مدیریت آب و آبیاری
(نشریه علمی)
دوره ۱۰ ■ شماره ۲ ■ پاییز ۱۳۹۹
صفحه‌های ۲۳۱-۲۲۱

مقاله پژوهشی:

بررسی امکان تولید آب از هوای مرطوب در مدل گلخانه‌ای مجهز به مبدل حرارتی

پیام کمالی[۱]، سید مهدی هاشمی شاهدانی[۲]، سامان جوادی[۲*]، ساسان علی نیائی فرد[۳]، حامد ابراهیمیان[۴]
۱. دانشجوی دکتری گرایش آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکده ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکده ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۳. استادیار، گروه باغبانی، دانشکده ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۴. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۲۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۰۷

چکیده
در حدود ۹۰ درصد آبی که در گلخانه‌ها مصرف می‌شود، به دو فرایند تبخیر و تعرق و خنک‌سازی محیط تخصیص می‌یابد. حجم زیادی از آب استفاده‌شده در گلخانه‌ها بدون استفاده و به‌صورت هوای مرطوب توسط هواکش به بیرون هدایت می‌شود که قابل بازیافت بوده و امکان مصرف دوباره آن با تقطیر به چرخه ورودی آب گلخانه وجود دارد. از این‌رو، هدف از انجام این تحقیق، در گام نخست بررسی امکان تولید آب از هوای مرطوب خارج‌شده از گلخانه و در گام بعدی بررسی تأثیر پارامترهای طول مبدل حرارتی و سرعت هوای ورودی روی میزان آب بازیافت شده است. این مطالعه در قالب نُه تیمار آزمایشی با سه طول متغیر (۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر) و سه سرعت هوای ورودی (۰/۵، ۰/۸ و ۱/۲ متر بر ثانیه)، در یک مدل گلخانه‌ای با ابعاد ۱/۵×۱×۲ مترمکعب انجام گردید. نتایج نشان داد که افزایش طول و سرعت هوای ورودی باعث افزایش تولید آب می‌شود، به‌طوری‌که بیش‌ترین مقدار آب چگالش‌شده در طول ۱/۵ متر و سرعت هوای ۱/۲ متر بر ثانیه به‌دست آمد. هم‌چنین، مقدار آب تولیدی حدود ۳ برابر شد به‌طوری‌که مقدار آب تولیدی در بیش‌ترین میزان خود به ۶۰ لیتر در طول ۱/۵ متر و سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه رسید. هم‌چنین، نتایج نشان داد که می‌توان با استفاده از مبدل حرارتی، حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد آب مصرفی برای آبیاری و سرمایش (هواکش و پوشال) را بازیافت کرد.

کلیدواژه‌ها: چگالش، رطوبت، سرعت هوا، گلخانه.

Investigating the Possibility of Water Production from humid Air in the Greenhouse Model Equipped with Heat Exchanger

Payam Kamali[1], Seyed Mehdy Hashemi shahedani[2], Saman Javadi[2*], Sasan Aliniaeifard[3], Hamed Ebrahimian[4]
1. Ph.D. Candidate of Irrigation and Drainage, Department of Irrigation and Drainage Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.
2. Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Horticulture, College of Aburaihan, University of Tehran, Tehran, Iran.
4. Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran.
Received: March 11, 2020 Accepted: May 27, 2020

Abstract
About 90 percent of the water used in greenhouses is allocated to the two processes of evapotranspiration and cooling of the environment. A large amount of water used in greenhouses is driven out useless in the form of humid air by the fan, which is recyclable and can be reused in the greenhouse water inlet cycle by condensation. Therefore, the purpose of this study is to investigate the possibility of water production from humid air exiting the greenhouse. In the next step, the effects of heat exchanger length and inlet air velocity were investigated on the amount of recycled water. This study was conducted in 9 experimental treatments with three lengths (0.5, 1 and 1.5 m) and three inlet air velocities (0.5, 0.8 and 1.2 m/s) inside a greenhouse model with dimensions of 2x1.5 x 2 m^3. The measurements were done with dimensions of 1.5 × 1 × 2 m^3. The results showed that increasing the heat exchanger length and inlet air velocity increase the water production and the highest condensed water achieved at heat exchanger length of 1.5 m and an air velocity of 1.2 m/s. Also, the amount of water produced was about three times higher than normal condition without condensation, up to a maximum of 60 liters at a length of 1.5 m and velocity of 1.2 m/s. The results showed that about 10 to 30 percent of the water used for irrigation and cooling (fan and pad) the greenhouse can be recovered by using a heat exchanger.

Keywords: Air velocity, Condensation, Greenhouse, Humidity.

* نویسنده مسئول Email: javadis@ut.ac.ir

مقدمه

بیش از ۹۰ درصد از حجم آب شیرین مصرفی در کشور، صرف تولید محصولات کشاورزی می‌شود. محور اقتصادی روستاها و شهرهای کوچک، فعالیت‌های کشاورزی است و مدیریت منابع آب در این حوزه اهمیت زیادی دارد. به‌کارگیری راه‌کارهای مدیریتی در شرایط کمبود منابع آب نیازی اساسی برای افزایش کارایی مصرف آب است که موجب کاهش مشکلات زیست‌محیطی و آسیب‌های اجتماعی می‌شود (٤ و ٦). با توجه به این‌که ایران یکی از کشورهای دارای محدودیت از لحاظ منابع آبی در جهان است، توجه به کشاورزی پایدار و افزایش بهره‌وری آب کشاورزی ضروری است (۷).

گیاهانی که در مناطق خشک‌تر رشد می‌کنند تحت تأثیر تنش‌های متعددی از قبیل خشکی، دمای بالا، سرعت باد بالا، رطوبت کم، تابش بالا، گرد و غبار و شوری قرار می‌گیرند. این عوامل هم به‌صورت تنش فیزیولوژیکی مستقیم و هم غیرمستقیم با تغییر فیزیکی محیط بر رشد گیاه تأثیر می‌گذارند. برای غلبه بر این مشکلات، استفاده از گلخانه‌ها می‌تواند یک محیط مناسب برای رشد گیاه فراهم کند. گلخانه‌ها ساختارهای چندمنظوره کشاورزی هستند که می‌توانند برای اهداف مختلف مانند افزایش تولید در واحد سطح و افزایش کیفیت محصول تولیدی مورداستفاده قرار گیرند (۱). هم‌چنین، استفاده از گلخانه‌ها این امکان را فراهم می‌سازد که بیش از یک‌بار در سال کشت انجام داد، به‌طوری‌که در شرایط هوای سرد، گلخانه‌ها برای ایجاد یک محیط گرم برای گیاهان کشت‌شده و در هوای گرم، به‌عنوان یک محیط خنک برای رشد استفاده می‌شوند (۸).

یکی دیگر از روش‌هایی که می‌تواند به رفع بحران آب کشور کمک کند، استفاده از روش‌های نوین برای تولید آب شیرین است. با توجه به این‌که آب مورداستفاده در گلخانه باید کیفیت بالایی داشته باشد، آب تولیدی با روش‌های آب‌شیرین‌کن می‌تواند در گلخانه‌ها مورد استفاده قرار بگیرد. از روش‌های متداول تولید آب شیرین می‌توان به نمک‌زدایی به‌صورت حرارتی (تبخیری-تقطیری)، تقطیر مؤثر چند مرحله‌ای، تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای، متراکم‌سازی بخار، اسمز معکوس و استفاده از رطوبت هوا اشاره کرد. به‌ندرت به این موضوع توجه می‌شود که در دنیا مخازن طبیعی آب زیادی به شکل بخار آب وجود دارد. مشاهده گیاهانی که به‌طور طبیعی، رطوبت هوا را به‌صورت شبنم بر روی برگ‌های خود جذب می‌کنند و یا در زمان مه‌های غلیظ، باریکه‌ای از جریان آب روی تنه آن‌ها قابل مشاهده است، امکان تهیه آب از هوای مرطوب را نشان می‌دهند. در روسیه یکی از اولین کارها در زمینه گرفتن آب از هوا انجام شد. این سامانه شامل کانال‌های قائم و شیب‌دار در زمین برای جمع‌آوری آب از اتمسفر توسط خنک‌کردن هوای مرطوب بود. این سامانه‌ها به سامانه‌های تولید آب چگالشی معروف هستند (۸).

چندین کار پژوهشی در مورد امکان‌سنجی تهیه آب از رطوبت هوا در ایران نیز انجام شده و موفقیت‌آمیز بوده است (۲). برای تبدیل رطوبت به آب در محیط کنترل‌شده نیز تحقیقاتی مانند گلخانه آب دریا انجام شده است. مفهوم گلخانه آب دریا برای اولین بار در سال ۱۹۹۱ توسط شرکت چارلی پاتون[1] توسعه یافت و در سال ۱۹۹۲ اولین کار پژوهشی در انگلستان انجام شد. نتیجه پژوهش نشان داد که مناطق خشک پتانسیل استفاده از این نوع گلخانه را دارند. در گلخانه آب دریا، کشت گیاهان در مناطق خشک با استفاده از آب دریا و انرژی خورشیدی انجام می‌شود، به این‌صورت که آب دریا به داخل گلخانه منتقل می‌شود و با استفاده از انرژی خورشیدی تبخیر و نمک‌زدایی می‌گردد. سپس با استفاده از

سامانه بازیافت و خنک‌کردن هوای داخل گلخانه، آب شیرین تولید می‌شود. با توجه به لزوم کاهش حداکثری تلفات آب در گلخانه‌های هوشمند و ضرورت بهبود حداکثری میزان بهره‌وری آب در این بخش، از نظریه تبدیل رطوبت به آب در طراحی سامانه GHHD[۲] نیز استفاده شده است (۹ و ۱۶). در این سامانه نیز همانند گلخانه آب دریا، آب شور واردشده به محیط گلخانه ابتدا توسط انرژی خورشیدی بخار و سپس دوباره به آب تازه تبدیل می‌شود. با این حال، هدف اصلی این سامانه‌ها تولید آب شیرین با استفاده از فرایند تبخیر و میعان در مناطق نزدیک دریا است و مشکلاتی از قبیل نیاز به سطح زیاد برای جذب انرژی خورشیدی، هزینه اولیه بالا و تجمع نمک دارند. سبلانی و همکارن (۱۷) با استفاده از شبیه‌سازی ترمودینامیک به بررسی تأثیر پارامترهای وابسته به گلخانه روی میزان آب تولیدی پرداختند. در این مطالعه، آب منتقل‌شده از دریا ابتدا تبخیر و سپس با استفاده از سردکننده به آب تبدیل می‌شد. نتایج این مطالعه نشان داد که ابعاد گلخانه (نسبت عرض به طول) بیش‌ترین تأثیر را روی میزان آب تولیدی و مصرف انرژی دارد. لیندبالم و نوردل (۱۵) برای رطوبت‌زدایی هوا از دستگاه تقطیرکن خورشیدی استفاده کردند. مقدار آب تولیدی برای مصارف کشاورزی را ۳/۱ کیلوگرم بر متر در روز به‌دست آوردند. برایانت و احمد (۱۱) در قطر، وضعیت آب‌وهوایی و سایر شرایط را برای تولید آب از رطوبت هوا را در یک دوره ۲۸ روزه بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود که میزان آب تولیدشده در حدود ۱۴۵ گالن در روز بود.

صالحی و همکارن (۱۸) در مطالعه‌ای استفاده از گلخانه آب دریا را در شرایط آب‌وهوایی بندرعباس در ایران بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش رطوبت نسبی هوای ورودی، تولید آب و دمای کف گلخانه افزایش و تفاوت دما کاهش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش جریان آب از دریا، تولید آب افزایش و دمای کف کاهش می‌یابد. در این مطالعه، چرخه‌های مختلف ورود آب به داخل گلخانه نیز بررسی شد. طبق نتایج، آبی که ابتدا از تبخیرکننده عبور و از قسمت زیرین گلخانه وارد می‌شود، مؤثرترین چرخه و آب بیش‌تری تولید می‌کند. کابیل و المقدر (۱۳) شرایط اقتصادی و تولید آب را در گلخانه آب دریا در مطالعات مختلف بررسی کردند. آن‌ها گلخانه آب دریا را یک روش کشت، شیرین‌کننده آب، خنک‌کننده محیط کشت و یکپارچه‌کننده رطوبت در گلخانه دانستند که از لحاظ اقتصادی نیز می‌تواند به‌صرفه باشد.

کابیل و السید (۱۴) با استفاده از سامانه GHHD برای تأمین نیازهای آبیاری و آشامیدن در منطقه خلیج فارس، اقدام به بررسی جنبه‌های فنی و اقتصادی تولید آب در گلخانه کردند. نتایج نشان داد که استفاده از فن‌آوری‌های جدید، هم می‌تواند باعث تولید آب بیش‌تر و هم پاسخگوی نگرانی‌های کارشناسان در مورد جنبه اقتصادی این طرح باشد. در دانشگاه سلطان قابوس عمان به بررسی جامع و به‌روز در مورد جنبه‌های اقتصادی و فنی گلخانه آب دریا پرداخته شد. طبق این نتایج، میزان شوری آب تولیدشده از رطوبت، برابر صفر گزارش شد. میزان آب تأمین‌شده تقریباً نصف نیاز آبیاری محصول بوده که با ترکیب با آب شور می‌تواند افزایش یابد. هم‌چنین در این مطالعه هزینه‌های اولیه دستگاه سردکننده نیز کاهش یافته است (۱۰). زارعی و همکاران (۲۰) در مطالعه‌ای اثرات طول و عرض گلخانه و شفافیت سقف گلخانه را با استفاده از روش رگرسیون بردار پشتیبان بررسی کردند. با استفاده از یک شبکه بهینه‌سازی طیف گسترده‌ای از تغییرات پارامترهای موردبررسی تأثیر پارامترها بر مصرف انرژی و تولید آب تعیین شد. در نهایت با صرف انرژی ۱/۵۵۸ کیلووات ساعت، ۱۶۱/۱ مترمکعب آب در هر مترمربع تولید گردید. طهری و همکاران (۱۹) به بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر مقدار میعانات در مبدل

حرارتی گلخانه آب دریا در مسقط، عمان پرداختند که نتایج آنان نشان داد حساسیت به سرعت جریان بیش‌تر از بقیه پارامترها می‌باشد و سرعت جریان میزان میعانات را افزایش می‌دهد. حسین‌خانی (۳) در تحقیقی ساخت و شبیه‌سازی یک آب‌شیرین‌کن را بررسی کرد. نتایج وی نشان داد که تأثیر دمای آب نسبت به هوا روی میزان آب شیرین تولیدشده بیش‌تر می‌باشد.

در مطالعات گذشته، هم در هوای آزاد و هم در گلخانه از رطوبت برای تولید آب استفاده شده است. در گلخانه روش کار به این صورت بوده است که به‌صورت مصنوعی رطوبت تولید و دوباره چگالش انجام شده که بیش‌تر با هدف شیرین‌سازی بررسی شده است. در مطالعه حاضر، از رطوبت موجود در داخل گلخانه برای تولید آب استفاده شد. لذا، فرضیه این پژوهش آن است که بخش قابل‌توجهی از آبی که در گلخانه‌ها به مصرف تبخیر و تعرق (حدود ۹۰ درصد) (۵) و خنک‌سازی محیط می‌رسد، قابل بازیافت است و دوباره می‌تواند با تقطیر به چرخه ورودی آب به گلخانه وارد شود. هم‌چنین با توجه به این‌که حجم زیادی از آب استفاده‌شده در گلخانه‌ها بدون استفاده و به‌صورت رطوبت توسط هواکش به بیرون هدایت می‌شود، به‌طورکلی در یک روز گرم و خشک، آبی با دبی ۰/٤ لیتر بر دقیقه در مترمربع می‌تواند از روی سطح پوشال، تبخیر شود (۲۱). هیریچ و چوکر- الله (۱۲) در مطالعه‌ای نشان دادند که مقدار مصرف آب در هواکش و پوشال به‌ترتیب ۲/٦ و ۳/۵ برابر بیش‌تر از نیاز آبی فلفل شیرین و گوجه فرنگی گیلاسی است. از آنجایی که در گلخانه‌ها امکان نگهداشت خروجی هوای مرطوب وجود ندارد، لذا باید طول دستگاه و شدت جریان هوا در مبدل حرارتی به‌صورتی تعیین گردد تا در این فاصله امکان میعان آب به‌وجود آید. شبیه‌سازی فرایند جریان دوفازی هوا و بخار آب در مبدل‌های حرارتی پیچیده بوده و لذا در این پژوهش در نظر است این جریان دو فازی به‌صورت تجربی در آزمایشگاه موردبررسی قرار گیرد. بنابراین، هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر طول و سرعت جریان هوای مرطوب روی میزان تولید آب در مقیاس کوچک می‌باشد.

مواد و روش‌ها

روند کلی انجام تحقیق در شکل (۱) ارائه شده است. شایان ذکر است که انجام این تحقیق در پنج مرحله کلی قابل تقسیم بوده که روند انجام هر مرحله در ادامه تشریح شده است.

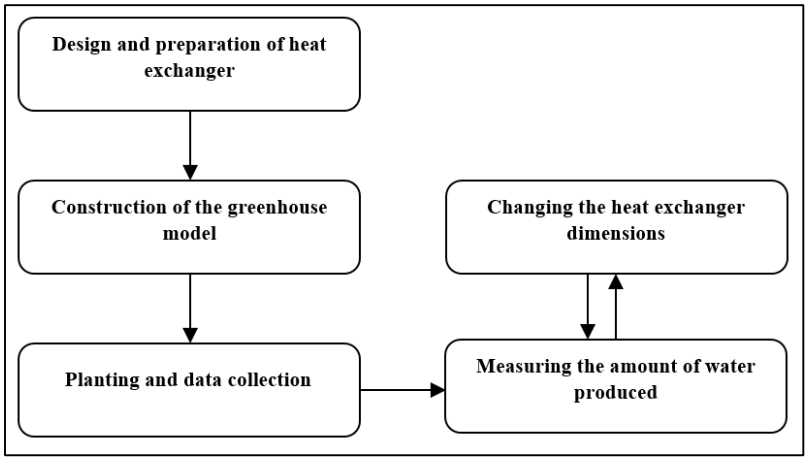

Figure 1. Trend of research

این تحقیق در پردیس ابوریحان دانشگاه تهران واقع در پاکدشت در سال ۱۳۹۸ انجام شد. در تابستان ۱۳۹۸ مدل گلخانه‌ای به ابعاد ۱×۲ مترمربع و ارتفاع ۱/۵ متر احداث گردید. مراحل تغییر ابعاد و داده‌برداری به‌مدت یک‌ماه انجام شد.

در این مطالعه، نه تیمار آزمایشی مطابق جدول (۱) در نظر گرفته شد. تیمارهای آزمایشی براساس شرایط موجود و مطالعات گذشته انتخاب شدند. هم‌چنین به‌منظور بررسی تأثیر خصوصیات مبدل در میزان آب تولیدی، سه طول مبدل حرارتی و سه سرعت هواکش (سرعت هوای ورودی) در این مطالعه موردبررسی قرار گرفت. هوای مرطوب خروجی از گلخانه با استفاده از یک لوله عایق به سمت دستگاه چگالش هدایت می‌شود و بعد از عبور از داخل آن و ازدست‌دادن رطوبت خود از قسمت انتهایی دستگاه خارج می‌شد. در محل‌های مورد نیاز با قراردادن سنجنده‌های مختلف اندازه‌گیری‌های موردنیاز انجام شد.

برای اندازه‌گیری سرعت هوای ورودی از بادسنج smart sensor استفاده شد. دقت مدل ۵± درصد و محدوده اندازه‌گیری آن بین صفر تا ٤٥ متر بر ثانیه بود. بادسنج مورد استفاده به‌صورت دستی در مسیر جریان هوای ورودی و خروجی گرفته می‌شد و سرعت هوا را برحسب متر بر ثانیه و دمای هوا را بر حسب درجه سانتی‌گراد به‌دست می‌داد. برای اندازه‌گیری دما و رطوبت داخل گلخانه و هم‌چنین دما و رطوبت هوای ورودی و خروجی به مبدل حرارتی از سنجنده Smart sensor استفاده شد. این سنجنده دمای هوا را در دو مکان (محل نصب ابزار و سنجنده انتهایی) و رطوبت نسبی را در یک مکان به‌دست می‌داد. شکل (۲) طرح نمادین گلخانه مورد آزمایش را نشان می‌دهد. دماسنج داخل گلخانه، داخل مبدل و در قسمت انتهای مبدل حرارتی برای اندازه‌گیری دمای هوای ورودی و خروجی و کنترل دمای داخل مبدل (که برابر با دمای نقطه شبنم باشد) نصب شد. هم‌چنین، رطوبت‌سنج برای اندازه‌گیری رطوبت نسبی در داخل گلخانه و قسمت خروجی مبدل نصب شد.

Table 1. Properties of experimental treatments

Treatment	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Length of heat exchanger (m)	0.5	1	1.5	0.5	1	1.5	0.5	1	1.5
Air velocity (m/s)	0.5	0.5	0.5	0.8	0.8	0.8	1.2	1.2	1.2

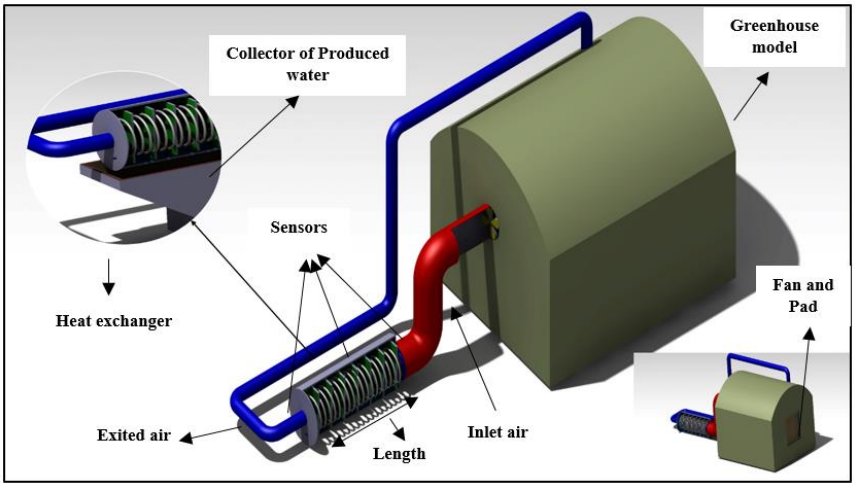

Figure 2. Schematic shape of the greenhouse model

در این مطالعه برای انجام آزمایش‌ها از گیاه چمن آماده استفاده شد. به این منظور، ابتدا بستر داخل مدل گلخانه‌ای آماده‌سازی گردید سپس، گیاه چمن خریداری‌شده در محل قرار داده شد. چمن از جمله گیاهان تک‌لپه‌ای و از خانواده گندمیان است. بافت خاک لوم رسی سیلتی بود. در طول آزمایش ارتفاع چمن (حدود ۱۲ سانتی‌متر) ثابت نگه داشته شد. دور آبیاری ثابت و به‌صورت روزانه اعمال شد تا این‌که شرایط مناسب و بدون تنش برای تبخیر- تعرق مهیا گردد. برای محاسبه میزان تبخیر- تعرق، از گلدان‌ها (دهانه ۲۰ و ارتفاع ۱۸ سانتی‌متر) به‌عنوان یک لایسیمتر وزنی استفاده شد. در این تحقیق با اندازه‌گیری وزن گلدان‌ها، درحالی‌که خاک در حد ظرفیت زراعی می‌باشد و وزن بوته تر گیاه، مقدار آب آبیاری تنظیم گردید.

منبع آب و نحوه آبیاری و سرمایش

برای آبیاری از منبع آب موجود در پردیس ابوریحان استفاده شد. برای اندازه‌گیری میزان آب مصرفی، کنتور اندازه‌گیری حجم آب افقی ۱/۲ اینچی با دقت R100 در مسیر آب نصب شد. داخل مدل گلخانه‌ای به‌وسیله نوارهای تیپ و روزانه آبیاری می‌شد. برای آبیاری روزانه چمن حدود ٤٠ لیتر آب مصرف می‌شد. برای سرمایش داخل گلخانه نیز آب توسط پمپ روی پد پخش می‌شد. میزان آبی که برای سرمایش روزانه مصرف می‌شد حدود ۱۵۰ لیتر بود. در کل در طول دوره آزمایش بین ۱۹۰ تا ۲۰۰ لیتر میزان آب مصرفی گیاه و قسمت هواکش و پوشال اندازه‌گیری شد. مشخصات کیفی آب مورد استفاده برای آبیاری در جدول (۲) ارائه شده است.

Table 2. Water qualitative parameters used for irrigation

EC (ds/m)	pH	Na (meq/lit)	Ca+Mg (meq/lit)	SAR
1.1	7.2	2.9	16	1.02

نحوه تغییر ابعاد دستگاه و سرعت هواکش

دستگاه تبدیل رطوبت به آب اولیه با همکاری شرکت تصفیه‌گستر جنوب واقع در استان فارس تهیه گردید. ابعاد قسمت سرمایشی ۰/۵ در ۰/۵ مترمربع بود. دستگاه دارای ورودی و خروجی که هر دو قسمت مجهز به هواکش می‌باشد. هم‌چنین، دستگاه دارای یک مخزن برای جمع‌آوری آب چگالش‌شده و یک شیر برای خروج آب می باشد. طول اولیه دستگاه در این آزمایش ۰/۵ متر بود. در ادامه با افزایش طول دستگاه (محفظه سرمایشی) به ۱ و ۱/۵ متر نیز آزمایش انجام شد. هم‌چنین با استفاده از دیمر الکتریکی دور هواکش در سرعت‌های ۰/۵، ۰/۸ و ۱/۲ متر بر ثانیه تنظیم شد.

نحوه داده‌برداری

داده‌های برداشت‌شده برای انجام این مطالعه و تحلیل‌های موردنیاز به‌ترتیب دما و رطوبت نسبی خروجی داخل گلخانه، سرعت هوای ورودی و خروجی، دما و رطوبت نسبی هوای خروجی، دمای داخل محفظه سرمایش می‌باشد. دما و رطوبت با نصب سنجنده در مسیر جریان هوا اندازه‌گیری شد. سرعت هوا نیز با استفاده از بادسنج دستی و قرارگرفتن آن در مسیر جریان هوا اندازه‌گیری شد. در این بررسی برای محاسبه دمای نقطه شبنم از نمودار سایکرومتریک و مشخصات هوای ورودی به مبدل حرارتی (دما و رطوبت نسبی) استفاده شد و سعی بر این بود که دمای داخل مبدل در حد دمای نقطه شبنم یا کم‌تر از آن باشد تا چگالش اتفاق بیافتد.

نحوه محاسبه مقدار آب تولیدی

مقدار آبی که می‌توان از کاهش دمای هوایی با دمای بالاتر T_1 درجه سانتی‌گراد تا دمای پایین‌تر T_2 به‌دست آورد، برابر است با اختلاف رطوبت مطلق هوای مرطوب در دماهای اولیه و ثانویه (شکل ۳). برای محاسبه اختلاف

رطوبت مطلق (مقدار بخار آب موجود در واحد حجم از هوا) هوای ورودی و خروجی مبدل و به‌دست‌آوردن مقدار آب تولیدی در این مطالعه از نمودار سایکرومتریک استفاده شد. پارامترهای آن به‌صورت زیر است:

T_{in} دمای هوای ورودی، RH_{in} رطوبت نسبی هوای ورودی، DP نقطه شبنم، T_{DP} دمای نقطه شبنم، T_{out} دمای هوای خروجی، RH_{out} رطوبت نسبی هوای خروجی، W_{in} رطوبت مطلق هوای ورودی و W_{out} رطوبت مطلق هوای ورودی.

با استفاده از رابطه (۱) و نمودار سایکرومتریک نرخ آب تولیدی محاسبه گردید:

$$M_w = M_{da}(W_{T1} - W_{T2}) \qquad (۱)$$

که در آن:

M_W نرخ آب تولیدی (گرم بر ثانیه)، M_{da} نرخ جریان ورودی (کیلوگرم بر ثانیه)، W_{T1} و W_{T2} به‌ترتیب رطوبت مطلق در دماهای ورودی و خروجی مبدل حرارتی.

نرخ جریان ورودی نیز از رابطه (۲) قابل محاسبه هست:

$$M_{da} = V \times \rho \times A \qquad (۲)$$

که در آن:

V سرعت هوای ورودی (متر بر ثانیه)، ρ چگالی هوای ورودی (کیلوگرم بر مترمکعب) و A سطح مقطع ورودی مبدل حرارتی.

نتایج و بحث

در این مطالعه با ثابت نگه‌داشتن مشخصات هوای ورودی (دما و رطوبت نسبی) سعی شد که فقط تأثیر پارامترهای موردنظر در تولید آب بررسی شود. در ادامه به بررسی میزان آب تولیدی و تأثیر پارامترها پرداخته شده است. مشخصات دستگاه و هوای ورودی تیمارهای مختلف در جدول (۳) ارائه شده است. در این تحقیق، همان‌طورکه اشاره شد سعی بر این بود که مشخصات هوای ورودی در طول آزمایش ثابت نگه داشته شود. پارامترهای دمای نقطه شبنم و رطوبت مطلق از طریق نمودار سایکرومتریک به‌دست آمد.

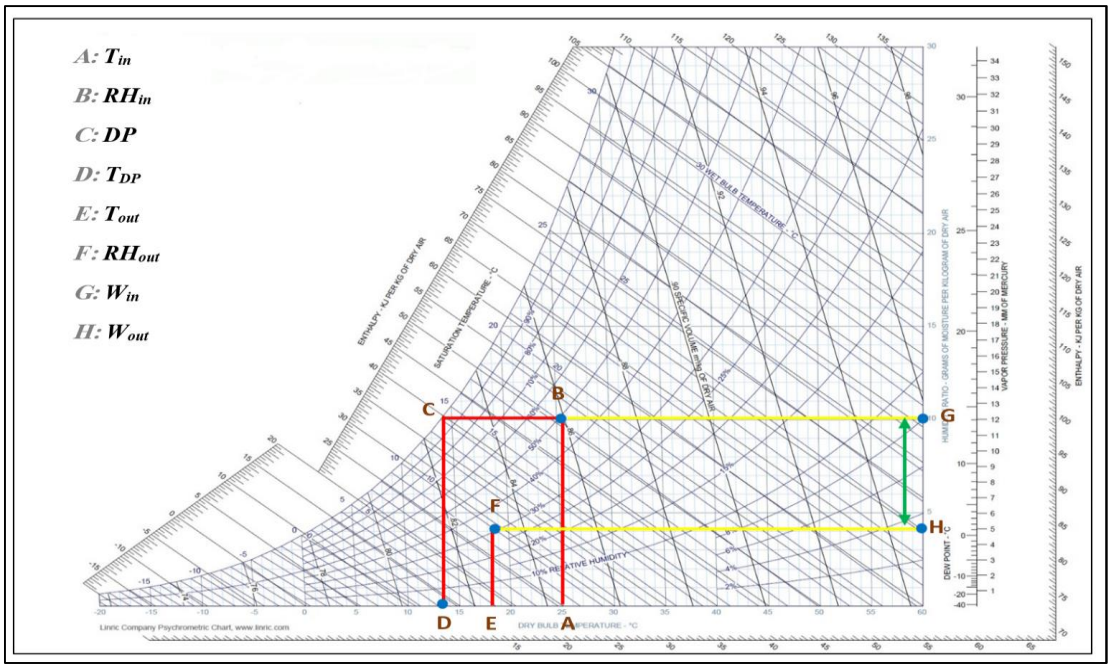

Figure 3. Psychometric chart

Table 3. Properties of different treatments

Treatment	Length (m)	Inlet air velocity (m/s)	Inlet air temperature (°C)	RH (%)	AH (g/g)	DP (°C)	Heat exchanger temperature (°C)
1	0.5	0.5	25	50	0.01189	16.72	5
2	1	0.5	25	50	0.01189	16.72	5
3	1.5	0.5	25	50	0.01189	16.72	5
4	0.5	0.8	25	50	0.01189	16.72	5
5	1	0.8	25	50	0.01189	16.72	5
6	1.5	0.8	25	50	0.01189	16.72	5
7	0.5	1.2	25	50	0.01189	16.72	5
8	1	1.2	25	50	0.01189	16.72	5
9	1.5	1.2	25	50	0.01189	16.72	5

مشخصات هوای خروجی و میزان آب تولیدی نیز در جدول (٤) برای تیمارهای مختلف ارائه شده است. با توجه به دما و رطوبت نسبی هوای خروجی که از طریق سنجنده‌ها اندازه‌گیری شد، میزان رطوبت مطلق کم‌شده و نرخ تولید آب به‌دست آمد. با توجه به زمان آزمایش که حدود شش ساعت برای هر تیمار در روزهای جداگانه بود، میزان آب جمع‌آوری‌شده با نرخ تولید هم‌خوانی داشت. به‌عنوان نمونه در تیمار دوم طول محفظه از ۰/۵ متر به ۱ متر رسید و سرعت ثابت نگه داشته شد. نتایج نشان داد که با افزایش طول به ۱ متر میزان آب تولیدی حدود ۷/۵ درصد افزایش داشت. با افزایش طول محفظه سرمایش، زمان نگهداشت هوای مرطوبت و سطح تماس افزایش می‌یابد و در نتیجه انتقال حرارت بیش‌تر صورت گرفته و مقدار آب تولیدشده افزایش یافت.

مشخصات هوای خروجی و میزان آب تولیدی برای تیمار سوم نشان می‌دهد که با افزایش طول از ۱ متر به ۱/۵ متر با سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه مقدار آب تولیدی شش درصد افزایش یافت که نشان می‌دهد نسبت به افزایش طول از ۰/۵ به ۱/۵ متر، افزایش بیش‌تری در میزان آب تولیدی اتفاق افتاده است. هم‌چنین، مشخصات هوای خروجی نشان می‌دهد که حدود ۹/۵ درجه از دما و ۲۱ درصد از دمای هوای مرطوب ورودی کاسته شده است. مشخصات هوای خروجی و میزان آب تولیدی نیز در جدول (٤) برای تیمار چهارم نشان می‌دهد که در این تیمار نسبت به تیمار اول طول ثابت و سرعت هوای ورودی به ۰/۸ متر بر ثانیه افزایش یافت. نتایج نشان می‌دهد که حدود ٦٩ درصد میزان آب تولیدی افزایش یافت.

تحلیل تأثیر افزایش طول

به‌طورکلی نتایج آزمایش‌ها در این تحقیق نشان می‌دهد که در سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه افزایش طول از ۰/۵ به ۱ متر، میزان آب تولیدی را ۷/۵ درصد و از ۱ به ۱/۵ متر، ٦ درصد افزایش می‌دهد. هم‌چنین در سرعت‌های ۰/۸ و ۱/۲ متر بر ثانیه در طول ۰/۵ به ۱ متر به‌ترتیب برابر ۷ درصد و ٤ درصد و در سرعت ۱/۲ برابر با ٦/٩ درصد و ٦/٤ درصد افزایش تولید آب وجود داشت که نشان می‌دهد، افزایش طول از ۰/۵ به ۱ متر به‌طور نسبی تأثیر بیش‌تری در افزایش مقدار آب تولیدی نسبت به افزایش طول از ۱ به ۱/۵ متر داشت. با افزایش طول زمان نگه‌داشت هوای مرطوب، سطح تماس افزایش و لایه مرزی دمایی نازک‌تر می‌شود که باعث انتقال حرارت بیش‌تر و افزایش مقدار آب تولیدی می‌شود. حسین‌خانی (۳) در تحقیقی عنوان کرد که با افزایش سطح انتقال حرارت در واحد مبدل حرارتی می‌توان میزان بیش‌تری از رطوبت موجود در هوا را جدا کرد. فرایند انتقال حرارت در مبدل حرارتی به‌طور عمده ناشی از جابه‌جایی می‌باشد.

Table 4. Exited air and produced water properties for different treatments

Treatment	Exited air temperature (°C)	RH (%)	AH (g/g)	Difference AH (g/g)	Water produced rate (g/s)	Water produced (lit)
1	18	34	0.00358	0.00831	0.9141	19.7
2	17	31	0.00295	0.00894	0.9834	21.2
3	15.5	29	0.00241	0.00948	1.0428	22.5
4	14	27	0.00309	0.0088	1.5488	33.5
5	13	25	0.00245	0.00944	1.6614	35.9
6	11.9	23	0.00204	0.00985	1.7336	37.4
7	10.9	20	0.00271	0.00918	2.4235	52.3
8	10.2	19	0.00208	0.00981	2.5898	55.9
9	9.1	17	0.00145	0.01044	2.7562	59.5

انتقال حرارت جابه‌جایی وابسته به ضریب انتقال حرات جابه‌جایی و اختلاف دمای بین جریان هوا و سطح مبدل می‌باشد. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی وابسته به اعداد رینلدز و پرانتل می‌باشد و با حرکت توده هوا از ابتدای محفظه مبدل به انتهای آن، با ثابت‌بودن دمای سطح محفظه، دمای جریان هوا کاهش یافته، در نتیجه اختلاف دما بین سطح و جریان هوا کاهش می‌یابد و درنهایت نرخ انتقال حرارت در انتهای محفظه کم‌تر خواهد بود. هم‌چنین در ابتدای ورود جریان هوا به داخل محفظه، جریان آشفته می‌باشد که درنتیجه آن لایه مرزی در ابتدای محفظه ضخامت کم‌تری نسبت به انتهای محفظه دارد و هر چقدر ضخامت لایه مرزی کم‌تر باشد، نرخ انتقال حرارت بیش‌تر خواهد بود. علاوه بر این، جریان هوا در ابتدای ورود به داخل محفظه، توسعه نیافته است و پروفیل سرعت جریان هوا و لایه‌های مرزی به‌طور منظم تشکیل نشده است که این خود نیز دلیل بیش‌تربودن نرخ انتقال حرارت در ابتدای محفظه نسبت به انتهای محفظه است. به‌طورکلی، آشفته‌بودن جریان هوا در ابتدای محفظه و اختلاف دمای بیش‌تر جریان هوا و سطح در ابتدای محفظه نسبت به انتهای محفظه و عدم توسعه‌یافتگی جریان هوا در ابتدای محفظه باعث بیش‌تربودن نرخ انتقال حرارت در ابتدای محفظه نسبت به انتهای آن می‌باشد.

تحلیل تأثیر افزایش سرعت هواکش

در طول ۰/۵ متر، افزایش سرعت از ۰/۵ به ۰/۸ متر بر ثانیه و از ۰/۸ به ۱/۲ متر بر ثانیه به‌ترتیب میزان آب تولیدی را ٦٩/٤ درصد و ٥٦/٥ درصد افزایش داد. در طول ۱ متر، افزایش سرعت از ۰/۵ به ۰/۸ و از ۰/۸ به ۱/۲ متر بر ثانیه به‌ترتیب میزان آب تولیدی را ٦٨/٩ درصد و ٥٥/٩ درصد افزایش داد. هم‌چنین در طول ۱/۵ متر، افزایش سرعت از ۰/۵ به ۰/۸ و از ۰/۸ به ۱/۲ متر بر ثانیه به‌ترتیب میزان آب تولیدی را ٦٦/٢ درصد و ٥٩ درصد افزایش داد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش سرعت از ۰/۵ به ۰/۸ متر بر ثانیه تأثیر بیش‌تری بر افزایش مقدار آب تولیدی داشت. هم‌چنین، نتایج نشان می‌دهد که افزایش سرعت هوای ورودی به محفظه سرمایش تأثیر بسیار بیش‌تری نسبت به افزایش طول در مقدار آب تولیدی داشت، حال آن‌که تغییر طول، هزینه‌بر و سخت می‌باشد، اما تغییر سرعت هواکش کم‌هزینه و سریع‌تر انجام می‌شود. دلیل این‌که با افزایش سرعت هوای ورودی میزان آب تولیدی افزایش می‌یابد این است که با افزایش سرعت، ضریب انتقال افزایش‌یافته و در نتیجه با افزایش انتقال حرارت میزان آب بیش‌تری تولید می‌شود. طهری و همکاران (۱۹) به بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر مقدار میعانات در کندانسور گلخانه آب دریا در مسقط عمان پرداختند که نتایج نشان داد حساسیت به سرعت جریان بیش‌تر از بقیه پارامترها می‌باشد که افزایش سرعت جریان میزان میعانات را افزایش می‌دهد. حسین‌خانی (۳) در مطالعه‌ای به این نتیجه رسید که با افزایش دبی هوای ورودی به کندانسور میزان آب تولیدشده را می‌توان افزایش داد، اما با توجه به ابعاد کندانسور با افزایش دبی از یک حد به بالا میزان افزایش تولید آب شیرین قابل‌توجه نمی‌باشد و صرفه اقتصادی ندارد.

نرخ انتقال حرارت به اختلاف دمای بین دو محیط، سطح تماس و ضریب جابه‌جایی حرارت وابسته است. ضریب جابه‌جایی توسط سه عدد بی‌بعد رینولدز[3]، پرانتل[4] و ناسلت[5] و هم‌چنین ثابت‌های وابسته دمایی بیان می‌شود. عدد رینولدز که نسبت نیروهای اینرسی و لزجت است برای تعیین نوع جریان به‌کار می‌رود. با افزایش سرعت هوای ورودی، عدد رینولدز افزایش و هم‌چنین باعث ایجاد افت فشار و افزایش عدد پرانتل و نفوذ حرارتی می‌شود و درنتیجه انتقال حرارت بیش‌تر اتفاق افتاده و میزان آب تولیدی افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

این تحقیق به‌منظور بررسی امکان تولید آب از هوای مرطوب خروجی از گلخانه با استفاده از یک مبدل حرارتی و پارامترهای مؤثر بر میزان آب تولیدی انجام شد. برای این منظور، گلخانه‌ای به ابعاد ۱/۵×۱×۲ ساخته شد. نتایج نشان داد، امکان تولید آب از هوای مرطوب خروجی وجود دارد و با نمونه اولیه دستگاه می‌توان حدود ۱۰ درصد آب مصرفی (آب موردنیاز گیاه و آب استفاده‌شده در هواکش و پوشال) را بازیافت کرد. برای بررسی تأثیر پارامترهای طول محفظه سرمایش و سرعت هواکش (سرعت هوای ورودی) بر مقدار آب تولیدی نُه تیمار آزمایشی تعریف شد. به‌منظور این‌که فقط تأثیر طول محفظه و سرعت هواکش روی میزان آب تولیدشده بررسی شود، مشخصات هوای ورودی (دما و رطوبت نسبی) در طول آزماش ثابت نگه داشته شد. نتایج نشان داد که افزایش طول و سرعت باعث افزایش مقدار آب تولیدی می‌شود و افزایش سرعت هوای ورودی به مراتب تأثیر بسیار بیش‌تری بر مقدار آب تولیدی داشت. بیش‌ترین مقدار آب تولیدی با طول ۱/۵ متر و سرعت هوای ۱/۲ متر بر ثانیه به‌دست آمد که حدود ۳۰ درصد (۶۰ لیتر) آب مصرفی برای نیاز آبی گیاه و هواکش و پوشال بازیافت شد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، استفاده از مبدل حرارتی در گلخانه‌ها به‌خصوص در مناطق گرمسیر که آب زیادی در قسمت هواکش و پوشال برای سرمایش داخل گلخانه‌ها مصرف می‌شود، پیشنهاد می‌گردد.

پی‌نوشت‌ها

1. Charlie Paton
2. Greenhouse Humidification Dehumidification
3. Reynolds
4. Prandtl
5. Nusseelt

منابع

۱. افاضاتی، م.، ایران دوست، م. و رضایی استخروییه، ع. (۱۳۹٤). تأثیر پلیمر سوپرجاذب بر رشد و عملکرد گیاه خیار گلخانه‌ای تحت شرایط کم‌آبیاری. مدیریت آب و آبیاری. ۵ (۲): ۲۱٤-۲۰۳.

۲. بهرامی، س.، طباطبایی، ط. و کریمی، م. ر. (۱۳۹٤). امکان سنجی آبگیری آب از رطوبت هوا با استفاده از روش سامانه تولید آب مکنده رطوبت هوا در استان هرمزگان- بندرعباس، اولین همایش علمی پژوهشی زیست شناسی و علوم باغبانی ایران، تهران، انجمن علمی توسعه و ترویج علوم و فنون بنیادین، ایران.

۳. حسین‌خانی، ع. (۱۳۹۵). ساخت و شبیه‌سازی آب‌شیرین‌کن خورشیدی رطوبت‌زنی- رطوبت‌زدایی، پایان نامه کارشناسی ارشد، انرژی‌های تجدیدپذیر دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته.

٤. زارع ابیانه، ح.، چشمه قصابانی، ا.، باب الحوائجی، ح. و افروزی، ع. (۱۳۹۷). اثر کم‌آبیاری بر تبخیر و تعرق، کارایی مصرف آب، عملکرد و رشد گیاه فلفل همدانی در کشت گلخانه‌ای. علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای. ۹ (۲): ۳٦-۲۳.

۵. علیزاده، ا. رابطه آب و خاک و گیاه. جلد دوازدهم. انتشارات آستان قدس رضوی. مشهد. ٦١٦ صفحه.

٦. کمیسیون کشاورزی، آب و صنایع غذایی. (۱۳۹۵). وضعیت آب در بخش کشاورزی. اتاق بازرگانی صنایع، معادن و کشاورزی تهران. ۲۰ صفحه.

۷. محبوبی، م. ر.، اسماعیلی اول، م. و یعقوبی، ج. (۱۳۹۰). بررسی عوامل بازدارنده و پیش‌برنده کاربرد روش‌های جدید آبیاری توسط کشاورزان: مورد غرب شهرستان بشرویه در خراسان جنوبی. مدیریت آب و آبیاری. ۱(۱): ۹۸-۸۷.

۸. محمدی، ع. (۱۳۹۱). تولید آب با استفاده از تقطیر هوا در لوله‌های مدفون در زیرزمین، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

9. Al-Ismaili, A.M. (2009) Modelling of a humidification-dehumidification greenhouse in Oman, PhD thesis, Cranfield University (United Kingdom), Ann Arbor, UK.
10. Al-Ismaili, A.M,. & Jayasuriya, H. (2016). Seawater greenhouse in Oman: A sustainable technique for freshwater conservation and production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 653-664.
11. Bryant, J.A., & Ahmed, T. (2008). Condensate Water Collection for an Institutional Building in Doha, Qatar: An Opportunity for Water Sustainability. Energy Systems Laboratory. Proceedings of the 16th Symposyum on Improving Building Performance Systems in Hot and Humid Climates, Plano, TX, 15-17 December.
12. Hirich, A., & Choukr-Allah, R. (2017). Water and Energy Use Efficiency of Greenhouse and Net house Under Desert Conditions of UAE: Agronomic and Economic Analysis. Water Resources in Arid Areas. Part of the Springer Water book series (SPWA), 481-499.
13. Kabeel, A.E., & Ali, M.A. (2013). Seawater greenhouse in desalination and economics. Seventeenth International Water Technology Conference, IWTC17, Istanbul, 5-7 November.
14. Kabeel, A.E. & Emad, M.S. El-Said. (2015). Water production for irrigation and drinking needs in remote arid communities using closed-system greenhouse: A review. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18(2), 294-301.
15. Lindblom, J., & Nordell, B. (2007). Underground condensation of humid air for drinking water production and subsurface irrigation. *Desalination*, 203(1-3), 417-434.
16. Paton, Ch. (2012). Seawater Greenhouse: A Restorative approach to agriculture, Discussion Paper 1220, Global Water Forum.
17. Sablani, S.S., Goosenat, M.F.A., Patonb, C., Shayya, W.H., & Al-Hinaid, H. (2003). Simulation of fresh water production using a humidification-dehumidification seawater greenhouse. *Desalination*, 159 (3), 283-288.
18. Salehi, G.R., Ahmadpour, M., & Khoshnazar, H. (2011). Modeling of the Seawater Greenhouse Systems. Solar Thermal Application. World Renewable Energy Congress, Linkoping, Sweden, 8-13 May.
19. Tahri, T., Douania, M., Amouraa, M., & Bettahar, A. (2016). Study of influence of operational parameters on the mass condensate flux in the condenser of seawater greenhouse at Muscat, Oman. *Desalination and Water Treatment*, 57(30), 1-8.
20. Zarei, T., Behyad, R., & Abedini, E. (2017). Study on parameters effective on the performance of a humidification-dehumidification seawater greenhouse using support vector regression. *Desalination*, 435(1), 235-245.
21. Zulovich, J.M. (2009). Maintenance of Evaporative Cooling Systems. Extension Agricultural Engineer Commercial Agriculture Program of University of Missouri Cooperating with U.S. Publication 1453.