Using solar energy as the most available renewable energy for solar desalination can be a sustainable way to produce drinking water. So, in this study, a two-stage MSF desalination plant coupled to a solar parabolic dish concentrator as a source of saltwater heating was designed, built, and evaluated. Then the solar concentrator performance was examined from two perspectives of energy and exergy. The results showed that by raising the flow rate of saline water to the concentrator from 0.7 to 1.3 lit/min, the amount of desalinated water decreased by 76.4 %. Furthermore, the effect of creating negative pressure on system performance was investigated. According to the results, reducing the air pressure by -10 kPa in the system at best caused an 82.98% increase in water production rate. Also, the exergy efficiency of the concentrator was calculated to be 1.29% at best.

Key words: Water and Energy, Sustainable way, Solar desalination, Solar concentrator, Exergy efficiency.

*Corresponding author

E-mail: Gorjian@modares.ac.ir