نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۳/ شماره ۱/ پیاپی ۳۰/ بهار ۱۴۰۳ (۱۱۵-۱۲۵)
https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2024.14421.663

مقاله پژوهشی

ارزیابی، تجزیه و تحلیل قابلیت بازیافت پساب‌های صنایع غذایی با استفاده از انرژی خورشیدی

مراد آبسته[۱]، عارف مردانی کرانی[۲*] و آرش محبی[۳]

چکیده

در این مطالعه به بررسی امکان به کارگیری انرژی خورشیدی برای بازیافت پساب صنایع غذایی در منطقه آذربایجان غربی پرداخته شد. روش تقطیر پساب به‌عنوان اساس کار فرض شد و سامانه‌ای برای تقطیر پساب با استفاده از گرمایش برگرفته از یک مبدل حرارتی خورشیدی طراحی و ساخته شد. در طراحی دستگاه سعی شد منبع انرژی دیگری برای جریان یافتن آب در سامانه لازم نباشد. دستگاه برای انجام آزمون‌های اولیه و برآورد عملکرد به یک المنت برقی برای گرم کردن آب مجهز گردید. آزمون‌هایی برای تخمین ظرفیت عملکرد دستگاه در چهار سطح دمای پساب ورودی (به نمایندگی از چهار سطح دمای محیط در فصل‌های مختلف) و همچنین سه سطح توان حرارتی تبخیر آب به انجام رسید. نتایج حاکی از افزایش عملکرد تقطیر با افزایش دمای اولیه پساب و همچنین افزایش توان حرارتی دستگاه بود. با تطبیق شرایط تابش در منطقه مورد مطالعه بر اساس داده‌های هواشناسی و نتایج آزمون دستگاه با المنت برقی در نهایت ظرفیت تقطیر دستگاه برای ماه‌های مختلف سال پیش‌بینی گردید. بر اساس یافته‌های تحقیق، بیشترین ظرفیت تقطیر روزانه دستگاه در تیرماه و در حدود ۵۰ لیتر پیش‌بینی شد. ظرفیت سالانه دستگاه نیز در حدود ۱۰۰۰۰ لیتر تخمین زده شد که با توجه به اهمیت تصفیه پساب از نظر زیست محیطی و همچنین مزایای اقتصادی در به کارگیری انرژی رایگان خورشید، قابل توجه به نظر می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: انرژی خورشیدی، تصفیه پساب، تقطیر خورشیدی، آب شیرین‌کن.

ارجاع: آبسته م. مردانی کرانی ع. و محبی آ. ۱۴۰۳. ارزیابی، تجزیه و تحلیل قابلیت بازیافت پساب‌های صنایع غذایی با استفاده از انرژی خورشیدی. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۳۰: ۱۱۵-۱۲۵. https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2024.14421.663

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه.
۲- دانشیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه.
۳- استادیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه.
* **نویسنده مسئول**: **a.mardani@urmia.ac.ir**
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰

مقدمه

آب ماده حیاتی است که به‌طور یکنواخت در سطح کره زمین موجود نیست و نقاط مختلف کره زمین با کمبود آب مواجه هستند. همچنین وجود آلاینده‌ها در محیط‌های آبی رو به افزایش است. این امر در نتیجه خروج بی‌رویه پساب‌های صنعتی و ریختن تصادفی و نشت مخازن حاوی مواد آلاینده است.

در دهه‌های اخیر به دلیل کمبود شدید آب قابل آشامیدن به خصوص در کشورهایی نظیر ایران که در مناطق خشک و نیمه‌خشک واقع شده‌اند و همچنین جهت تأمین آب مورد نیاز با استانداردهای کیفی مشخص، از سامانه شیرین‌کن‌های آب به میزان وسیعی استفاده می‌گردد. انسان در تاریخ حیات خود ضمن آشنایی با آب و خواص آن به این نکته پی برد که می‌توان از آب به‌عنوان یک ماده پاک‌کننده استفاده کند. هر چند با دفع آلودگی‌ها توسط آب، کمک بزرگی در بقای بشر شد، اما از طرف دیگر مشکل دیگری به وجود آمد و آن تجمع آب‌های آلوده و اصطلاحاً فاضلاب بود. رهاسازی این فاضلاب‌ها در کنار محل سکونت جوامع بشری، محل مناسبی برای حیات، رشد و تکثیر انواع تک‌سلولی‌ها مانند میکروب‌ها، باکتری‌ها و ویروس‌ها شد. با ازدیاد جمعیت و صنعتی شدن زندگی بشری، انواع فاضلاب‌های خطرناک و صنعتی وارد رودخانه‌ها و دریاها شد و باعث نابودی آبزیان و زیست‌بوم آن‌ها گردید، به‌طوری‌که تا به امروز این مشکل کماکان ادامه دارد و دریاها و رودخانه‌ها توانایی تصفیه فاضلاب‌ها را ندارند (Monzavi, 1994). به این دلیل، انسان پی برد که باید فاضلاب را تصفیه کرده تا از زیان‌های آن بکاهد. یکی از اهداف تصفیه فاضلاب را می‌توان استفاده مجدد از پساب جهت مصارف کشاورزی، فضای سبز، مصارف تفریحی، پرورش ماهی، صنایع و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی نام برد. استفاده مجدد از فاضلاب‌های تصفیه‌شده می‌تواند به‌عنوان یک منبع ارزشمند آب در شهرهایی که با مشکل کمبود آب روبرو هستند، مطرح باشد. کاهش منابع آب از یک طرف و افزایش مصارف آن از طرف دیگر سبب شده که مسئولین به دنبال یافتن راه حلی جهت مقابله با بحران کمبود منابع آب باشند. در این رابطه استفاده از پساب می‌تواند دارای نقش مؤثر در جهت کاهش برداشت آب از منابع دیگر باشد. کاربرد پساب در کشاورزی از متداول‌ترین مصارف استفاده از فاضلاب‌های تصفیه‌شده است. از مزایای استفاده از فاضلاب‌های تصفیه شده در کشاورزی، کاهش مصرف کودهای شیمیایی است که خود در کاهش آلودگی منابع آب بسیار مؤثر است. با استفاده مجدد از پساب تولیدی توسط هر نفر می‌توان ۳۰۲۵ مترمربع زمین را تحت پوشش کشاورزی قرار داد. در خصوص کاربرد پساب برای استفاده مجدد، توجه به استانداردها و معیارهای بهداشتی ارائه شده از سوی سازمان‌های مربوطه ضروری است (Torkian, 2020). نیاز به آب قابل شرب، همراه با پیشرفت علم و فناوری موجب شده است که صنعت تولید آب شیرین، و بازیافت پساب‌ها در یک قرن اخیر رشد خارق‌العاده‌ای داشته باشد؛ به‌طوری‌که هم‌اکنون بیش از ده روش مختلف تهیه آب شیرین از آب شور و بازیافت پساب وجود دارد. همچنین توجه به توسعه پایدار و حفظ محیط زیست موجب شده است که هر روزه مقالات متعددی در زمینه بهینه‌سازی روش‌های موجود برای بازیافت پساب‌های صنایع مختلف و یا روش‌های نوین دفع پساب نوشته شود و محققان به دنبال راهی برای به صفر یا نزدیک به صفر رساندن پساب آب شیرین‌کن‌ها و سایر صنایع باشند.

پژوهشی به منظور بررسی تولید نمک از پساب واحدهای آب شیرین‌کن با استفاده از حوضچه‌های تبخیر انجام شد و این راهکار را در مناطقی با تابش آفتاب شدید، نفوذ کم، زمین زیاد و ارزان و نزدیک به مناطق مصرف کننده نمک مانند کشورهای آسیایی توصیه کردند (Ravizkya & Nadav, 2007).

در تحقیقی انرژی خورشیدی را به‌عنوان جایگزین انرژی‌های تجدیدناپذیر برای تولید آب مقطر در بازیافت پساب‌ها به کار گرفتند و به بررسی اقتصادی آن پرداختند. این تحقیق استفاده از مبدل‌های حرارتی خورشیدی را علی‌رغم نیاز به فضای زیاد، کم هزینه‌تر و ساده‌تر از سایر روش‌ها یافت (Ravizkya & Nadav, 2008).

Fernandez-Lopez *et al.* (2009)، از دو سامانه متناوب تقطیر چندگانه و فشرده‌سازی مکانیکی بخار، به منظور جداسازی کامل نمک و نداشتن پساب خروجی در واحدهای آب شیرین‌کن استفاده کردند. انرژی مورد نیاز این سامانه‌ها به ترتیب از یک مبدل حرارتی خورشیدی و چندین توربین بادی تأمین شد.

Hou *et al.* (2010)، جهت رفع مشکل مصرف زیاد انرژی و مقدار زیاد پساب واحدهای بازیافت، روش تقطیر در دمای پایین را با تبخیر افشان همراه کردند. در این تحقیق ویژگی‌های دمای هوا، نرخ هوای ورودی، نرخ آب ورودی، نرخ آب افشان و درجه خلأ بررسی شدند. نتایج نشان داد که افزایش نرخ هوای گرم‌کننده ورودی، نرخ استحصال آب را افزایش اما بازدهی حرارتی کل فرایند را کاهش می‌دهد.

در پژوهشی دیگر در یک مطالعه موردی در منطقه کوهستانی توچال و شهر تهران یک واحد غیر فعال نمک‌زدایی خورشیدی مورد مطالعه و ارزیابی تجربی قرار داده شد، نتایج نشان داد که بیش‌ترین میزان تولید ساعتی آب شیرین به ترتیب ۵۰۰ و ۷۲۰ میلی‌لیتر در مترمربع برای شهر تهران و کوه توچال بود. بیان شد که بسیاری از مطالعات بر تأثیر ویژگی‌های اساسی مانند شرایط محیطی، نوع آب و هوا و سامانه‌های موجود بر روی تصفیه آب شور به استفاده از انرژی خورشیدی تمرکز دارند (Parsa *et al.*, 2019).

Feilizadeh *et al.* (2019)، تصفیه آب دریا را با استفاده از شرایط غیرفعال و فعال یک سامانه خورشیدی ساکن بررسی کردند. برای سامانه فعال، آن‌ها از یک لوله مستقیم و مارپیچ به عنوان آبگرمکن استفاده کردند. آن‌ها مقادیر تولید آب شیرین این سامانه‌ها را به ترتیب ۱۰/۲۲ و ۱۵/۲۵ کیلوگرم بر مترمربع در روز گزارش کردند.

در تحقیقی یک سامانه ثابت خورشیدی برای مواجهه با کمبود آب و انرژی در هند تولید شد. آزمایشات نشان داد که سامانه مجهز به پنل PV و لایه ایزوله با حدود ۷/۳ کیلوگرم در روز بهترین بهره‌وری را داشت (Manokar *et al.*, 2018).

Ahmadi *et al.* (2021)، نشان دادند که سامانه نمک‌زدایی MED-TVC یکی از مناسب‌ترین و اقتصادی‌ترین سامانه‌های نمک‌زدایی است. در این تحقیق از ترکیب سیکل الام و سامانه نمک‌زدایی در جزیره کیش واقع در جنوب ایران استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که چرخه پیشنهادی عملکرد اقتصادی خوبی دارد و ارزش فعلی خالص (NPV) نشان می‌دهد که دوره بازگشت سرمایه در این طرح ۴/۸ سال است.

در پژوهش دیگر یک دستگاه ثابت تصفیه فاضلاب مبتنی بر تقطیر خورشیدی برای جداسازی فاضلاب کارخانه زیتون (OMW) مورد مطالعه قرار گرفت. شرایط حاکم در داخل دستگاه خورشیدی، میزان تقطیر و تعدادی از ویژگی‌های کیفی برای آب تقطیر شده مانند pH، هدایت برقی (EC)، کدری، اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD)، کربن آلی کل (TOC) و نیتروژن کل (TN)) برای ارزیابی عملکرد سامانه مورد ارزیابی قرار گرفتند. آب تولید شده اسیدی (pH 3.8)، بی‌رنگ، شفاف و بدون مواد جامد معلق بود. کدری و EC در آب تولید شده به ترتیب ۱۰۰ و ۹۹ درصد کاهش یافتند؛ همچنین COD، TOC و TN به ترتیب ۹۰، ۹۸ و ۹۹/۹ درصد کاهش یافتند (Jaradat *et al.*, 2017).

روش‌های دفع پساب‌هایی که امروزه در دنیا به کار می‌روند شامل روش‌های حرارتی، غشایی و ترکیب این دو است. تقسیم‌بندی‌های مختلفی برای روش‌های دفع پساب وجود دارد و هر ساله با پیشرفت علم و شناخت یا ابداع روش‌های نوین، به این تقسیم‌بندی‌ها اضافه می‌شود. انواع روش‌هایی که بدین منظور به کار می‌رود عبارتند از: انبساط چند مرحله‌ای، تقطیر چند مرحله‌ای، اسمز معکوس، انجماد، الکترودیالیز، تبادل یونی، متراکم نمودن بخار و تقطیر خورشیدی.

آب شیرین‌کن‌های خورشیدی راه بسیار ساده‌ای جهت نمک‌زدایی و بازیافت پساب‌ها است که با انرژی گرمای خورشید کار می‌کنند. با این وجود، در مناطق داخلی که از اقیانوس‌ها و منابع عظیم آب شور فاصله دارند، نحوه تخلیه پساب آب شیرین‌کن‌ها هنوز به صورت مسئله‌ای چالش برانگیز مورد توجه است. تخلیه به آب‌های سطحی یا سامانه فاضلاب، تزریق به چاه‌های عمیق، پخش روی سطح خاک و استفاده از حوضچه‌های تبخیر خورشیدی گزینه‌هایی است که به منظور دفع این پساب‌ها در مناطق داخلی استفاده می‌شود که هر یک معایبی نیز دارند؛ دسترسی به آب شرب سالم در مناطق جنوبی کشور ایران، همواره به عنوان بحرانی چالش برانگیز مطرح بوده است. از طرفی اکثر این مناطق به آب‌های شور و به تابش خورشیدی کافی دسترسی دارند. بنابراین شیرین‌سازی شوراب با استفاده از انرژی خورشیدی می‌تواند از جمله راه‌حل‌های پایدار و مناسب جهت تأمین آب این مناطق و همچنین مدیریت پساب دستگاه‌های نمک‌زدایی آن‌ها به شمار رود. ایران روی کمربند خورشیدی قرار گرفته است و یکی از کشورهای

مستعد جهت بهره‌گیری از انرژی خورشیدی است به طوری که میزان تابش متوسط روزانه آفتاب در آن به ۴ کیلووات ساعت بر مترمربع می‌رسد و متوسط تعداد ساعات آفتابی از ۲۸۰۰ ساعت در سال بیشتر است. بر اساس مطالعات انجام شده در شهرهایی که متوسط انرژی تابش خورشید در آن‌ها بیش از ۲۰۰ وات بر مترمربع است و سرعت باد در آن‌ها خیلی زیاد نیست، قابلیت استحصال حداقل ۳/۱ مترمکعب آب شیرین به ازای واحد سطح در طول سال وجود دارد (Hyun, 2011).

Igoud *et al.* (2017)، یک دستگاه فاضلاب خورشیدی (SOWAT) را بین ماه‌های آوریل و سپتامبر مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاکی از این بود که اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی فاضلاب (BOD) بین ۸۶ تا ۹۰ درصد و کدری فاضلاب ۹۹ درصد کاهش یافت. این نوع تصفیه همچنین امکان گندزدایی و ضد عفونی فاضلاب را فراهم می‌کرد. آن‌ها بیان کردند این نوع تصفیه پایدار بوده و بدون نیاز به مصرف برق و عدم تولید گازهای گلخانه ای (GHGs)، می‌تواند در مقیاس متوسط و بزرگ مورد استفاده قرار گیرد و برای استفاده مجدد از فاضلاب‌ها در کشاورزی امیدوارکننده خواهد بود.

به طور کلی ایران از میانگین جهانی (۳/۵ کیلو وات ساعت بر متر مربع) دارای شدت تابش بالاتری بوده به طوری که شدت تابش در شهر تهران ۴/۵۸، در تبریز ۴/۱۳، در مشهد ۴/۷۴ و در بندر عباس ۵/۷۵ کیلو وات ساعت بر متر مربع در روز است. با توجه به اطلس جغرافیایی اتحادیه اروپا شدت تابش آفتاب در شیراز ۵/۵ کیلووات ساعت بر متر مربع در روز و طبق آمار سایت هواشناسی دارای ۳۳۵۸/۶ ساعت آفتابی در سال است. با توجه به گسترش استفاده از آب شیرین‌کن‌ها و عدم مطالعه در مورد روش‌های دفع پساب آن‌ها در کشور، با توجه به وضعیت اقلیمی منطقه، به کارگیری انرژی خورشیدی می‌تواند در کاهش اثرات زیست محیطی بسیار مؤثر باشد (Ardakani *et al.*, 2011).

مواد و روش‌ها

در این تحقیق جهت بازیافت پساب‌های صنایع غذایی با تابش خورشیدی دستگاهی طراحی و ساخته شدکه به نحوه طراحی، ساخت و ارزیابی قابلیت آن پرداخته می‌شود. به منظور طراحی و ساخت قطعات مکانیکی دستگاه از نرم‌افزار شبیه‌سازی سه بعدی Solidworks 2016 استفاده شد. به کمک نرم‌افزارهای مهندسی می‌توان ضمن کاهش هزینه‌ها، نمونه طراحی شده را به‌طور بهینه و با دقت بالا ساخت که در این تحقیق اصول طراحی رعایت شده است.

سامانه طراحی و ساخته شده در این تحقیق یک دستگاه بازیافت پساب‌های صنایع غذایی است که انرژی خود را از خورشید می‌گیرد. ابعاد سامانه طراحی شده به ترتیب طول، عرض و ارتفاع ۵۰×۵۰×۱۳۴ سانتی‌متر بوده است. دستگاه طراحی و ساخته شده بازیافت پساب‌های صنایع غذایی از دو قسمت بخش مکانیکی و بخش برقی و انتقال حرارت تشکیل شده است که هر کدام از این بخش‌ها در ارتباط با یکدیگر هستند. روند طراحی و ساخت در بخش‌های زیر توضیح داده شده است. بخش مکانیکی شامل شاسی، مخزن نگهدارنده پساب، مخزن بخار، مخزن ذخیره آب قابل مصرف برای مصارف عمومی و کشاورزی، اتصالات و شلنگ‌های انتقال سیال و بخار است. بخش برقی این سامانه یک المنت برقی با توان بیشینه ۲۰۰۰ وات است، المنت‌های برقی انواع مختلف و هر کدام کاربرد خاص خود را دارند. المنتی که در این سامانه به کار برده شده از نوع المنت برقی مخازن آب است.

مهم‌ترین بخش دستگاه مبدل حرارتی خورشیدی، مجموعه مبدل و گیرنده است. میزان توان گرمایی به دست آمده توسط این مجموعه به عوامل محیطی متعدد و شرایط کاری بستگی دارد. برخی از عوامل محیطی عبارت اند از: میزان تابش مستقیم خورشیدی در دسترس که خود به شرایط جغرافیایی و همچنین فصل سال بستگی دارد، دمای هوای محیط، سرعت باد و غیره. همچنین برخی از عوامل کاری مؤثر نیز شامل بازده نوری مبدل حرارتی که به جنس سطح بازتابنده و دقت سامانه ردیاب خورشیدی وابسته است. ابعاد و دمای کاری گیرنده که تعیین‌کننده میزان تلفات حرارتی از گیرنده هستند نیز بر میزان بازده گرمایی کلی دستگاه تأثیر می‌گذارد. در این تحقیق، مبدل حرارتی با هندسه معین موجود در گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه ارومیه در نظر گرفته شد.

بعد از اتمام محاسبات، انرژی حرارتی خروجی مبدل حرارتی که از محفظه گیرنده گرفته می‌شود در

حدود ۱۹۷۳ وات برآورد شدکه انرژی حرارتی خروجی با این توان وارد مدارسیال عامل شده و از آنجا سیال حامل با توان حرارتی معین وارد مبدل حرارتی؛ که در کف مخزن بخار نصب شده می‌شود. در مدار سیال عامل (مدار بخار) یک پمپ گردشی و یک منبع انبساط نیز نصب شده است. پمپ گردشی به‌صورت مداوم کار می‌کند، که سیال عامل دمای خود را در داخل مخزن بخار توسط مبدل به پساب منتقل می‌کند و دمای اولیه خود را از دست می‌دهد. این چرخه ادامه می‌یابد و در زمان مشخص سیال داخل مخزن بخار (پساب) به نقطه جوش خود رسیده و عملیات بخارسازی انجام می‌گیرد. بخار توسط اتصالات نصب شده و شیلنگ شفاف که جهت انتقال بخار مورد استفاده قرار گرفته‌اند وارد لوله مسی‌ای که داخل مخزن پساب قرار گرفته و همانند مبدل حرارتی عمل می‌کند شده و حرارت حاصل از بخار را به پساب که دمای پایین‌تری دارد می‌دهد و عملیات تقطیر صورت می‌گیرد. بعد از آن آب مقطر از طریق شیلنگ شفافی وارد مخزن آب مقطر می‌شود و در آنجا ذخیره شده که قابل مصرف برای مصارف عمومی وکشاورزی است. به منظور ارزیابی عملکرد سامانه طراحی شده در این تحقیق، از المنت برقی نصب شده بر روی دستگاه به منظور تولید گرمای تبخیر پساب استفاده شد. تجهیزات نصب شده بر روی سامانه جهت انجام آزمایشات و داده‌برداری سامانه عبارتند از دیمر ۴۰۰۰ واتی برقی، ولت متر ۲۲۰ ولتی رقمی، آمپرمتر رقمی ۲۰ آمپری، سیم جریان برقی و وارنیش حرارتی، دماسنج و شیشه مدرج آزمایشگاهی. عمده‌ترین هدف و پیرو آن نتیجه این پژوهش عبارت است از ساخت و ارزیابی یک سامانه جهت امکان‌سنجی بازیافت پساب‌های صنایع غذایی که در برگیرنده مراحل اولیه طراحی، ساخت و یا تهیه قطعات، سر هم کردن و ارتباط‌دهی بخش‌های مختلف به یکدیگر بوده است. شکل ۱ نمای کلی دستگاه ساخته شده را هنگام انجام آزمون‌های نخستین، نمایش داده است. ارزیابی دستگاه با استفاده از یک المنت برقی ۲۰۰۰ وات، با توان‌های متفاوت و چهار دمای متفاوت و متناسب با دمای احتمالی محیط در نظر گرفته که در نهایت با توان سامانه مبدل حرارتی خورشیدی گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه ارومیه تطبیق داده شد. عملکرد سامانه در بررسی‌های نخستین، گویای کارکرد قابل پذیرش سامانه ساخته شده بوده و اجزای مختلف این مجموعه، شامل بخش‌های مکانیکی حرارتی و برقی و مجموعه وسایل آزمایشگاهی، شرایط لازم جهت ارزیابی و داده برداری را فراهم می‌سازند.



شکل ۱- نمای کلی دستگاه ساخته شده

روش انجام آزمون و داده‌برداری

قبل ازشروع عملیات داده‌برداری، داخل مخزن پساب از سیال پر شده و سپس با توجه به محاسبات انجام شده در رابطه با سامانه مبدل حرارتی خورشیدی ساخته شده، توان خروجی سامانه محاسبه شده که این توان برابر ۱۹۷۳ وات است با توجه به تغییر ولتاژ و شدت جریان برقی، توان المنت نصب شده در کف مخزن در سه ولتاژ ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ ولت با شدت جریان‌های به ترتیب ۴/۲۶، ۶/۱۹ و ۸/۳۱ آمپر در نظر گرفته شده است.

نتایج حاصل از آزمایش‌های مربوط به دبی تقطیر پساب دستگاه مورد آزمون، مورد بررسی آماری قرار گرفت. با توجه به تعداد سطوح دمای اولیه پساب (۴ سطح)، توان حرارتی مورد آزمایش (۳ سطح) و تعداد تکرارهای هر آزمایش (۳ سطح)، جمعا ۳۶ آزمایش و داده

جهت تجزیه و تحلیل اثرات مورد آزمایش بر میزان دبی تقطیر پساب دستگاه مورد آزمون، حاصل شد. برای تجزیه و تحلیل داده‌های به‌دست آمده از آزمایش‌ها از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی و برای مقایسه میانگین از آزمون مقایسه میانگین چند دامنه‌ای دانکن استفاده شد. تجزیه و تحلیل با استفاده از نرم‌افزار MSTATC نسخه 1.2 انجام شد.

نتایج و بحث

با استفاده از معادله (۱) توان المنت محاسبه شده و با توان مبدل حرارتی خورشیدی تطبیق داده شد. المنت برقی به جریان برق ۲۲۰ ولت شهری وصل و با استفاده از دیمر که به‌صورت موازی در مدار جریان نصب شد، فرایند تغییر ولتاژ و شدت جریان فراهم گردید.

سه ولتاژ ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ ولت به المنت داده شد که توسط ولت‌متر رقمی کنترل شده‌اند. توسط آمپرمتر استفاده شده، مقدار شدت جریان در سه ولتاژ تعیین شده در نقطه جوش پساب گرفته شد که میزان آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- میزان شدت جریان در ولتاژهای تعیین شده و نقطه جوش پساب

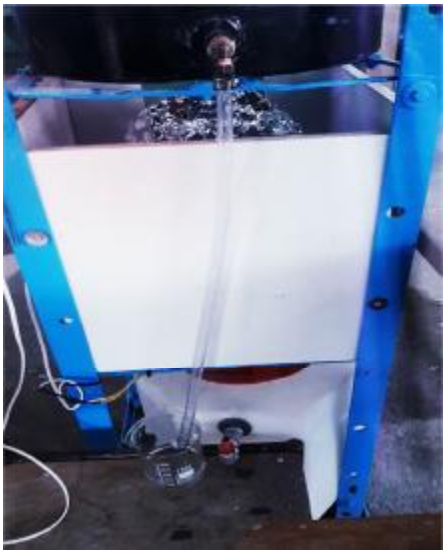
نقطه جوش پساب (درجه سلسیوس)	شدت جریان (آمپر)	ولتاژ ورودی (ولت)
۹۷	۴/۲۶	۱۰۰
۹۷	۶/۱۹	۱۵۰
۹۷	۸/۳۱	۲۰۰

با توجه به میزان شدت جریان در ولتاژهای تعیین شده در جدول ۱ سه توان ظاهری برحسب وات به‌دست آورده می‌شود. توان ظاهری برقی از معادله (۱) محاسبه می‌شود.

$$P = V \times I \qquad (۱)$$

P که بر حسب وات یا کیلووات است و توان برقی را نشان می‌دهد و V برحسب ولت، مقدار ولتاژ ورودی و I نیز شدت جریان ورودی به المنت بر حسب آمپر است. با استفاده از معادله (۱) سه توان ورودی به المنت به‌کار برده شده به ترتیب برابر ۴۲۶، ۹۲۸/۵ و ۱۶۶۲ وات محاسبه گردید.

بعد از محاسبه توان‌های ورودی، سیال با چهار سطح دمای محیطی مختلف، به نمایندگی از چهار سطح دمای محیط ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درجه سلسیوس، که با دماسنج الکلی اندازه‌گیری شدند، در داخل مخزن بخار ریخته می‌شود و دستگاه با سه سطح توان به‌دست آمده در هر دما با سه تکرار روشن شد. طی هر آزمایش مقدار آب مقطر تولید شده با توجه به مدت زمان جوش پساب در دماهای در نظر گرفته شده و مقدار توان‌های برقی وارد شده به المنت برقی نصب شده در کف مخزن بخار، توسط شیشه مدرج اندازه‌گیری شده (شکل ۲) و در نهایت ظرفیت مقدار تولیدی آب مقطر توسط سامانه به‌دست آمد.



شکل ۲- اندازه گیری آب مقطر و دبی خروجی سامانه توسط شیشه مدرج

تحلیل آماری داده‌ها

خلاصه نتایج تجزیه واریانس داده‌های حاصل از اندازه‌گیری دبی تقطیر پساب در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که تأثیر اصلی دمای اولیه و توان حرارتی و همچنین اثر متقابل این دو عامل بر دبی تقطیر پساب در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است.

نتایج در جدول ۲ نشان داد که در بین دماهای اولیه مورد آزمایش، دمای ۱۵°C با میانگین دبی ۲۴/۷۷۸ میلی‌لیتر بر دقیقه، با کم‌ترین مقدار و دمای ۳۰°C با میانگین دبی ۳۱/۱۱۱ میلی‌لیتر بر دقیقه، با بیش‌ترین مقدار، اختلاف معنی‌داری با دیگر دماهای مورد آزمایش داشته است.

آزمایش‌ها با توان حرارتی ۱۶۶۲ وات، بیش‌ترین مقدار میانگین دبی ۳۷/۴۱۷ میلی‌لیتر بر دقیقه و در توان

حرارتی ۴۲۶ وات، کم‌ترین مقدار میانگین دبی ۱۸/۸۳۳ میلی‌لیتر بر دقیقه را به خود اختصاص داده است. ضمناً تفاوت معنی‌داری در میانگین اثرات هر سه سطح از توان‌های حرارتی مورد آزمایش مشاهده شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود دمای اولیه و توان حرارتی مورد آزمایش، مقدار میانگین دبی افزایش معنی‌داری داشته است. سطوح دمای اولیه در این آزمایش‌ها به‌عنوان شاخصی از دمای محیط برای فصل‌های مختلف در نظر گرفته شد تا این‌که تخمین فراگیرتری در رابطه با ظرفیت تولید سامانه طراحی شده به دست آید. افزایش دمای اولیه پساب منجر به بهبود ظرفیت تولید شد که با توجه به کم‌تر شدن انرژی مورد نیاز برای تبخیر آب با دمای اولیه بالاتر، منطقی به نظر می‌رسد. این روند در تمامی سطوح توان مصرفی مشاهده شده است و با افزایش دمای اولیه آب، زمان رسیدن به نقطه جوش کاهش یافته است. همچنین افزایش توان برقی به‌خاطر افزایش نرخ انتقال انرژی به پساب منجر به کاهش زمان تبخیر و در نهایت، افزایش ظرفیت دستگاه شد.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس داده‌های حاصل از اندازه‌گیری دبی تقطیر پساب

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F
دمای اولیه (t_0)	۳	۱۸۷/۶۶۷	۶۲/۵۵۶	۳۷۵/۳۳۳**
توان حرارتی (P)	۲	۲۰۷۸/۱۶۷	۱۰۳۹/۰۸۳	۶۲۳۴/۵۰**
اثر متقابل (t_0×P)	۶	۳۴/۱۶۷	۵/۶۹۴	۳۴/۱۶۶**
خطا	۲۴	۴	۰/۱۶۷	
مجموع	۳۵	۲۳۰۴		

** اثر معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد، ۱/۴۷% = ضریب تغییرات

جدول ۳- نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی عوامل مورد بررسی بر دبی تقطیر پساب

دمای اولیه (درجه سلسیوس)	میانگین اثرات	توان حرارتی (وات)	میانگین اثرات
۱۵	۲۴/۷۷۸ d	۴۲۶	۱۸/۸۳۳ c
۲۰	۲۶/۱۱۱ c	۹۲۸/۵	۲۶/۲۵۰ b
۲۵	۲۸/۳۳۳ b	۱۶۶۲	۳۷/۴۱۷ a
۳۰	۳۱/۱۱۱ a		

حروف غیر مشابه نشان‌دهنده اختلاف معنی‌داری اثرات (در سطح احتمال ۵%) در هر ستون است.

نتایج مقایسه میانگین تأثیر متقابل دماهای اولیه پساب مورد آزمایش و توان‌های حرارتی مورد استفاده شکل ۳ نشان داد که در آزمایش با توان حرارتی ۱۶۶۲ وات و دمای اولیه ۳۰ درجه سلسیوس، بیش‌ترین مقدار دبی دستگاه و در آزمایش با توان حرارتی ۴۲۵ وات و دمای اولیه ۱۵ درجه سلسیوس، کم‌ترین مقدار آن حاصل شد. در دماهای اولیه یکسان با افزایش توان حرارتی، افزایش معنی‌داری در دبی دستگاه مشاهده شد. در توان‌های حرارتی مورد آزمایش نیز با افزایش دماهای اولیه پساب، دبی دستگاه افزایش معنی‌داری را از خود نشان داد.

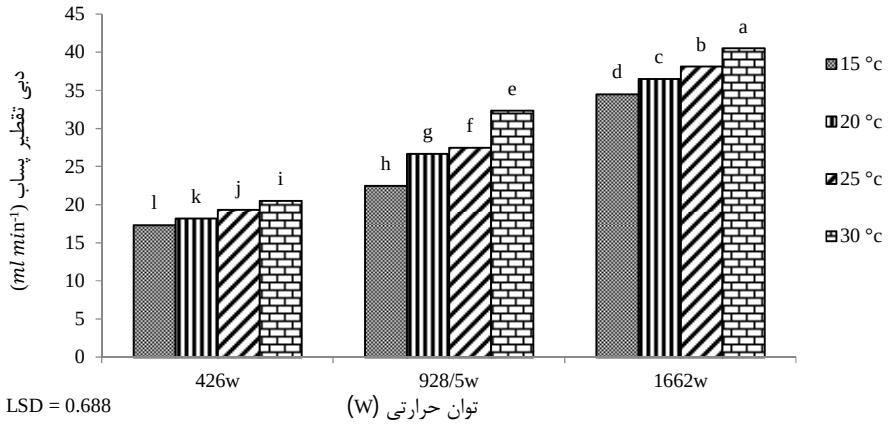
با توجه به شکل ۳ و ارزیابی‌های آماری، در هر سطح از توان حرارتی با افزایش دمای اولیه آب دبی تقطیر پساب بالاتر بوده است.

ارزیابی ظرفیت سامانه طراحی شده

به منظور ارائه تخمینی از ظرفیت تولید آب مقطر توسط سامانه طراحی شده از تطبیق داده‌های آزمایش‌های انجام شده با داده‌های مربوط به تابش سالانه منطقه جغرافیایی ارومیه بهره‌گیری شد. بر همین اساس ظرفیت تولید توان حرارتی توسط مبدل حرارتی خورشیدی موجود در گروه مکانیک بیوسیستم در بازه‌های زمانی مختلف در طول سال به‌عنوان منبع توان برای تبخیر پساب در نظر گرفته شد و در هر فصل از سال با مراجعه به داده‌های مربوط به آزمایش‌های انجام شده برای سطح توان در دسترس، مقدار دبی تولید آب توسط سامانه پیش‌بینی شده است. در نهایت الگویی برای ظرفیت سامانه در هر مقطع از سال و به صورت تجمعی، ظرفیت دستگاه در هر بازه زمانی به دست آمد.

جدول ۴ مقدار توان قابل دسترسی مبدل حرارتی خورشیدی را در منطقه مورد مطالعه نشان داده است. این داده‌ها بر اساس اطلاعات هواشناسی، استخراج شده‌اند و به صورت فصلی مقدار انرژی‌ای که می‌توان برای تقطیر آب در دست داشت را تعیین کرده است.

به منظور تخمین ظرفیت دستگاه، اطلاعات جدول ۴ برای مبدل حرارتی خورشیدی مورد بررسی در نظر گرفته شد. همچنین مقدار دبی متوسطی برای سامانه در هر فصل از سال به صورت مجزا محاسبه شد. شکل ۴ نمودار تغییرات دبی دستگاه را با ساز و کار مورد اشاره نمایش داده است.

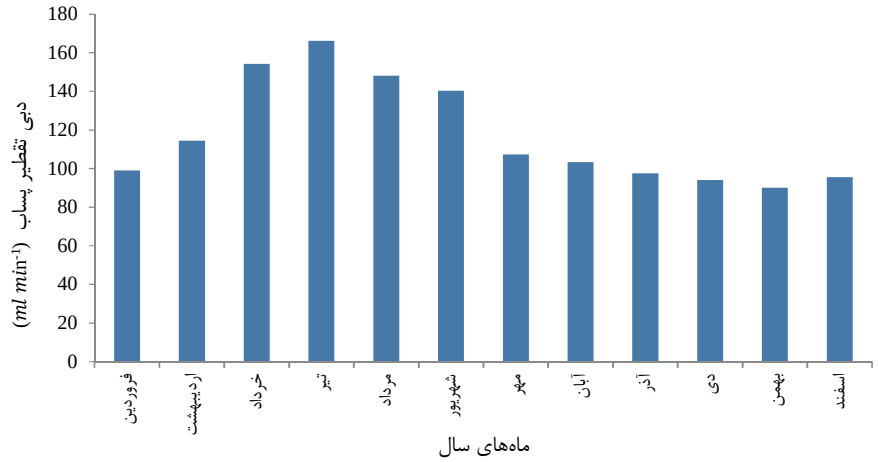


شکل ۳- نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل دمای اولیه و توان حرارتی بر میزان دبی تقطیر پساب

حروف غیرمشابه نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار اثرات (در سطح احتمال ۵%) هستند.

جدول ۴- مقادیر توان خروجی مبدل حرارتی در طول سال ۱۳۹۶ در شهرستان ارومیه

بازه زمانی	توان خروجی مبدل حرارتی (وات بر مترمربع)	بازه زمانی	توان خروجی مبدل حرارتی (وات بر مترمربع)
فروردین	۹۷۹/۴۵۴	مهر	۱۱۱۳/۳۱۵
اردیبهشت	۱۲۲۹/۶۲	آبان	۱۰۴۸/۲۱۳
خرداد	۱۷۰۸/۷۴۱	آذر	۹۵۳/۸۵۲
تیر	۱۸۱۰/۴۱۷	دی	۸۹۰/۹۴۴
مرداد	۱۵۶۹/۷۵۹	بهمن	۸۱۲/۶۷۶
شهریور	۱۴۱۵/۴۱۷	اسفند	۹۲۰/۲۰۴

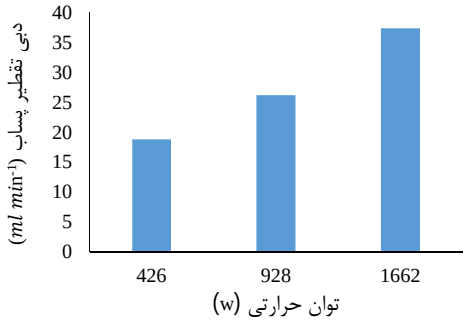


شکل ۴- تغییرات دبی تقطیر پساب در طول ماه‌های سال ۱۳۹۶ (هجری شمسی) در شهرستان ارومیه با استفاده از مبدل حرارتی خورشیدی

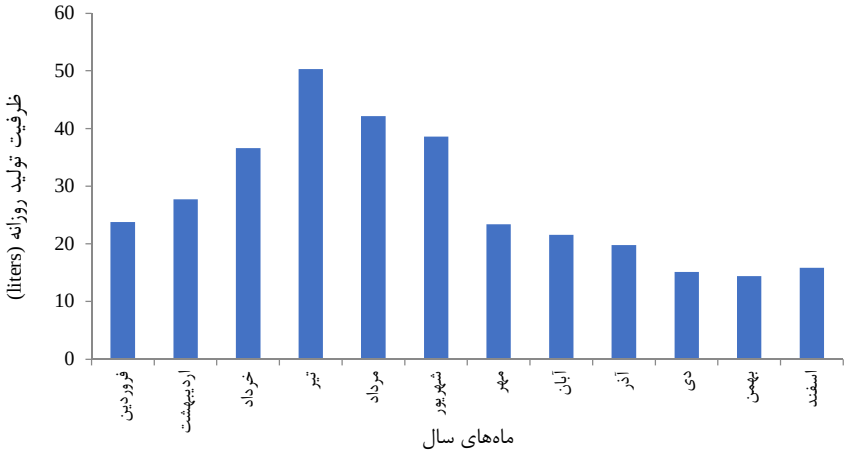
با افزایش توان حرارتی المنت گرمایش آب به روندی خطی مقدار دبی تولید آب توسط دستگاه افزایش داشت که در نمودار شکل ۵ به‌عنوان نمونه و در دمای اولیه ۲۰ درجه سلسیوس نمایش داده شده است.

در گام دیگر و با احتساب ساعات تابش در بازه‌های مختلف سال، مقدار ظرفیت روزانه برای تأمین آب مقطر توسط دستگاه تعیین گردید. شکل ۶ مقدار ظرفیت روزانه دستگاه را به صورت تجمعی برای ماه‌های مختلف سال نشان داده است.

بیش‌ترین ظرفیت ماهانه دستگاه در حدود ۱۵۰۰ لیتر در تیر ماه تخمین زده شد. ظرفیت سالانه دستگاه به صورت تجمعی و بر اساس داده‌های به دست آمده در حدود ۱۰۰۰۰ لیتر برآورد می‌گردد.



شکل ۵- تغییرات دبی تقطیر پساب (دمای ^{o}C ۲۰) با توان‌های حرارتی مورد آزمایش به کمک المنت برقی



شکل ۶- مقدار ظرفیت روزانه دستگاه به صورت تجمعی برای ماه‌های مختلف سال

بررسی کیفی آب تولید شده از پساب

به منظور ارزیابی کیفی عملکرد سامانه تقطیر به‌عنوان راه‌کاری برای تصفیه پساب صنایع غذایی، پساب کارخانه‌های لبنیات در نظر گرفته شدند. پساب صنایع لبنی علاوه بر آب و مواد شوینده NaOH، HNO_3، H_3PO_4، هیپوکلریت سدیم، شامل آب پنیر در قسمت تولید و دارای BOD[1] ۳۵ (اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی فاضلاب) تا ۴۵ هزار میلی‌گرم در لیتر هستند. فاضلاب صنایع لبنی بسته به نوع فرآیند و محصول کارخانه شامل مقادیر متغیری از مواد زیست تجزیه‌پذیر مانند کربوهیدرات‌ها (لاکتوز) و تجزیه‌ناپذیر مانند چربی‌های شیر است. رنگ فاضلاب معمولاً مایل به سفید و pH آن ۵/۵ تا ۱۰/۵ است و خاصیت قلیایی آن در طی تخمیر لاکتوز شیر به اسید لاکتیک کاهش می‌یابد و به ۴/۵ تا ۵ می‌رسد. محدوده BOD فاضلاب لبنی در گستره ۲۰۰-۳۵۰۰ میلی‌گرم در لیترمتغیر است، در حالی که COD[2] (اکسیژن‌خواهی شیمیایی فاضلاب) آن ۲ الی ۲/۵ برابر بیش‌تر از BOD آن است. جدول ۵ محدوده ویژگی‌های آلاینده پساب‌های لبنی را نشان داده است.

به منظور بررسی کیفیت تصفیه پساب، پساب صنایع غذایی از یک کارخانه لبنیات با تحلیل و بررسی اولیه مشخص، تهیه شدو داخل مخزن بخار سامانه به جوش آمد. پس از عملیات تقطیر، آب مقطر دوباره به آزمایشگاه ارسال شده و تحلیل و بررسی ثانویه آن انجام گردید که میزان بازیافت پساب از نظر بهداشتی و آلودگی زیست‌محیطی و بار میکروبی آن نسبت به تحلیل و

1- Biochemical oxygen demand

2- Chemical oxygen demand

بررسی اولیه مقایسه شد. جدول ۶ ترکیب شامل میزان ویژگی‌های آلاینده پساب مورد آزمایش را بر اساس نتایج تحلیل و بررسی نمونه نشان داده است.

جدول ۵- محدوده ویژگی‌های آلاینده پساب‌های لبنی

ویژگی	مقدار
اکسیژن‌خواهی شیمیایی فاضلاب (COD)	۳۵۰۰۰-۳۰۰۰
اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی فاضلاب (BOD)	۲۰۰۰-۱۳۰۰
کل مواد جامد معلقs	۹۶۰
چربی	۳۵۰-۲۰۰
میزان اسیدی یا بازی (pH)	۱۰-۷

جدول ۶- ترکیب شامل میزان ویژگی‌های آلاینده پساب مورد آزمایش بر اساس نتایج آزمایشگاه

ویژگی	مقدار
اکسیژن‌خواهی شیمیایی فاضلاب (COD)	۳۱۰۰
اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی فاضلاب (BOD)	۱۹۶۰
کل مواد جامد معلق	۲۲۰
چربی	۱۶۰
میزان اسیدی یا بازی (pH)	۱/۷
نیترات	۷۱/۱
فسفات کل	۸۲
کلراید	۱۷۰
پاک کننده‌های غیر صابونی	۲۴

نمونه‌ای از آب به دست آمده توسط دستگاه با ارسال به آزمایشگاه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتیجه آزمایش حاکی از جدا شدن کامل ناخالصی‌های پساب تصفیه شده بود. آب به دست آمده از تبخیر پساب در قالب آب مقطر و عاری از مواد محلول و ناخالصی بود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به مطالعه امکان‌سنجی به‌کارگیری انرژی خورشید برای تقطیر پساب‌های صنایع غذایی با در نظر گرفتن ظرفیت‌های تولید توان حرارتی مبدل حرارتی خورشیدی پرداخته شد.با توجه به وضعیت مناسب استان آذربایجان غربی از نظر قابلیت‌های تابشی، امکان استفاده از انرژی خورشیدی برای عملیات تقطیر آب‌ها و پساب وجود دارد و با وجود انرژی‌بر بودن این فرآیند، دردسترس بودن و رایگان بودن انرژی خورشیدی امکان بهره‌گیری از این منبع انرژی را فراهم کرده است.

یک سامانه تقطیر آب برای تولید آب مقطر از آب و یا پساب‌ها ساخته شد و با موفقیت آزمایش گردید. این سامانه بدون نیاز به هیچ منبع انرژی ثانویه برای پمپاژ آب و تنها با دریافت جریان سیال عامل گرم شده از یک مبدل حرارتی خورشیدی قادر به تقطیر آب است. سامانه تبرید این مجموعه با به‌کارگیری پساب ورودی و پیش‌گرمایش آن باعث بهره‌وری هر چه بیش‌تر از انرژی شد.

افزایش دمای آب ورودی به سامانه و یا به عبارت دیگر افزایش دمای محیط منجر به بهبود عملکرد سامانه از نظر دبی آب تقطیر شده گردید. نتایج مقایسه میانگین اثرات اصلی عوامل مورد بررسی بر دبی تقطیر حاکی از آن بود که در بین دماهای اولیه مورد آزمایش، دمای ۱۵ درجه سلسیوس با میانگین دبی ۲۴/۷۷۸ میلی‌لیتر بر دقیقه، از کم‌ترین مقدار دبی برخوردار بود و دمای ۳۰ درجه سلسیوس با میانگین دبی ۳۱/۱۱۱ میلی‌لیتر بر دقیقه بیش‌ترین مقدار دبی را در پی داشت و اختلاف معنی‌داری بین سطوح مختلف دماهای مورد آزمایش وجود داشت.

با افزایش توان ورودی به سامانه، زمان جوشش آب کاهش یافته و دبی آب تولید شده افزایش می‌یابد که این توان در تطابق با توان قابل حصول توسط یک مبدل حرارتی خورشیدی برای تخمین ظرفیت تولید سامانه، مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش‌ها با توان حرارتی ۱۶۶۲ وات، بیش‌ترین مقدار میانگین دبی ۳۷/۴۱۷ میلی‌لیتر بر دقیقه و در توان حرارتی ۴۲۶ وات، کم‌ترین مقدار میانگین دبی ۱۸/۸۳۳ میلی‌لیتر بر دقیقه را به خود اختصاص دادند. همچنین تفاوت معنی‌داری در میانگین اثر هر سه سطح از توان‌های حرارتی مورد آزمایش مشاهده شد.

ظرفیت دستگاه بر اساس قابلیت‌های تابشی در ماه‌های مختلف سال مورد ارزیابی و تخمین قرار گرفت. همچنین ظرفیت سالانه دستگاه برای تقطیر ۱۰۰۰۰ لیتر پساب با استفاده از یک مبدل حرارتی با مشخصات مبدل حرارتی خورشیدی گروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه ارومیه برآورد گردید.

منابع

Ahmadi, A., Noorpoor, A. R., Kani, A. R., & Saraei, A. (2021). Modeling and economic

analysis of MED-TVC desalination with allam power plant cycle in Kish Island. *Iran. J. Chem. Eng*, 40(6): 1882- 1892.

Ardakani, A. S., Jahanmiri, A. H., Estahbanati, M. R. K., & Feilizadeh, M. (2011). Innovative multiple solar water desalination. The fourth specialized conference on environmental engineering. Tehran University, Tehran. Iran

Feilizadeh, M., Estahbanati, M. R. K., Khorram, M., & Rahimpour, M. R. (2019). Experimental investigation of an active thermosyphon solar still with enhanced condenser. *Journal of Renew Energy*. 143: 328–334.

Fernández, C., Viedma, A., Herreroa, R. & Kaisera, A. S. (2009). Seawater integrated desalination plant without brine discharge and powered by renewable energy systems. *Desalination*, 235: 179-198.

Hou, J., Cheng H., Wang, D., Gao, X. & Gao, C. (2010). Experimental investigation of low temperature distillation coupled with spray evaporation. *Desalination*, 258: 5-11.

Hyun, K. D. (2011). A review of desalting process techniques and economic analysis of the recovery of salts from retentates. *Desalination*, 270: 1-8.

Igoud, S., Fatiha, S., & Chems, E. CH. (2017). Solar Wastewater Treatment (SOWAT) And Reuse For Agricultural Irrigation. *Journal of Irrigation and Draining Published online in Wiley Online Library*. (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/ird.2157

Jaradat, A. Q., Gharaibeh, S., & Mustafa, A. I. (2017). The application of solar distillation technique as a mean for olive mill wastewater management. *Journal of Water and Environment*, 32: 134-140.

Manokar, A. M., Winston, D. P., Kabeel, A. E., & Sathyamurthy, R. (2018). Sustainable fresh water and power production by integrating PV panel in inclined solar still. *Journal of Clean. Prod*, 172: 2711-2719.

Monzavi, M. T (1994). *Municipal sewage*. Tehran University, Tehran. Iran.

Parsa, S. M., Javadi, D., Rahbar, A., Majidniya, M., Aberoumand, S., Amidpour, Y., & Amidpour, M. (2019). Experimental assessment on passive solar distillation system on Mount Tochal at the height of 3964 m: Study at high altitude. *Desalination*, 466: 77-88.

Qiblawey, H. M., & Banat, F. (2008). Solar thermal desalination technologies. *Desalination*, 220: 633-644.

Ravizkya, A., & Nadav, N. (2007). Salt production by the evaporation of SWRO brine in Eilat: a success story. *Desalination*, 205: 374–379.

Torkian, A. (2020). Principles of engineering and environmental science. *Niaze Danesh*, Tehran. Iran.