



مدل‌سازی یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی مجهز به مواد تغییر فاز دهنده به روش رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی هوا

جاماسب پیرکندی^{۱*}، رامین ساجدی^۲، منیژه ذاکری^۳

^۱ دانشیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
^۲ فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۳ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۰

چکیده

روش رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی هوا گزینه مناسبی برای تولید غیر متمرکز آب شیرین است. نقطه ضعف اصلی این سیستم‌ها وابستگی آن به نور مستقیم خورشید است. برای حل این مشکل، استفاده از روش ذخیره انرژی گرمایی خورشید در روز و استفاده از این انرژی در طول شب می‌تواند گزینه بسیار مناسبی باشد که با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده قابل تحقق است. در کار حاضر با تجهیز کردن کلکتور خورشیدی مجهز شده با ماده تغییر فاز دهنده از دو نوع مختلف پارافین و اکس امکان ادامه کار آب شیرین‌کن در ساعات بعد از غروب خورشید نیز فراهم گردیده است. برای حل معادلات حاکم بر اجزای سیستم آب شیرین‌کن از نرم‌افزار متلب استفاده شده است. طبق نتایج به دست آمده دمای آب خروجی از کلکتور خورشیدی نقش قابل توجهی در میزان آب شیرین تولید شده دارد و همچنین نتایج مؤید آن است که استفاده از ماده تغییر فاز دهنده بیش از ۹٪ افزایش تولید آب شیرین را در پی دارد. نتیجه دیگر نشان می‌دهد که سرعت فرایند ذوب به مقدار قابل ملاحظه‌ای بیشتر از سرعت فرایند انجماد است.

کلمات کلیدی: آب‌شیرین‌کن؛ رطوبت‌زنی- رطوبت‌زدایی؛ کلکتور خورشیدی؛ مواد تغییر فاز دهنده.

Modeling of Solar Desalination Equipped with Phase Change Materials by Air Humidification and Dehumidification Technique

Jamasb Pirkandi^{1,*}, Ramin Sajedi², Manizhe Zakeri³

¹ Associate Professor, Faculty of Aerospace Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

² M. Sc. Graduated, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

³ Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

The air humidification-dehumidification method is a good option for decentralized freshwater production because of no need for high temperature operation. The main disadvantage of these systems is their dependence on direct sunlight. To solve this problem, using the sun's thermal energy storage during the day and using this energy during the night can be a very good option that can be achieved using phase change materials. In the present work, it is also possible to continue the desalination process after sunset, by equipping the solar collector with phase change material from two different types of paraffin wax. MATLAB software has been used to solve the equations governing the components of the desalination system. According to the results, the temperature of the output water from the solar collector plays a significant role in the amount of fresh water produced. The results also confirm that the use of phase change material leads to more than 9% increase in fresh water production. Another important result is that in the phase change materials the melting process speed is substantially higher than the freezing process speed.

Keywords: Desalination, humidifier-dehumidifier, solar collector, phase change materials.

۱- مقدمه

افزایش قابل توجه فعالیت‌های صنعتی و نیز رشد جمعیت جهان که هم نیازهای غذایی و هم نیازی‌های شرب بیشتری دارند، موجب افزایش هر چه بیشتر نیاز به آب‌شیرین در جهان امروز گردیده است؛ بنابراین یافتن منابع جدید آب شرب و بهداشتی اجتناب‌ناپذیر است. از آن جا که مقدار قابل توجهی از منابع آب جهان، آب‌شور دریاها و اقیانوس‌ها می‌باشند، لذا شیرین‌سازی این آب‌ها می‌تواند گزینه مناسب و قابل‌اعتمادی برای تأمین و پاسخگویی به نیاز روزافزون آب بهداشتی باشد. حتی امروزه نیز استفاده از روش نمک‌زدایی آب دریاها اصلی‌ترین روش تأمین آب مصرفی در برخی کشورهای جهان (مانند عربستان، امارات و...) است. نمک‌زدایی در واقع مجموعه فعالیت‌هایی است که در طی آن، آب‌شور غیر قابل شرب که دارای مقدار جامدات محلول (TDS) بسیار زیاد است، تبدیل به آب شیرین (TDS کمتر از ۱۰۰۰ ppm) می‌شود. روش‌های مختلفی برای نمک‌زدایی از آب‌شور به کار گرفته شده است ولی به طور کلی فرایندهای نمک‌زدایی را به دو دسته کلی می‌توان تقسیم‌بندی کرد: (۱) فرآیندهای غشایی، (۲) فرآیندهای حرارتی. اساساً مجموعه‌های نمک‌زدایی تأسیسات عظیمی هستند، لذا نیاز به انرژی و مواد اولیه گزاف برای راه‌اندازی و کار کردن این تأسیسات امری بدیهی است که همین موضوع یکی از موانع و اشکالات مهم در راه‌اندازی این مجموعه‌ها است؛ چرا که در بسیاری از کشورهای در حال توسعه و نیز مناطق محروم، اصولاً سرمایه کافی برای خرید و راه‌اندازی این مجموعه‌ها وجود ندارد. چه این مجموعه نمک‌زدایی از نوع غشایی باشد که نیاز به تجهیزات اولیه گران‌قیمت و نیز برق مصرفی فراوان دارد و چه از نوع حرارتی باشد که نیاز به سوخت‌های فسیلی بسیار زیاد برای تولید حرارت دارد.

روش نسبتاً جدیدی که در دهه نود میلادی و قرن حاضر جهت تولید آب شیرین مورد توجه قرار گرفته، روش رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی است. این روش برای ظرفیت‌های نسبتاً کم مناسب بوده و به علت پایین بودن میزان مصرف انرژی حرارتی، می‌توان کل انرژی حرارتی مورد نیاز واحد را به وسیله انرژی خورشید تأمین نمود. تولید آب شیرین به روش رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی هنوز به مرحله تجاری نرسیده است؛ اما کارهای تحقیقاتی زیادی در کشورهای مختلف به خصوص مناطق گرمسیر صورت گرفته است. چندین آب‌شیرین‌کن

رطوبت‌زنی- رطوبت‌زدایی در کشورهای تونس [۱]، ایران [۲ و ۳] مالزی [۴] و اردن [۵] ساخته شده‌اند و تحقیقات برای بهبود راندمان، کوچک کردن اندازه واحد و کم کردن انرژی مصرفی آن‌ها ادامه دارد. در طی سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در مورد آب‌شیرین‌کن‌های رطوبت‌زنی- رطوبت‌زدایی با دو رویکرد بررسی عددی-تحلیلی و بررسی تجربی انجام گردیده است که در ادامه برخی کارهای صورت گرفته و نتایج حاصل از آن‌ها ارائه شده است. این فناوری می‌تواند، موجب حفظ منابع زیرزمینی، جلوگیری از اثرات تخریبی روی محیط زیست [۶] و اطمینان از بهره‌گیری از منابع تجدید پذیر انرژی در راستای تولید آب شیرین و قابل شرب شود. یک دستگاه ساده نمک‌زدایی با فرایند رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی شامل مراحل رطوبت‌زنی، گرمایش (آب/هوا) و مرحله رطوبت‌زدایی می‌باشد. منابع گرمایی متنوعی شامل، گرمایش خورشیدی، منبع فوتولتاییک /گرمایی، زمین گرمایی، بادی و یا ترکیبی از این موارد می‌توانند به‌عنوان منبع گرمایی در فناوری رطوبت‌زنی- رطوبت‌زدایی مورد استفاده قرار بگیرند [۷]. انتقال و نفوذ آب خالص از محتویات آب‌شور به داخل هوا در قسمت رطوبت‌زنی اتفاق می‌افتد که در پی آن رطوبت هوای ورودی به داخل رطوبت‌زن در طی عبور از آن به میزان قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. تفاوت غلظت بین آب موجود در بخار آب و هوای مرطوب در مرز مشترک بین دو سیال عاملی است که موجب نفوذ و حرکت مولکول‌های آب به داخل هوا در داخل دستگاه رطوبت‌زن می‌شود. نکته مهم دیگر این که انتقال یا به عبارتی نفوذ مولکول‌های آب به داخل هوا به شدت تحت تأثیر دو پارامتر قرار دارد، اول فشار جزئی بخار آب داخل هوا و دوم فشار بخار آب که البته در سطح تماس مشترک بخار آب و هوا [۸] مدنظر است.

تحقیقات مختلف نشان داده‌اند که مقدار رطوبت موجود در هوای ورودی به بخش رطوبت‌زن سیستم رطوبت‌زنی- رطوبت‌زدایی تأثیر قابل توجهی بر عملکرد قسمت رطوبت‌زن و به تبع آن عملکرد کلی دستگاه رطوبت‌زنی- رطوبت‌زدایی دارد. مطالعه عددی بر روی عملکرد رطوبت‌زن (رطوبت‌زن دارای صفحات عمودی موازی) توسط کسیم و همکارانش انجام شده است [۹]. طبق نتایج ارائه شده توسط آن‌ها بهترین عملکرد دستگاه رطوبت‌زن زمانی است که میزان رطوبت هوای ورودی به داخل رطوبت‌زن کمترین مقدار را داشته باشد. محققان

دهنده در کلکتورهای خورشیدی، مطالعه انجام شده در انستیتو فناوری ماساچوست توسط سامرز و همکاران [۱۲] است. در این تحقیق با قرار دادن مخزن‌های حاوی مواد تغییر فاز دهنده در زیر صفحه جاذب کلکتور خورشیدی صفحه تخت، تأثیر استفاده از این مواد بر جلوگیری از کاهش محسوس دمای صفحه جاذب پس از غروب خورشید بررسی گردیده است. با توجه به نتایج ارائه شده، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده به عمق ۸ سانتی‌متر بهترین عملکرد را در حفظ دمای صفحه جاذب و به تبع آن ثابت نگه داشتن دمای هوای گرم شده در خروجی کلکتور از خود نشان می‌دهد. گارمینا و همکاران [۱۳] در مطالعه دیگری مدل‌سازی تحلیلی یک کلکتور خورشیدی تجهیز شده با کپسول‌های حاوی مواد تغییر فاز دهنده از نوع پارافین واکس را انجام دادند. آن‌ها در این مدل‌سازی که با استفاده از نرم‌افزار متلب اجرا شده است، با فرض برقراری تعادل انرژی در تمام اجزای کلکتور خورشیدی صفحه تخت دسته معادلات دیفرانسیلی حاصل از تعادل اجزا را حل نمودند و در همین حال با انجام بررسی تجربی و آزمایشگاهی، نتایج حاصل از مدل‌سازی تحلیلی خود را اعتبارسنجی نموده‌اند. مطابق نتایج و مقایسه انجام شده از کار تجربی و تحلیلی، توافق قابل قبولی بین نتایج وجود دارد و روش مدل‌سازی تحلیلی ارائه شده توسط آن‌ها معتبر است. استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در آب‌شیرین‌کن رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا به‌ندرت مورد مطالعه قرار گرفته است، با این حال نمونه‌هایی از آن وجود دارد. به عنوان مثال در سال ۲۰۱۱ میلادی هو و همکارانش [۱۴]، تأثیر استفاده از کپسول‌های حاوی مواد تغییر فاز دهنده به‌عنوان بستر آکنده در قسمت رطوبت‌زدایی آب‌شیرین‌کن رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا را مورد مطالعه قرار دادند. طبق نتایج ارائه شده استفاده از ماده تغییر فاز دهنده به‌عنوان بستر تماسی در رطوبت‌زدا موجب افزایش میزان چگالش در رطوبت‌زدا می‌شود. این افزایش ناشی از ظرفیت حرارتی بالای مواد تغییر فاز دهنده و همچنین نزدیک بودن دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده مورد استفاده به دمای کاری رطوبت‌زدا، است. بدیعی و همکاران در تحقیقی یک کلکتور خورشیدی صفحه‌ای مسطح حاوی مواد تغییر فاز دهنده را به صورت عددی بررسی کرده و روش‌های بهبود عملکرد آن را بررسی کردند [۱۵]. آبوسکا و همکاران در پژوهشی یک کلکتور خورشیدی دارای مواد تغییر فاز دهنده را به صورت تجربی تحلیل کردند. در این تحقیق

دیگری نیز نحوه عملکرد دستگاه رطوبت‌زن تحت تأثیر رطوبت هوای ورودی به آن را مطالعه نموده‌اند. آن‌ها اقسام مختلف دستگاه رطوبت‌زن شامل (دستگاه رطوبت‌زن بستر آکنده، دیواره‌تر، دستگاه رطوبت‌زن برج پاششی و ستون حباب) را مطالعه کرده‌اند [۱۰، ۱۱]. در همگی آن‌ها، به این اصل مشترک رسیدند که بهترین عملکرد دستگاه رطوبت‌زن در پایین‌ترین درصد رطوبت هوای ورودی اتفاق می‌افتد. برای رطوبت‌زدایی از هوای خروجی از دستگاه رطوبت‌زن، نیاز به مبدل حرارتی وجود دارد. انواع مختلفی از مواد و سطوح در قسمت رطوبت‌زدایی سیستم رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در مناطق دارای پتانسیل بالای تابش خورشیدی استفاده از آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی گزینه بسیار مناسبی برای تولید آب مصرفی می‌باشد. روش رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی هوا گزینه‌ای مناسب برای تولید غیر متمرکز آب شیرین است که به دلیل نیاز نداشتن به کارکرد در دمای بالا، کل انرژی حرارتی موردنیاز آن می‌تواند از خورشید تأمین گردد، اما نقطه ضعف اصلی این سیستم وابستگی آن به نور مستقیم خورشید است؛ لذا در طول شب عملاً این سیستم‌ها کارایی خود را از دست می‌دهند و بایستی تجهیز دیگری مانند هیترهای برقی یا گازی یا امثالهم، به منظور گرمایش آب/ هوا، پیش از ورود آن‌ها به بخش رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی استفاده گردد. استفاده از هر یک از موارد فوق برای گرمایش آب یا هوا، مستلزم صرف هزینه جاری نسبتاً زیاد است، از طرفی با توجه به این که این سیستم‌ها اغلب در مناطق دورافتاده نصب می‌گردند، اصولاً دسترسی کافی نیز به برق یا گاز برای استفاده از هیترها وجود ندارد.

در این بین استفاده از روش ذخیره انرژی گرمایی خورشید در روز و استفاده از آن در طول شب می‌تواند گزینه بسیار مناسبی باشد که با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده قابل تحقق است. این مواد با قابلیت ذخیره و آزادسازی انرژی در طول فرآیند تغییر فاز تأثیر قابل ملاحظه‌ای در ایجاد توازن بین ساعات پرمصرف و کم‌مصرف انرژی دارند. با وجود حجم قابل توجه تحقیقات انجام شده در مورد استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در مبدل‌های حرارتی، استفاده از این مواد در کلکتور-های خورشیدی یا در سیستم آب‌شیرین‌کن رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی، بسیار کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. از معدود کارهای انجام شده در رابطه با استفاده از مواد تغییر فاز

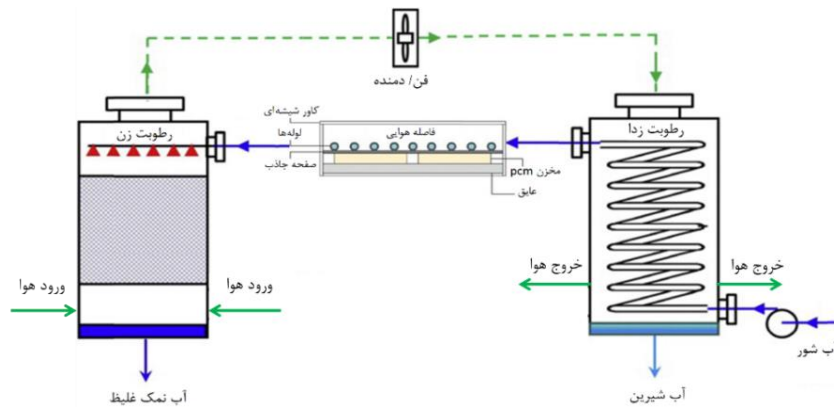
بنابراین در کار حاضر تلفیق سیستم آب‌شیرین‌کن رطوبت‌زن- رطوبت‌زدا با کلکتور خورشیدی مجهز شده به مواد تغییر فاز دهنده انجام گرفته است؛ لذا به منظور بررسی میزان تأثیرگذاری این مواد در بهبود عملکرد سیستم آب‌شیرین‌کن رطوبت‌زن- رطوبت‌زدا، در طرح ارائه شده در شکل ۱ ابتدا معادلات حاکم بر مسئله به دست آمده و سپس از نرم‌افزار متلب برای حل آن‌ها استفاده شده است.

۲- معرفی سیستم پیشنهادی

سیستم آب شیرین‌کن خورشیدی شامل زیرمجموعه‌های رطوبت‌زن، رطوبت‌زدا، کلکتور خورشیدی تلفیق شده با ماده تغییر فاز دهنده است که ارتباط بین اجزای آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

موارد تغییر فاز دهنده در یک ساختار لانه زنبوری قرار داشتند [۱۶]. آنانو و همکاران در تحقیقی یک کلکتور خورشیدی هیبریدی مجهز به مواد تغییر فاز دهنده را به صورت عددی تحلیل و بررسی کردند. در این کار انرژی حرارتی توسط یک پمپ زمین گرمایی فراهم می‌گردد [۱۷]. پالاسیو و همکاران در تحقیقی یک کلکتور خورشیدی مسطح حاوی مواد تغییر فاز دهنده را به صورت تجربی مورد تحلیل و بررسی قرار دادند [۱۸].

مطابق آن چه در قسمت مقدمه در مورد سیستم آب‌شیرین‌کن‌های رطوبت‌زنی- رطوبت‌زدایی همراه با کلکتور خورشیدی ارائه شد و همچنین مرور انجام شده بر کارهای صورت گرفته در مورد استفاده از مواد تغییر فاز دهنده، استفاده از این مواد به همراه کلکتورهای خورشیدی به منظور افزایش مدت زمان تولید آب شیرین ایده‌ی مناسبی به نظر می‌رسد؛



شکل ۱- شماتیک سیستم آب‌شیرین‌کن خورشیدی

لوله‌ها، رطوبت موجود در هوا تقطیر و به صورت آب قابل شرب از انتهای دستگاه رطوبت‌زدا خارج می‌شود. آب شور وارد شده به دستگاه رطوبت‌زدا نیز پس از عبور از لوله‌های داخلی دستگاه و مشارکت در فرایند تقطیر بخار آب موجود در هوا، به سمت کلکتور خورشیدی تلفیق شده با مواد تغییر فاز دهنده هدایت می‌شود و در طی عبور از کلکتور خورشیدی دمای آن به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد که این افزایش کمک شایانی به بهبود عملکرد دستگاه رطوبت‌زن در راستای افزایش رطوبت هوای عبوری می‌نماید.

۳- معادلات حاکم

هوای محیط به واسطه فن تعبیه شده در سیستم، از قسمت زیرین رطوبت‌زن به داخل آن وارد شده و از مسیر بستر آکنده آن عبور می‌کند که به منظور افزایش سطح تماس آب و هوا در نظر گرفته شده است. پس از جذب رطوبت از قسمت بالای دستگاه رطوبت‌زن خارج می‌شود و از طریق کانال انتقال دهنده به سمت رطوبت‌زدا حرکت می‌نماید. نهایتاً و پس از عبور از مسیر انتقال، هوای مرطوب وارد بخش رطوبت‌زدایی می‌شود. دستگاه رطوبت‌زدا به صورت یک مبدل حرارتی لوله پره دار است که آب با دمای پایین در داخل لوله‌های آن جریان دارد و هوا به صورت جریان عمودی از روی این دسته لوله‌ها عبور می‌کند. طی این عبور با توجه به دمای پایین آب داخل

در ادامه معادلات حاکم بر هر یک از اجزای مذکور ارائه گردیده است.

[۲۰]، مدل سازی شده است. در این مدل سازی جرم و انرژی هوا و آب با استفاده از مدل جریان یک بعدی در بستر آکنده و با فرض جریان پایا، خصوصیات یکنواخت برای هوا و آب و ضرایب انتقال جرم و حرارت ثابت، انجام شده است. در جدول ۱ معادلات بقای جرم بخار آب در جریان هوا و آب و همچنین موازنه انرژی برای جریان هوا و آب ارائه شده است.

۳-۱- رطوبت زن

فرآیند رطوبت زنی هوا در رطوبت زن با بستر آکنده، با استفاده از مدل ریاضی رادوان و همکاران [۱۹] و قلاوند و همکاران

جدول ۱- روابط حاکم در رطوبت زن [۱۹ و ۲۰]

معادلات بقای جرم بخار آب در جریان هوا و آب	
$G_{air} \frac{dY}{dz} = a \frac{\pi D^2}{4} k'_{w-air} (Y^* - Y) \quad (1)$	
$\frac{dm_w}{dz} = G_{air} \frac{dY}{dz} \quad (2)$	
موازنه انرژی برای جریان هوا و آب [۱۹ و ۲۰]	
$\frac{dT_{air}}{dz} = \frac{1}{G_{air} (C_{air} + Y C_w)} \times \left\{ a \frac{\pi D^2}{4} h_{w-air} (T_w - T_{air}) - \frac{\pi (T_w - T_{amb})}{\frac{1}{h_c - air D_{in}} + \frac{\ln(\frac{D_{out}}{D_{in}})}{2k_{ci}} + \frac{1}{h_{ci} - amb D_{out}}} \right\} \quad (3)$	
$\dot{m}_w C_w \frac{dT_w}{dz} + T_w C_w \frac{dm_w}{dz} = a \frac{\pi D^2}{4} h_{w-air} (T_w - T_{air}) + a \frac{\pi D^2}{4} k'_{w-air} (Y^* - Y) \lambda \quad (4)$	

در رابطه (۳) عبارت آخر سمت راست مربوط وجود عایق در اطراف رطوبت زن است که با توجه به تأثیر ناچیز آن در نتایج مدل سازی ارائه شده در مرجع [۱۶]، از این جمله صرف نظر شده است. ضرایب انتقال حرارت (h_{w-air}) و جرم (k'_{w-air}) با استفاده از روابط ارائه شده توسط تریبول [۱۰] برای رطوبت زن با رینگ های راشینگ سرامیکی به عنوان بستر آکنده و اندازه اسمی 25 mm، محاسبه شده است. روش رانگ-کوتا مرتبه چهار [۲۱] برای حل این دسته معادلات مرتبه اول مورد استفاده قرار گرفته است. شکل جریان در این رطوبت زن به صورت جریان مخالف است و با داشتن دما و رطوبت نسبی هوا در قسمت پایین رطوبت زن و دما و دبی آب در قسمت بالای آن و با استفاده از روابط فوق، می توان دما و رطوبت نسبی هوا در خروجی رطوبت زن و همچنین ابعاد آن را به دست آورد. لازم به ذکر است، دبی جرمی آب، ضریبی از دبی جرمی هوا در نظر گرفته شده و توسط رابطه (۵) بیان می شود:

$$\dot{m}_w = n_{wa} \times \dot{m}_a \quad (5)$$

۳-۲- رطوبت زدا یا چگالنده

در قسمت رطوبت زدای دستگاه از مبدل حرارتی لوله پره دار استفاده شده است و معادلات حاکم بر آن در این قسمت به ترتیب در ذیل ارائه گردیده است [۲۲]:

$$\dot{Q}_{HX} = \dot{m}_a (h_{a_0} - h_{a_1}) \quad (6)$$

$$h_{a_0} - h_{a_1} = [(C_{p,a} + C_{p,s} \omega_{a_1}) T_{a_0} - (C_{p,a} + C_{p,s} \omega_{a_1}) T_{a_1}] + h_{fg,w} (\omega_{a_0} - \omega_{a_1}) \quad (7)$$

$$A_{HX} = \frac{\dot{Q}_{HX}}{F_{HX} U_{HX} \Delta T_{LMTD}} \quad (8)$$

$$U_{HX} = \left(\frac{1}{\eta_0 h_0} + \frac{A_0}{A_i} \frac{d_i \ln(\frac{d_0}{d_i})}{2k_w} + \frac{A_0}{A_i} \frac{1}{h_i} + R_{f,i} \frac{A_0}{A_i} \right)^{-1} \quad (9)$$

$$h_i = \begin{cases} 4.36 \frac{K_i}{d_i} \rightarrow Re_i < 2300 \\ \left[\frac{(\frac{f_i}{8})(Re_i - 1000) Pr_i}{1 + 1.27 (\frac{f_i}{8})^{0.5} (Pr_i^{\frac{2}{3}} - 1)} \right] \left(\frac{K_i}{d_i} \right) \rightarrow Re_i > 2300 \end{cases} \quad (10)$$

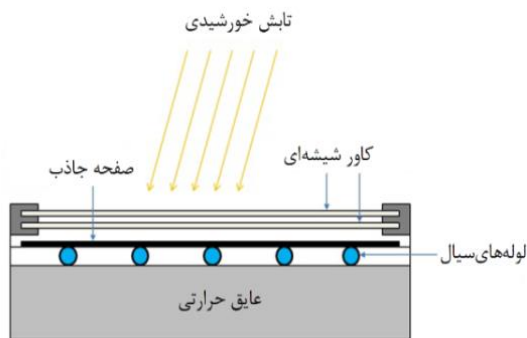
$$h_0 = j_a C_{p,a} G_a Pr_a^{-\frac{2}{3}} \quad (11)$$

که در آن σ ، نسبت حداقل سطح مقطع جریان به مساحت سطح جلویی و A_{min} ، حداقل سطح مقطع جریان است. f_a ، ضریب اصطکاک بوده و از رابطه (۲۴) به دست می‌آید [۲۳]:

$$f_a = 0.2682 Re_a^{-0.2341} \quad (24)$$

۳-۳- کلکتورهای صفحه تخت خورشیدی

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، کلکتور خورشیدی شامل کاور شیشه‌ای (که در این تحقیق از نوع تک کاوره استفاده خواهد شد)، صفحه جاذب، لوله‌های حامل سیال، عایق جانبی و قاب کلکتور است. در یک جریان پایا درون کلکتور خورشیدی، انرژی خورشیدی تابش شده روی کلکتور به انرژی گرمایی مفید (بالا رفتن دمای سیال درون لوله‌ها)، تلفات انعکاسی و اتلافات گرمایی تبدیل می‌شود.



شکل ۲- نمای روبرو از یک کلکتور صفحه تخت خورشیدی

در مدل‌سازی انجام شده در این بخش فرضیات ذیل صورت گرفته است:

- فرایند ذوب مواد تغییر فاز دهنده ناشی از هدایت حرارتی است که بر اثر انتقال گرما از بالا به پایین کلکتور صورت می‌گیرد.

- اتلافات گرمایی از طریق دیواره‌های کلکتور قابل صرف نظر کردن است.

- انتقال حرارت به صورت یک بعدی در نظر گرفته شده است و اجزای اصلی کلکتور در سیستم فشرده در نظر گرفته شده‌اند.

h_o ضریب انتقال حرارت سمت جریان هوا است که از رابطه (۱۲) به دست می‌آید [۲۲]:

$$h_o = j_a C_{Pa} G_a (Pr_a)^{-\frac{2}{3}} \quad (12)$$

که در آن j_a ، ضریب کلبرون است که برای میدل لوله‌ای پره‌دار با مشخصات خاص در این مقاله، از رابطه زیر تبعیت می‌کند [۲۳]:

$$j_a = 0.27833 (Re_a)^{-0.43338} \quad (13)$$

$$Re_a = \frac{G_a d_h}{\mu_a} \quad (14)$$

$$\eta_o = 1 - \frac{A_f}{A_t} (1 - \eta_f) \quad (15)$$

$$\eta_f = \frac{\tanh(mL_c)}{mL_c} \quad (16)$$

$$mL_c = \left(\frac{2h_o}{K_w A_p} \right)^{\frac{1}{2}} L_c^{\frac{3}{2}} \quad (17)$$

$$A_p = L_c t_f \quad (18)$$

$$L_c = L_f + \left(\frac{t_f}{2} \right) \quad (19)$$

$$L_f = \left(\frac{d_2}{2} \right) - \left(\frac{d_1}{2} \right) \quad (20)$$

که η_o ، η_f ، t_f و L_c به ترتیب، بازده کلی پره، بازده پره، ضخامت پره و طول تصحیح شده پره می‌باشند. d_1 و d_2 نیز قطر پای پره و قطر لبه پره است.

و همچنین A_r ، A_a و A_f / A_t به ترتیب، مساحت سطح سمت میرد، مساحت سطح هوا و نسبت سطح پره به کل سطح خارجی است. افت فشار در سمت هوا (ΔP_a) از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۳]:

$$A_r R_w = \frac{d_i \ln \left(\frac{d_o}{d_i} \right)}{2K_w \left(\frac{A_r}{A_a} \right)} \quad (21)$$

$$\frac{A_r}{A_a} = \frac{d_i}{d_o} \left(1 - \frac{A_f}{A_t} \right) \quad (22)$$

و همچنین A_r ، A_a و A_f / A_t به ترتیب، مساحت سطح سمت میرد، مساحت سطح هوا و نسبت سطح پره به کل سطح خارجی است. افت فشار در سمت هوا (ΔP_a) از رابطه (۲۳) محاسبه می‌شود:

$$P_a = G_a^2 \frac{\left(\frac{f_a A_{Evap1} \rho_m}{A_{min} \rho_m} + (1 + \sigma^2) \frac{\rho_m}{\rho_{out}} \right)}{2\rho_m} \quad (23)$$

به منظور محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین صفحه جاذب و کاور شیشه‌ای رابطه (۳۰) قابل استفاده است.

$$h_{p,conv} = \frac{Nu_{air} k_{air}}{L_{air}} \quad (30)$$

$$Nu = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708(\sin 1.8\beta)^{1.6}}{Ra \cos\beta} \right] \times \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos\beta} \right] + \left[\left(\frac{Ra \cos\beta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]$$

در رابطه فوق β زاویه نصب کلکتور است. مقدار عدد رایلی نیز از رابطه (۳۱) محاسبه می‌شود:

$$Ra = \frac{g\beta(T_p - T_c)L_{air}}{v_{air}\alpha_{air}} \quad (31)$$

k ضریب هدایت حرارتی، ν ضریب ویسکوزیته سینماتیکی و α ضریب نفوذ حرارتی هستند؛ همچنین در روابط فوق منظور از L_{air} ، فاصله هوایی بین صفحه جاذب و کاور شیشه‌ای است. جز اصلی دیگر در کلکتور خورشیدی که معادله تعادل حرارتی برای آن نوشته می‌شود، صفحه جاذب است. تعادل حرارتی حول صفحه جاذب منجر به رابطه زیر می‌شود:

$$\dot{Q}_{S,p} - \dot{Q}_{P,rad} - \dot{Q}_{P,conv} - \dot{Q}_U - \dot{Q}_{PMC} = m_p C_{p,p} \frac{\partial T_p}{\partial t} \quad (32)$$

در این رابطه \dot{Q}_U حرارت مفید منتقل شده به سیال عامل در کلکتور و \dot{Q}_{PMC} انتقال حرارت بین صفحه جاذب و مخزن حاوی مواد تغییر فاز دهنده می‌باشند. تشعشع خورشیدی جذب شده توسط صفحه جاذب عبارت است از:

$$\dot{Q}_{S,p} = A_p(\tau\alpha)\dot{q}_s \quad (33)$$

در این رابطه A_p مساحت صفحه جاذب و $\tau\alpha$ ضریب جذب-عبور مؤثر صفحه می‌باشند. برای محاسبه حرارت مفید منتقل شده به سیال عامل از رابطه (۳۴) استفاده شده است.

$$\dot{Q}_U = A_w h_w (T_p - T_w) \quad (34)$$

A_w عبارت از کل مساحت تماس بین صفحه جاذب و لوله‌های حامل آب است. ضریب انتقال حرارت جابجایی جریان سیال داخل لوله‌ها نیز از روابط (۳۵) به دست خواهد آمد:

به منظور استخراج معادلات تحلیلی حاکم بر کلکتور خورشیدی، تحلیل حرارتی تک‌تک اجزای اصلی تشکیل‌دهنده کلکتور ضروری است [۱۳]. این اجزا عبارت‌اند از: کاور شیشه‌ای، صفحه جاذب و مخزن حاوی مواد تغییر فاز دهنده. ابتدا معادله تعادل حرارتی برای کاور شیشه‌ای به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۳]:

$$m_c C_{p,c} \frac{\partial T_c}{\partial t} = \dot{Q}_{S,C} + \dot{Q}_{P,rad} + \dot{Q}_{P,conv} - \dot{Q}_{C,rad} - \dot{Q}_{C,conv} \quad (25)$$

$$\dot{Q}_{S,C} = \alpha_c A_c \dot{q}_s$$

$$\dot{Q}_{P,rad} = A_c h_{p,rad} (T_p - T_c)$$

$$\dot{Q}_{P,conv} = A_c h_{p,conv} (T_p - T_c)$$

$$\dot{Q}_{C,rad} = A_c h_{c,rad} (T_c - T_A)$$

$$\dot{Q}_{C,conv} = A_c h_{c,rad} (T_c - T_A)$$

که در روابط فوق T_A ، T_C و T_P به ترتیب عبارت از دمای محیط، دمای کاور شیشه‌ای و دمای صفحه جاذب می‌باشند. \dot{q}_s شار حرارتی تشعشع خورشید است. در گام بعدی بایستی روابط مربوط به محاسبه ضرایب انتقال حرارت موجود در معادله فوق ارائه شوند. رابطه مربوط به ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در بالای کاور شیشه‌ای که ناشی از وزش باد است، به صورت (۲۶) است:

$$h_{c,conv} = 5.7 + 3.8V_{wind} \quad (26)$$

که در این رابطه V_{wind} سرعت وزش باد است. ضریب انتقال حرارت تشعشعی عبارت است از:

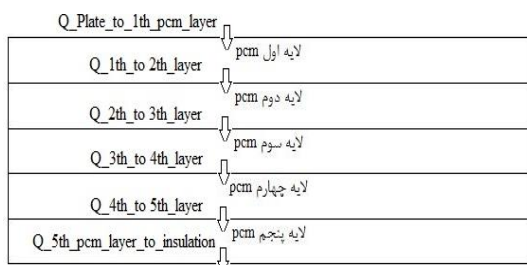
$$h_{c,rad} = \sigma \varepsilon_c (T_c + T_{sky})(T_c^2 + T_{sky}^2) \quad (27)$$

σ و ε_c به ترتیب عبارت از ضریب نشر و ثابت استفان-بولتزمن هستند. ضریب انتقال حرارت تشعشعی بین صفحه جاذب و کاور شیشه‌ای از رابطه (۲۸) قابل محاسبه است.

$$h_{p,rad} = \frac{\sigma(T_p + T_c)(T_p^2 + T_c^2)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} \quad (28)$$

به منظور محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین صفحه جاذب و کاور شیشه‌ای رابطه (۲۹) قابل استفاده است.

$$h_{p,rad} = \frac{\sigma(T_p + T_c)(T_p^2 + T_c^2)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} \quad (29)$$



شکل ۴- روند انتقال گرما از صفحه جاذب، لایه‌های ماده تغییر فاز دهنده و عایق کلکتور خورشیدی

روابط مورد استفاده برای مدل‌سازی حرارتی مخزن حاوی مواد تغییر فاز دهنده به صورت زیر است [۱۳].

$$\dot{Q}_{\text{absorber plate to 1th pcm}} = A_{\text{pcm}} h_{\text{plate pcm}} (T_{\text{plate}} - T_{1\text{th pcm}}) \quad (37)$$

$$\dot{Q}_{j-1\text{th to } j\text{th pcm}} = A_{\text{pcm}} h_{j-1\text{th } j\text{th}} (T_{j-1\text{th}} - T_{j\text{th}}) \quad (38)$$

$$\dot{Q}_{5\text{th to insulation}} = A_{\text{pcm}} h_{\text{pcm insulation}} (T_{5\text{th pcm}} - T_{\text{insulation}}) \quad (39)$$

$$\dot{Q}_{\text{absorber plate to 1th pcm}} = \dot{Q}_{\text{PCM}} \quad (40)$$

اعمال تعادل انرژی برای لایه j ام از ماده تغییر فاز دهنده منجر به رابطه زیر برای محاسبات مربوطه در لایه‌های میانی می‌شود [۱۳].

$$\dot{Q}_{j-1\text{th to } j\text{th pcm}} - \dot{Q}_{j\text{th to } j+1\text{th pcm}} = m_{\text{pcm}_j} C_{\text{pcm}} \frac{\partial T_{\text{pcm}_j}}{\partial t} + m_{\text{pcm}_j} LH_{\text{pcm}} \frac{\partial \lambda_{\text{pcm}_j}}{\partial t} \quad (41)$$

که در رابطه فوق C_{pcm} ظرفیت گرمایی محسوس ماده تغییر فاز دهنده، LH_{pcm} ظرفیت گرمایی نهان و λ_{pcm_j} کسر جرمی مایع ماده تغییر فاز دهنده است و از رابطه (۴۲) محاسبه می‌شود [۱۳]:

$$\lambda_{\text{pcm}_j} = \frac{m_{\text{pcm}_j, \text{liquid}}}{m_{\text{pcm}_j}} = \frac{m_{\text{pcm}_j} - m_{\text{pcm}_j, \text{solid}}}{m_{\text{pcm}_j}} \quad (42)$$

شایان ذکر است که سمت راست معادله فوق در هر لحظه زمانی شامل یکی از دو عبارت است و این دو هرگز به صورت هم‌زمان غیر صفر نخواهند بود. تا زمانی که دمای ماده تغییر فاز دهنده در هر یک لایه‌ها کمتر از دمای ذوب باشد، عبارت دوم در سمت راست معادله فوق صفر خواهد بود؛ همچنین زمانی که دمای لایه به دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده برسد،

$$h_w = 4.36 \frac{K_w}{d_{\text{tube}}} \rightarrow \text{Re} < 2300$$

$$h_w = \left[\frac{(\frac{f_w}{8})(\text{Re}-1000)Pr_w}{1 + 1.27(\frac{f_w}{8})^{0.5}(Pr_w^{\frac{2}{3}} - 1)} \right] \left(\frac{K_w}{d_{\text{tube}}} \right) \quad (35)$$

$$\rightarrow \text{Re} > 2300$$

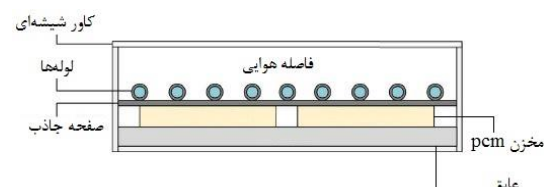
در روابط بالا K_w ضریب هدایت حرارتی آب، d_{tube} قطر داخلی لوله، f_w ضریب اصطکاک، Pr_w عدد بی‌بعد پرانتل و نهایتاً Re عدد بی‌بعد رینولدز است. نهایتاً رابطه مربوط به محاسبه حرارت جابه‌جاشده بین صفحه جاذب و مواد تغییر فاز دهنده برابر خواهد بود با:

$$\dot{Q}_{\text{PCM}} = A_{\text{PCM}} h_{\text{PCM}} (T_p - T_{\text{PCM}}) \quad (36)$$

که در این رابطه h_{PCM} عبارت از رسانایی گرمایی تماسی بین صفحه جاذب و لایه بالایی ماده تغییر فاز دهنده است.

۳-۴- مدل‌سازی مواد تغییر فاز دهنده تعبیه شده در کلکتور خورشیدی

در این مقاله به منظور مدل‌سازی مواد تغییر فاز دهنده تعبیه شده در داخل کلکتور خورشیدی (شکل ۳)، از روش لایه بندی مواد تغییر فاز دهنده استفاده شده است.



شکل ۳- کلکتور خورشیدی همراه با مخزن مواد تغییر فاز دهنده تعبیه‌شده در آن

در این روش هر مخزن حاوی مواد تغییر فاز دهنده در جهت عمق آن، به ۵ لایه‌ی مجازی تقسیم‌شده است که صرفاً جهت تسهیل در مدل‌سازی و قابل تشخیص تر کردن محل جبهه‌ی تغییر فاز و تغییر دمای مواد داخل مخزن مورد استفاده قرار می‌گیرد. تعادل حرارتی برای هر لایه مطابق شکل ۴ به صورت جداگانه از سایر لایه‌ها نوشته شده است [۱۳].

۱- تغییرات پارامترهای مختلف (دمای آب، دمای هوا، نسبت رطوبت هوا و...) در راستای شعاع رطوبت زن ناچیز فرض شده است.

۲- تغییرات خواص سیال آب و هوا به صورت تابعی از دما و فقط در راستای ارتفاع رطوبت زن منظور گردیده است.

۳- فرض شده است که دیواره داخلی دستگاه رطوبت زن، با لایه‌ای از هوا یا آب پوشانیده نشده است.

۴- سطح انتقال حرارت و انتقال جرم برای هر دو سیال آب و هوا یکسان در نظر گرفته شده است.

عبارت اول صفر و عبارت دوم مخالف صفر خواهد بود. رابطه حاصل از اعمال تعادل حرارتی برای لایه اول نشان داده شده در شکل ۴ به صورت زیر خواهد بود [۱۳]:

$$\dot{Q}_{plate_to_1th_pcm} - \dot{Q}_{1th_to_2th_pcm} = m_{pcm1th} C_{pcm} \frac{\partial T_{pcm1th}}{\partial t} + m_{pcm1th} LH_{pcm} \frac{\partial \lambda_{pcm1th}}{\partial t} \quad (43)$$

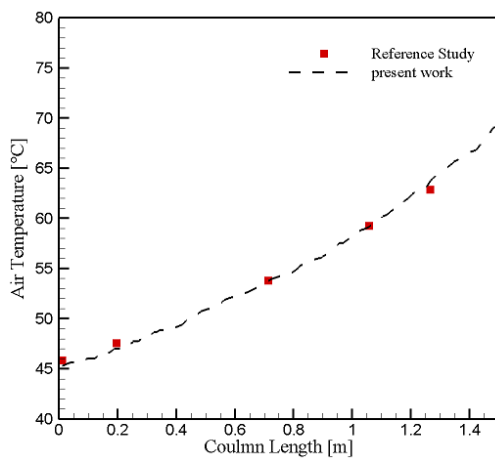
برای لایه آخر از رابطه (۴۴) استفاده می‌شود:

$$\dot{Q}_{4th_to_5th} - \dot{Q}_{5th_to_insulation} = m_{pcm5th} C_{pcm} \frac{\partial T_{pcm5th}}{\partial t} + m_{pcm5th} LH_{pcm} \frac{\partial \lambda_{pcm5th}}{\partial t} \quad (44)$$

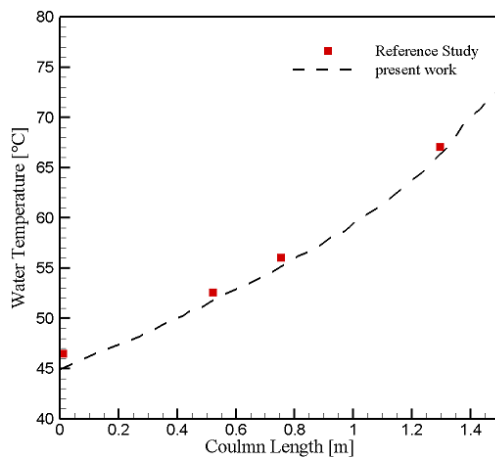
بنابراین پنج رابطه حاصل از اعمال شرایط تعادل انرژی برای لایه‌های پنج‌گانه ماده تغییر فاز دهنده به همراه دو رابطه مربوط به کاور شیشه‌ای و صفحه جاذب بایستی به صورت دسته معادلات دیفرانسیلی مرتبط با یکدیگر و به صورت هم‌زمان حل شوند تا از این طریق دمای آب خروجی از کلکتور به دست آید.

۴- اعتبارسنجی

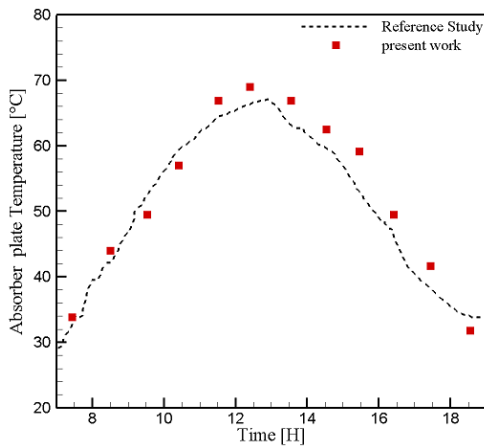
در مطالعه حاضر به منظور مدل‌سازی کامل سیستم آب شیرین‌کن پیشنهادی ابتدا سه جز اصلی آن بایستی به طور جداگانه مدل‌سازی شده و سپس به صورت یک مجموعه واحد و با در نظر گرفتن تأثیر متقابل اجزا بر یکدیگر، روند تحلیل تکمیل شود. از طرفی با توجه به ایده سیستم آب شیرین‌کن ارائه شده در این کار که برای نخستین بار مدل‌سازی شده است، امکان صحت‌سنجی نتایج برای سیستم کلی آب شیرین‌کن خورشیدی تلفیق شده با مواد تغییر فاز دهنده وجود ندارد؛ لذا به منظور تأیید اعتبار کار حاضر، نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های انجام شده برای هر یک از اجزا آب شیرین‌کن با نتایج تجربی موجود مقایسه شده است. به همین منظور ابتدا در قسمت رطوبت‌زن، تغییرات دمای هوا در راستای ارتفاع آن و تغییرات دمای آب در راستای ارتفاع رطوبت‌زن با نتایج تجربی ارائه شده در مرجع [۱۶] مقایسه و در شکل‌های ۵ و ۶ آورده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها نشان داده شده است، حداکثر میزان اختلاف کمتر از ۱۰٪ است که اعتبار مدل‌سازی رطوبت‌زن را تأیید می‌کند. البته لازم به ذکر است، در این مدل‌سازی و مقایسه برای حل مسئله فرضیاتی در نظر گرفته شده است که عبارت‌اند از:



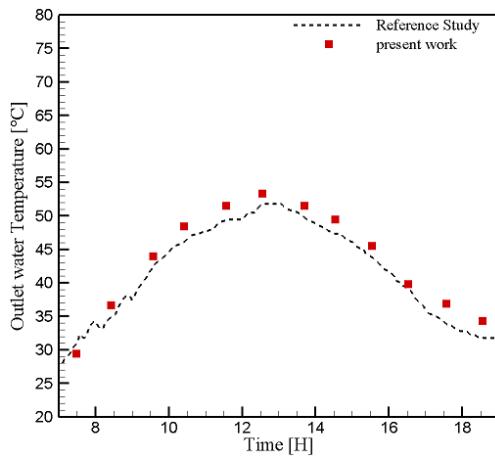
شکل ۵ - نمودار تغییرات دمای هوا در راستای ارتفاع دستگاه رطوبت زن



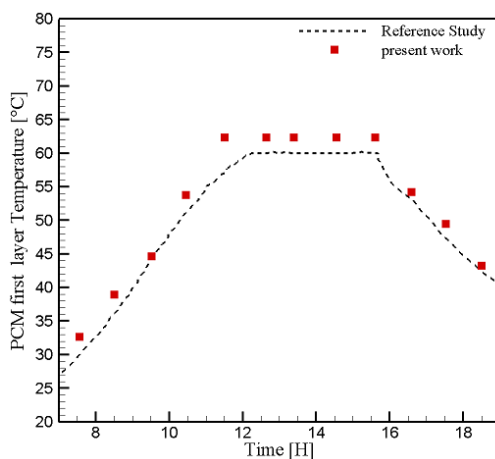
شکل ۶ - نمودار تغییرات دمای آب در راستای ارتفاع دستگاه رطوبت زن



شکل ۸- دمای صفحه جاذب



شکل ۹- دمای آب خروجی از کلکتور



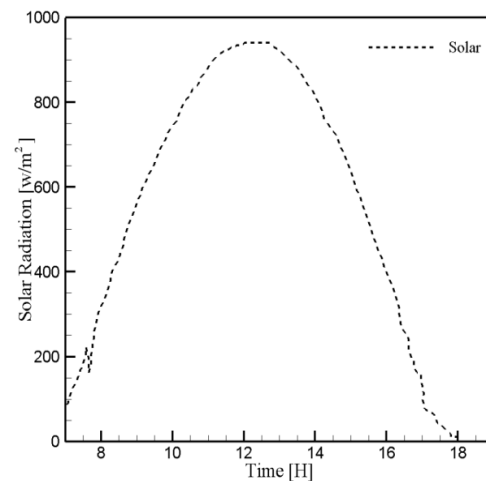
شکل ۱۰- دمای لایه اول PCM

همچنین برای تأیید صحت مدل‌سازی کلکتور خورشیدی تلفیق‌شده با مواد تغییر فاز دهنده، تغییرات دمای صفحه جاذب کلکتور خورشیدی در طول مدت دوازده ساعت کاری ($T_{\text{absorber plate}}$)، دمای آب خروجی از این کلکتور در گذر زمان و تغییر شدت تابش خورشید در طول روز، ($T_{\text{outlet water}}$) و نیز تغییرات دمای لایه اول PCM از نتایج مدل‌سازی کار حاضر استخراج گردید و با مقادیر گزارش‌شده در مرجع [۱۱] مقایسه شده است و در شکل‌های ۷ تا ۱۰ ارائه گردیده است. در این مقایسه درصد اختلاف حداکثر، کمتر از ۱۲٪ است که مقدار قابل قبولی است.

همچنین خواص ترموفیزیکی مواد تغییر فاز دهنده مورد استفاده در این پروژه و در مرجع [۱۳] در جدول ۲ ارائه شده است. لازم به توضیح است، ماده تغییر فاز دهنده مورد استفاده از نوع پارافین واکس است.

جدول ۲- خواص ترموفیزیکی ماده تغییر فاز دهنده (پارافین واکس)

واحد	PCM 60	PCM 45	پارامتر
$^{\circ}C$	۶۰	۴۲-۴۶	دمای نقطه ذوب
kJ / kg	۲۱۰	۱۶۰	گرمای نهان ذوب
$J / kg^{\circ}C$	۲۵۰۰	۲۰۰۰	ظرفیت گرمایی ویژه
$W / m^{\circ}C$	۹/۰	۰/۲	ضریب هدایت گرمایی
kg / m^3	۹۳۴	۸۸۰	چگالی



شکل ۷- توزیع شار دریافتی از خورشید

۵- نتایج

تلفیق شده با مواد تغییر فاز دهنده انجام شده است. مقادیر پارامترهای در نظر گرفته شده برای مطالعه موردی مقاله حاضر، در جدول ۳ به طور کامل ارائه گردیده و نتایج حاصل از این مطالعه در شکل‌های ۱۱ تا ۱۷ ارائه شده‌اند.

پس از صحت سنجی مدل‌سازی کار حاضر با نتایج تجربی موجود در مراجع اشاره شده، مطالعه موردی سیستم آب شیرین کن رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا همراه با کلکتور خورشیدی

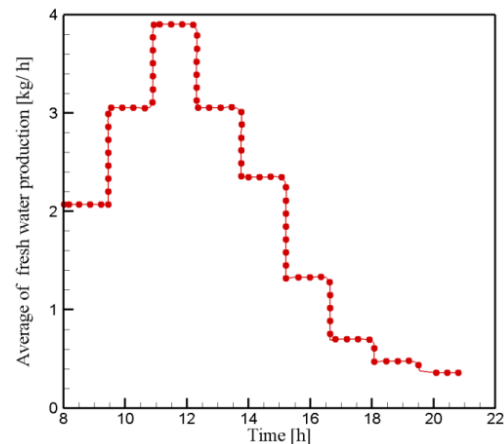
جدول ۳- مقادیر پارامترهای طراحی در مطالعه موردی

مقدار	نماد	نام متغیر
۲/۵۵	n_{wa}	نسبت دبی جرمی آب به دبی جرمی هوا در رطوبت زن
$0.05 (kg/s)$	\dot{m}_{water}	دبی آب در حال گردش در مجموعه
$1/5 (m)$	H	ارتفاع دستگاه رطوبت زن
۵	ΔT	اختلاف دمای آب خروجی و ورودی در رطوبت‌زدا
$20 (m^2)$	$A_{collector}$	مساحت سطح جاذب کلکتور خورشیدی
$25 (^\circ C)$	T_{Air}	دمای محیط
—	PCM	ماده PCM45
$15 (^\circ C)$	$T_{inlet water}$	دمای آب ورودی به سیستم
٪۳۰	ϕ	رطوبت نسبی هوای محیط

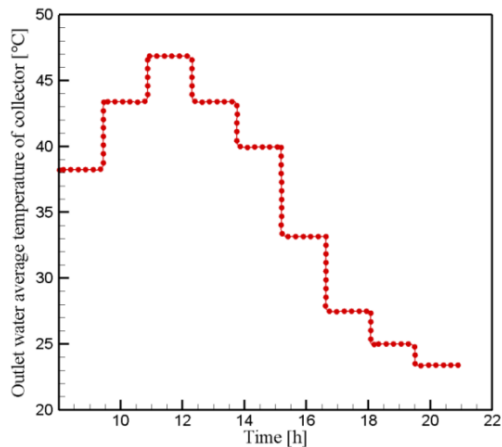
در ساعات اولیه صبح که شدت تابش کمتر است، میزان تولید آب شیرین در حدود ۲/۱ لیتر در ساعت است. به مرور و با نزدیک شدن به ظهر و افزایش شار حرارتی خورشید میزان تولید آب شیرین حدوداً ۸۵٪ بیشتر می‌شود. به نحوی که در ساعت ۱۲ تا ۱۴ بیش از ۳/۹ لیتر در ساعت آب شیرین تولید می‌شود.

در شکل ۱۱ مقدار متوسط آب شیرین تولید شده در طی روز ارائه شده است. با توجه به نحوه توزیع شار حرارتی خورشید در طی روز به وضوح قابل تشخیص است که میزان تولید آب شیرین در ساعت‌های مختلف و با تغییر شدت تابش خورشیدی تغییر می‌کند.

در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ مقدار متوسط دمای آب خروجی از رطوبت‌زدا و دمای صفحه جاذب و همچنین متوسط دمای آب خروجی از کلکتور خورشیدی ارائه شده‌اند. چنانچه پیش از این نیز اشاره شد، تغییر شار حرارتی خورشید در طول روز تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر تغییرات دمای تمام اجزای آب شیرین کن خورشیدی دارد. در شکل ۱۴ ملاحظه می‌شود که دمای آب خروجی از کلکتور خورشیدی از $37^\circ C$ در ساعت ۸ صبح به حدود $47^\circ C$ در ساعات ظهر رسیده که نشان دهنده افزایش ده درجه‌ای دمای آب خروجی از کلکتور است. در شکل ۱۱ اشاره شد که طی تقریباً همین مدت زمان مقدار متوسط تولید آب شیرین بیش از ۸۵٪ افزایش می‌یابد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، افزایش دمای آب خروجی از کلکتور تأثیر بسیار



شکل ۱۱- مقدار متوسط آب شیرین تولید شده در ساعات مختلف

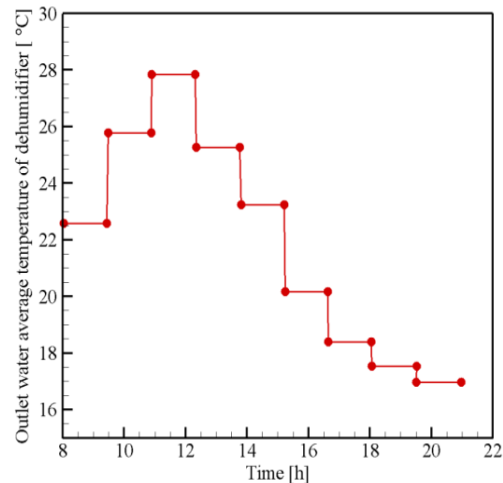


شکل ۱۴- مقدار متوسط دمای آب خروجی از کلکتور

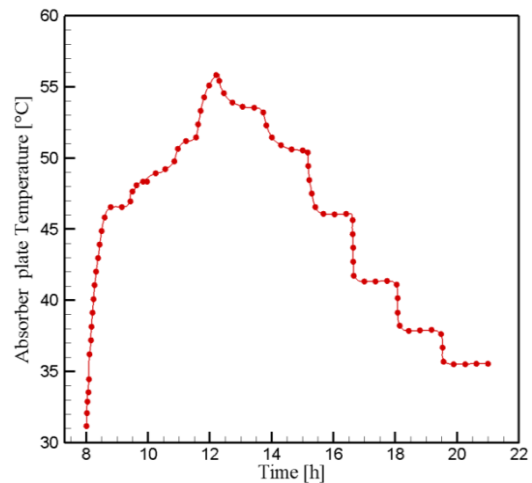
شکل‌های ۱۵ مقدار متوسط دمای سه لایه اول ماده تغییر فاز دهنده و در شکل ۱۶ چرخه تغییر فاز یا به عبارتی فرایند ذوب و انجماد ایجاد شده در این ماده را نشان می‌دهد. چنان‌چه در شکل ۱۵ قابل تشخیص است، در دمای 45°C که دمای تغییر فاز ماده تغییر فاز دهنده مورد استفاده در این تحقیق است، روند افزایش یا کاهش دما متوقف شده است و دمای ماده تغییر فاز دهنده پس از رسیدن به این دما در دو مقطع، ساعت حدوداً $9/30$ صبح و $16/30$ عصر، به علت شروع فرایند تغییر فاز، ثابت باقی مانده است.

با دقت در شکل ۱۶ نیز ملاحظه می‌شود که دقیقاً در همین مقاطع زمانی فرایند تغییر فاز رخ داده است. به‌نحوی که در ساعت $9/30$ صبح لایه اول ماده تغییر فاز دهنده شروع به ذوب شدن می‌کند و با توجه به شار زیادی که از صفحه جاذب دریافت می‌کند، سرعت ذوب بالایی دارد. همین مسئله با کمی تأخیر در لایه دوم این ماده اتفاق افتاده می‌افتد. به این صورت که اندکی قبل از ساعت ۱۰ صبح و در حالی که فرایند ذوب لایه اول کامل شده است، لایه دوم شروع به ذوب شدن می‌کند و به همین ترتیب برای سایر لایه‌ها نیز همین فرایند تکرار شده است. نکته مهم دیگر تفاوت سرعت فرایند ذوب و انجماد است. همان‌طور که در شکل نیز ملاحظه می‌شود، در تک‌تک لایه‌ها سرعت فرایند ذوب به مقدار قابل‌ملاحظه‌ای بیشتر از سرعت فرایند انجماد آن است. لازم به ذکر است که این تفاوت در لایه‌های پایین‌تر یا به عبارتی دورتر از صفحه جاذب، قابل‌ملاحظه‌تر و بیشتر است.

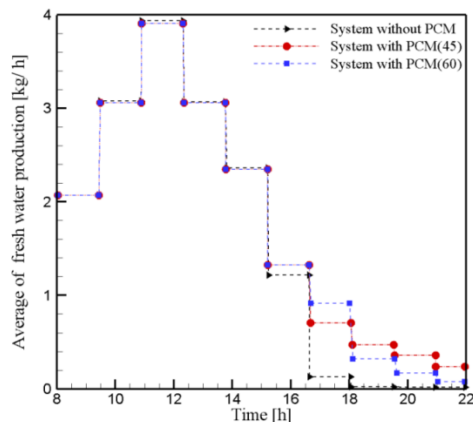
زیادی بر افزایش میزان آب شیرین تولید شده در این نوع از آب‌شیرین‌کن‌ها دارد.



شکل ۱۲- مقدار متوسط دمای آب خروجی از رطوبت‌زدا



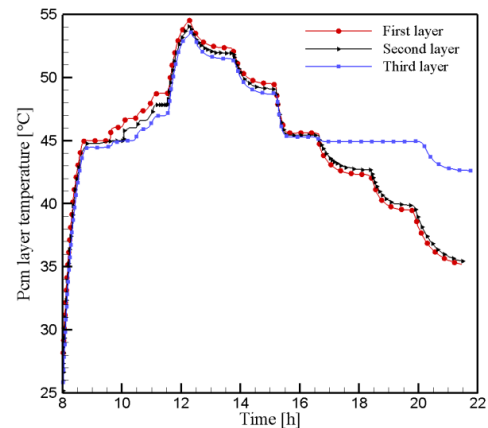
شکل ۱۳- مقدار متوسط دمای صفحه جاذب کلکتور



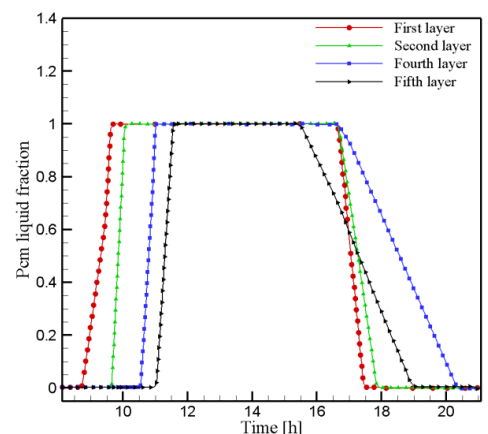
شکل ۱۷- مقایسه نتایج تأثیر استفاده یا عدم استفاده از ماده تغییر فاز دهنده بر مقدار متوسط آب شیرین تولیدشده در ساعات مختلف

چنانکه در شکل فوق نیز کاملاً مشخص است، استفاده از ماده‌ی تغییر فاز دهنده تا حدود ساعت ۱۵ عصر تأثیر محسوس و قابل توجهی بر افزایش یا کاهش میزان آب شیرین تولید شده ندارد، زیرا در کل این زمان با توجه میزان نسبتاً بالای شدت تشعشع خورشید دمای صفحه جاذب تا حدی بالاتر از دمای ماده تغییر فاز دهنده است، ولی پس از این ساعت و با عبور از ساعت ۱۶ و با توجه کاهش قابل ملاحظه شدت شار دریافتی از خورشید، در حالت عدم حضور ماده تغییر فاز دهنده بر اثر کاهش شدید شدت تشعشع، به مقدار قابل ملاحظه‌ای آب شیرین تولید شده در سیستم کاهش می‌یابد و پس از ساعت ۱۸ عصر عملاً تولید آب شیرین به مقداری در حدود صفر می‌رسد. پر واضح است که با کاهش شدت تشعشع و بالطبع آن کاهش محسوس دمای صفحه جاذب، روند انتقال حرارت بین صفحه جاذب و ماده تغییر فاز دهنده معکوس می‌گردد و این بار گرما از ماده‌ی تغییر فاز دهنده به صفحه جاذب و لوله‌های حاوی آب، منتقل خواهد شد. نتیجه این معکوس شدن جهت انتقال حرارت که از حوالی ساعت ۱۷ عصر ملموس‌تر است، ادامه تولید آب شیرین در ساعات پایانی عصر و تا نزدیکی نیمه‌شب می‌باشد. نکته جالب توجه دیگر در این شکل، بیشتر بودن تولید آب شیرین در ساعات ابتدایی انتقال گرما از ماده تغییر فاز دهنده به صفحه جاذب و لوله‌هاست که منجر به تولید بیشتر آب شیرین در ساعات پایانی عصر (۱۶ تا ۲۰) گردیده است. این موضوع دقیقاً با ویژگی مواد تغییر فاز دهنده مبنی

نهایتاً و به منظور مطالعه تأثیر استفاده یا عدم استفاده از ماده تغییر فاز دهنده در این تحقیق و همچنین با هدف بررسی تأثیر نوع ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده در سیستم، تغییراتی در شرایط حل مسئله ایجاد شد. ابتدا مخزن‌های ماده تغییر فاز دهنده تعبیه شده در داخل کلکتور خورشیدی در مطالعه موردی، با ماده PCM60 که جایگزین PCM45 شده است و با همان مقادیر پارامترهای طراحی ارائه شده در جدول ۳ مدل‌سازی گردیدند. سپس با حذف کامل مخزن‌های ماده تغییر فاز دهنده و استفاده از شرایط جدول ۳ مدل‌سازی سیستم آب‌شیرین‌کن رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا بدون ماده تغییر فاز دهنده انجام گرفته است و نتایج آن در شکل ۱۷ آورده شده است.



شکل ۱۵- مقدار متوسط دمای سه لایه‌ی PCM45



شکل ۱۶- کسر جرمی مایع مربوط به دولایه‌ی اول و دولایه آخر PCM45

دمای ذوب 45°C و 60°C می‌باشند، امکان ادامه کار آب‌شیرین‌کن در ساعات بعد از غروب خورشید نیز میسر گردیده است. با توجه به مطالعه موردی اجرا شده و نوآوری انجام شده در تحقیق حاضر در زمینه به کارگیری مواد تغییر فاز دهنده در ساختار سیستم آب شیرین‌کن خورشیدی رطوبت‌زن- رطوبت‌زدا نتایج ذیل حاصل می‌شود:

در ساعات اولیه صبح که شدت تابش کمتر است، میزان تولید آب شیرین در حدود $2/1$ لیتر در ساعت است. به مرور و با افزایش شار حرارتی خورشید در ساعت ۱۲ تا ۱۴ میزان تولید آب شیرین حدوداً 85% بیشتر می‌شود و به بیش از $3/9$ لیتر در ساعت می‌رسد.

در طی روز و افزایش و کاهش شدت تابش خورشیدی، مقدار متوسط دمای آب خروجی از رطوبت‌زدا تغییرات ناچیزی دارد، به نحوی که تفاوت بین دمای آب خروجی در زمان اوج شدت تابش در ظهر (حدود ساعت ۱۳) و کمینه آن در عصر (حدود ساعت ۱۸) کمتر از ۱ درجه سلسیوس است. به بیان دیگر تغییرات دمای آب خروجی از رطوبت‌زدا در طی روز کمتر از 5% است.

دمای آب خروجی از کلکتور خورشیدی نقش قابل توجهی بر میزان آب شیرین تولید شده دارد. نتایج حاصل نشان‌دهنده آن است که استفاده از ماده تغییر فاز دهنده بیش از 9% افزایش تولید آب شیرین روزانه را در پی دارد. ضمن این که تفاوت قابل توجهی بین کارایی این دو نوع ماده تغییر فاز دهنده ملاحظه نگردید؛ بنابراین در مجموع استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در این نوع سیستم آب‌شیرین‌کن عملکرد مناسبی در پی خواهد داشت.

در مواد تغییر فاز دهنده سرعت فرایند ذوب به مقدار قابل‌ملاحظه‌ای بیشتر از سرعت فرآیند انجماد آن است. لازم به ذکر است که این تفاوت در لایه‌های پایین‌تر یا به عبارتی دورتر از صفحه جاذب، قابل‌ملاحظه‌تر و بیشتر است.

هزینه بالای خرید و به کارگیری مواد تغییر فاز دهنده می‌تواند از معایب این روش باشد و برای دستیابی به مقادیر این هزینه‌ها باید تحلیل‌های اقتصادی روی سیستم پیشنهادی انجام شود.

بر کندتر شدن روند انتقال گرما از آن‌ها در طی گذر زمان تطابق دارد و حداکثر آهنگ انتقال گرما در هر دو نوع ماده تغییر فاز دهنده در حوالی ساعت ۱۷ تا ۱۸ اتفاق افتاده است. استفاده از هر یک از دو نوع ماده تغییر فاز دهنده، PCM45 یا PCM60، موجب افزایش 9% در تولید آب شیرین روزانه نسبت به حالت عدم استفاده از ماده تغییر فاز دهنده، می‌گردد. همچنین لازم به توضیح است که میزان آب شیرین تولیدشده در حالت استفاده از PCM60 سیر نزولی سریع‌تری به نسبت حالت استفاده از PCM45 از خود نشان می‌دهد؛ یعنی با این که بین ساعت‌های $16/30$ تا 18 تولید آب‌شیرین‌کن بیشتری دارد، ولی این میزان تولید در ساعات بعدی شدیداً نزول می‌کند و به مقداری کمتر از آب شیرین تولید شده در سیستم با ماده تغییر فاز دهنده PCM45 می‌رسد. علت این امر در نوع گرمای ذخیره‌سازی شده در هر یک از انواع ماده تغییر فاز دهنده نهفته است. بدین معنا که چون ماده PCM60 کمتر وارد مرحله تغییر فاز گردیده است و عمده حجم آن در فاز جامد باقی می‌ماند، لذا عمده گرمای ذخیره‌شده در آن به صورت گرمای محسوس می‌باشد و مقدار ناچیزی ذخیره‌سازی نهان دارد، لذا در مرحله پس دادن گرما شار بالای گرمایی را به صورت گرمای محسوس در ساعات ابتدایی ایجاد می‌کند و در ساعات بعدی به علت عدم ذخیره انرژی گرمایی به صورت نهان، بشدت میزان شار گرمایی آن کاهش می‌یابد. این در حالی است که در ماده PCM45 بخش قابل توجهی گرما به صورت گرمای نهان صرف تغییر فاز آن شده است، بنابراین مقدار زیادی از انرژی ذخیره شده در این نوع ماده تغییر فاز دهنده، از نوع گرمای ذخیره‌شده نهان است. لذا روند پس دادن گرما نیز در آن برخلاف PCM60، به صورت آهسته و پیوسته است، اما درعین حال چنان‌چه پیش‌تر نیز اشاره شد، تفاوتی بین استفاده از این دو نوع مختلف ماده تغییر فاز دهنده در متوسط مقدار آب شیرین روزانه تولید شده مشاهده نگردید.

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه مدل‌سازی فنی سیستم آب‌شیرین‌کن رطوبت‌زنی- رطوبت‌زدایی که در آن از یک کلکتور خورشیدی به منظور گرمایش آب استفاده شده، انجام گرفته است. در کار حاضر با مجهز کردن کلکتور خورشیدی به مخزن‌های حاوی ماده تغییر فاز دهنده از دو نوع مختلف پارافین واکس که دارای

η	بازده
β	شیب صفحه به درجه
ε_g	ضریب تابش گرمایی شیشه
ε_p	ضریب تابش گرمایی صفحه مسی

مراجع

- [1] Bacha H.B, Maalej A.Y, Dhia H.B, Ulber I, Uchtmann H, Engelhardt M, Krelle J, (1999) Perspectives of solar-powered desalination with the "SMCEC" technique. *Desalination* 122(2-3): 177-183.
- [2] Soufari S.M, Zamen M, Amidpour M, (2008) Design and manufacture of optimum solar desalination system by humidification-dehumidification method, 12th National Congress of Iranian Chemical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.
- [3] Jahanshahi Javaran E, Hossein Khani A, Mohammadi S.M, (2016) Manufacturing and simulation of solar humidification-dehumidification desalination system. *Modares Mech Eng* 16(12): 239-248.
- [4] Nawayseh N.K, Farid M.M, Al-Hallaj S, Al-Timimi A.R, (1999) Solar desalination based on humidification process—I. Evaluating the heat and mass transfer coefficients. *Energy Conv. Manag* 40(13): 1423-1439.
- [5] Nawayseh N.K, Farid M.M, Omar A.A, Al-Hallaj S.M, Tamimi A.R, (1997) A simulation study to improve the performance of a solar humidification-dehumidification desalination unit constructed in Jordan. *Desalination* 109(3): 277-284.
- [6] Ettouney R, Fawzi N, El-Rifai M, Ettouney H, (2012) Flue gas desulfurization and humidification dehumidification in power plants. *Desalin. Water Treat* 37(1-3): 337-349.
- [7] Mehrgoo M, Amidpour M, (2012) Constructal design and optimization of a direct contact humidification-dehumidification desalination unit. *Desalination* 293: 69-77.
- [8] Giwa A, Fath H, Hasan S.W, (2016) Humidification-dehumidification desalination process driven by photovoltaic thermal energy recovery (PV-HDH) for small-scale sustainable water and power production. *Desalination* 377: 163-171.
- [9] Kassim M.A, Benhamou B, Harmand S, (2011) Effect of air humidity at the entrance on heat and mass transfers in a humidifier intended for a desalination system. *Appl. Therm. Eng* 31(11-12): 1906-1914.
- [10] Treybal R.E, (1980) *Mass transfer operations*, New York.

۷- فهرست علائم و اختصارات

A	مساحت سطح پره
C	ظرفیت گرمایی ویژه
d	قطر لوله
D	قطر دستگاه رطوبت زن
f	ضریب اصطکاک
F'	ضریب عملکرد کلکتور
f _m	ضریب اصلاح جنس ماده
f _p	ضریب اصلاح فشار
f _t	ضریب اصطکاک دارسی
G _a	سرعت جرمی یا دبی جرمی در واحد سطح برای سیال هوا
h	ضرایب انتقال حرارت
H	ارتفاع دستگاه رطوبت زن
j _a	ضریب کلبرون
k' _{w-air}	ضریب انتقال جرم بین آب و هوا
K	رسانایی حرارتی
L	ضخامت عایق
L _c	طول تصحیح شده پره
L _f	طول پره
n _{wa}	نسبت دبی جرمی آب به دبی جرمی هوا
Pr _i	عدد پی بعد پرانتل برای سیال داخلی
Q _u	انرژی به دست آمده از کلکتور صفحه تخت خورشیدی
R _{f,i}	مقاومت ایجاد شده توسط رسوب لوله‌ها
Re _t	عدد رینولدز داخل لوله
S	وان تابشی خورشید بر حسب وات بر مترمربع
T	دما
U _L	ضریب کلی اتلافات حرارتی
Nu _t	عدد پی بعد ناسلت برای سیال داخل لوله
\dot{V}	دبی حجمی هوا
Y	نسبت رطوبت
t _f	ضخامت پره
$\omega_{a,i}$	رطوبت مطلق هوا در ورودی رطوبت زن
ΔT_{LMTD}	متوسط دمای لگاریتمی
μ_a	ویسکوزیته دینامیکی هوا
σ	نسبت حداقل سطح مقطع جریان به مساحت سطح جلویی
ΔP_t	افت فشار در قسمت لوله
ρ_t	چگالی سیال داخل لوله
μ_t	ویسکوزیته دینامیکی سیال داخل لوله

- [17] Ananno A.A, Masud M.M, Dabnichki P, Ahmed A, (2020) Design and numerical analysis of a hybrid geothermal PCM flat plate solar collector driver for developinf countries. *J. Sol. Energy* 196: 270-286.
- [18] Palacio M, Rincon A, Carmona M, (2020) Experimental comparative analysis of a flat plate solar collector with and without PCM. *J. Sol. Energy* 206: 708-721.
- [19] Radhwan A, Gari H, Elsayed M, (1993) Parametric study of a packed bed dehumidifier/regenerator using CaCl₂ liquid desiccant. *Renew. Energy* 3(1): 49-60.
- [20] Ghalavand Y, Rahimi A, Hatamipour M.S, (2018) Mathematical modeling for humidifier performance in a compression desalination system: Insulation effects. *Desalination* 433: 48–55.
- [21] Chapra S.C, Canale R.P, (1998) Numerical methods for engineers, Mcgraw-hill New York.
- [22] Bergman T.L, Incropera F.P, DeWitt D.P, Lavine A.S, (2011) Fundamentals of heat and mass transfer, John Wiley & Sons.
- [23] Kakac S, Liu H, Pramuanjaroenkij A, (2002) Heat exchangers: selection, rating, and thermal design, CRC press.
- [11] Zhang L, Chen W, Zhang H, (2013) Study on variation laws of parameters in air bubbling humidification process. *Desalin. Water Treat* 51(16-18): 3145-3152.
- [12] Summers S.M, Antar M.A, Lienhard J, (2012) Design and optimization of an air heating solar collector with integrated phase change material energy storage. *J. Sol. Energy* 86: 3417–3429.
- [13] Carmona M, Palacio M, (2019) Thermal modelling of a flat plate solar collector with latent heat storage validated with experimental data in outdoor conditions. *J. Sol. Energy* 177: 620–633.
- [14] Hu T, Hassabou A.H, Spinnler M, Polifke W, (2011) Performance analysis and optimization of direct contact condensation in a PCM fixed bed regenerator. *Desalination* 280: 232–243.
- [15] Badiei Z, Eslami M, Jafarpur K, (2019) Performance Improvements in Solar Flat Plate Collectors by Integrating with Phase Change Materials and Fins: A CFD Modeling. *Energy J* 192: 1-41.
- [16] Abuska M, Sevik S, Kayapunar A, (2019) Experimental analysis of solar air collector with PCM-honeycomb combination under the natural convection. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 195: 299-308.