

مطالعه تجربی اثر تولید بخار سرد فراصوتی بر بهبود عملکرد آب شیرین کن استخری خورشیدی با استفاده از فناوری برداشت از مه

شعبان محمدی*
استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران، sh.khanmohammadi@kut.ac.ir
سجاد خانجانی
کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران، sajadkha@yahoo.com

چکیده

با استفاده از فناوری‌های نوین نظیر سیستم فراصوتی و برداشت آب از مه با استفاده از توری‌های فلزی می‌توان عملکرد آب شیرین کن‌های استخری خورشیدی را بهبود داد. نتایج تجربی این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از ماژول تولید بخار سرد فراصوتی با بهره‌گیری از فناوری برداشت از مه توسط توری فلزی، در افزایش آهنگ تبخیر سطحی آب شور، چگالش قطره‌ای و تولید آب شیرین در سیستم آب شیرین کن استخری خورشیدی تأثیرگذار است. بر اساس ارزیابی عملکرد سیستم آزمایشگاهی بهبودیافته با فراصوتی و توری فلزی دیده شد که با افزایش دمای محیط و شدت تابش خورشید، قطرات متمیزه شده توسط امواج فراصوتی به سرعت تبخیر می‌شوند و عملکرد چشمگیری دارند. نتایج نشان می‌دهد که میزان ضریب انتقال گرمایی تبخیری آب شور ۲۲/۹۰٪ بهبود و بازده انرژی و انرژی داخلی به ترتیب به میزان ۵۶/۲۱٪، ۲۹/۱۴٪ افزایش می‌یابد. همچنین این تغییرات باعث افزایش میزان تولید آب شیرین در سیستم بهبود یافته با فراصوتی و توری تا ۱۸/۷۵٪ در مقایسه با سیستم پایه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آب شیرین کن استخری خورشیدی، فناوری فراصوتی، برداشت از مه، چگالش، پیزوالکتریک، بخار سرد.

Experimental study of ultrasonic atomizer effect on improving the performance of single slope solar still using Fog harvesting technology

Sh. Khanmohammadi
S. Khanjani

Department of Mechanical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran
Department of Mechanical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

Abstract

New technologies such as ultrasonic systems and water extraction from fog using metal nets can improve the performance of solar still desalination systems. Experimental results of the current study show that the use of ultrasonic cold vapor generator module and using fog-harvesting technology by metal mesh are effective in increasing the rate of surface evaporation of saline water, dropwise condensation, and freshwater production in the solar still desalination system. Based on the performance evaluation of the improved system by ultrasonic unit and metal mesh, it was found that with increasing ambient temperature and solar radiation intensity, the atomized droplets evaporate quickly with ultrasonic waves and have a remarkable performance. The results show that the evaporative heat transfer coefficient of saline water increases by 22.90% and the energy efficiency and internal exergy increase by 56.21% and 29.14%, respectively. The modifications also increase the production of fresh water in the improved system with ultrasonic and metal net up to 18.75% compared to the base system.

Keyword: Single slope solar still, Ultrasonic technology, Fog harvesting, Condensation, Piezoelectric, Cold vapor.

زمان و در اثر تابش و تجمع گرمای مستقیم نور خورشید درون محفظه، هوای خشک درون محفظه به علت افزایش دمای آب شور و تبخیر سطحی به صورت هوای مرطوب در می‌آید و باعث تشکیل بخار اشباع و میعان در سطح داخلی پوشش شیشه‌ای می‌گردد و به علت شیب‌دار بودن پوشش شیشه‌ای، آب شیرین تولید شده از طریق مجرای تقطیر درون ظروف تعیین شده جمع‌آوری می‌گردد. یکی از مشکلات اساسی و اصلی آب‌شیرین‌کن‌های استخری خورشیدی بازدهی پایین و بهره‌وری کم آن‌ها است که محققان و پژوهشگران را بر آن داشته است مطالعات و تحقیقات بسیاری را در جهت افزایش بهره‌وری و راندمان آب‌شیرین‌کن‌های استخری خورشیدی انجام دهند و توجه خود را در استفاده از روش‌های آب‌شیرین‌کن گرمایی روزبه‌روز افزایش دهند.

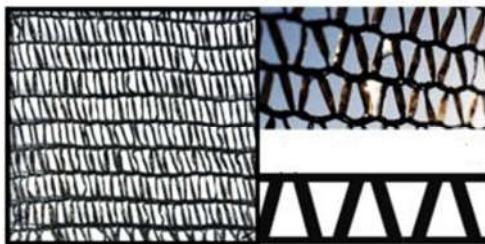
۱- مقدمه

مطالعات موید این است که جمعیت انبوهی از انسان‌ها که در مناطق خشک و نیمه‌خشک زندگی می‌کنند تا سال ۲۰۲۵ با مشکل کمبود و بحران آب شیرین روبه‌رو خواهند شد [۱]. بنابراین بحران و تنش جهانی آب نیاز به روش‌های جدید مبتنی بر فناوری‌های روز برای جمع‌آوری و تأمین آب شیرین پاک و ارزان است. به همین منظور، مطالعات و پژوهش‌های بسیاری از روش‌های جدیدی برای جمع‌آوری آب شیرین، مانند نمک‌زدایی آب دریا، جمع‌آوری باران، برداشت از مه و شبنم توسعه داده‌اند [۲]. یکی از فناوری‌های مناسب جهت شیرین کردن آب و تولید آب آشامیدنی خالص، استفاده از روش تقطیر خورشیدی است. فناوری آب‌شیرین‌کن‌های استخری خورشیدی با بهره‌گیری از انرژی پاک و رایگان خورشید می‌توانند آب شور را به صورت آب شیرین قابل آشامیدن تبدیل کنند اصول فرایند کاری آب‌شیرین‌کن استخری خورشیدی بدین صورت است که آب نمک درون حوضچه توسط پوشش شیشه‌ای محبوس می‌گردد. با گذشت

۱-۱- افزایش آهنگ تبخیر سطحی

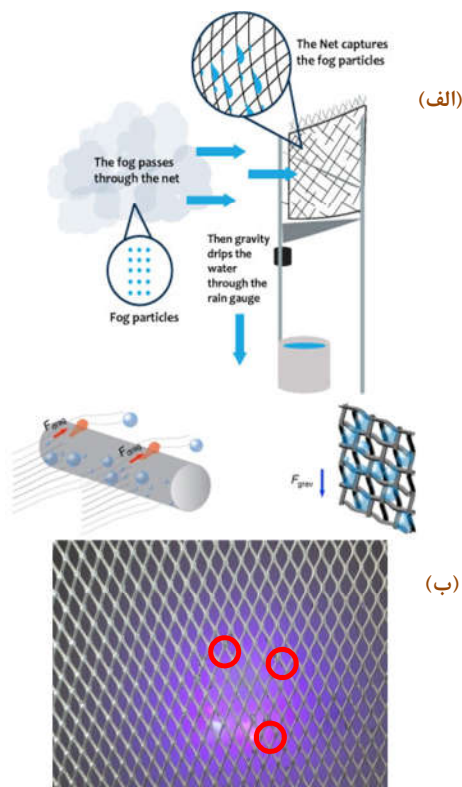
آهنگ انتقال گرما بین آب شور درون حوضچه و پوشش شیشه‌ای عامل بسیار مهمی برای افزایش بهره‌وری آب شیرین کن خورشیدی است.

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: sh.khanmohammadi@kut.ac.ir



شکل ۱- شبکه راشل و طرح هندسی مدل آن [۵]

در مطالعه تجربی حاضر، تکنیک جدیدی معرفی می‌شود که مفهوم چکیدن و جمع‌آوری آب شیرین را با استفاده از فناوری فراصوتی به جهت افزایش آهنگ تبخیر سطحی آب شور، تولید بخار سرد و برداشت مه از طریق مش‌های توری فلزی با الگوی چهار گوشه‌ای لوزی شکل^۲ در سیستم آب شیرین کن استخری خورشیدی که به صورت دولایه‌ای قرار گرفته اند، بیان می‌کند. مطالعه حاضر برای بهبود عملکرد سیستم آب شیرین کن خورشیدی مؤثر است و هزینه آب شیرین به دست آمده را کاهش می‌دهد و می‌توان اهداف مدنظر آن را برای آزمایش دستگاه‌های تقطیرکننده آب شور صنعتی توسعه و گسترش داد.



شکل ۲- الف. طرحواره یک برداشت کننده مه [۶،۷]؛ ب. تولید قطرات آب بروی توری‌های فلزی مطالعه حاضر

افزایش اختلاف دما بین آب شور حوضچه و پوشش شیشه‌ای باعث افزایش آهنگ تبخیر سطحی آب شور می‌شود. انتقال گرما را می‌توان با افزایش سطح حوضچه، رسانایی گرمایی و ضریب انتقال گرمای سیال پایه افزایش داد. برای افزایش تبخیر سطحی آب شور، پورتا-گاندارا و همکاران [۳] با استفاده از تزریق حباب‌های هوا، در سطح آب شور ساکن آشفستگی ایجاد کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد که ایجاد آشفستگی در سطح آب شور موجب افزایش آب شیرین تولیدی می‌شود و موقعیت و دبی جریان حباب‌های هوای تزریقی در افزایش تبخیر آب شور تاثیری ندارد. در بررسی دیگری که توسط الهادی آتیا و همکاران [۴] با موضوع افزایش بهره‌وری آب شیرین کن خورشیدی نیم‌کره‌ای با استفاده از سینی‌های آهن، روی و مس انجام گرفت، نتایج مشخص گردید که افزودن سینی‌های فلز سیاه رنگ مس، روی و آهن منجر به افزایش قابل‌توجهی در میزان تبخیر آب نمک حوضچه سیستم به دلیل بهبود ویژگی‌های انتقال گرما می‌شوند به طوری که نتایج آزمایش‌ها نشان داد، زمانی که از سینی سیاه رنگ مس در آب شیرین کن خورشیدی نیم‌کره‌ای استفاده شود، باعث بهبود بهره‌وری به میزان ۵۳٪/۱۲ نسبت به سینی‌های روی و آهن در سیستم خواهد شد.

مطالعات فوق نشان می‌دهد که پیشرفت‌های بسیار خوبی در افزایش آهنگ تبخیر سطحی آب شور سیستم آب شیرین کن خورشیدی انجام گرفته است. مرور کارهای پیشین نشان می‌دهد که در زمینه برداشت مه با استفاده از توری‌ها و همچنین افزایش بخار در آب شیرین کن‌های استخری تا کنون مطالعه‌ای صورت نگرفته است. لذا مهم‌ترین نوآوری کار حاضر استفاده از این دو مفهوم برای ازدیاد تولید آب شیرین در آب شیرین کن‌های استخری می‌باشد.

۲-۱- برداشت از مه و دامنه بررسی مطالعه حاضر

مطالعات نشان می‌دهد که بسیاری از گیاهان و حیوانات مانند ابریشم عنکبوت، کاکتوس و غیره توانایی خاصی در جمع‌آوری آب از مه دارند به طوری که سطح بیولوژیکی و خواص مورفولوژی بدن آن‌ها در سطح میکرو و نانو نشان می‌دهد که دارای هندسه منحصر به فردی هستند و باعث ترشوندگی زیادی می‌شوند. انواع مختلفی از برداشت کننده‌های مه در رابطه با نوع شکل، اندازه و همچنین جنس مواد مشبک استفاده شده در آن‌ها طراحی و به کار گرفته شده‌اند، اما بیشتر مطالعات و تلاش‌های عملی جهت برداشت مه با استفاده از مش‌های ساخته شده از الیاف و سیم‌های فلزی انجام گرفته است. رایج‌ترین نوع مشی که به عنوان برداشت کننده مه استفاده می‌شود در شکل ۱ به نام مش راشل^۱ استفاده می‌شود.

شکل ۲ طرحواره نحوه تولید قطرات ایجاد شده بروی شبکه‌های توری و فرآیند انتقال آن در اثر چگالش و نیروی گرانش را نشان می‌دهد که با گذشت زمان، قطرات ریز رشد کرده و به هم می‌پیوندند و وقتی قطرات به اندازه کافی بزرگ شوند، بر اساس فشار لاپلاس (P) $(\Delta\gamma/R)$ ، جایی که γ کشش سطح هوا و آب است و R شعاع انحنا موضعی است، یک نیروی فشار در امتداد قطرات تشکیل می‌شوند و آن‌ها را به آستانه ریزش می‌رساند و باعث سقوط آن‌ها می‌شود.

² rhombus mesh

¹ Raschel

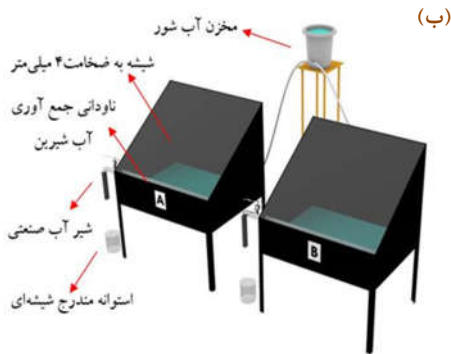
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ساخت سیستم‌های آزمایشگاهی

در مطالعه تجربی حاضر، دو سیستم آزمایشگاهی آب شیرین کن استخری خورشیدی جهت انجام آزمایش تجربی طراحی و ساخته شده است. یکی از قسمت‌های مهم و اساسی در عملکرد سیستم‌های آب شیرین کن خورشیدی حوضچه تبخیر آب شور (صفحات جاذب) است که باید دارای سه پارامتر اساسی باشد: ۱. قابلیت جذب تابش خورشید و مقاومت گرمایی بالا؛ ۲. مقاوم نسبت به خوردگی و جلوگیری از ایجاد رسوب؛ ۳. قابلیت حمل آسان، وزن پایین و صرفه اقتصادی بالا. به همین منظور در مطالعه حاضر، جهت افزایش انتقال گرمای داخلی و تبخیر آب شور، جنس بدنه سیستم‌های آزمایشگاهی از ورق آلومینیوم به ضخامت ۳ میلی‌متر به دلیل جذب و رسانایی گرمایی بالا و سبک بودن وزن آن‌ها ساخته شده است. به علاوه، برای جذب گرمای بیشتر خورشید و افزایش عملکرد سیستم‌های آزمایشگاهی، رنگ دیواره‌ها، به وسیله رنگ مشکی براق به دلیل ضریب جذب بسیار بالاتر خود، پوشانده شده است و برای جلوگیری از اتلاف گرما در کف زیرین حوضچه (تبخیرکننده آب شور) و محفوظ نگه داشتن گرمای آب شور درون حوضچه، سطح زیرین کف حوضچه توسط فوم پلی اورتان عایق‌بندی شده است.

یکی دیگر از عوامل مهم در طراحی و ساخت این سیستم‌ها انتخاب جنس پوشش (چگالنده) می‌باشد. از آنجایی که ضریب جذب، ضریب بازتاب و ضریب گذردهی شیشه بر راندمان دستگاه تأثیرگذار است، چگالنده دستگاه‌ها باید ضریب رسانایی گرمایی بالا، ظرفیت گرمایی و با ضخامت کم باشد تا توزیع دما در آن یکنواخت شده و با اتلاف گرما به محیط، دمای آن سریع‌تر کاهش و میزان چگالش افزایش یابد، از همین روی، از شیشه‌های فلوت ساده به دلیل کیفیت بالای آن‌ها در جنس، عبور نور و یکنواخت بودن آن‌ها با ابعاد 80×78 با ضخامت ۴ میلی‌متر که دارای زاویه ۳۵ درجه نسبت به افق هستند، استفاده شده است. شکل ۳ طراحی سه بعدی مطالعه حاضر به همراه شماتیک فرایند شیرین سازی این سیستم‌ها را نشان می‌دهد.

برای اندازه‌گیری دمای محیط (T_{amb})، دمای شیشه داخلی (T_{gi}) و دمای شیشه بیرونی (T_{go})، دمای آب شور (T_w)، دمای کف حوضچه (T_{ab})، شدت تابش نور خورشید (Rad)، میزان اسیدیته آب شور (PH) و مواد جامد محلول در آب (TDS) از وسایل اندازه‌گیری زیر استفاده گردیده است:



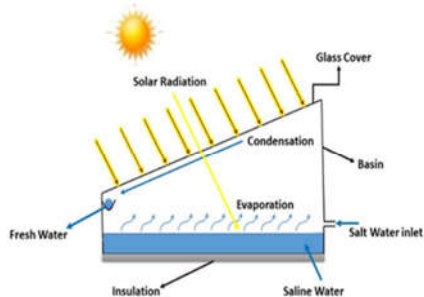
شکل ۳- الف. شماتیک فرایند شیرین سازی آب شور؛ ب. مدل سه بعدی سیستم‌های آزمایشگاهی

- دیتالاگر (مدل logger jumo 500 cf): این دستگاه دارای ۶ ورودی دما از نوع NTC با دقت ± 0.1 است.
- ترموکوپل نوع K
- تابش سنج (مدل Trotec BF06)
- سختی سنج (مدل HM-T-3)
- پی اچ متر (مدل ATC-2011)
- استوانه مندرج شیشه‌ای و پلاستیکی: به منظور اندازه‌گیری حجم آب شیرین تولیدی سیستم‌ها

آزمایش تجربی انجام شده در فضای باز و در روز کاملاً آفتابی از ساعت ۹:۰۰ صبح آغاز و در ساعت ۱۷:۰۰ عصر در دانشگاه صنعتی کرمانشاه به مختصات جغرافیایی (E 47° 05' 47.7", N 34° 19' 31") در مهر ماه ۱۳۹۹ انجام گرفته است. میزان آب شور ورودی از مخزن به دستگاه‌های آزمایشگاهی یکسان و شوری آب ورودی به درون حوضچه‌ها برابر با ۹۰۰۰ ppm تنظیم و اندازه‌گیری شده است. دستگاه‌های آزمایشگاهی ساخته شده در محیط واقعی و طبیعی در محلی که در طول روز، سایه‌ای بر روی آن‌ها اتفاق نیافتد و بتوانند حداکثر تابش مستقیم نور خورشید را دریافت نمایند، قرار داده شده‌اند.

۲-۲- مازول تولید بخار سرد فراصوتی و روند برداشت مه

هنگامی که امواج فراصوتی در اثر ارتعاشات پیزوالکتریک از پایین به سطح مایع منتشر می‌شود، اتمی سازی توسط امواج فراصوتی انجام می‌گیرد. یکی از تأثیرات امواج فراصوتی در پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی، ایجاد پدیده کاویتاسیون از طریق نوسانات تولید شده توسط آن‌ها خواهد بود که منجر به ایجاد تغییرات فشار، شکل‌گیری و فروپاشی حباب‌ها در محیط سیال و آزادسازی مقدار زیادی انرژی از طریق آن‌هاست. در این حالت امواج فراصوتی می‌توانند بروی سیال یک فشار نوسانی را ایجاد کنند که در شدت‌های پایین این امواج فشاری موجب اختلال در کل سیال به عنوان جریان صوتی می‌شوند و با افزایش هر چه بیشتر شدت انتشار امواج فراصوتی علاوه بر وقوع جریان صوتی، فشار محلی در طول دوره تراکم و انبساط موج صوتی به اندازه کافی به زیر فشار بخار سیال کاهش می‌یابد و بر فشار استاتیک و نیروهای چسبندگی غلبه می‌کند و به دنبال آن حباب‌های ریز تشکیل می‌شود. وقتی که امواج فراصوتی با فرکانس بالا از مایعات عبور کنند منجر به بالا رفتن سطح آن‌ها، انحنای شدید سطح و منجر به بروز





شکل ۵- تصویر مازول‌های تولید بخار سرد



شکل ۶- نمایی از محل قرارگیری توری‌های فلزی در اطراف دیوار-ه‌های داخلی

۳-۲- معادلات انتقال گرمای داخلی

انتقال گرمای داخلی در آب شیرین کن استخری خورشیدی از سطح آب شور به سطح درونی پوشش شیشه‌ای صورت می‌گیرد و به طور کلی شامل تبخیر، همرفتی و تابشی است. انتقال گرمای تابشی بین آب شور و سطح شیشه داخلی ($\dot{q}_{R,W-gi}$) را می‌توان از طریق رابطه زیر محاسبه نمود [۸]:

$$\dot{q}_{R,W-gi} = h_{r,w-gi}(T_w - T_{gi}) \quad (1)$$

که در آن ضریب انتقال گرمای تابشی ($h_{R,W-gi}$) برابر است با:

$$h_{R,W-gi} = \varepsilon_{eff} \sigma [(T_w + 273)^2 - (T_{gi} + 273)^2] (T_w + T_{gi} + 546) \quad (2)$$

$$\varepsilon_{eff} = \left(\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_g} - 1 \right)^{-1}$$

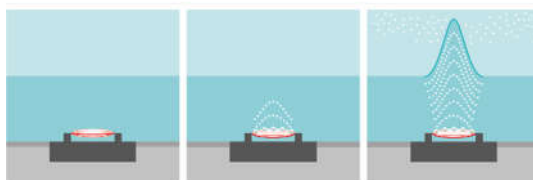
که در رابطه فوق ضریب دید بین آب و شیشه برابر با یک و دما بر حسب درجه سلسیوس تعیین شده است.

به دلیل وجود هوای مرطوب، انتقال گرمای همرفتی درون محفظه آب شیرین‌کن خورشیدی استخری در اثر نیروی شناوری ناشی از اختلاف چگالی، اختلاف دما و غلظت بین سطح آب شور و سطح داخلی پوشش شیشه‌ای به وجود می‌آید. میزان انتقال گرمای همرفتی بین آب شور و سطح داخلی پوشش شیشه‌ای از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\dot{q}_{c,w-gi} = h_{c,w-gi} \times (T_w - T_{gi}) \quad (3)$$

ضریب انتقال گرمای همرفتی در رابطه فوق ($h_{c,w-gi}$) به عواملی نظیر

فواره صوتی به شکل مخروط در سطح آزاد آن‌ها می‌شود، در حالی که اگر انتشار امواج فراصوتی در فرکانس بالا با شدت کم انجام پذیرد، پدیده‌ای در سطح آزاد مایع رخ نخواهد داد. اگر شدت فراصوتی به طور پیوسته افزایش یابد، ارتعاش اندکی در سطح مایع پدیدار می‌شود و اگر مقدار این شدت به بیشینه خود برسد ذرات مایع به اطراف پراکنده و ذرات ابری شکل در بالای سطح آزاد مایع به شکل مه سفید ایجاد خواهند شد که میزان مه تولیدی به شدت امواج مافوق صوت بستگی دارد و اندازه قطرات نیز به فرکانس امواج مافوق صوت و کشش سطح مایع وابسته است. شکل ۴ نمایی از نحوه اتمیزه سازی و فرایند تشکیل مه سفید را نشان می‌دهد.



شکل ۴- فرایند تولید مه در اثر انتشار امواج فراصوتی

با استفاده از دو مازول تولید بخار سرد فراصوتی که در مکان ثابتی در وسط حوضچه یکی از سیستم‌های آزمایشگاهی قرار گرفته‌اند، می‌توان در اثر ارتعاشات پیزوالکتریک به طور پیوسته سطح آب شور را تحریک نمود و با گذشت زمان فضای مه آلود درون محفظه حوضچه ایجاد کرد. جدول ۱ و شکل ۵ به ترتیب محل قرارگیری مازول‌های فراصوتی و مشخصات کاربری این مازول‌ها را در سیستم (A) نشان می‌دهد. جهت چگالش و برداشت مه درون محفظه علاوه بر چگالنده پوشش شیشه‌ای، یک جمع‌کننده مه در اطراف دیواره‌های داخلی به صورت دو لایه با منافذ نسبتاً ریز و لوزی شکل و وسایلی که آن را در یک حالت قائم نگه می‌دارند، استفاده شده است. جنس تور به صورت فلزی بوده و یک ناودانی به منظور جمع‌آوری آب شیرین چگالش یافته در زیر آن‌ها تعبیه شده است. شکل ۶ نمایی از محل قرارگیری توری‌های فلزی در اطراف دیواره‌های داخلی مدل سیستم آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات فنی مازول تولید بخار سرد

منبع تغذیه	۲۴ v AC/DC
میزان جریان ورودی	۰/۴ A
میزان بخاردهی	> ۴۰۰ ml/h
عمر سرامیک پیزوالکتریک	> ۶۰۰۰ h

میزان بازده اگزرژی در سیستم آب شیرین کن استخری خورشیدی برابر است با:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_{x,out}}{\dot{E}_{x,in}} = \frac{\dot{E}_{x,evap}}{\dot{E}_{x,in}} \quad (19)$$

که در رابطه فوق، $\dot{E}_{x,evap}$ میزان اگزرژی خروجی از سیستم و $\dot{E}_{x,in}$ میزان اگزرژی ورودی به سیستم تعریف می‌شود و توسط روابط زیر محاسبه می‌گردد:

$$\dot{E}_{x,out} = \dot{E}_{x,evap} = \frac{\dot{m}_{ew} \times A_b \times h_{fg}}{3600} \left[1 - \frac{T_{amb} + 273}{T_w + 273} \right] \quad (20)$$

میزان اگزرژی خروجی از سیستم برای سیستم آب شیرین کن استخری خورشیدی در حالت ساده و ارتقا یافته با فرضی به ترتیب توسط روابط (۲۱) و (۲۲) محاسبه می‌گردد:

$$\dot{E}_{x,in} = \dot{E}_{x,sun} = A_b I(t) \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_{amb} + 273}{T_s} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{amb} + 273}{T_s} \right)^4 \right] \quad (21)$$

$$\dot{E}_{x,in} = A_b I(t) \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_{amb} + 273}{T_s} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{amb} + 273}{T_s} \right)^4 \right] + W \quad (22)$$

۴-۲- تحلیل عدم قطعیت

عدم قطعیت مقدار شک در اندازه‌گیری‌های یک آزمایش تجربی است. در اندازه‌گیری‌های آزمایشی، دو نوع عدم اطمینان وجود دارد. نوع A که با خطاهای تصادفی مرتبط است و نوع B که با خطاهای سیستماتیک همراه است. در این مطالعه فرض بر این است که اندازه‌گیری‌ها به صورت یکنواخت توزیع می‌شوند و از عدم اطمینان نوع B استفاده می‌شود؛ بنابراین، عدم اطمینان استاندارد می‌تواند به صورت رابطه زیر بیان گردد [۹]:

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (23)$$

که در رابطه فوق، a و u دقت و عدم اطمینان استاندارد تجهیزات اندازه‌گیری در آزمایش هستند. جدول ۲، دقت، محدوده و عدم اطمینان کلیه تجهیزات اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.

جدول ۲- عدم قطعیت و مقادیر دقت ابزار اندازه‌گیری آزمایش.

تجهیزات	دقت	محدوده	عدم قطعیت
آزمایشگاهی			
تابش‌سنج	±۰.۵٪	۰-۴۰۰۰ W/m ²	۰.۲۸۸ W/m ²
ترموکوپل	±۱.۰°C	۰-۱۳۰.۰°C	۰.۵۸°C
استوانه مندرج	۵ ml	۰-۵۰ ml	۲/۸۸ ml

۵-۲- آنالیز اقتصادی

هدف اصلی هر سیستم آب شیرین کن خورشیدی در آنالیز اقتصادی کاهش هزینه تولید آب شیرین در هر لیتر (CPL) است. به همین دلیل، تجزیه و تحلیل هزینه‌های اقتصادی برای سیستم‌های آب شیرین کن خورشیدی مطالعه حاضر بررسی شده است و مراحل تجزیه و تحلیل اقتصادی آن را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد [۱۰، ۱۱].

کل هزینه سالانه سیستم را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$TAC = FAC + AOMC + ASV \quad (24)$$

که در آن FAC ، $AOMC$ ، ASV به ترتیب هزینه‌های ثابت سالانه، متوسط سالانه هزینه ساخت و نگهداری و نرخ بهره سود بانکی در آب

خصوصیات فیزیکی سیال، مشخصات هندسه و اختلاف دمای بین سطح آب شور و سطح داخلی پوشش شیشه‌ای بستگی دارد. نظریه‌های گوناگونی جهت یافتن ضریب انتقال گرمای همرفتی رابطه فوق پیشنهاد شده است که معروف‌ترین حل جهت یافتن ضریب انتقال گرمای همرفتی توسط آقای دانکل انجام گرفته است که حل ایشان توسط روابط زیر نشان داده شده است [۸]:

$$h_{c,w-gi} = 0.844[\Delta T]^{1/3} \quad (4)$$

$$\Delta T' = T_w - T_{gi} + \frac{(P_w - P_{gi})(T_w + 273)}{269.9 \times 10^3 - P_w} \quad (5)$$

$$P_w = \exp\left(25.317 - \frac{5144}{273 + T_w}\right) \quad (6)$$

$$P_{gi} = \exp\left(25.317 - \frac{5144}{273 + T_{gi}}\right) \quad (7)$$

میزان انتقال گرمای تبخیری بین سطح آب شور و چگالنده پوشش شیشه‌ای ($q_{E,w-gi}$) به صورت زیر محاسبه می‌شود [۸]:

$$\dot{q}_{E,w-gi} = h_{E,w-gi} \times (T_w - T_{gi}) \quad (8)$$

که در این رابطه مقدار ضریب انتقال گرمای تبخیری بین سطح داخلی پوشش شیشه‌ای و جرم آب شور ($h_{E,w-gi}$) برابر است با:

$$h_{E,w-gi} = 16.273 \times 10^{-3} \times h_{c,w-gi} \times \left[\frac{P_w - P_{gi}}{T_w - T_{gi}} \right] \quad (9)$$

بنابراین با توجه به روابط فوق، آهنگ کل انتقال گرمای داخلی ($q_{T,w-gi}$) به صورت مجموع آهنگ‌های انتقال گرمای همرفتی، تابشی و تبخیری از طریق انتقال گرما بین آب شور و سطح داخلی پوشش شیشه‌ای بیان می‌گردد و توسط روابط زیر محاسبه می‌گردد:

$$q_{T,w-gi} = q_{c,w-gi} + q_{R,w-gi} + q_{E,w-gi} \quad (10)$$

$$q_{T,w-gi} = h_{T,w-gi} \times (T_w - T_{gi}) \quad (11)$$

$$h_{T,w-gi} = h_{c,w-gi} + h_{R,w-gi} + h_{E,w-gi} \quad (12)$$

بیش‌ترین تأثیر حالت انتقال گرما (تبخیری، همرفتی و تابشی) را می‌توان از کسر انرژی آن‌ها پیدا نمود که به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$F_{ew} = \frac{q_{E,w-gi}}{q_{T,w-gi}} \quad (13)$$

$$F_{rw} = \frac{q_{R,w-gi}}{q_{T,w-gi}} \quad (14)$$

$$F_{cw} = \frac{q_{c,w-gi}}{q_{T,w-gi}} \quad (15)$$

میزان آب شیرین تولیدی از لحاظ نظری (\dot{m}_{ew}) برابر است با:

$$\dot{m}_{ew} = \frac{h_{E,w-gi} \times (T_w - T_{gi}) \times 3600}{h_{fg}} \quad (16)$$

که در این رابطه h_{fg} گرمای نهان بخار آب شور است. همچنین، میزان بازده داخلی برای سیستم آب شیرین کن استخری خورشیدی در حالت ساده و ارتقا یافته با فرضی به ترتیب توسط روابط ۱۷ و ۱۸ محاسبه می‌گردد:

$$\eta_i = \frac{\dot{m}_{ew} \times h_{fg}}{(I(t) \times A_b)} \quad (17)$$

$$\eta_i = \frac{\dot{m}_{ew} \times h_{fg}}{(I(t) \times A_b) + W} \quad (18)$$

که در روابط فوق، W میزان توان الکتریکی مصرفی ماژول فراصوتی، $I(t)$ شدت تابش لحظه‌ای خورشید و A_b مساحت سطح حوضچه نامیده می‌شوند.

عملکرد واقعی هر سیستم را می‌توان با دانستن کارایی اگزرژی آن ارزیابی کرد. هر چه راندمان اگزرژی بیشتر باشد، توانایی دستگاه در انجام اهداف پیش‌بینی شده برای آن بالاتر خواهد بود. بر این اساس

شیرین کن خورشیدی است. در رابطه فوق هزینه‌های ثابت سالانه (FAC) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$FAC = P \times CRF \quad (25)$$

که در آن P و CRF به ترتیب نشان دهنده مجموع هزینه‌های مواد اولیه سیستم و ضریب بازیابی سرمایه اولیه است. که در رابطه فوق CRF به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$CRF = \frac{r \times (1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (26)$$

که در رابطه فوق، n تعداد سال‌های مفیدی است که سیستم آب شیرین کن خورشیدی در آن‌ها کار می‌کند و به طور معمول برای این دستگاه‌ها ۱۰ سال پیشنهاد می‌شود و r نرخ بهره (سود) سالانه که در ایران به طور متوسط ۱۵٪ منظور می‌شود.

همچنین، ارزش باقیمانده ASV ، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$ASV = SFF \times S \quad (27)$$

که در آن SFF و S به ترتیب ضریب هزینه استهلاک و ارزش حفظ و نگهداری سیستم آب شیرین کن خورشیدی هستند، که توسط روابط زیر به دست می‌آیند:

$$SFF = \frac{r}{(1+r)^n - 1} \quad (28)$$

$$S = 0.2 \times P \quad (29)$$

متوسط هزینه بهره‌برداری و نگهداری سالانه ($AOMC$) توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$AOMC = 0.15 \times FAC \quad (30)$$

هزینه آب مقطر تولید شده در هر لیتر ($L/m^2/S$) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$CPL = \frac{TAC}{M_y} \quad (31)$$

$$M_y = (\dot{m}_{ev})_d \times N_{day} \quad (32)$$

که در روابط فوق، TAC ، $(\dot{m}_{ev})_d$ ، M_y ، N_{day} به ترتیب برابر کل هزینه سالانه سیستم آب شیرین کن خورشیدی، متوسط سالانه آب شیرین تولید شده بر حسب (L/m^2 در سال)، میانگین روزانه آب شیرین تولید شده (L/m^2 در روز)، و تعداد روزهای آفتابی که در آن آب شیرین کن خورشیدی کار می‌کند. در این مطالعه، تمام روابط حل شده فوق و نمودارها به کمک نرم‌افزار ایز (EES¹) محاسبه می‌شوند.

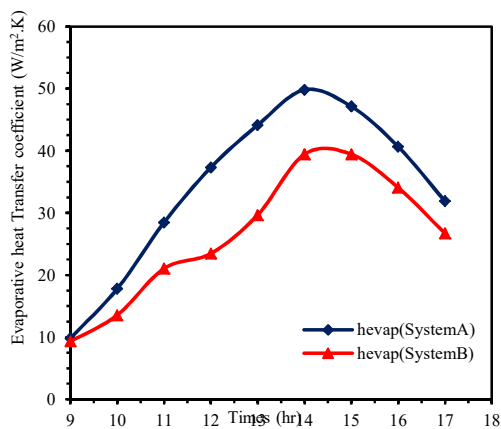
۳- نتایج و بحث

دستگاه‌های آزمایشگاهی آب شیرین کن خورشیدی حالت ساده و بهبودیافته با فراصوتی و توری هر کدام به طور یکسان در عمق آب شور ۴cm معادل ۲۰Lit تنظیم و آزمایش شده‌اند. تغییرات لحظه‌ای شدت تابش خورشید، دمای محیط، دمای سطح داخلی پوشش شیشه‌ای و آب شور به عنوان تابعی از زمان محلی برای دو سیستم آزمایشگاهی ساخته شده در روز آزمایش در شکل ۷ نشان داده شده است. واضح است که شدت تابش خورشید در ساعت‌های اولیه صبح افزایش می‌یابد و به حداکثر مقدار خود در حوالی ظهر در حدود ۱۰۵۵ وات بر متر مربع می‌رسد و بعد از ظهر کاهش می‌یابد. همان‌طور که از روند دو نمودار تغییرات شدت تابش خورشید و دمای محیط نسبت به زمان

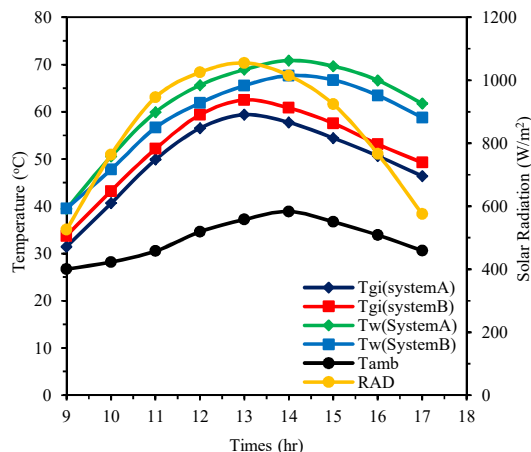
مشخص است با کاهش شدت تابش خورشید در ظهر و گذشت زمان، در بعدازظهر پس از مدتی که تابش خورشید به زمین تابیده می‌شود و زمین گرمای خود را به محیط انتقال می‌دهد، حداکثر دمای محیط بین ساعات ۱۳:۰۰ الی ۱۵:۰۰ رخ می‌دهد و از آنجایی که بهره‌وری دستگاه‌های آب شیرین کن خورشیدی با میزان شدت تابش خورشید و دمای محیط رابطه مستقیم دارد، در نتیجه مشاهده می‌شود که بازده تولید آب شیرین توسط دستگاه‌های مورد مطالعه با افزایش شدت تابش خورشید افزایش و برای یک روز آزمایش تقریباً مقادیری نزدیک به هم داشته باشند، در نتیجه می‌توان شاهد افزایش تولید آب شیرین در هر دو دستگاه‌ها بود. به علاوه، نتایج تجربی تغییرات ساعتی دمای آب شور، پوشش شیشه را در طول آزمایش نشان می‌دهد که دمای آب شور، دمای سطح داخلی پوشش شیشه‌ای در ساعات صبح افزایش می‌یابد تا قبل از شروع به کاهش اواخر بعد از ظهر، به حداکثر مقدار در نیمه ظهر برسد. می‌توان گفت که دمای پوشش شیشه‌ای سریع‌تر از آب شور به حداکثر دمای خود می‌رسد. این در حقیقت به این دلیل است که آب شور از ظرفیت گرمایی بالاتری نسبت به پوشش شیشه برخوردار است.

شکل ۸ تغییرات لحظه‌ای ضرایب انتقال گرمای تبخیری (\dot{m}_{evap}) برای دستگاه‌های بهبودیافته با فراصوتی و حالت ساده نسبت به زمان در روز آزمایش را نشان می‌دهد. انتقال ارتعاش از مبدل پیزوالکتریک در فراصوتی به آب شور باعث ایجاد آشفتگی و حفره در آن می‌شود و در ایجاد قطرات متمیزه شده آب شور بسیار تأثیرگذار است. به همین دلیل تبدیل انرژی از فرکانس ارتعاش پیزوالکتریک باید بیشتر از کشش سطحی آب باشد تا سطح آب شور را دچار آشفتگی کند. انرژی ارتعاشی پیزوالکتریک قادر به شکسته شدن نیروی کشش سطحی آب شور برای فرکانس با ارتعاشات کم نیست، به همین دلیل انرژی ارتعاشی باید بر نیروهای کششی سطحی آب غلبه کند تا زمانی که قطرات دچار ترکیده شدن شوند؛ به همین منظور در فرکانس با ارتعاشات بالا، قطرات بیشتری نسبت به فرکانس با ارتعاشات پایین تولید می‌شوند. در اتمیزه‌سازی فراصوتی، با افزایش میزان ولتاژ، امواج فراصوتی می‌توانند سرعت و شتاب مولکول‌های سطح آب را افزایش دهند، در این حالت مولکول‌ها بر نیروی کششی سطحی آب شور غلبه کرده و باعث افزایش مقدار اتمیزه شدن و تبخیر آب خواهند شد و منجر به افزایش آهنگ تبخیر سطحی آب شور و میزان آب شیرین تولید شده توسط سیستم می‌شوند، به طوری که با افزایش دمای آب شور، پیوستگی و کشش سطحی مولکول‌های آب کاهش می‌یابد و انرژی جنبشی و سرعت مولکول‌های سطح آب افزایش خواهد یافت که این امر باعث غلبه بر نیروی کشش سطحی آب شور می‌شود و در نتیجه، مقدار اتمیزه شدن آب شور توسط امواج فراصوتی و همچنین سرعت انتقال گرمای تبخیری افزایش می‌یابد.

¹ Engineering Equation Solver



شکل ۸- تغییرات لحظه‌ای ضریب انتقال گرمای تبخیری برحسب زمان در روز آزمایش



شکل ۷- تغییرات لحظه‌ای شدت تابش خورشید، دمای محیط، دمای سطح داخلی پوشش شیشه‌ای و آب شور



شکل ۹- نمایی از سیستم‌های آزمایشگاهی و اشباع شدن سیستم آزمایشگاهی A با بخار سرد در هنگام آزمایش

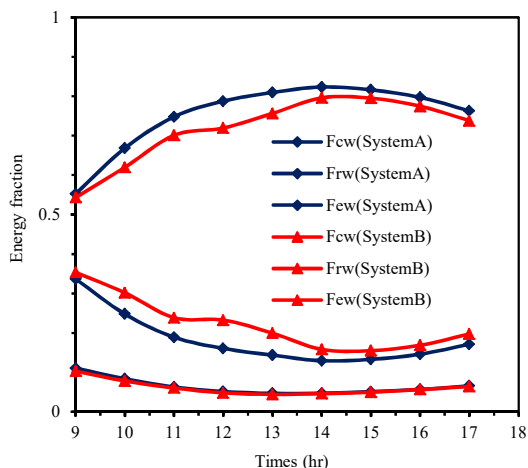
همان‌طور که از نمودار شکل ۸ نیز برای دو سیستم مشخص است، نتایج نشان می‌دهد که ارتعاشات پیزوالکتریک از طریق تحریک آب شور موجب افزایش ضریب انتقال گرمای تبخیری در طی زمان شده است. حداکثر مقدار ضریب انتقال گرمای تبخیری (h_{evap}) برای سیستم بهبودیافته در روز اول در ساعت ۱۴:۰۰ برابر با $49/81 \text{ W/m}^2\text{K}$ مشاهده می‌شود که به میزان $20/83\%$ بیشتر از سیستم حالت ساده افزایش یافته است. به علاوه، مشاهده می‌شود که سیستم (A) از ساعت ۱۲:۰۰ تا ۱۷:۰۰ افزایش چشمگیری در ضریب انتقال گرمای تبخیری نسبت به سیستم (B) داشته است، دلیل این افزایش شدت تابش‌های خورشید و دمای محیط است که منجر به بخار شدن مه (بخار سرد) و قطرات اتمیزه شده در آن ساعات می‌شود؛ بنابراین می‌توان گفت که به طور کلی $22/90\%$ ضریب انتقال گرمای تبخیری سیستم بهبودیافته با فراصوتی در مقایسه با سیستم حالت ساده افزایش یافته است.

ارتعاشات فراصوتی نه تنها آب شور را به بخار سرد و تشکیل قطرات اتمیزه شده تبدیل می‌کند، بلکه هم‌زمان باعث ایجاد آشفتگی در آب شور می‌شود که منجر به بخار شدن بیشتر آن می‌شود. به همین دلیل، افزایش کلی ضریب انتقال گرمای داخلی کل (ht_{wgi}) برای سیستم مجهز به فراصوتی (سیستم A) در مقایسه با سیستم حالت ساده (سیستم B) به دلیل تشکیل بخار سرد (مه) در طول سه روز آزمایش $19/03\%$ اندازه‌گیری شده است.

تغییرات ضریب انتقال گرمای داخلی کل در سیستم آب شیرین‌کن خورشیدی (ht_{wgi}) برابر با مجموع تمام ضرایب انتقال گرمای تبخیری، همرفتی و تابشی است و با توجه به نمودار گذشته، همان‌طور که نشان داده شده است، مقدار عددی ضرایب انتقال گرمای تبخیری (h_{evap}) افزایش قابل توجهی یافته است، از این رو تغییرات ضریب انتقال گرمای داخلی کل (ht_{wgi}) از منحنی ضریب انتقال گرمای تبخیری (h_{evap}) پیروی خواهد کرد. به همین دلیل، تغییرات ضریب انتقال گرمای داخلی کل (ht_{wgi}) به عنوان تابعی از زمان در شکل ۹ برای هر دو سیستم آزمایشگاهی نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، حداکثر مقدار ضریب انتقال گرمای داخلی کل (ht_{wgi}) در ساعت ۱۴:۰۰ مشاهده می‌شود که نسبت به سیستم (B) افزایش بیشتری داشته است. با گذشت زمان، ضریب انتقال گرمای داخلی کل (ht_{wgi}) روند کاهشی می‌یابد و این روند تا پایان آزمایش ثابت می‌ماند.

شکل ۱۱ تغییرات لحظه‌ای فشار جزئی بین سطح آب شور و سطح پوشش چگالنده نسبت به زمان را نشان می‌دهد. هر چه مقدار اختلاف فشار جزئی بیشتر باشد، عملکرد سیستم در حالت کلی بیشتر خواهد بود. از شکل ۱۰ مشخص است که اختلاف فشار جزئی در سیستم آب شیرین‌کن خورشیدی مجهز به فراصوتی در روز آزمایش به طور قابل توجهی بیشتر از سیستم حالت ساده در طول روز است، علت این امر را می‌توان افزایش اختلاف دمای بین سطح آب شور و دمای سطح چگالنده دانست.

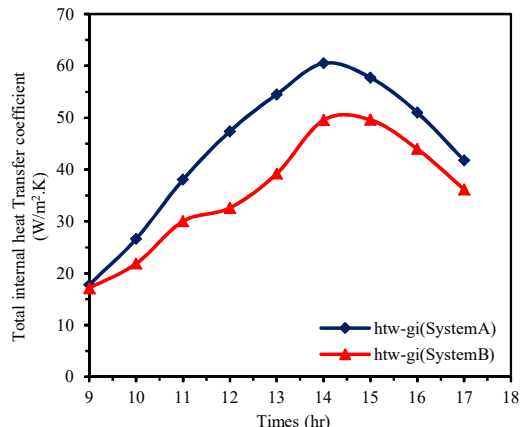
با سیستم (B) کاملاً افزایش یافته است که باعث بهبود انتقال گرمای تبخیری در اثر استفاده از ماژول تولید بخار سرد فراصوتی شده است.



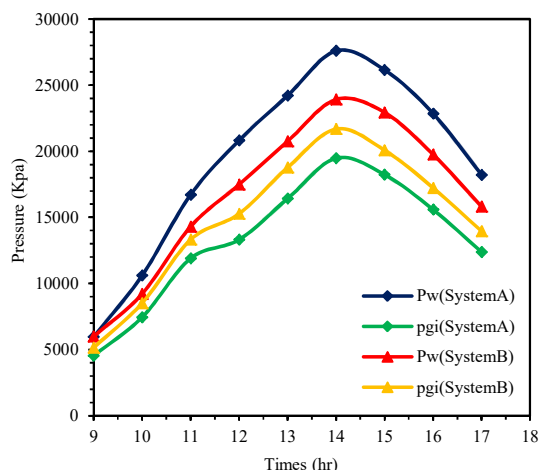
شکل ۱۲- تغییرات لحظه‌ای کسره‌های انرژی برحسب زمان در روز آزمایش

شکل ۱۳ تغییرات لحظه بازده انرژی و انرژی نسبت به زمان را نشان می‌دهد. مشخص است که در تمامی ساعات آزمایش، بازده انرژی و انرژی تجربی سیستم بهبودیافته با فراصوتی در مقایسه با سیستم حالت ساده افزایش یافته است، با افزایش شدت تابش خورشید، میزان بازده انرژی و انرژی داخلی هر دو سیستم با افزایش تدریجی همراه است. با گذشت زمان و در ساعات ابتدایی ظهر تا پایان ساعت آزمایش، با افزایش شدت تابش خورشید، دمای محیط و تولید بخار سرد (قطرات اتمیزه شده) نسبت به سیستم حالت ساده، میزان کارایی و انرژی داخلی سیستم A بهبود چشمگیری می‌یابد و در کلیه ساعات آزمایش حالت پایدار و روند افزایشی دارد. به طور کلی میزان بازده انرژی و انرژی داخلی برای سیستم بهبودیافته با فراصوتی به ترتیب ۵۶٪/۲۱ و ۲۹٪/۱۴ افزایش نسبت به سیستم حالت ساده نشان می‌دهد.

شکل ۱۴ میزان تولید آب شیرین برای هر یک از سیستم آزمایشگاهی در اثر استفاده از ماژول تولید بخار سرد و توری را نشان می‌دهد. میزان تولید آب شیرین بر اساس ارتعاشات پیزوالکتریک، قطرات اتمیزه شده و چگالش آن‌ها بروی پوشش شیشه‌ای و توری ۱۰۴۰ میلی‌لیتر است، در حالی که نتیجه آزمایش هم‌زمان سیستم دیگر در حالت ساده میزان ۸۴۵ میلی‌لیتر را نشان می‌دهد. مقدار اختلاف تولید آب شیرین بین دو سیستم آزمایشگاهی در اثر استفاده از ماژول تولید بخار سرد و توری فلزی به میزان ۱۸٪/۷۵ برآورد شده است. افزایش تولید آب شیرین به دلیل افزایش میزان تبخیر بالاتر در اثر ارتعاشات ناشی از پیزوالکتریک و میزان تولید بخار سرد است؛ بنابراین، میزان آب شیرین تولید شده از سیستم بهبود یافته با فراصوتی در مقایسه با سیستم آزمایشگاهی دیگر، به دلیل افزایش میزان تبخیر آب شور و تولید بخار سرد در بازه زمانی آزمایش افزایش یافته است.

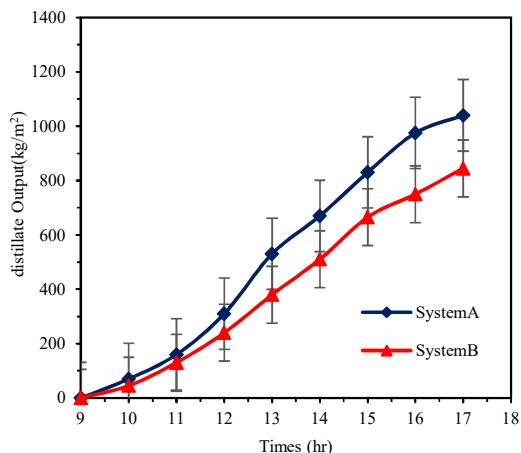


شکل ۱۰- تغییرات لحظه‌ای ضریب انتقال گرمای داخلی کل برحسب زمان در روز آزمایش



شکل ۱۱- تغییرات لحظه‌ای فشار جزئی سیستم‌های آزمایشگاهی برحسب زمان در روز آزمایش

شکل ۱۲ تغییرات لحظه‌ای کسره‌های انرژی هر دو سیستم آزمایشگاهی در روز آزمایش را با استفاده از معادلات ۱۳ تا ۱۵ نشان می‌دهد. این پارامترها هر کدام تعریف کلی از فرایندهای انتقال گرما در هر یک از سیستم‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهند و با مقایسه تمام حالت‌های انتقال گرما از طریق آن، می‌توان توانایی یا آنالیز نسبی انتقال گرما (از قبیل تبخیر، همرفت و تابش) در یک سیستم آب شیرین کن خورشیدی با مشاهده منحنی‌های کسر انرژی به دست آورد و تأثیرگذارترین حالت انتقال گرما در عملکرد سیستم آب شیرین کن خورشیدی را برداشت نمود. همان‌طور که در شکل زیر نمایش داده شده است، بیشترین تأثیرگذاری عامل انتقال گرما در عملکرد دستگاه‌های آزمایشگاهی، انتقال گرمای تبخیری و سپس همرفتی و تابشی است. با مقایسه کسره‌های انرژی بین دو سیستم واضح است که با گذشت زمان آزمایش، کسر انرژی انتقال گرمای تبخیری (F_{ew}) و کسر انرژی انتقال گرمای تابشی (F_{rw}) در بعدازظهر به دلیل کاهش تابش خورشید ارتباط معکوسی با یکدیگر دارند که باعث کاهش اختلاف دمای آن‌ها شده است؛ بنابراین، از منحنی‌ها برآورد می‌گردد منحنی کسر انرژی انتقال گرمای تبخیری (F_{ew}) برای سیستم (A) در مقایسه

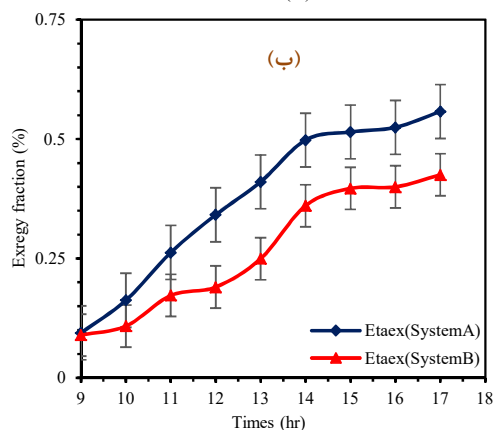
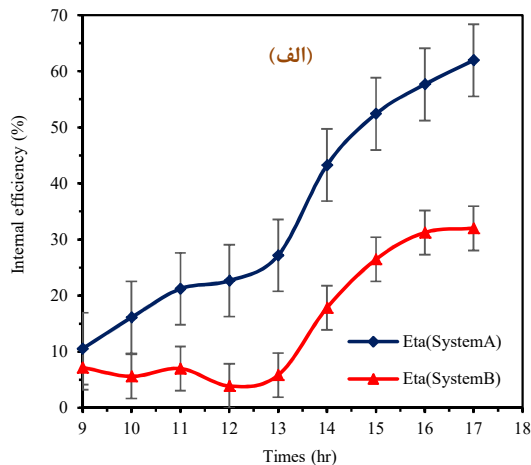


شکل ۱۴- میزان تولید آب شیرین سیستم‌های آزمایشگاهی با و بدون فراصوتی و توری

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه تجربی، اثر استفاده از ماژول تولید بخار سرد فراصوتی و برداشت از مه با استفاده از توری فلزی بر عملکرد آب شیرین کن استخری خورشیدی تحت شرایط آب و هوایی شهر کرمانشاه در مهرماه ۱۳۹۹ بررسی شده است. مشخص گردید که استفاده از ماژول تولید بخار سرد فراصوتی میزان چگالش قطره‌های و سرعت تبخیر آب شور را بهبود می‌بخشد و نتیجه‌گیری‌های زیر در مطالعه حاضر به دست آمد:

- میزان ضریب انتقال گرمای تبخیری (h_{ew}) و میزان ضریب انتقال گرمای داخلی (ht_{wgi}) به ترتیب $۲۲/۹۰$ ، $۱۹/۰۳$ ٪ در اثر ارتعاشات پیزوالکتریک بروی سطح آب شور در مقایسه با سیستم آزمایشگاهی حالت ساده، بهبود و افزایش یافته است.
- میزان بازده انرژی و اگزرژی داخلی برای سیستم آزمایشگاهی بهبود یافته با فراصوتی به ترتیب $۵۶/۲۱$ ٪، $۲۹/۱۴$ ٪ افزایش یافته است.
- قطرات اتمیزه تولید شده توسط امواج فراصوتی با افزایش دمای محیط سریع‌تر تبخیر می‌شوند؛ بنابراین، با افزایش دما و شدت تابش خورشید، میزان تولید آب شیرین افزایش می‌یابد.
- مشخص شد که میزان تولید تقطیر روزانه ۱۰۴۰ میلی‌لیتر در روز برای آب شیرین کن خورشیدی با الترسونیک و توری است، یعنی معادل $۱۸/۷۵$ ٪ افزایش در بهره‌وری آب شیرین در مقایسه با آب شیرین کن استخری خورشیدی حالت ساده نشان می‌دهد.
- هزینه سالانه آب مقطر تولید شده از آب شیرین کن خورشیدی مجهز به فراصوتی در مقایسه با سیستم حالت ساده تقریباً $۴/۸۳$ ٪ کاهش یافته است.



شکل ۱۳- تغییرات لحظه‌ای بازده انرژی و اگزرژی برحسب زمان در روز آزمایش

الف. بازده انرژی ب. بازده اگزرژی

جدول ۳ هزینه اقتصادی اجزای مختلفی که آب شیرین کن خورشیدی بهبود یافته با فراصوتی و حالت ساده از آن‌ها تشکیل شده است را نشان می‌دهد، از آنجایی که ماژول تولید بخار سرد فراصوتی فقط $۰/۰۰۹۶$ کیلووات ساعت انرژی مصرف می‌کند که بسیار ناچیز است، بنابراین می‌توان از آن چشم پوشی کرد. جدول ۴ مقادیر هزینه و فاکتورهای مختلف اقتصادی را برای هر دو سیستم نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، هزینه سالانه آب شیرین تولید شده از آب شیرین کن خورشیدی مجهز به فراصوتی در مقایسه با سیستم حالت ساده تقریباً $۴/۸۳$ ٪ کمتر است. بنابراین، اضافه نمودن تجهیز ماژول تولید بخار سرد فراصوتی در سیستم آب شیرین کن خورشیدی در ساعات اوج تابش خورشید نه تنها از نظر تولید آب شیرین بلکه از نظر اقتصادی نیز گزینه بهتری است و صرفه اقتصادی دارد.

جدول ۳- هزینه نصب و تجهیزات اجزای مختلف آب شیرین کن خورشیدی بهبود یافته و حالت ساده (برحسب دلار \$).

سیستم	سیستم	تجهیزات
حالت ساده	بهبود یافته	
۲	۲	شیشه تک جداره
۵۳	۵۳	بدنه آلومنیومی گالوانیزه
۲	۲	پشم شیشه (عایق)
۳/۵۹	۳/۵۹	لوله پلیکا
۶/۴۰	۶/۴۰	چسب اکواریموم
-	۷/۲۶	ماژول افراصوتی
-	۴/۲۷	توری فلزی
۶۷	۷۸/۵۲	جمع هزینه

جدول ۴- مقادیر هزینه و فاکتورهای مختلف اقتصادی برای آب شیرین کن خورشیدی بهبود یافته و حالت ساده.

سیستم	سیستم	حالت ساده
بهبود یافته		
P	۷۸/۵۲	۶۷
S	۱۵/۷	۱۳/۴
CRF	۰/۲	۰/۲
FAC(\$)	۱۵/۷	۱۳/۴
SFF	۰/۴۵۴۵	۰/۴۵۴۵
ASV(\$)	۷/۱۳۸	۶/۰۹۱
AOMC(\$)	۲/۳۵۶	۲/۰۱
TAC	۲۵/۲	۲۱/۵
CPL(L/m ² /S)	۰/۰۸۰۷	۰/۰۸۴۸

۵- سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از دانشگاه صنعتی کرمانشاه به دلیل پشتیبانی، تشویق و امکانات ارائه شده جهت انجام این پژوهش کمال تشکر و قدردانی لازم را دارند.

۶- مراجع

- [1] Seckler D., Barker R., Amarasinghe U., Water scarcity in the twenty-first century. *International Journal Water Resour Development*, Vol. 15, No. 1-2, pp. 29-42, 1999.
- [2] Beysens D., Muselli M., Nikolayev V., Narhe R., Milimouk I., Measurement and modelling of dew in island, coastal and alpine areas. *Atmospheric Reserch*, Vol. 73, No 1-2, pp:1-22, 2005.
- [3] Essa F.A., Abdullah A.S., Omara Z.M., Kabeel A.E., Gamiel Y., Experimental study on the performance of trays solar still with cracks and reflectors, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 188, 116652, 2021.
- [4] Attia M.E.H., Kabeel A.E., Abdelgaied M., Essa F.A., Omara Z.M., Enhancement of hemispherical solar still productivity using iron, zinc and copper trays, *Solar Energy*, Vol. 216, pp:295-302, 2021.
- [5] Azeem M., Noman M.T., Wiener J., Petru M., Louda P., Structural design of efficient fog collectors: A review. *Environmental Technology and Innovation*, Vol. 20, 101169, 2020.
- [6] Park K.C., Chhatre S.S., Srinivasan S., Cohen R.E., McKinley G.H., Optimal design of permeable fiber network structures for fog harvesting, *Langmuir*, pp:13269-77, 2013.
- [7] <https://www.baysidefogcollectors.com>
- [8] Nazari S., Safarzadeh H., Bahiraci M., Experimental and analytical investigations of productivity, energy and exergy efficiency of a single slope solar still enhanced with thermoelectric channel and nanofluid, *Renewable Energy*, Vol. 135, pp:729-44, 2019.
- [9] Kirkup L., Frenkel R.B., An introduction to uncertainty in measurement, *Cambridge University Press*, 2006.
- [10] Shehata A.I., Kabeel A.E., Khairat Dawood M.M., Abo Elazm M.M., Abdalla A.M., Mehanna A., Achievement of humidification and dehumidification desalination system by utilizing a hot water sprayer and ultrasound waves techniques. *Energy Conversion and Management*, Vol. 201, , 112142, 2019.
- [11] Mukherjee K., Tiwari G.N., Economic analyses of various designs of conventional solar stills. *Energy Conversion and Management*, Vol. 26, No. 2, pp:155-7, 1986.