

## Supply of Greenhouse Water Requirement from Solar Distiller Freshwater Production Using Condensation Method

LEILA GHASSEMI<sup>1</sup>, ABDOLRAHIM HOOSHMAND<sup>1\*</sup>, SAEED BOROUMANDNASAB<sup>1</sup>

1. Irrigation and Drainage Department, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran  
(Received: Apr. 6, 2019- Revised: May. 27, 2019- Accepted: Aug. 24, 2019)

### ABSTRACT

In this research, a greenhouse connected to a solar distiller device was constructed for the desalination of saline water and irrigation at Shahid Chamran University of Ahvaz. Sand, sand-bagasse-perlite, and bagasse-perlite beds were used in the greenhouse as a condenser of hot and humid air of the distiller tank. By measuring air temperature, relative humidity, air flow velocity in the distiller tank, temperature around the pipes and moisture in the beds, daily production of freshwater from the distiller was calculated. The FAO Penman-Montieth method was used to estimate greenhouse reference evapotranspiration. The purpose of this research was to estimate the percentage of supplied evapotranspiration in the greenhouse by produced freshwater from the condensation method and to select the proper condenser bed in terms of moisture and temperature distribution. Daily and periodic measurements of freshwater produced by each bed were compared to daily and periodic evapotranspiration of the greenhouse. The average amount of freshwater produced per square meter by the solar distiller was calculated to be 1.23, 1.97, 2, and 1.97 kg/day in May, June, July, and August, respectively, with the average of 1.75 kg/day during the whole period. The average evapotranspiration amount in the greenhouse was estimated to be 4.08 millimeter per day. Production water in sand, sand-bagasse-perlite and bagasse-perlite beds was calculated to be 0.94, 0.79, and 0.82 times of the evapotranspiration rate within the greenhouse, respectively. Due to the lower temperature of the sand bed and the higher production of water, the sand bed is a better condenser than the other two beds. Evapotranspiration from April 21 to July 29, 2018, was estimated to be 408.2 millimeters, which %85 of it was supplied by a distiller with a production of 2799.5 kilograms for an area of 8.1 square meters of bed (without considering its type).

**Keywords:** Condenser, FAO Penman-Monteith method, Production of freshwater, Reference evapotranspiration, Solar distiller.

## تامین نیاز آبی گلخانه توسط آب شیرین تولیدی تقطیرگر خورشیدی به روش چگالشی

لیلا قاسمی<sup>۱</sup>، عبدالرحیم هوشمند<sup>۱\*</sup>، سعید برومندنسب<sup>۱</sup>

۱. گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران  
تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱/۱۷ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۳/۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۶/۲

### چکیده

در این تحقیق، یک گلخانه متصل به یک دستگاه تقطیرگر خورشیدی برای نمک‌زدایی از آب شور و آبیاری گیاهان در دانشگاه شهید چمران اهواز ساخته شد. بسترهای شن، شن-باگاس-پرلایت و باگاس-پرلایت به عنوان چگالنده هوای گرم و مرطوب مخزن تقطیرگر در گلخانه استفاده شدند. با اندازه‌گیری دمای هوا، درصد رطوبت نسبی و سرعت جریان هوا در مخزن تقطیرگر، دمای اطراف لوله‌ها و رطوبت در بسترها، تولید آب شیرین تقطیرگر به صورت روزانه محاسبه گردید. برای برآورد تبخیر-تعرق مرجع گلخانه از روش فائو پنمن مانیتیت استفاده شد. هدف تحقیق حاضر محاسبه درصد تبخیر-تعرق تامین شده به وسیله آب شیرین تولیدی به روش چگالشی در این گلخانه و انتخاب بستر چگالنده بهتر از لحاظ توزیع رطوبت و دما است. اندازه‌گیری‌های روزانه و دوره‌ای تولید آب شیرین برای هر بستر با تبخیر-تعرق روزانه و دوره‌ای گلخانه مقایسه شدند. میانگین تولید آب شیرین در یک مترمربع از تقطیرگر خورشیدی در ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر و مرداد به ترتیب برابر ۱/۲۳، ۱/۹۷، ۲ و ۱/۹۷ کیلوگرم در روز محاسبه شدند و به طور میانگین ۱/۷۵ کیلوگرم در روز به دست آمد. مقدار میانگین تبخیر-تعرق گلخانه در محل مورد مطالعه ۴/۰۸ میلی‌متر در روز برآورد شد. آب تولیدی در بسترهای شن، شن-باگاس-پرلایت و باگاس-پرلایت به ترتیب ۰/۹۴، ۰/۷۹ و ۰/۸۲ برابر تبخیر-تعرق درون گلخانه محاسبه شدند. به دلیل پایین‌تر بودن دمای بستر شن و تولید آب بیشتر، بستر شن چگالنده بهتری نسبت به دو بستر دیگر است. مقدار تبخیر-تعرق از تاریخ اول اردیبهشت تا هفتم مرداد ۱۳۹۷، ۴۰۸/۲ میلی‌متر به دست آمد که ۸۵٪ آن توسط تقطیرگر با تولید ۲۷۹۹/۵ کیلوگرم برای مساحت ۸/۱ مترمربع بستر (بدون در نظر گرفتن نوع آن) تامین گردید.

**واژه‌های کلیدی:** تبخیر-تعرق مرجع، تقطیرگر خورشیدی، تولید آب شیرین، چگالنده، روش فائو پنمن مانیتیت.

### مقدمه

تقاضا برای آب شیرین به دلیل افزایش جمعیت و مقدار رو به رشد استفاده از آن در کشاورزی و صنعت، افزایش یافته است (Tiwari and Sahota, 2017). بخش کشاورزی، ۷۰٪ آب شیرین را در جهان مصرف می‌کند، در حالی که این مقدار در مناطقی مانند خاورمیانه و آفریقای شمالی که از کمبود شدید آب رنج می‌برند، به بیش از ۹۰٪ نیز می‌رسد (Bourouni et al., 2011).

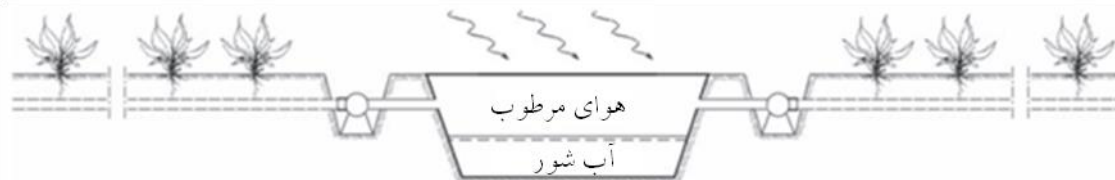
محدودیت منابع آب باعث می‌شود که از آب‌های با کیفیت پایین استفاده شود. استفاده از آب‌های با کیفیت پایین باعث کاهش محصول و زیان به محیط زیست، خاک و سفره‌های آب زیرزمینی می‌شود (Chaibi, 2013a). گروه مشاورین تحقیقات کشاورزی بین‌الملل<sup>۱</sup> (CGIAR) توضیح می‌دهد که اگر همه کارهایی که منجر به افزایش راندمان آبیاری و بهبود در بهره‌وری کشاورزی می‌شوند انجام شوند، بشریت حداقل به ۱۷٪ آب شیرین

بیشتر برای تهیه نیازهای غذایی خود احتیاج دارد. تنها راه برای تولید آب شیرین بیشتر، نمک‌زدایی از آب‌های شور است (Lindblom and Nordell, 2007). سیستم‌های نمک‌زدایی آب مبتنی بر مصرف انرژی‌های فسیلی در درازمدت برای غلبه بر بحران آب پایدار نیستند، زیرا هم باعث تخلیه منابع انرژی موجود شده و هم افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای را در پی دارند (Gorjian and Ghobadian, 2015). تقطیر خورشیدی یک روش حرارتی برای حذف آلودگی‌ها از آب شور و یا خالص‌سازی آب با استفاده از انرژی تجدیدپذیر خورشید است (Manchanda and Kumar, 2017). سیستم‌های تقطیرگر خورشیدی می‌توانند آب مورد نیاز محصولات گلخانه‌ای را در مناطق خشک با مقیاس کم اما ارزان و ساده تامین نمایند (Reca et al., 2018).

دو نوع اساسی گلخانه متصل به دستگاه‌های تقطیرگر که در مناطق کم‌آب، کاربرد وسیعی دارند، سیستم‌های تقطیرگر

\* نویسنده مسول: hooshmand\_a@scu.ac.ir

چگالشی در شکل (۱) نشان داده شده است. همانطور که جریان هوای گرم و مرطوب، رطوبت خود را درون لوله‌ها از دست می‌دهد، به تدریج خاک اطراف گرم می‌شود (با از دست رفتن رطوبت هوای گرم و مرطوب، گرمای نهان چگالش آزاد شده و انتقال حرارت (همرفتی) از لوله به خاک اطراف اتفاق می‌افتد). بنابراین بازده تولید آب کاهش می‌یابد. برای کاهش درجه حرارت زمین، در طول شب هوای سرد اطراف درون لوله‌ها به گردش در می‌آید (Boroomandnasab and Yousefi, 2016; Yousefi, 2012). این سیستم آبیاری باعث افزایش بازده آبیاری و کاهش تلفات رواناب سطحی می‌گردد. به علاوه در روزهای گرم و آفتابی وقتی نیاز آبیاری بالا است تولید آب در سیستم‌های خورشیدی رطوبت دهنده هوا بیشتر است. در طراحی یک سیستم آبیاری چگالشی باید به پیکربندی سیستم (طول، قطر، فاصله بین لوله‌ها و عمق آن‌ها از سطح زمین)، آب و هوا، نوع خاک و خصوصیات جریان هوای ورودی توجه نمود. اگر سیستم به منظور آبیاری طراحی گردیده است، محصول انتخابی باید با توجه به عواملی همچون نیاز آبی، عمق ریشه، سطح برگ، توانایی جذب آب، حساسیت دمایی ریشه‌ها و غیره مورد بررسی قرار گیرد (Lindblom and Nordell, 2007).



شکل (۱). طرح یک سیستم آبیاری چگالشی (Lindblom and Nordell, 2007)

متوسط تولید آب آشامیدنی ۱/۸ کیلوگرم در هر متر طول لوله در روز بود و در لوله‌های زهکش مقدار تولید آب تا ۳/۱ کیلوگرم در هر متر در روز (معادل ۲/۳ میلی‌متر در روز آب آبیاری) افزایش یافت. همچنین نتایج تحلیل‌های حساسیت نشان داد که با افزایش دمای هوا، رطوبت و سرعت جریان هوا و نیز کاهش طول لوله، فاصله لوله، قطر لوله، عمق و فشار هوا، تولید آب افزایش می‌یابد. یک سیستم آبیاری چگالشی مقیاس کوچک (۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متر ارتفاع) توسط Lindblom and Nordell (2012) برای بررسی مسیرهای جریان آب، هوا و گرما ساخته شد. میزان متوسط آبیاری در جعبه شنی ۱/۰۳ میلی‌متر در روز محاسبه شد. با افزایش دوره آزمایش، میزان تولید آبیاری روزانه کاهش یافت که به دلیل افزایش دمای خاک اطراف لوله بود. مهم‌ترین مکانیسم

خورشیدی و سیستم‌های نمک‌زدای رطوبت‌زا و رطوبت‌زدا هستند (Kabeel and Almagar, 2013).

آبیاری چگالشی<sup>۱</sup> (CI) که در حقیقت فرایندی رطوبت‌زا و رطوبت‌زدا است، یک روش توسعه‌یافته نوین است که با استفاده از انرژی حاصل از تابش خورشید، آب‌های شور و نامتعارف را نمک‌زدائی (شیرین) کرده و به طور مستقیم در اختیار ریشه گیاه قرار می‌دهد که از افزایش نمک در خاک جلوگیری می‌کند (Yousefi *et al.*, 2010; Yousefi *et al.*, 2011; Lindblom and Nordell, 2006; Boroomandnasab and Yousefi, 2016).

سیستم آبیاری چگالشی از انرژی تابشی خورشید برای تبخیر آب شور و یا آب‌های آلوده استفاده می‌کند. در محفظه‌های تبخیر، هوای محصور به وسیله آب گرم درون دستگاه تقطیرگر مرطوب می‌شود و سپس به سیستم لوله‌های زیرزمینی هدایت می‌شود و در آنجا سرد شده و بخار به صورت آب شیرین در دیواره داخلی لوله، چگالش می‌یابد. اگر از لوله‌های زهکش استفاده شود، آب چگالش شده و مقداری از هوای گرم و مرطوب از لوله‌ها وارد خاک می‌شود و بنابراین ناحیه ریشه آبیاری و هوادهی می‌شود. اما با استفاده از لوله‌های معمولی، آب در انتهای لوله جمع‌آوری گردیده و برای آشامیدن به کار می‌رود. قاعده کلی سیستم آبیاری

مطالعات و کارهای انجام شده در زمینه آبیاری چگالشی از دانشگاه فنی لولئا<sup>۲</sup> به صورت مجموعه‌ای از پایان‌نامه‌های کارشناسی ارشد شروع شد (Yousefi, 2012). یکی از اولین طرح‌های آبیاری چگالشی توسط یک شرکت سوئیدی اجرا شد. در آن طرح، آب دریا درون لوله‌های پلاستیکی توسط انرژی خورشید تبخیر گردید و هوای گرم و مرطوب تولیدی توسط لوله‌های زهکش به عمق ریشه فرستاده شد و با چگالش آن، کاهش ۵۰ درصدی در مصرف آب گرچه فرنگی در این سیستم مشاهده شد (Hausherr and Ruess, 1993). مطالعات Lindblom and Nordell (2006) and Nordell (2007) و Lindblom and Nordell (2007) روی انتقال هوای مرطوب درون لوله‌های ساده و زهکش در سیستم آبیاری چگالشی انجام شد. برای این سیستم مرجع فرضی، مقدار

دستگاه شامل یک بام شیشه‌ای دوجداره شفاف بود که لایه داخلی بام شیشه‌ای با یک ماده سایه‌انداز پوشیده شده بود. آب شور روی این ماده سایه‌انداز بین دو لایه به سمت پایین جریان داشت. بخشی از تشعشع‌های زمینی جذب لایه داخلی بام می‌شد و آب شور تبخیر می‌گردید. بخار آب در سطح داخلی لایه بیرونی چگالش یافته و در امتداد شیشه به سمت پایین هدایت می‌شد و توسط شیارهایی برای آبیاری گیاهان جمع‌آوری می‌گردید. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که اگر ۵۰ درصد سقف گلخانه به دستگاه تقطیرگر خورشیدی اختصاص یابد، ظرفیت تأمین نیاز سالانه گیاهان با سایه‌اندازی کم با ظرفیت تولید حدود ۱/۵ تا ۲ لیتر بر مترمربع در روز برای روزهای با تابش بالا را دارد و در ابتدا و انتهای دوره فصل رویش، از حدود ۲/۳ و ۱/۶ برابر نیاز آبی محصول، تجاوز می‌کند. یک بررسی جامع و به‌روز بر فن‌آوری گلخانه‌ای دریایی<sup>۳</sup> (SWG<sub>H</sub>) توسط Al-Ismaili and Jayasuriya (2016) انجام شد. همچنین به پیاده‌سازی سیستم SWGH در عمان پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که عملکرد SWGH به عنوان یک سیستم ذخیره‌کننده آب، تقریباً ۶۷٪ نیاز آبی محصولات را در مقایسه با کشت فضای باز، کاهش می‌دهد. تولید آب شیرین از SWGH در عمان، بین ۳۰۰ تا ۶۰۰ لیتر در روز به‌دست آمد. از یک صفحه تقطیرگر خورشیدی<sup>۴</sup> برای نمک‌زدایی از سه نوع منبع آب شامل آب دریا، آب زیرزمینی و زهاب کشاورزی توسط Mashaly et al. (2015) استفاده شد. برای برآورد نیاز آبی در گلخانه از دو روش پنمن مانیتیت اصلاح شده و روش فرناندز، استفاده گردید. سه مدل آماری مشتق شده از نتایج آزمایشی برای برآورد سالیانه آب تولیدی سیستم تقطیرگر خورشیدی برای هر سه نوع منبع آب تغذیه، به‌دست آوردند. آب‌های شیرین تولیدی که توسط سه منبع آب تغذیه ورودی اندازه‌گیری شد، با نیازهای آبی برآورد شده توسط دو روش مذکور مقایسه گردیدند تا مساحت مورد نیاز سیستم تقطیرگر خورشیدی تعیین شود. نتایج نشان داد که روش پنمن مانیتیت می‌تواند برای برآورد نیاز آبی گیاهان در گلخانه‌ها به کار رود. به استثنای محاسبات ماه جولای در تولید آب شیرین از منبع آب زیرزمینی که از نیاز آبی با روش فرناندز کمتر بود، به طور کلی تولید آب در طول سال بیشتر از نیاز آبی بود و میانگین تولید آب شیرین از انواع آب تغذیه‌ای ۴/۷۹ لیتر در هر مترمربع در روز بود که از نیاز آبی دو روش پنمن مانیتیت و فرناندز با مقدار میانگین ۱/۸۸ لیتر در هر مترمربع در روز، بیشتر بود. نوع آب تغذیه کننده بر مقدار

انتقال گرما در پروفیل خاک شنی، فرایند همرفت گاز بود. یک سیستم آبیاری چگالشی برای تولید آب آشامیدنی توسط Yousefi and Boroomandnasab (2012) و Yousefi et al. (2015) به کار برده شد. در این تحقیق، از برق برای گرم کردن آب درون مخزن در کنار تشعشع خورشید، استفاده شد. نتایج نشان داد که در یک لوله ۲۵ متری به قطر ۶۳ میلی‌متر که در عمق ۴۰ سانتی‌متری زمین کار گذاشته شده بود و با دمای ثابت آب ۷۰ درجه سلسیوس، ظرفیت متوسط تولید آب آشامیدنی ۴ لیتر در ۸ ساعت کار سیستم در طول روز بود. راندمان تولید آب ۴۰٪ بود. همچنین دریافتند با دور شدن از ابتدای لوله، دمای سطح لوله کمتر افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش مقدار آب چگالش یافته در طول لوله است. یک سیستم تقطیرگر خورشیدی با چرخه رطوبت‌ساز - رطوبت‌زدا<sup>۲</sup> (HD) توسط Okati et al. (2016; 2018) طراحی گردید که در آن اتصال یک تقطیرگر خورشیدی (به عنوان رطوبت‌ساز) و یک فرایند جدید چگالش زیرسطحی (لوله‌های مدفون در زیرخاک به عنوان رطوبت‌زدا یا چگالنده) بررسی گردیدند. موازنه جرم و انرژی برای رطوبت‌ساز خورشیدی و چگالنده زیرسطحی در تحلیل‌های ترمودینامیکی سیستم نوشته شدند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقدار تولید آب به بیش از ۲۶۴/۸۶ کیلوگرم در روز رسیده و آب تولیدی می‌تواند از سوراخ‌های لوله‌ها عبور نموده و برای آبیاری ریشه‌های گیاه استفاده شود و یا به عنوان آب آشامیدنی، جمع‌آوری گردد. آن‌ها این طرح چگالش زیرسطحی را یک استراتژی امیدوارکننده برای روش آبیاری زیرسطحی دانستند و ابراز داشتند که فرایند جدید به کشاورزان اجازه می‌دهد تا از آب شور برای کشاورزی با کاربرد انرژی خورشید به‌ویژه در مناطق خشک، استفاده نمایند.

با توجه به اینکه بیشتر کارهایی که در زمینه تقطیرگرهای خورشیدی انجام شده توسط کارشناسان فنی و مهندسی است که بیشتر به جنبه‌های ترمودینامیکی تقطیرگرها می‌پردازند، از این‌رو در زمینه نیاز آبی در گلخانه‌های متصل به تقطیرگرهای خورشیدی که از اهداف این تحقیق است، بررسی‌های انگشت‌شماری صورت گرفته است که در ادامه آورده می‌شوند. ترکیب دستگاه تقطیر با گلخانه اولین بار توسط Trombe and Foex (1961) طراحی شد و سپس نسخه‌های اصلاح شده آن به‌وسیله Boutiere (1972) و Bettaque and Naegel (1999) توسعه یافتند (Yousefi, 2012; Chaibi, 2003a). یک دستگاه تقطیرگر توسط Chaibi (2003a) روی بام گلخانه نصب شد. این

انتخاب ارتفاع کم گلخانه در این طرح، بررسی پدیده تولید شب‌نم بر روی سقف و دیواره گلخانه است که هر چه ارتفاع کمتر باشد، تولید شب‌نم بیشتر است. در زمانی که فن‌ها کار نمی‌کنند، هوای گرم و مرطوب تقطیرگر، از طریق لوله‌هایی که به مخزن تقطیرگر متصل‌اند وارد گلخانه شده و با توجه به اختلاف دمای بخار و شیشه‌های گلخانه، شب‌نم تشکیل می‌گردد و گیاهان درون گلخانه به‌صورت خودبه‌خودی آبیاری می‌گردند. البته بررسی این پدیده، خارج از بحث این مقاله است. طول ردیف‌های کشت ۳ متر و عرض آن ۳۰ سانتی‌متر با عمق ۴۰ سانتی‌متر است. برای این گلخانه ۹ ردیف کشت در نظر گرفته شد که ردیف‌ها با سه بستر شنی، باگاس-پرلایت به نسبت یک‌دوم و شن-باگاس-پرلایت به نسبت یک‌سوم حجمی و با سه تکرار پر گردیدند. برای آبیاری بسترها در ۱۰ سانتی‌متری زیر هر بستر یک لوله با قطر ۶۳ میلی‌متری پلی پروپیلن (معروف به لوله سبز) زهکش‌دار با فاصله سوراخ‌های ۲/۱ سانتی‌متر و قطر سوراخ‌های ۰/۵ میلی‌متر، جایگذاری شدند که به مخزن شیشه‌ای اصلی تولید هوای مرطوب متصل شدند.

یک دستگاه تقطیرگر خورشیدی ساده روی زمین در پشت گلخانه یعنی جنوب آن (بهترین مکان نصب آن به دلیل عدم سایه‌اندازی تاسیسات اطراف) کار گذاشته شد و اطراف مخزن توسط فوم حرارتی-برودتی عایق‌بندی گردید تا از هدر رفت گرما از طریق بدنه مخزن پیشگیری شود. این مخزن توسط لوله‌های آبیاری به بسترهای گلخانه متصل شد. تقطیرگر خورشیدی در این گلخانه در واقع مخزن محصور شیشه‌ای است که با آب شور ۵ دسی‌زیمنس بر متر تا ارتفاع ۲/۸ سانتی‌متر پر گردید و بر اثر انرژی گرمایی دریافتی از خورشید، آب شور موجود در آن به بخار تبدیل شده و بخارهای تشکیل شده توسط دو پنکه نیمه‌صنعتی با توان ۶۵ وات به زیر بسترهای کشت هدایت شدند. این دو پنکه مکنده در دیواره جنوبی گلخانه نصب شدند و هر پنکه توسط یک لوله ۱۲ اینچ با طول ۵ متر به انتهای مخزن تقطیرگر متصل گردید. هوای مرطوب گلخانه توسط آن‌ها مکیده شده و به مخزن تقطیرگر هدایت می‌شد و از طریق سرعت جریان هوای ایجاد شده درون مخزن، هوای گرم و مرطوب درون مخزن به ۹ لوله که هر کدام در زیر یک بستر کشت قرار گرفته‌اند هدایت شده و در آنجا سرد شده و باعث رطوبت‌دهی به بستر کشت می‌شد. پنکه‌ها از ساعت ۹ صبح تا ساعت ۱۷ روشن بودند. در واقع بسترهای کشت در اینجا نوعی چگالنده خارجی محسوب می‌شوند. مساحت کف مخزن تقطیرگر ۱۶ مترمربع با طول و عرض مساوی چهار متر بود. به منظور جذب و تمرکز بیشتر پرتوهای خورشید از شیشه سیاه‌رنگ در کف مخزن استفاده شد و در پشت مخزن، آئینه تخت

آب تولیدی تاثیر چندانی نداشت. آب تولیدی توسط یک مترمربع سیستم تقطیرگر خورشیدی قادر به تامین نیاز آبی دو مترمربع از گلخانه بود.

هرچند که تحقیقات بسیار زیادی در زمینه استفاده از انرژی خورشید به منظور نمک‌زدائی از آب در تقطیرگرها انجام شده است (Singh et al., 2018; Dumka and Mishra, 2018; Pal et al., 2018; Bait and Si-Ameur, 2018; Ni et al., 2018; Hosseini et al., 2018)، اما با توجه به بررسی مطالعات انجام شده توسط محققین، کمبود کار تحقیقاتی در زمینه سیستم‌های تقطیرگر خورشیدی به منظور آبیاری و به‌ویژه آبیاری چگالشی و برآورد تبخیر-تعرق درون گلخانه‌ها احساس می‌گردد. همچنین با توجه به کمبود (به احتمال زیاد فقدان تحقیق در این زمینه) تحقیقات در ایران در زمینه تامین نیاز آبی محصولات گلخانه‌ای با آبیاری چگالشی و با توجه به پتانسیل بالای انرژی خورشید کشورمان، تحقیق در این زمینه، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد. بنابراین هدف تحقیق حاضر این است که به سوالات زیر پاسخ داده شود ۱- تولید آب شیرین به روش چگالشی در این گلخانه، چند درصد از تبخیر-تعرق گلخانه را در شرایط آب و هوایی شهر اهواز، تامین می‌نماید و ۲- مناسب‌ترین چگالنده از بین بسترهای مورد استفاده در این طرح، کدام بستر است؟

## مواد و روش‌ها

### موقعیت جغرافیایی طرح

شهر اهواز با موقعیت جغرافیایی ۳۱ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۶۵ دقیقه طول شرقی، در ارتفاع ۱۲ متر از سطح دریا واقع شده است. متوسط بارندگی سالانه آن در طول دوره آماری بلندمدت برابر با ۲۱۳ میلی‌متر می‌باشد. متوسط درجه حرارت سالانه آن نیز ۲۵ درجه سلسیوس است.

### گلخانه و مخزن تقطیرگر خورشیدی متصل به آن

در این تحقیق، گلخانه کوچکی (شکل ۲) به منظور تولید آب شیرین با روش چگالشی برای تامین تمام یا بخشی از نیاز آبی محصولات گلخانه‌ای در دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز ساخته شد. گلخانه از جنس شیشه و فلز بود. برای کاهش دما در این گلخانه در بخشی از سقف و دیواره‌های آن (حدود نیم متر از سقف) از فوم حرارتی برودتی با روکش آلومینیومی استفاده شد. با نصب آن دمای گلخانه حدود ۱۰ درجه سلسیوس در فصل بهار کاهش داشت. شیب سقف گلخانه شمالی-جنوبی است. مساحت گلخانه ۱۶ مترمربع با طول و عرض چهار متر و ارتفاع آن از سطح بستر در شمال دو متر و در جنوب ۱/۷ متر می‌باشد (ارتفاع گلخانه‌های معمولی بسیار بیشتر است. علت

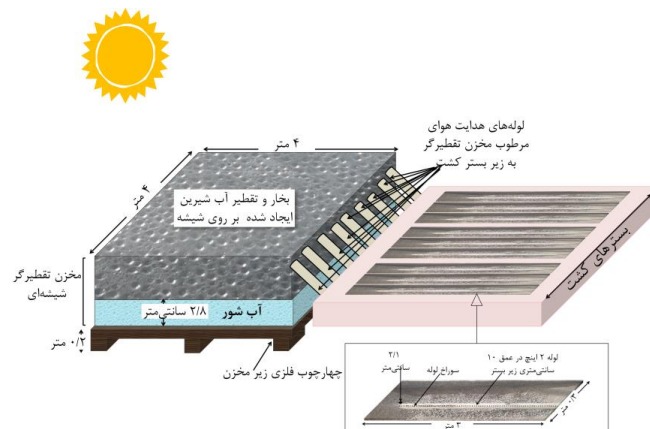
بسترها از دستگاه رطوبت‌سنج Lutron PMS-714 استفاده شد. رطوبت در ۱۰ سانتی‌متری اطراف لوله در ابتدا، وسط و انتهای بسترها اندازه‌گیری شد و از آن‌ها میانگین‌گیری گردید. رطوبت بسترها نیز در طول روز اندازه‌گیری شدند، اما به دلیل کاشت گیاه در زمان اندازه‌گیری و نیاز آبی گیاه که بیشتر از میزان آب تولیدی بود، محاسبات رطوبت در زمان کاشت گیاه تنها به آب تولیدی اختصاص نداشت. (نتایج کاشت گیاه خارج از بحث این مقاله است). شکل شماتیک بستر کشت و لوله‌های جایگذاری شده در آن و مخزن تقطیرگر متصل به آن، در شکل (۳) نشان داده شده است.

برای محاسبه تبخیر تدریجی مرجع به روش فائو پنمن مانیت، دما، رطوبت نسبی، تشعشع خورشید و سرعت باد درون گلخانه چهار بار در روز و در ساعت‌های ۹، ۱۳، ۱۵ و ۱۷ اندازه‌گیری شدند. از دستگاه Thermo-Humidity Meter HTC-1 برای اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی، لوله پیتوت ال شکل ۵۰ سانتی‌متری متصل به مانومتر MP120 شرکت KIMO فرانسه برای اندازه‌گیری سرعت باد و تشعشع‌سنج مدل TES-1333 ساخت شرکت TES تایوان برای اندازه‌گیری تشعشع خورشید استفاده شد.

به طول ۲ متر و ارتفاع ۱ متر نصب گردید. در مخزن آب شور گلخانه چگالشی یک المنت نصب گردید تا در صورت لزوم برای پیش‌گرم کردن آب از انرژی الکتریکی در مخزن استفاده شود. برای ایجاد شرایط مطلوب محیطی برای کاشت گیاه در گلخانه، یک دستگاه کولرگازی نصب گردید. همچنین در گلخانه از یک پنکه مکنده کوچک برای تهویه محیط گلخانه استفاده شد. به دلیل نصب تقطیرگر خورشیدی و اتصالات آن در پشت گلخانه، فضایی حدود ۲۰ مترمربع از زمین اطراف اشغال گردید. برای محاسبه آب چگالش یافته این تقطیرگر، دمای هوا ورودی و خروجی و رطوبت نسبی هوای ورودی و خروجی با دستگاه Pocket Thermometer-Hygrometer و سرعت ورودی و خروجی هوای مرطوب با لوله پیتوت ال شکل ۵۰ سانتی‌متری متصل به مانومتر MP120 شرکت KIMO فرانسه، اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری‌ها چهار بار در روز و در ساعت‌های ۹، ۱۳، ۱۵ و ۱۷ انجام شدند و از آن‌ها میانگین‌گیری گردید. همچنین برای اندازه‌گیری دمای بسترها در ابتدا و انتهای هر بستر، از یک دماسنج شیشه‌ای الکلی با دامنه دمایی ۲۰- تا ۱۱۰+ درجه سلسیوس استفاده شد. برای برآورد دمای بسترها از دمای ابتدا و انتهای بسترها میانگین‌گیری گردید. برای اندازه‌گیری رطوبت



شکل ۲. نمایی از گلخانه و مخزن تقطیرگر متصل به آن



شکل ۳. شکل شماتیک بسترکشت و لوله‌های جایگذاری شده در آن و مخزن تقطیرگر متصل به آن

و فشار جزئی برای هوای خشک،  $P_{da}$  [Pa] باشد، می توان تفاوت بین فشار کل و فشار جزئی بخار را بر اساس رابطه (۳) محاسبه کرد.

$$P_{da} = P_{tot} - p_v = P_{tot} - p_{v,sat} \cdot \phi \quad (\text{رابطه ۳})$$

بخار آب و هوا هر دو در فشار نرمال، مانند گازهای کامل رفتار می کنند و مقدار آب چگالش یافته از قانون گازهای کامل پیروی می کند. با استفاده از ثابت جهانی گاز برای بخار و هوا خواهیم داشت:

$$m_v = \frac{p_v \cdot V}{R_v \cdot T} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$m_{da} = \frac{P_{da} \cdot V}{R_{da} \cdot T} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن،  $m_v$ : جرم بخار در سیستم [kg]،  $R_v$ : ثابت جهانی گاز برای بخار آب  $k, 462 \text{ J/kg}$ ،  $V$ : حجم سیستم  $[m^3]$ ،  $m_{da}$ : جرم هوای خشک در سیستم [kg]،  $R_{da}$ : ثابت جهانی گاز برای هوا  $k, 287 \text{ J/kg}$

نسبت تقسیم جرم بخار آب به جرم هوای خشک، مقیاس مناسبی از مقدار بخار در هوا می دهد (رابطه ۶).

$$\frac{m_v}{m_{da}} = \frac{R_{da}}{R_v} \times \frac{p_{v,sat} \cdot \phi}{P_{tot} - p_{v,sat} \cdot \phi} \quad (\text{رابطه ۶})$$

نسبت  $m_v/m_{da}$  رطوبت مطلق نامیده می شود و علامت آن  $x$  و واحد آن، کیلوگرم هوای خشک به کیلوگرم آب می باشد. در جایی که فشار کل با فشار اتمسفر ( $101325 \text{ Pa}$ ) برابر باشد، رابطه (۶) به صورت رابطه (۷) نوشته می شود:

$$x = \frac{0.622 \cdot p_{v,sat} \cdot \phi}{101325 - p_{v,sat} \cdot \phi} \quad (\text{رابطه ۷})$$

برای درک بهتر فرایند، مثالی آورده شده است. فرض کنید که هوا در  $70\%$  رطوبت نسبی با رطوبت نسبی  $\phi = 50\% \text{ RH}$  با بخار آب در دستگاه تقطیر اشباع شده است. چگالی هوای مرطوب  $\rho_a = 0.909 \text{ kg/m}^3$  می باشد (رابطه ۹). اگر در دستگاه تقطیر جریان هوای مرطوب در شبکه ای متشکل از  $N=20$  لوله با قطر  $D=0.20 \text{ m}$  و سرعت ورودی  $c_1=5 \text{ m/s}$  در جریان باشد، جریان جرمی هوای مرطوب که از دستگاه تقطیر خورشیدی خارج و وارد لوله ها می شود، می بایست مطابق رابطه (۸) شود:

$$\dot{m}_{a,tot} = \frac{N \cdot c_1 \cdot D^2 \cdot \pi \cdot \rho_a}{4} = 0.909\pi \text{ kg/s} \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$\rho_a = \frac{P_{tot}}{R_{da}(T_a + 273.15)} - \left( \frac{1}{R_{da}} - \frac{1}{R_v} \right) \frac{p_{v,sat} \phi}{(T_a + 273.15)} \quad (\text{رابطه ۹})$$

که  $T_a$  دمای هوای مرطوب است. جریان جرم هوای مرطوب در یکی از ۲۰ لوله مطابق رابطه (۱۰) است:

### مقدار آب چگالش یافته در سیستم آبیاری چگالشی

در این بخش محاسبات مربوط به تولید بخار آب در تقطیرگر خورشیدی و لوله های متصل به آن و چگالش بخار در لوله و بستر کشت با اندازه گیری برخی پارامترها در مخزن تقطیرگر و بسترها انجام شده است. برای اطلاع در مورد روابط مربوط به انتقال حرارت در سیستم های آبیاری چگالشی به تحقیقات Gustafson and Lindblom (2001)؛ Lindblom (2012)؛ Okati et al. (2016)؛ Boroomandnasab and Yousefi (2018) مراجعه شود.

در یک سیستم نیمه محصور از آب و هوا، هنگامی که هوا وارد دستگاه تقطیرگر خورشیدی می شود، بر سطح آب حرکت داده می شود و از خروجی سیستم در جهت مخالف خارج می شود. هنگامی که هوا روی آب جریان دارد، به علت انتقال جرم همرفتی رطوبت نسبی آن افزایش می یابد. هر قدر بخار آبی که هوا می گیرد بیشتر باشد، فشار جزئی بخار در ترکیب هوا-بخار بیشتر خواهد بود. همچنین فشار کل مخلوط گاز، جمع فشارهای جزئی هوا و آب می باشد. اگر بخار مداوماً به هوای محصور شده بپیوندد، فشار جزئی آن سریعاً تا سطح ماکزیمم برای دمای غالب در سیستم، افزایش خواهد یافت و به فشار اشباع آن دست می یابد. در این شرایط، هوا ناتوان از گرفتن مقدار بیشتر رطوبت می باشد و گفته می شود با بخار آب اشباع شده است. اگر هوای اشباع در جای دیگری سرد شود، مقدار زیادی بخار در نقطه اشباع به صورت قطرات آب در هوا تشکیل می شود، بنابراین فشار جزئی آن در سرتاسر مدت سرد شدن با فشار اشباع برابر می باشد. فشار اشباع برای بخار آب،  $P_{v,sat}$  [Pa] می تواند با رابطه (۱) محاسبه شود، که در آن  $T$  [°C] دمای هوای مرطوب می باشد:

$$P_{v,sat} = \frac{e^{(77.345 + 0.0057 \cdot (T + 273.15)) - \frac{7235}{T + 273.15}}}{(T + 273.15)^{8.2}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

رطوبت نسبی می تواند به این صورت تعریف شود:

$$\text{رطوبت نسبی} = \frac{\text{مقدار بخار آب در هوا}}{\text{حداکثر مقدار بخار آب هوا که در دمای یکسان می تواند نگهداشته شود}}$$

که رطوبت نسبی مطابق رابطه (۲) می شود،  $\phi$  [%RH]:

$$\phi = \frac{p_v}{p_{v,sat}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

اگر رطوبت نسبی  $100\%$  باشد، بدین معنی است که هوا با بخار، اشباع شده است و اگر صفر باشد ( $\phi=0\% \text{ RH}$ )، بدین معنی است که هیچ گونه بخار آبی در هوا نیست و گفته می شود که هوا خشک است. با فرض این که سیستم شامل فشار کل،  $P_{tot}$  [Pa]

مقدار آبی که در یکی از لوله‌ها در هر ثانیه چگالش می‌یابد از رابطه (۱۴) به‌دست می‌آید:

(رابطه ۱۴)

$$\dot{m}_W = \dot{m}_{da}(x_{70^\circ C} - x_{40^\circ C}) = 0.025 \text{ kg/s}$$

که در آن:  $x_{70^\circ C}$  = رطوبت مطلق در دمای ۷۰ درجه سلسیوس تقطیرگر و با رطوبت نسبی ۱۰۰٪ و  $x_{40^\circ C}$  = رطوبت مطلق در دمای ۴۰ درجه سلسیوس لوله و با رطوبت نسبی ۱۰۰٪ محاسبه شده است. اگر سیستم ۱۰ ساعت کار کند، مقدار آب شیرین تولیدی از سیستم معادل ۹۱۳ کیلوگرم در آن روز به‌دست می‌آید. اگر سیستم با هدف آبیاری به کار رود، یک لوله در یک مزرعه با لوله‌های موازی با طول  $L=100\text{m}$  و فاصله بین لوله‌ها  $s=2\text{m}$ ، تامین آب آبیاری در هر روز در واحد سطح ( $\text{mm/day.m}^2$ ) از رابطه (۱۵) به‌دست می‌آید (Alnaser and Barakat, 2000; Gustafsson and Lindblom, 2001; Lindblom and Nordell, 2012; Yousefi, 2012; Waller and Yitayew, 2014 Yousefi and boroomandnasab, 2015;)

(رابطه ۱۵)

$$H = \frac{\dot{m}_W \cdot 3600 \cdot 10}{\rho_W \cdot L \cdot S} \cdot 1000 = 4.6 \text{ mm/m}^2 \cdot \text{day}$$

برخی خصوصیات مواد تشکیل‌دهنده بسترها یکی از بسترهای مورد استفاده در این تحقیق خاک شنی است که کلاس بافت آن به روش هیدرومتری در آزمایشگاه تعیین شد. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول (۱) آمده است. باگاس ماده‌ای فیبری (تفاله) است که پس از استخراج شکر از نیشکر به‌صورت قطعات ریز تراشه چوب و به رنگ زرد کاهی به‌دست می‌آید. حدوداً ۳۰ تا ۳۲ درصد وزن آن را مواد فیبری تشکیل می‌دهد و رطوبت آن نیز حدود ۵۵-۵۰ درصد می‌باشد. ساختار باگاس متشکل از سلولز (۳۵٪)، همی‌سلولز (۲۴٪)، لیگنین (۲۲٪) و حدود ۲۰ درصد خاکستر حاوی سایر مواد معدنی هستند (Sarkamarian et al., 2015).

پرلیت همان آلومینوسیلیکات با منشأ آتشفشانی بوده و دارای ظرفیت تبادل کاتیونی زیادی نمی‌باشد. پرلیت باعث افزایش ظرفیت زهکشی بستر کشت و در نتیجه بهبود تهویه آن می‌شود. پرلیت از تخلخل خوب، تبادل هوا و گاز خوب برای فعالیت ریشه‌های گیاهان و همچنین ظرفیت مناسب نگهداری آب و مواد مغذی برخوردار است. پرلیت همچنین دارای مواد معدنی نظیر آهن، سدیم، کلسیم و عناصر دیگر به مقدار کم است (Dilmaghani and Hemmaty, 2011).

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_{a,\text{total}}}{N} = 0.143 \text{ kg/s} \quad (\text{رابطه } 10)$$

مقدار آبی که دمای هوا از یک دمای بالاتر به دمای پایین‌تر سرد می‌شود (مثلاً دما از ۷۰ درجه سلسیوس در دستگاه تقطیر به ۴۰ درجه سلسیوس در لوله آب برسد)، با تفاوت بین رطوبت مطلق در دماهای مختلف به‌دست می‌آید. مثلاً در رطوبت نسبی ۱۰۰٪، رطوبت مطلق در دمای ۴۰ درجه سلسیوس برابر  $x(40^\circ) = 0.04869 \text{ kg water/kg dry air}$  و رطوبت مطلق در دمای ۷۰ درجه سلسیوس برابر  $x(70^\circ) = 0.27504 \text{ kg water/kg dry air}$  هستند. جریان جرم هوای خشک می‌بایست از ابتدای منبع تقطیرگر خورشیدی تا انتهای آن ثابت باشد (در طول لوله)، قبل از این که به مکان دیگری برود. این می‌تواند به‌وسیله تابع رطوبت مطلق و جریان جرم کل در ورودی لوله بیان شود (رابطه ۱۱).

(رابطه ۱۱)

$$\dot{m}_{da,\text{tot}} = \dot{m}_{a,\text{tot}} - \dot{m}_{v,\text{tot}} = \dot{m}_{a,\text{tot}} - \dot{m}_{da,\text{tot}} \cdot x_{100\%}$$

$$= \dot{m}_{a,\text{tot}} / (1 + x_{100\%}) = 2.24 \text{ kg/s}$$

که در آن:  $x_{100\%}$  = رطوبت مطلق در دمای ۷۰ درجه سلسیوس تقطیرگر و با رطوبت نسبی ۱۰۰٪ محاسبه شده است. رابطه (۱۰)، اینگونه به‌دست آمده است که جرم هوای کل ( $\dot{m}_{a,\text{tot}}$ ) ترکیبی از جرم بخار ( $\dot{m}_{v,\text{tot}}$ ) و جرم هوای خشک ( $\dot{m}_{da,\text{tot}}$ ) است. همانطور که قبلاً گفته شد نسبت جرم بخار به جرم هوای خشک، رطوبت مطلق ( $x$ ) نامیده می‌شود که به جای جرم بخار معادل آن ( $\dot{m}_{da,\text{tot}} \cdot x_{100\%}$ ) جایگزین می‌گردد. از آنجایی که  $\dot{m}_{da,\text{tot}}$  در دو طرف تساوی تکرار می‌شود پس به سمت چپ تساوی برده شده و از آن فاکتور گرفته می‌شود و در نهایت  $\dot{m}_{da,\text{tot}} = \dot{m}_{a,\text{tot}} / (1 + x_{100\%})$  به‌دست می‌آید.

جریان جرم هوای خشک در یکی از لوله‌ها بر اساس رابطه (۱۲) به‌دست می‌آید.

$$\dot{m}_{da} = \frac{\dot{m}_a}{1 + x_{100\%}} = 0.112 \text{ kg/s} \quad (\text{رابطه } 12)$$

مقدار بخاری که نیاز هست به هوا در هر ثانیه داده شود (سرعت بخار)، تابعی از تفاوت بین مقدار آب موجود در هوای اشباع و مقدار آب اولیه در هوای خشک می‌باشد و مطابق رابطه ۱۳ تعیین می‌شود:

(رابطه ۱۳)

$$\dot{m}_e = \dot{m}_{da,\text{tot}} \cdot (x_{100\%} - x_{50\%}) = 0.364 \text{ kg/s}$$

که در آن:  $x_{50\%}$  = رطوبت مطلق در دمای ۷۰ درجه سلسیوس تقطیرگر و با رطوبت نسبی ۵۰٪ محاسبه شده است.



جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک شنی

رطوبت	pH	EC (μs/cm)	تخلخل (درصد)	جرم ویژه ظاهری (g/cm <sup>3</sup> )	بافت خاک	درصد شن	درصد رس	درصد سیلت
۰/۶	۷/۴	۶/۳	۳۳/۷	۱/۸۵	شنی	۹۳	۲	۵

### تبخیر-تعرق مدل فائو پنمن - مانیتث

رابطه پنمن - مانیتث اصلی به دو قسمت ترم تابش (چپ) و ترم آئرودینامیکی (راست)، تقسیم می‌شود (رابطه ۱۶).  
(رابطه ۱۶)

$$\lambda ET_0 = \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} (R_n - G) + \left( \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) f(u) (e_{sa} - e_a)$$

رابطه (۱۶) شکل کلی رابطه پنمن مانیتث است. در طول سال‌ها، محققان در مناطق مختلف تغییرات خود بر معادله پنمن مانیتث را به منظور وفق دادن با شرایط ویژه آب و هوایی مناطق خویش گسترش داده‌اند. این کار منجر به تفاوت در برآورد تبخیر-تعرق مرجع حتی با اطلاعات آب و هوایی یکسان گردید. برای حل این مشکل سازمان خوار و بار جهانی<sup>۱</sup> (FAO) و کمیته کار انجمن مهندسی عمران آمریکا<sup>۲</sup> (ASCETC) یک روش محاسبه تبخیر-تعرق مرجع استاندارد شده را انتخاب نمودند که توسط Allen et al. (1998) توسعه داده شده بود. محاسبه تبخیر-تعرق مرجع فائو ۵۶ برای تبخیر-تعرق گیاه به صورت رابطه (۱۷) است:  
(رابطه ۱۷)

$$ET_{sz} = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left( \frac{C_n}{T + 273} \right) U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + C_d U_2)}$$

که در آن:  $ET_{sz}$ : تبخیر-تعرق گیاه مرجع استاندارد شده ( $\text{mm d}^{-1}$  و یا  $\text{mm h}^{-1}$ ),  $\Delta$ : شیب منحنی دما - فشار بخار اشباع ( $\text{KPa}^0 \text{C}^{-1}$ ),  $R_n$ : تابش خالص محاسبه شده در سطح گیاه ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$  و یا  $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ),  $G$ : دانسیته شار گرمای خاک در سطح خاک ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$  و یا  $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ),  $\gamma$ : ثابت سایکرومتری ( $\text{KPa}^0 \text{C}^{-1}$ ),  $C_n$ : ثابت صورت کسر که با گام زمانی و نوع مرجع تغییر می‌کند,  $T$ : متوسط دمای روزانه هوا اندازه‌گیری شده در  $۲/۵ - ۱/۵$  متری بالای زمین ( $^0 \text{C}$ ),  $U_2$ : متوسط سرعت روزانه باد اندازه‌گیری شده در دو متری بالای زمین ( $\text{m/s}$ ),  $e_s$ : فشار بخار اشباع اندازه‌گیری شده در  $۲/۵ - ۱/۵$  بالای زمین ( $\text{KPa}$ ),  $e_a$ : متوسط فشار بخار اندازه‌گیری شده در  $۲/۵ - ۱/۵$  بالای زمین ( $\text{KPa}$ ),  $C_d$ : ثابت مخرج کسر که با گام زمانی و نوع مرجع تغییر می‌کند، هستند (Waller and Yitayew, 2014).

بر آورد نسبت تأمین تبخیر-تعرق توسط آب شیرین تولیدی با تقسیم مقدار آب شیرین تولیدی توسط تقطیرگر خورشیدی گلخانه بر مقدار تبخیر-تعرق مرجع محاسبه شده درون گلخانه، مقدار تأمین تبخیر-تعرق گلخانه توسط این تقطیرگر به صورت روزانه و در کل دوره، محاسبه شد. همچنین با تقسیم آب شیرین تولیدی توسط هر بستر بر تبخیر-تعرق برای مساحت هر بستر که  $۰/۹$  مترمربع است، نسبت تأمین آب مورد نیاز هر بستر برآورد گردید. رابطه (۱۸) بیانگر نسبت تأمین تبخیر-تعرق مرجع گلخانه و هر یک از بسترهای کشت توسط آب شیرین تولیدی در تقطیرگر خورشیدی است.

$$P_{(FW/ET)} = \frac{P_{FW}}{ET_0} \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

که در آن؛  $P_{(FW/ET)}$ : نسبت تأمین تبخیر-تعرق مرجع توسط آب شیرین تولیدی تقطیرگر خورشیدی (برای کل تقطیرگر و یا هر بستر به صورت مجزا)،  $P_{FW}$ : تولید آب شیرین توسط تقطیرگر خورشیدی (مجموع تولید تقطیرگر و یا به صورت مجزا در هر بستر) (میلی‌متر در روز)،  $ET_0$ : تبخیر-تعرق مرجع به روش فائو پنمن مانیتث (برای کل گلخانه و یا برای مساحت  $۰/۹$  مترمربع هر بستر بر حسب میلی‌متر در روز) هستند.

### نتایج و بحث

#### دمای بسترها

در گلخانه چگالشی هوای گرم و مرطوب تقطیرگر خورشیدی به لوله‌های مدفون در زیر بسترها هدایت می‌شود و باعث افزایش دما در این بسترها می‌گردد. از آنجایی که بسترها در گلخانه چگالشی به عنوان کاهنده دمای لوله‌ها و چگالنده هوای گرم و مرطوب درون آن‌ها به کار رفته‌اند، بنابراین هر بستری که دمای پایین‌تری داشته باشد (مقدار گرمایی که وارد ۹ لوله مدفون در زیر بسترهای کشت می‌شود یکسان بوده و بر اساس تعریف ظرفیت گرمایی، اگر تغییرات دمایی ناشی از این مقدار مساوی گرمای، در بستری کمتر باشد پس آن بستر ظرفیت گرمایی بالاتری دارد)، بستر مناسب‌تری برای گلخانه چگالشی محسوب می‌شود. به همین منظور میانگین دمای بسترها در گلخانه چگالشی در مدت

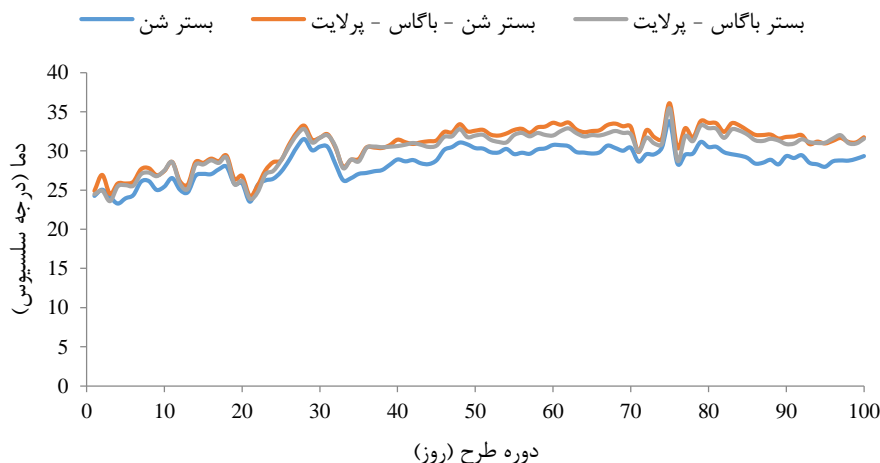
انتقال گرمای اصلی در پروفیل شنی، همرفت گاز است که باعث کاهش بسیار زیاد دمای شن در اطراف لوله می‌گردد (Lindblom and Nordell, 2012)، در نتیجه انتقال گرما در عمق‌های نزدیک به سطح سریع‌تر اتفاق می‌افتد و خاک زودتر سرد می‌شود، بنابراین دمای خاک شنی در تحقیق حاضر کمتر از دمای شن در تحقیقات مذکور است.

در تحقیقی که توسط Yousefi (2012) روی تاثیر دمای سیستم آبیاری چگالشی با دمای آب ثابت با مقدار ۷۰ درجه سلسیوس بر خاک اطراف یک لوله ۲۵ متری در عمق ۴۰ سانتی‌متری یک خاک با بافت لومی انجام شد، میانگین دمای خاک لوم اطراف لوله در ابتدا و در فاصله پنج متری از ابتدای لوله، به ترتیب حدود ۴۲ و ۳۰ درجه سلسیوس به دست آمد. ایشان گزارش نمودند که هر چه از ابتدای لوله به انتهای آن می‌رویم، از مقدار دما کاسته می‌گردد و در نتیجه مقدار آب چگالش‌یافته نیز کاهش می‌یابد. نوع بستر، پیکربندی لوله، آب و هوا و خصوصیات جریان هوای مرطوب ورودی از پارامترهای مهم تاثیرگذار بر دمای بسترها و تولید آب در سیستم آبیاری چگالشی هستند (Lindblom and Nordell, 2012). این پارامترها در تحقیق Yousefi (2012) با پژوهش حاضر تفاوت دارند و در نتیجه میانگین دمای بسترها در دو تحقیق متفاوت است. در این تحقیق، دما در ابتدا و انتهای بسترها به دلیل کم بودن طول آن‌ها (سه متر) و سرعت بیشتر جریان هوای ورودی تفاوت چندانی نداشتند و بنابراین چگالش تقریباً یکسان به دست آمد. با توجه به اینکه پژوهش‌های کمی در زمینه آبیاری چگالشی و به‌ویژه اندازه‌گیری دمای بسترها انجام شده است، تحقیقات جدیدتری در این زمینه برای مقایسه یافت نگردید.

آزمایش بررسی شدند (شکل ۴). با توجه به شکل (۴) در گلخانه چگالشی، دمای میانگین بستر شن، پایین‌ترین دما را دارد. سپس بسترهای باگاس-پرلایت و شن-باگاس-پرلایت از لحاظ پایین‌تر بودن دما در اولویت‌های بعدی قرار دارند. دمای میانگین بسترهای شن، شن-باگاس-پرلایت و باگاس-پرلایت در مدت آزمایش در گلخانه چگالشی به ترتیب برابر ۲۸/۵، ۳۰/۷ و ۳۰/۲ درجه سلسیوس بود. بنابراین به دلیل پایین‌تر بودن دمای بستر شن نسبت به دو بستر دیگر که کم‌تر تحت تاثیر هوای گرم و مرطوب لوله قرار گرفته است، بستر شن چگالنده بهتری نسبت به دو بستر باگاس-پرلایت و شن-باگاس-پرلایت است.

دمای شبیه‌سازی شده بستر شن در تحقیقات Lindblom and Nordell (2006; 2007) برای عمق ۰/۵ متری کارگذاری لوله‌ای با طول ۵۰ متری و دمای هوای ثابت ۶۰ درجه سلسیوس، معادل ۳۵ تا ۴۰ درجه سلسیوس گزارش شد. در تحقیقات دیگری که توسط Lindblom and Nordell (2012) و Lindblom and Nordell (2012) روی بستر شن انجام شد، دمای بستر شن در بالای لوله واقع در عمق ۰/۲ متری از سطح، ۳۴ درجه سلسیوس گزارش شد.

دمای میانگین بستر شن در دوره طرح در تحقیق حاضر کمتر از دمای بستر شن گزارش شده توسط Lindblom and Nordell (2006; 2007) و Lindblom and Nordell (2012) است. یکی از علل این امر این است که دمای هوا در تحقیق حاضر ثابت نیست و تحت تاثیر افزایش و کاهش انرژی دریافتی از خورشید در طول روز و در کل دوره طرح است. علت دیگر این است که عمق کارگذاری لوله در تحقیقات Lindblom and Nordell (2006; 2007) و Lindblom and Nordell (2012) بیشتر از عمق کارگذاری لوله در تحقیق حاضر است (۱۰ سانتی‌متر). از آنجایی که مکانیسم

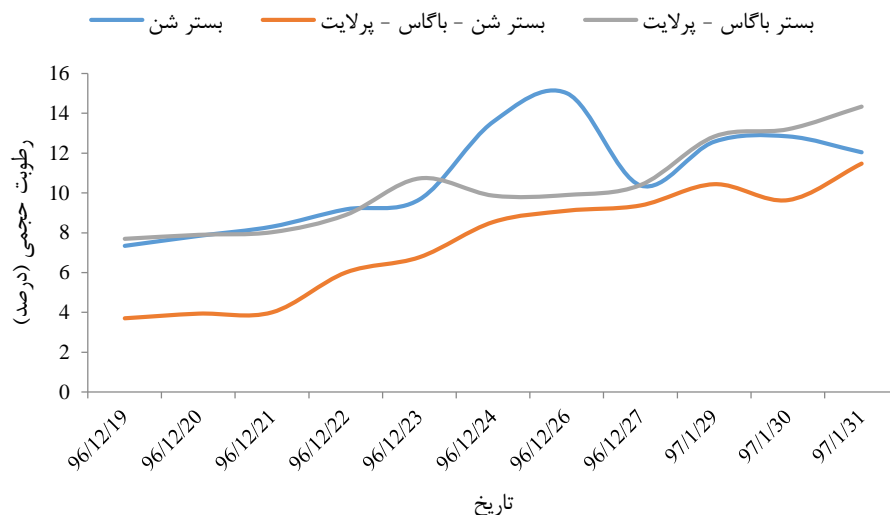


شکل (۴). تغییرات دمای میانگین بسترها در گلخانه دارای آبیاری چگالشی در مدت آزمایش

### رطوبت بسترها

آزمایش‌های تولید آب شیرین و نیاز آبی، در حضور گیاه ریحان انجام گردید، اما به دلیل گسترده بودن، بحث آن خارج از این مقاله است. لیکن برای مشخص شدن مقدار پایداری بسترهای به کار رفته از لحاظ مقدار رطوبت، رطوبت اندازه‌گیری شده در ۱۰ سانتی‌متری اطراف لوله چند روز پیش از کاشت گیاه (آبیاری فقط با آب تولیدی) و در زمان کاشت گیاه (آبیاری توسط آب تولیدی و آب مازاد برای تامین نیاز آبی گیاه) نیز در این تحقیق گنجانده شده است. شکل (۵) میانگین رطوبت بسترهای گلخانه از آب شیرین تولیدی (پیش از کاشت گیاه) در اطراف لوله ایجاد

شده است، نشان می‌دهد. بسترهای شن و باگاس-پرلایت در بیشتر بودن درصد رطوبت حجمی در روزهای مختلف آزمایش با هم رقابت می‌کنند. در برخی از روزها درصد رطوبت حجمی در بستر شن نسبت به دو بستر دیگر بیشتر است و در روزهای دیگر درصد رطوبت حجمی در بستر باگاس-پرلایت نسبت به دو بستر دیگر بیشتر است. میانگین رطوبت حجمی روزهای اندازه‌گیری شده در بسترهای شن، شن-باگاس-پرلایت و باگاس-پرلایت به ترتیب برابر ۱۰/۷۹، ۷/۵۴ و ۱۰/۳۵ درصد است. بیشترین و کمترین مقدار رطوبت حجمی، مربوط به بسترهای شن و شن-باگاس-پرلایت با مقدارهای ۱۰/۷۹ و ۷/۵۴ درصد است.



شکل (۵). میانگین رطوبت بسترهای گلخانه آبیاری چگالشی توسط آب شیرین تولیدی

باشند.

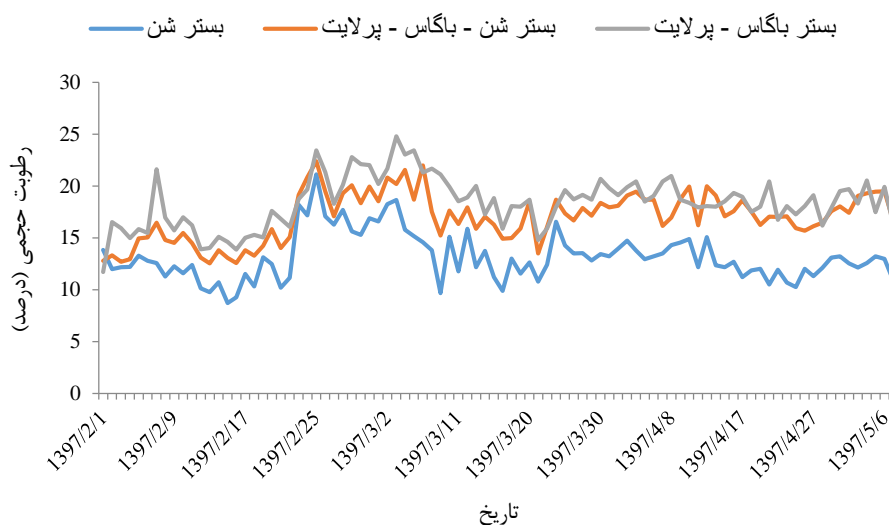
در شرایط آبیاری کامل وضعیت رطوبت بسترها تغییر می‌کند. در شکل (۶) میانگین رطوبت حجمی بسترها در طول دوره رشد گیاه که آبیاری کامل صورت گرفته است، در گلخانه نشان داده شده است. میانگین درصد رطوبت حجمی بستر باگاس-پرلایت در طول دوره رشد گیاه در گلخانه، نسبت به میانگین درصد رطوبت حجمی دو بستر دیگر بیشتر است. میانگین مقدار رطوبت حجمی بسترهای شن، شن-باگاس-پرلایت و باگاس-پرلایت در طول دوره رشد گیاه به ترتیب برابر ۱۳/۱۰، ۱۶/۹۵ و ۱۸/۳۶ درصد است. بیشترین و کمترین مقدار رطوبت حجمی مربوط به بسترهای باگاس-پرلایت و شن به ترتیب برابر ۱۸/۳۶ و ۱۳/۱۰ درصد است. رطوبت در پیش از کاشت (فقط از آب تولیدی برای آبیاری

با بررسی دمایی که در شکل (۴) بین بسترهای گلخانه چگالشی صورت گرفت نتیجه گرفتیم که بستر شن پایدارترین بستر در برابر تغییرات دمایی نسبت به دو بستر دیگر است. علت اینکه بستر شن مقدار رطوبت بالاتری نسبت به دو بستر دیگر دارد پایدار بودن در برابر تغییرات دمایی بستر شن نسبت به دو بستر دیگر است. به عبارت دیگر به خاطر دمای کمتر آن، آب بیشتری در بستر شنی تولید می‌شود و رطوبت ایجاد شده از آب تولیدی در آن بیشتر است. به نظر می‌آید علت اینکه بستر شن-باگاس-پرلایت نسبت به بستر باگاس-پرلایت درصد رطوبت حجمی کمتری دارد، به موقعیت قرارگیری ردیف‌های این بستر در گلخانه باشد. بستر شن-باگاس-پرلایت در ردیف‌های اول، سوم و نهم (آخر) در گلخانه قرار دارند و شاید عوامل محیطی بیرون نظیر تشعشع خورشید و دما تاثیر بیشتری روی آن‌ها داشته

اطراف لوله بود و در کل بستر بسیار کمتر از این محاسبه شد. علت بیشتر بودن رطوبت در این طرح، کمتر بودن دمای بستر شن نسبت به تحقیقات Lindblom and Nordell (2012) و Lindblom (2012) است. با مقایسه دو آزمایش در یک بستر شنی Lindblom and Nordell (2012) دریافتند که هر چه دمای اطراف لوله در بستر افزایش یابد میزان چگالش آب کمتر می‌شود. در تحقیق Yousefi et al., (2017) مقدار رطوبت در یک خاک لومی در ۱۰ سانتی‌متری اول لوله در مدت ۱۵ روز برای ابتدا و انتهای یک لوله ۲۵ متری به ترتیب ۳۲ و ۶ درصد به دست آمد. هر چه بافت خاک سنگین‌تر باشد تجمع رطوبت در آن بیشتر است (Salter and Williams, 1965) و بنابراین مقدار آب در بستر لومی در تحقیق Yousefi et al., (2017) بیشتر از مقدار آب در بستر شنی تحقیق حاضر است. مقایسه آزمایش‌های رطوبت در خاک و یا بسترهای کشت سیستم‌های آبیاری چگالشی مشکل است. زیرا شرایط آب و هوایی، ابعاد مختلف، نوع بستر و موقعیت رطوبت‌ها در بستر با هم تفاوت دارند.

بستر استفاده شد) و در هنگام کاشت در همه بسترها تفاوت دارد. این اختلاف در بسترهای شن، شن-باگاس-پرلایت و باگاس-پرلایت به ترتیب ۲/۳۱، ۹/۴۱ و ۸/۰۱ درصد است. به عبارت دیگر بسترهای شن، شن-باگاس-پرلایت و باگاس-پرلایت به ترتیب ۰/۸۲، ۰/۴۴ و ۰/۵۶ میانگین رطوبتی مورد نیاز در زمان آبیاری را فراهم می‌آورند. بستر شن از لحاظ توزیع رطوبت در بستر و دریافت رطوبت مورد نیاز بهتر عمل نموده است. علت این امر ممکن است به دلیل وجود نیروی کاپیلاری کم اما کارآمد شن نسبت به دو بستر دیگر باشد. بنابراین اگر چه بستر شنی نسبت به دو بستر دیگر، درصد رطوبت حجمی کمتری دارد، اما رطوبت حجمی آن در محدوده بسیار خوبی از درصد رطوبت حجمی مورد نیاز بستر در زمان آبیاری کامل است.

میانگین رطوبت ناشی از تولید آب در بستر شنی حدود ۲۱/۴ کیلوگرم در مترمکعب (۳/۵۷٪ حجمی برای ضخامت ۴۰ سانتی‌متری بستر) است، اما این پارامتر در نتایج شبیه‌سازی شده Lindblom and Nordell (2012) و Lindblom (2012) برای یک بستر شنی حدود ۲۵ کیلوگرم در مترمکعب در ۱۰ سانتی‌متری



شکل (۶). میانگین رطوبت بسترها در گلخانه چگالشی در طول دوره رشد گیاه

اولویت‌های بعدی قرار دارند.

#### تولید آب شیرین

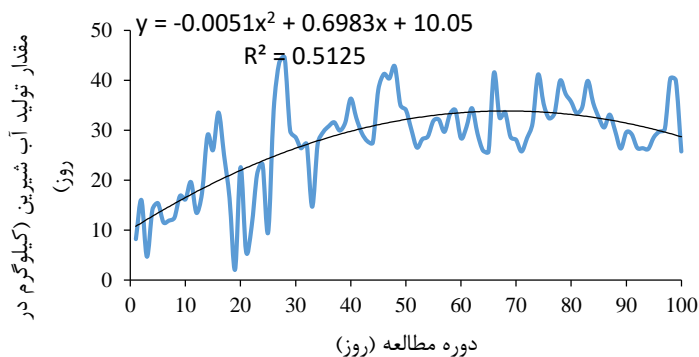
شکل (۷) تغییرات روزانه تولید آب شیرین دستگاه تقطیرگر خورشیدی متصل به گلخانه چگالشی با مساحت ۱۶ مترمربع را در دوره طرح که ۱۰۰ روز است (۱۳۹۷/۰۲/۰۱ تا ۱۳۹۷/۰۵/۰۷) نشان می‌دهد. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار تولید آب شیرین تقطیرگر به ترتیب در روز ۱۲۸م اردیبهشت ماه (۴۴/۵ کیلوگرم) و

بنابراین به طور کلی با بررسی پارامترهای دما و رطوبت در بسترها نتیجه می‌گیریم که پایدارترین بستر از لحاظ تاثیر تغییرات دمایی بر آن بستر شن است. همچنین بهترین بستر از لحاظ توزیع رطوبت و در اختیار قرار دادن آب بستر برای ریشه گیاه نیز بستر شن است. پس به طور کلی مناسب‌ترین بستر از لحاظ پایداری دما و رطوبت مناسب برای ریشه گیاه، بستر شن است. بسترهای شن-باگاس-پرلایت و باگاس-پرلایت از لحاظ پایداری دما و توزیع رطوبت مناسب برای ریشه گیاه، در

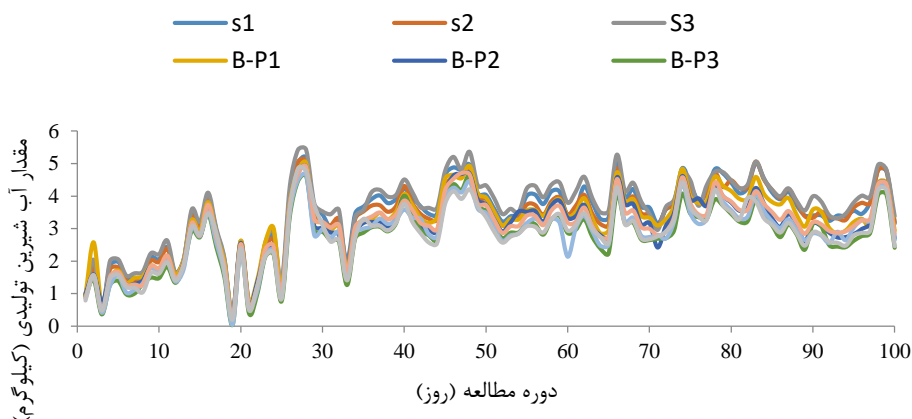
در بسترهای شماره یک تا نه گلخانه چگالشی در دوره طرح به ترتیب ۴/۶۵، ۰/۰۴، ۲/۸۳ کیلوگرم در روز در بستر شماره یک (S-B-P1)، ۵/۱۷، ۰/۳۸، ۳/۴۲ کیلوگرم در روز در بستر شماره دو (S1)، ۴/۹۰، ۰/۲۷، ۳/۰۴ کیلوگرم در روز در بستر شماره سه (S-B-P2)، ۵/۰۸، ۰/۲۷، ۳/۳۴ کیلوگرم در روز در بستر شماره چهار (S2)، ۵/۰۲، ۰/۳۴، ۳/۲۲ کیلوگرم در روز در بستر شماره پنج (P1)، ۵/۴۳، ۰/۱۹، ۳/۵۷ کیلوگرم در روز در بستر شماره شش (S3)، ۴/۹۰، ۰/۳۴، ۳/۰۲ کیلوگرم در روز در بستر شماره هفت (B-P2)، ۴/۶۳، ۰/۴۲، ۲/۷۵ کیلوگرم در روز در بستر شماره هشت (B-P3)، ۴/۸۵، ۰/۲۰، ۲/۸۲ کیلوگرم در روز در بستر شماره نه (S-B-P3) ثبت شد. در بین نه بستر، بیشترین و کمترین مقدار تولید آب شیرین به ترتیب مربوط به بسترهای شماره شش و شماره یک با مقدار ۵/۴۳ و ۰/۰۴ کیلوگرم در روز به دست آمد. بستر شماره شش با مقدار متوسط ۳/۵۷ کیلوگرم در روز در هر مترمربع سطح تقطیرگر، بالاترین مقدار متوسط تولید را در بین نه بستر کشت دارد. بستر شماره هشت با ۲/۷۵ کیلوگرم در روز در بین نه بستر گلخانه چگالشی، کمترین مقدار متوسط تولید را دارد.

در روز ۱۹م اردیبهشت ماه (۲/۱ کیلوگرم) به دست آمده‌اند. میانگین مقدار تولید آب شیرین تقطیرگر ۲۸ کیلوگرم در روز است. با نمودار برازش داده شده می‌توان دریافت که در ابتدا تولید آب شیرین کمتر بوده و با فرا رسیدن روزهای گرم، میزان تولید افزایش یافته است و سپس روند تقریباً ثابتی را طی نموده و در انتهای دوره، مقدار تولید نیز روند نزولی داشته است. مقدار کل تولید آب شیرین تقطیرگر خورشیدی در ۱۰۰ روز اندازه‌گیری شده ۲۷۹۹/۵ کیلوگرم به دست آمد. میانگین آب شیرین تولیدی تقطیرگر خورشیدی با مساحت ۱۶ مترمربع در ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر و مرداد به ترتیب برابر ۱۹/۷، ۳۱/۵، ۳۲/۱ و ۳۱/۵ کیلوگرم در روز به دست آمد. به عبارت دیگر میانگین آب شیرین تولیدی یک مترمربع از تقطیرگر خورشیدی در ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر و مرداد به ترتیب برابر ۱/۲۳، ۱/۹۷، ۲ و ۱/۹۷ کیلوگرم در روز محاسبه شد. میانگین تولید آب شیرین یک مترمربع از تقطیرگر خورشیدی در طول دوره طرح ۱/۷۵ کیلوگرم در روز محاسبه گردید.

با توجه به شکل (۸) که به مقایسه آب تولیدی بسترهای مختلف می‌پردازد، بیشترین، کمترین و متوسط تولید آب شیرین



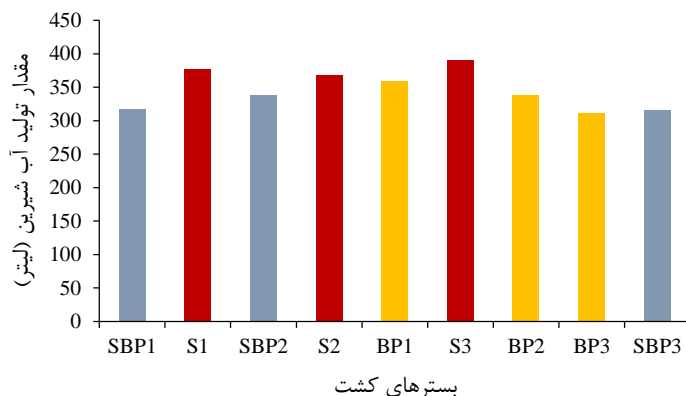
شکل (۷). تغییرات روزانه تولید آب شیرین تقطیرگر خورشیدی متصل به گلخانه



شکل (۸). مقایسه آب شیرین تولیدی در نه بستر کشت گلخانه چگالشی (نشانه‌های اختصاری نمودار: S= بستر شن، S-B-P= بستر شن-باگاس-پرلایت، S-B= بستر باگاس-پرلایت؛ همچنین اعداد ۱، ۲ و ۳ نشان‌دهنده تکرار بستر است)

۲۷۴/۵۸، ۲۸۱/۶۰ کیلوگرم بوده است. بیشترین و کمترین مقدار تولید آب شیرین در دوره طرح به ترتیب مربوط به بستر S3 با مقدار ۳۵۶/۷۸ کیلوگرم و بستر BP3 با مقدار ۲۷۴/۵۸ کیلوگرم بوده است.

در شکل (۹) مقدار آب شیرین تولیدی در نه بستر کشت گلخانه چگالشی در دوره طرح، با هم مقایسه شده است. مقدار آب شیرین تولیدی در بسترهای S1، SBP1، S2، BP1، S3، BP2، BP3، SBP3 در دوره طرح به ترتیب ۲۸۳/۱۵، ۳۰۳/۵۳، ۳۴۲/۳۲، ۳۲۱/۷۳، ۳۳۳/۵۹، ۳۰۲/۲۲، ۳۵۶/۷۸، ۳۲۱/۷۳ کیلوگرم بوده است.



شکل (۹). مقایسه مقدار آب تولیدی در بسترهای مختلف با توجه به اختلاف دمای هوای دستگاه تقطیر و دمای هر بستر در دوره طرح

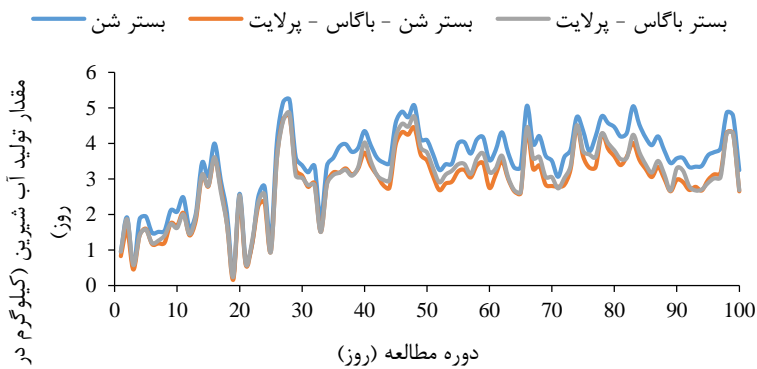
خورشیدی که به بسترهای شن، شن-باگاس-پرلایت و باگاس-پرلایت در دوره طرح در گلخانه چگالشی داده شده‌اند، به ترتیب ۱۰۳۲/۷، ۸۶۸/۳ و ۸۹۸/۵ کیلوگرم به دست آمدند. بیشترین و کمترین مقدار تولید آب شیرین در دوره طرح به ترتیب مربوط به بستر شن با مقدار تولید ۱۰۳۲/۷ کیلوگرم و با نسبت ۰/۳۷ از کل تولید و بستر شن-باگاس-پرلایت با مقدار تولید ۸۶۸/۳ کیلوگرم و با نسبت ۰/۳۱ از کل تولید به دست آمدند. رطوبت بستر کشت تابع خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن است. کاشت گیاه با تغییر این خصوصیات، می‌تواند رطوبت بستر را تحت تاثیر قرار دهد. بنابراین در زمان کاشت گیاه، تولید آب در بستر شن نسبت به دو بستر دیگر بیشتر و درصد رطوبت در آن کمتر است. به نظر می‌آید بستر شن آب تولیدی خود را بیشتر در اختیار گیاه قرار داده و مقدار رطوبت آن کمتر است. اما دو بستر دیگر آب را در نزد خود نگهداشته و کمتر در اختیار ریشه گیاه قرار می‌دهند (کارایی مصرف آب بسترهای شن، شن-باگاس-پرلایت و باگاس-پرلایت برای گیاه ریحان به ترتیب ۱/۶۷۴، ۰/۱۶۴ و ۰/۲۳۱ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد).

به طور کلی هر سه تکرار بستر شن، تولید بالاتری نسبت به شش بستر دیگر شن-باگاس-پرلایت و باگاس-پرلایت داشته و میانگین تولید در بسترهای شن-باگاس-پرلایت و باگاس-پرلایت از روند افزایشی یا کاهش منظمی نسبت به یکدیگر پیروی ننموده و بستر باگاس-پرلایت هم بیشترین و هم کمترین تولید

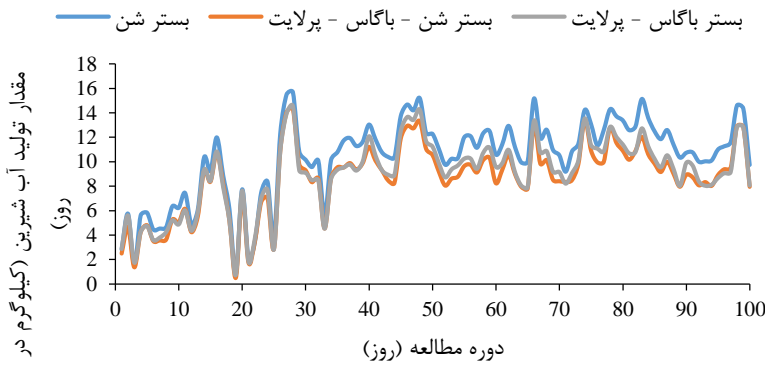
در شکل (۱۰) مقدار میانگین سه تکرار هر بستر تولید آب شیرین در بسترهای شن، شن-باگاس-پرلایت و باگاس-پرلایت (بسترها برای هوای گرم و مرطوب ورودی به لوله‌های مدفون در زیر آن‌ها، چگالنده محسوب می‌شوند) ارائه شده‌اند. با توجه به ظرفیت کاهش دمای هوای گرم و مرطوب توسط بسترها، مقدار تولید آب شیرین در آن‌ها متفاوت خواهد بود. شکل (۱۱) آب شیرین تولیدی در بسترهای شن، شن-باگاس-پرلایت و باگاس-پرلایت (مجموع سه تکرار هر بستر) را نشان می‌دهد و همچنین در شکل (۱۲) تولید آب شیرین در بسترهای شن، شن-باگاس-پرلایت و باگاس-پرلایت نسبت به کل تولید دستگاه تقطیرگر نشان داده شده است. مقدار میانگین تولید آب شیرین در بسترهای شن، شن-باگاس-پرلایت و باگاس-پرلایت در دوره طرح به ترتیب ۳/۴۴، ۲/۸۹ و ۳ کیلوگرم در روز به دست آمد. نسبت آب تولیدی به تبخیر-تعرق درون گلخانه در بسترهای شن، شن-باگاس-پرلایت و باگاس-پرلایت به ترتیب ۰/۹۴، ۰/۷۹ و ۰/۸۲ محاسبه شد. بنابراین شن، چگالنده بهتری نسبت به دو بستر دیگر است. میانگین مقدار تولید آب شیرین در بسترهای شن، شن-باگاس-پرلایت و باگاس-پرلایت در دوره طرح به ترتیب ۱۰/۳۲، ۸/۶۸ و ۸/۹۹ کیلوگرم در روز به دست آمدند. همچنین نسبت تولید هر بستر به کل تولید تقطیرگر برای بسترهای شن، شن-باگاس-پرلایت و باگاس-پرلایت در دوره طرح به ترتیب ۰/۳۷، ۰/۳۱ و ۰/۳۲ برآورد شد. آب شیرین تولیدی توسط تقطیرگر

که دمای پایین‌تری نسبت به دو بستر دیگر دارد، تولید آب شیرین بیشتری دارد و بسترهای باگاس-پرلایت و شن-باگاس-پرلایت در رده‌های بعدی قرار دارند. از سوی دیگر، به دلیل بیشتر بودن مقدار تولید آب در بستر شن نسبت به دو بستر دیگر، تفاوت مقدار رطوبت بستر در زمان پیش از کاشت و پس از آن کمتر است (شکل‌های ۵ و ۶)، همچنین کمتر بودن مقدار رطوبت، در بستر شن نسبت به دو بستر دیگر در زمان کاشت گیاه، نشان‌دهنده دریافت آب بیشتر توسط ریشه گیاه در این بستر است.

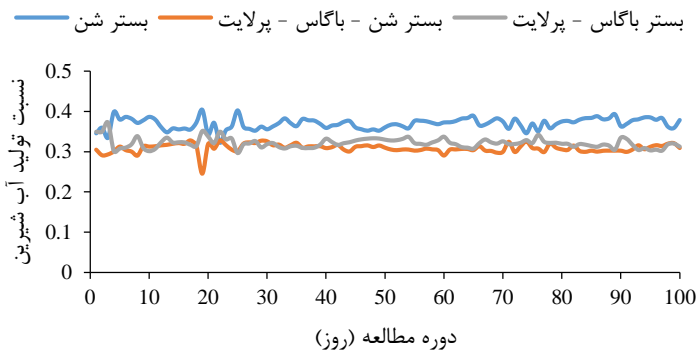
را در بین شش بستر دارد. لیکن با میانگین‌گیری از سه تکرار هر بستر، نتیجه گرفته شد که میانگین تولید آب شیرین به ترتیب نزولی در بسترهای شن، باگاس-پرلایت و شن-باگاس-پرلایت بوده است. هر چه دمای بستر نسبت به دمای هوای مخزن تقطیرگر کمتر باشد، مقدار تولید آب شیرین در آن بستر بیشتر است. بنابراین به دلیل اینکه سیر افزایشی دمای میانگین به ترتیب مربوط به بسترهای شن، باگاس-پرلایت و شن-باگاس-پرلایت بوده است (شکل ۴)، از اینرو میانگین تولید آب شیرین در این بسترها با افزایش دما کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، بستر شن



شکل (۱۰). میانگین آب شیرین تولیدی در بسترهای شن، شن-باگاس-پرلایت و پرلایت-باگاس-پرلایت گلخانه چگالشی



شکل (۱۱). مجموع آب شیرین تولیدی در بسترهای شن، شن-باگاس-پرلایت و پرلایت-باگاس-پرلایت گلخانه چگالشی (مجموع سه تکرار هر بستر)



شکل (۱۲). مقایسه نسبت تولید آب شیرین (مقدار مجموع تولید سه تکرار هر بستر تقسیم بر مجموع تولید تقطیرگر) سه بستر شن، شن-باگاس-پرلایت و باگاس-پرلایت

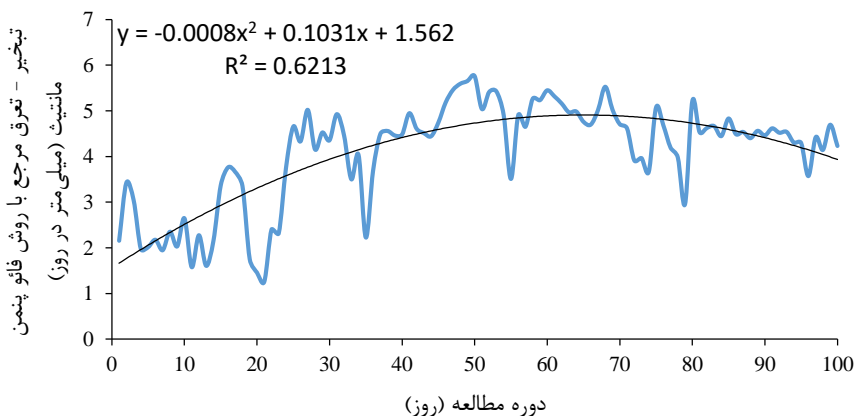
پارامترها در آنها یکسان بررسی شده باشند. اما با بررسی تحقیقات پیشین، میانگین تولید آب شیرین ۲۸ کیلوگرم در روز (معادل ۱/۰۴ کیلوگرم در هر متر طول لوله و یا ۳/۵ کیلوگرم در هر ساعت کار سیستم) سیستم آبیاری چگالشی منطقی به نظر می‌رسد.

#### تبخیر-تعرق مرجع فائو پنمن مانیتیت در گلخانه چگالشی

نتایج تغییرات روزانه تبخیر-تعرق مرجع با روش فائو پنمن مانیتیت در دوره اندازه‌گیری شده در شکل (۱۳) نشان داده شده است. نمودار تبخیر-تعرق یک روند صعودی، ثابت و نزولی را طی می‌کند. علت آن تغییر پدیده‌های محیطی موثر درون گلخانه نظیر رطوبت، دما و تشعشع خورشید است که بر فرایند تبخیر-تعرق تاثیر زیادی دارند. کمترین و بیشترین مقدار تبخیر-تعرق روزانه به ترتیب، ۱/۲۵ میلی‌متر (۱۳۹۷/۰۲/۲۱) و ۵/۷۶ میلی‌متر پس از ۵۰ روز از تاریخ شروع آزمایش (۱۳۹۷/۰۳/۱۹) به‌دست آمد. میانگین رطوبت نسبی، دما و تشعشع خورشید در زمانی که کمترین مقدار تبخیر-تعرق اتفاق افتاده به ترتیب ۶۲/۵ درصد، ۲۴/۱ درجه سلسیوس و ۳۸ وات بر مترمربع است. همچنین میانگین رطوبت نسبی، دما و تشعشع خورشید در زمانی که بیشترین مقدار تبخیر-تعرق اتفاق افتاده به ترتیب ۲۸ درصد، ۳۵/۵ درجه سلسیوس و ۲۶۶ وات بر مترمربع است. بنابراین با افزایش دما و تشعشع خورشید و کاهش رطوبت نسبی درون گلخانه، مقدار تبخیر-تعرق افزایش یافته است. میانگین تبخیر-تعرق در ماه اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب ۴/۷۴، ۴/۷۴، ۴/۷۴ و ۴/۲۴ میلی‌متر در روز بوده است. تبخیر-تعرق در ماه اول کم و در ماه دوم افزایش یافته و در ماه سوم و چهارم از مقدار آن کاسته می‌گردد. میانگین تبخیر-تعرق مرجع به روش فائو پنمن مانیتیت در طول دوره اندازه‌گیری، ۴/۰۸ میلی‌متر در روز برآورد گردید.

در تحقیقی که توسط Yousefi et al. (2012) و Yousefi and Boroomandnasab (2015) انجام شد، سیستم آبیاری چگالشی برای تولید آب آشامیدنی در یک خاک لومی، به کار رفت. در این تحقیق، از برق برای گرم کردن آب درون مخزن در کنار تشعشع خورشید استفاده شد. نتایج نشان داد که در یک لوله ۲۵ متری به قطر ۶۳ میلی‌متر که در عمق ۴۰ سانتی‌متری زمین کار گذاشته شده بود و با دمای ثابت ۷۰ درجه سلسیوس تقطیرگر، ظرفیت متوسط تولید آب آشامیدنی چهار لیتر در هشت ساعت کار سیستم در طول روز بود. در مطالعات Lindblom and Nordell (2006) و Lindblom and Nordell (2007) که به مدت ۹۰ روز روی تولید آب آشامیدنی و آبیاری زیرسطحی در سیستم آبیاری چگالشی انجام شد، طول، فاصله بین لوله‌ها و عمق کارگذاری لوله‌ها در هر دو مدل به ترتیب ۵۰ متر، یک متر و ۰/۵ متر بودند. برای این سیستم مرجع فرضی، مقدار متوسط تولید آب آشامیدنی، ۱/۸ کیلوگرم در هر متر طول لوله در روز بود و در لوله‌های زهکش، مقدار تولید آب تا ۳/۱ کیلوگرم در هر متر در روز (معادل ۲/۳ میلی‌متر در روز آب آبیاری) افزایش یافت. یک سیستم آبیاری چگالشی مقیاس کوچک (۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتیمتر ارتفاع) توسط Lindblom and Nordell (2012) برای بررسی مسیرهای جریان آب، هوا و گرما ساخته شد. میزان متوسط آبیاری در جعبه شنی ۱/۰۳ میلی‌متر در روز محاسبه شد. با افزایش دوره آزمایش، میزان تولید آبیاری روزانه کاهش یافت که این به دلیل افزایش دمای خاک اطراف لوله بود. پارامترهای زیادی بر مقدار تولید آب در سیستم آبیاری چگالشی موثرند که از جمله می‌توان به تفاوت در سرعت جریان هوا، دمای آب، دمای هوا، شرایط آب و هوایی، نوع بستر، عمق آب شور درون تقطیرگر، طول لوله‌های مدفون در زیر بستر و فاصله بین لوله‌ها اشاره نمود (Okati et al., 2018).

بنابراین مشکل است که بتوان دو تحقیق را یافت که همه



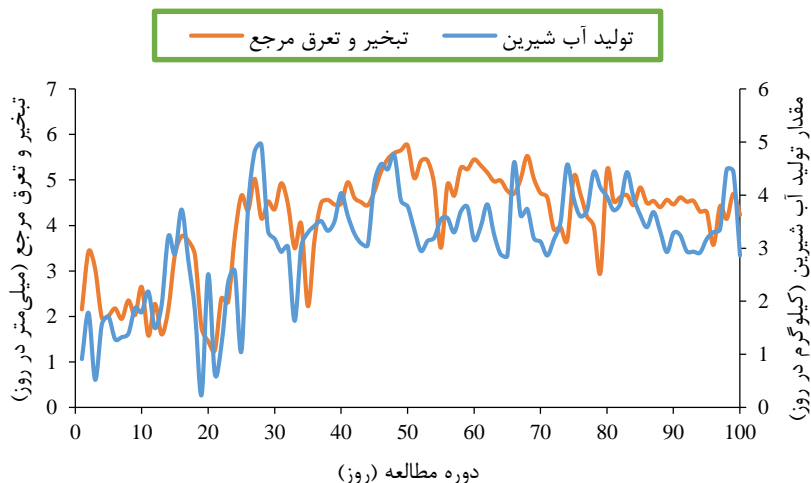
شکل (۱۳). تغییرات روزانه تبخیر-تعرق مرجع درون گلخانه با روش فائو پنمن مانیتیت



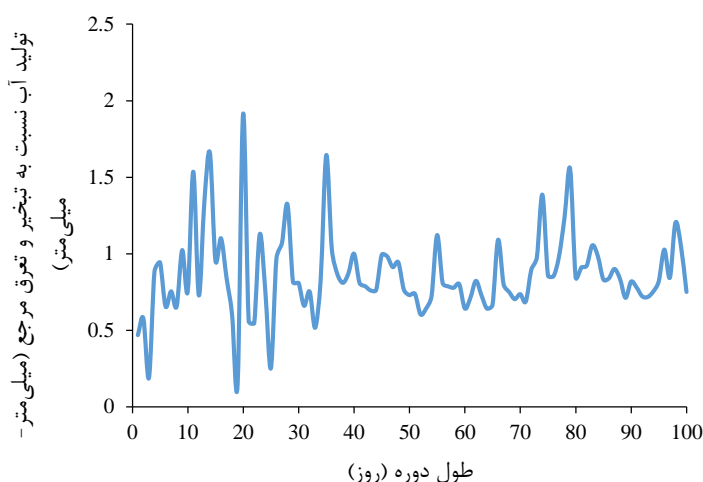
روند تغییرات روزانه تبخیر-تعرق مرجع به روش فائو پنمن مانیتیت در طول دوره آزمایش در مقابل تغییرات روزانه تولید آب شیرین برای یک مترمربع از گلخانه بدون در نظر گرفتن نوع بستر کشت در شکل (۱۴) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در برخی روزهای آزمایش، مقدار تولید آب شیرین از تبخیر-تعرق درون گلخانه بیشتر است و در روزهای دیگر با افزوده شدن میزان تبخیر-تعرق، مقدار آب تولیدی از تبخیر-تعرق کمتر است. میانگین تبخیر-تعرق مرجع در ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر و مرداد به ترتیب برابر ۲/۹۱، ۴/۷۴، ۴/۵۵ و ۴/۲۴ میلی‌متر در روز بوده است. همچنین میانگین تولید آب شیرین تقطیرگر خورشیدی متصل به گلخانه، در این چهار ماه به ترتیب برابر ۱۹/۷، ۳۱/۵، ۳۲/۱ و ۳۱/۵ میلی‌متر در روز به دست آمدند. بر اساس تبخیر-تعرق در ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر و مرداد، مقدار آب شیرین تولیدی تقطیرگر خورشیدی قادر به تامین نیاز آبی گلخانه به ترتیب با مساحت ۶/۷۴، ۶/۶۳، ۷/۰۴ و ۷/۴۴ مترمربع است. از آنجایی که نه بستر کشت هر یک به مساحت ۰/۹ مترمربع، در این گلخانه کار گذاشته شده‌اند آب تولیدی در ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر و مرداد ۰/۸۳، ۰/۸۲، ۰/۸۷ و ۰/۹۲ آب مورد نیاز بسترهای این گلخانه را با مساحت ۸/۱ مترمربع، تامین می‌نماید. شکل (۱۵) نسبت تغییرات تولید آب شیرین تقطیرگر خورشیدی را به تبخیر-تعرق مرجع در طول دوره رشد برای مساحت یک مترمربع گلخانه بدون در نظر گرفتن نوع بستر نشان می‌دهد. بیشترین و کمترین نسبت تولید آب شیرین به تبخیر-تعرق مرجع به ترتیب در روز ۱۹ام و ۲۰ام طرح در روزهای ۹۷/۰۲/۱۹ و ۹۷/۰۲/۲۰ با مقدارهای ۱/۹۱ و ۰/۱۵ اتفاق افتاده است.

در تحقیقی که توسط Rafeei *et al.* (2016) در یک گلخانه پلاستیکی به مساحت ۱۲۰ مترمربع در دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز در فاصله زمانی ۲۰ اردیبهشت تا ۱۵ شهریور ۹۲ انجام شد، میانگین تبخیر-تعرق مرجع روزانه به روش فائو پنمن مانیتیت درون گلخانه ۶/۶۳ میلی‌متر تخمین زده شد. تفاوت در جنس مواد به کار رفته در ساخت گلخانه و استفاده از کولر برای خنک‌سازی محیط گلخانه در این تحقیق باعث شده است که مقدار تبخیر-تعرق مرجع از تبخیر-تعرق مرجع برآوردی در گلخانه پلاستیکی در شیراز (Rafeei *et al.*, 2016) کمتر شود. یک مقاله مروری توسط Karaca *et al.* (2018) انجام شد و معادلات تبخیر-تعرق مرجع در گلخانه ارزیابی شدند. آن‌ها نتیجه گرفتند که هیچ معادله استاندارد برای برآورد تبخیر-تعرق در گلخانه (حتی در شرایط آب و هوایی یکسان) وجود ندارد زیرا شرایط آب و هوایی گلخانه بر اساس نوع گلخانه، موقعیت، جهت، جنس مواد پوشش‌دهنده، جنس سازه گلخانه، مکانیسم تهویه، استفاده از پرده حرارتی و پودر سایه تغییر می‌کند. در تحقیق Shahabifar *et al.* (2010) هفت روش تبخیر-تعرق مرجع فائو پنمن مانیتیت، تورک، مک کینگ، پریستلی، تیلور، FAO 24 Radiation، بلانی کریدل اصلاح شده توسط فائو و پنمن مانیتیت-ASCE با داده‌های لایسیمتری درون گلخانه‌ای واقع در موسسه تحقیقات گیاه‌پزشکی کشور مقایسه شدند. آن‌ها نشان دادند که روش فائو پنمن مانیتیت بهترین برآورد تبخیر-تعرق درون گلخانه را داشته است. همچنین در تحقیق دیگری، روش فائو پنمن مانیتیت بهترین روش برآورد تبخیر-تعرق روزانه در بین ۱۳ روش برآورد تبخیر در شرایط گلخانه‌ای در ناحیه باجگاه استان فارس، معرفی گردید (Moazed *et al.*, 2014).

#### نسبت تامین تبخیر-تعرق توسط آب شیرین تولیدی



شکل (۱۴). روند تغییرات روزانه تبخیر-تعرق مرجع به روش فائو پنمن مانیتیت در مدت آزمایش در مقایسه با تغییرات روزانه تولید آب شیرین



شکل (۱۵). نسبت تغییرات میانگین تولید آب شیرین به تبخیر-تعرق مرجع با روش فائو پنمن مانیتیت برای یک مترمربع گلخانه (بدون در نظر گرفتن نوع بستر)

کم مصرفی به کار رفته است. در تحقیق دیگری توسط Chaibi (2013a)، تولید تقطیرگر بام گلخانه برای یک مترمربع تقطیرگر، ۱/۵ تا ۲ لیتر در روز به دست آمد که حدوداً ۱/۶ تا ۲/۳ برابر نیاز آبی گیاه با سایه اندازی کم مانند کاهو است.

همان پارامترهایی که بر میزان تولید آب و تبخیر-تعرق موثر هستند (شرایط آب و هوایی، جنس گلخانه، نوع بستر و غیره) بر نسبت تولید به تبخیر-تعرق نیز موثرند. بنابراین بر اساس بررسی تحقیقات پیشین مشخص گردید که تامین ۸۵٪ نیاز آبی در شرایط آب و هوایی اهواز و با وجود گلخانه شیشه‌ای و تجهیزات به کار گرفته شده، کاربرد این سیستم منطقی است.

#### ارزیابی انرژی الکتریسیته مصرفی و هزینه تولید آب شیرین

برای ارزیابی انرژی مصرفی ویژه از روش Poblete and Painemal (2018) استفاده شد. انرژی‌های مصرفی شامل انرژی خورشید تابیده شده بر سطح دستگاه تقطیرگر و انرژی الکتریسیته دو عدد پنکه با توان ۶۵ وات برای ایجاد سرعت در جریان هوا در سیستم است. میانگین انرژی خورشید در مدت طرح ۳/۵۸ کیلو وات ساعت بر مترمربع در روز (برای ۱۶ مترمربع تقطیرگر ۵۷/۲۸ کیلو وات ساعت در روز است) و انرژی الکتریسیته دو عدد پنکه، ۰/۱۳ کیلو وات ساعت است. جمعاً ۵۷/۴۱ کیلو وات ساعت انرژی برای تولید آب شیرین با میانگین ۳/۵ کیلوگرم در ساعت (میانگین تولید آب شیرین ۲۸ کیلوگرم در روز بر ۸ ساعت کار سیستم تقسیم گردید) مصرف گردید. به عبارت دیگر برای تولید یک کیلوگرم آب، ۱۶/۰۴ کیلو وات ساعت انرژی مصرف شده است. در تحقیق Poblete and painmal (2018) انرژی مصرفی ویژه

با توجه به تبخیر-تعرق مرجع که در ۱۰۰ روز اندازه‌گیری شده دوره طرح ۴۰۸/۲ میلی‌متر است و با توجه به تولید ۳۴۵/۶ کیلوگرم آب شیرین از تقطیرگر خورشیدی برای یک مترمربع بسترکشت گلخانه چگالشی در این ۱۰۰ روز، درصد تولید آب به نیاز آبی گلخانه در طول دوره ۸۵٪ است. به عبارت دیگر این مقدار آب تولیدی که از تقطیرگر متصل به گلخانه با مساحت کلی ۱۶ مترمربع به دست می‌آید، قادر به تامین نیاز آبی ۶/۸۶ مترمربع مساحت گلخانه است.

یک شرکت سوئیسی سیستمی از آبیاری چگالشی را طراحی کرد که آب دریا درون لوله‌های پلاستیکی توسط انرژی خورشید تبخیر گردید و هوای گرم و مرطوب تولیدی توسط لوله‌های زهکش به عمق ریشه فرستاده شد و با چگالش آن، کاهش ۵۰ درصدی در مصرف آب گرچه فرنگی در این سیستم مشاهده شد (Hausherr and Ruess, 1993). یک طرح آزمایشی در چات مریم در بخش ساحلی تونس برای آبیاری چگالشی انجام شد. در این طرح با تولید ۲/۸ میلی‌متر در روز، ۵۶٪-۵۱٪ نیاز آبی لوبیا سبز، ۷۱٪-۶۹٪ نیاز آبی نخود فرنگی، ۶۴٪-۵۷٪ نیاز آبی گوجه فرنگی، ۶۸٪-۶۱٪ نیاز آبی سیب زمینی، ۸۱٪-۷۴٪ نیاز آبی پیاز تامین شد (Chaibi, 2013b). در تحقیق Mashaly et al. (2015) که از یک صفحه تقطیرگر برای نمک‌زدایی از آب استفاده نمودند، نیاز آبی را ۱/۸۸ لیتر بر مترمربع در روز و میانگین آب شیرین تولیدی را در تقطیرگر خورشیدی ۴/۷۹ لیتر در مترمربع در روز برآورد نمودند و بیان داشتند که یک مترمربع تقطیرگر قادر به تولید آب برای دو مترمربع از گلخانه است. با توجه به نیاز آبی ۱/۸۸ لیتر بر مترمربع در روز، به نظر می‌آید این تحقیق برای گیاه

۵/۷۶ میلی‌متر پس از ۵۰ روز از تاریخ شروع آزمایش (۱۳۹۷/۰۳/۱۹) در خرداد ماه به دست آمد. میانگین تبخیر-تعرق مرجع در ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر و مرداد به ترتیب ۲/۹۱، ۴/۷۴، ۴/۵۵ و ۴/۲۴ میلی‌متر در روز بودند. بیشترین و کمترین مقدار تولید آب شیرین تقطیرگر خورشیدی با مساحت ۱۶ مترمربع به ترتیب ۴۴/۵ (۱۳۹۷/۰۲/۲۸) و ۲/۱ کیلوگرم (۱۳۹۷/۰۲/۱۹) به دست آمدند. میانگین مقدار تولید آب شیرین تقطیرگر ۲۸ کیلوگرم در روز است. مقدار کل تولید آب شیرین تقطیرگر خورشیدی در ۱۰۰ روز اندازه‌گیری شده ۲۷۹۹/۵ کیلوگرم به دست آمد. میانگین آب شیرین تولیدی تقطیرگر خورشیدی در ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر و مرداد به ترتیب برابر ۱۹/۷، ۳۱/۵، ۳۲/۱ و ۳۱/۵ کیلوگرم در روز به دست آمدند. به عبارت دیگر میانگین آب شیرین تولیدی یک مترمربع از تقطیرگر خورشیدی در ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر و مرداد به ترتیب برابر ۱/۲۳، ۱/۹۷، ۲ و ۱/۹۷ کیلوگرم در روز محاسبه شدند. میانگین تولید آب شیرین یک مترمربع از تقطیرگر خورشیدی در طول دوره طرح ۱/۷۵ کیلوگرم در روز محاسبه گردید. بیشترین و کمترین مقدار تولید آب شیرین از بین ۹ بستر در دوره طرح به ترتیب مربوط به بستر S3 با مقدار ۳۵۶/۷۸ کیلوگرم و بستر BP3 با مقدار ۲۷۴/۵۸ کیلوگرم است. بیشترین و کمترین مقدار تولید آب شیرین در دوره طرح به ترتیب مربوط به بستر شن با مقدار تولید ۱۰۳۲/۷ کیلوگرم و با نسبت ۰/۳۷ از کل تولید و بستر شن-باگاس-پرلایت با مقدار تولید ۸۶۸/۳ کیلوگرم و با نسبت ۰/۳۱ از کل تولید به دست آمدند. میانگین تولید آب شیرین به ترتیب نزولی در بسترهای شن، باگاس-پرلایت و شن-باگاس-پرلایت به دست آمد. چرا که بستر شن دمای پایین‌تری نسبت به دو بستر دیگر داشت. ظرفیت آب تولیدی در بسترهای شن، شن-باگاس-پرلایت و باگاس-پرلایت به ترتیب ۰/۹۴، ۰/۷۹ و ۰/۸۲ برابر تبخیر-تعرق درون گلخانه محاسبه شدند. به دلیل پایین‌تر بودن دمای بستر شن و تامین بیشتر درصد رطوبتی مورد نیاز آن توسط آب تولیدی، نتیجه می‌گیریم بستر شن چگالنده بهتری نسبت به دو بستر دیگر است. آب تولیدی در ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر و مرداد ۰/۸۳، ۰/۸۲، ۰/۸۷ و ۰/۹۲ آب مورد نیاز بسترهای این گلخانه را با مساحت ۸/۱ مترمربع تامین می‌نماید. بیشترین و کمترین نسبت تولید آب شیرین به تبخیر-تعرق به ترتیب در روزهای ۱۱۹ام و ۱۲۰ام طرح با مقدارهای ۱/۹۱ و ۰/۱۵ اتفاق افتاد. به طور کلی تولید آب شیرین توسط تقطیرگر خورشیدی متصل به این گلخانه، ۸۵٪ تبخیر-تعرق مرجع به روش فائو پنمن مانیتیت را برای مساحت ۸/۱ مترمربع بسترهای درون گلخانه در گرم‌ترین ماه‌های سال در اهواز

فرایند چگالش، با سه روش متفاوت از ۷/۷ تا ۲۳/۹ کیلو وات ساعت محاسبه شد.

برای ارزیابی اقتصادی از روش Kabeel *et al.* (2014) استفاده شد. هزینه ثابت ساخت تقطیرگر خورشیدی و گلخانه متصل به آن، حدود ۳۷۷۵۰۰۰۰ ریال (۲۵۱۷ دلار آمریکا) برآورد شد. هزینه‌های متغیر ۰/۳ هزینه ثابت در هر سال در نظر گرفته شد. هزینه کل که مجموع هزینه ثابت و متغیر است برای عمر مفید ۲۰ سال (چون جنس این تقطیرگر و گلخانه از شیشه و فلز است، جزء سیستم‌های با عمر مفید بالا دسته‌بندی می‌شود) ۲۶۴۲۵۰۰۰ (۳۷۷۵۰۰۰۰ + ۰/۳ × ۲۰ × ۳۷۷۵۰۰۰) ریال می‌شود. با توجه به میانگین تولید روزانه ۲۸ کیلوگرم آب شیرین و در نظر گرفتن ۳۴۰ روز آفتابی در شهر اهواز، مقدار کل تولید آب شیرین در ۲۰ سال عمر مفید سیستم ۱۹۰۴۰۰ (۲۰ × ۳۴۰ × ۲۰) کیلوگرم می‌شود. بنابراین هزینه تولید یک لیتر آب شیرین از تقسیم هزینه کل بر مقدار تولید کل به دست آمده و معادل ۱۳۸۷۸ ریال (۰/۰۹۵ دلار آمریکا) محاسبه شد.

هزینه تولید آب در یک سیستم آبیاری چگالشی بزرگ با تولید روزانه ۹۱۳ کیلوگرم آب شیرین توسط Gustafsson and Lindblom (۲۰۰۱)، معادل ۵-۱۶ کرون سوئد (۰/۵-۱/۵ یورو) برای هر مترمکعب آب تخمین زده شد. در تحقیقی که توسط Kabeel *et al.* (2014) انجام شد، هزینه تولید یک کیلوگرم آب شیرین در یک تقطیرگر خورشیدی معمولی معادل ۰/۰۴۸ دلار برآورد شد. همچنین در تحقیق Okati *et al.* (2018) هزینه تولید یک کیلوگرم آب با سرمایه‌گذاری اولیه ۵۴۸۰ دلار، معادل ۰/۰۲۷ دلار به دست آمد. در تحقیقی که توسط Poblete and painemal (2018) انجام شد، هزینه تولید آب شیرین، ۰/۳۵ دلار آمریکا برای هر لیتر آب به دست آمد. علت بالا بودن هزینه تولید آب در طرح حاضر این است که علاوه بر تقطیرگر خورشیدی، یک گلخانه نیز ساخته شده است، در حالی که در تحقیقات پیشین (Gustafsson and Lindblom, 2001; Kabeel *et al.*, 2014; Okati *et al.*, 2018; Poblete and Painemal, 2018) فقط هزینه ساخت تقطیرگر و تجهیزات آن در نظر گرفته شده است.

با بررسی‌های انجام شده به نظر می‌رسد که هزینه حدود ۱۳۸۷۸ ریال برای هر لیتر آب تولیدی در تقطیرگرهای خورشیدی معمولی ترکیب شده با گلخانه با مقیاس کم، منطقی است.

## نتیجه‌گیری

نتایج روند تغییرات روزانه تبخیر-تعرق مرجع به روش فائو پنمن مانیتیت نشان داد که بیشترین میزان تبخیر-تعرق مرجع روزانه

این نوع از گلخانه‌ها به‌دست آید.

### سیاسگزاری

نگارندگان مقاله از حمایت و مساعدت شرکت بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری کرخه و شاوور و همچنین سازمان آب و برق خوزستان که هزینه طرح تحقیقاتی با شماره قرارداد ۵۱۲/۹۵ را پرداخت نموده‌اند، قدردانی و سپاسگزاری می‌نمایند.

### REFERENCES

- Al-Ismaili, A. M., and Jayasuriya, H. (2016). Seawater greenhouse in Oman: A sustainable technique for freshwater conservation and production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 653-664.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998). Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56, FAO-Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome (<http://www.fao.org/docrep/ARPAV>) (2000), La caratterizzazione climatica della Regione Veneto, Quaderni per. *Geophysics*, 156, 178.
- Alnaser, W. E., and Barakat, A. (2000). Use of condensed water vapor from the atmosphere for irrigation in Bahrain. *Applied Energy*, 65(1-4), 3-18.
- Bait, O., and Si-Ameur, M. (2018). Enhanced heat and mass transfer in solar stills using nanofluids: a review. *Solar Energy*, 170, 694-722.
- Bettaque, R., and Naegel, L. C. A. (1999). An integrated solar desalination system in controlled-environment greenhouses. *Sunworld*, 23(1), 18-20.
- Boroomandnasab, S. and Yousefi, B. (2016). *Condensation Irrigation (Solar Technologies Drainage Water and Irrigation)*. Ahwaz: Shahid Chamran University of Ahwaz Press, 98. (In Farsi)
- Bourouni, K., Chaibi, M. T., and Al-Tae, A. (2011). Water desalination by humidification and dehumidification of air, seawater greenhouse process. *Solar energy conservation and photoenergy systems*, Encyclopedia of Life Support Systems. EOLSS.
- Boutiere, H. (1972). Culture en zone aride et serre-distillateurs solaires. *COMPLES Bulletin*, (1972).
- Chaibi, M. T. (2003a). Greenhouse systems with integrated water desalination for arid areas based on solar energy (Vol. 389). Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences Alnarp
- Chaibi, M. T. (2013b). Thermal solar desalination technologies for small-scale irrigation. *American Journal of Energy Research*, 1(2), 25-32.
- Dilmaghani, M. R., and Hemmaty, S. (2011). Effect of different substrates on nutrients content, yield and quality of strawberry cv. Selva in soilless culture. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, 2(3), 1-8.
- Dumka, P., and Mishra, D. R. (2018). Energy and exergy analysis of conventional and modified solar still integrated with sand bed earth: Study of heat and mass transfer. *Desalination*, 437, 15-25.
- Gorjian, S., and Ghobadian, B. (2015). Solar desalination: A sustainable solution to water crisis in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 571-584.
- Gustafsson, A.M., and Lindblom, J. (2001). *Underground Condensation of Humid Air – a Solar Driven System for Irrigation and Drainage-Water Production*. Master's Thesis. 2001: 140. Luleå University of Technology. Sweden.
- Hausherr, B., and Ruess, K. (1993). *Seawater desalination and irrigation with moist air*. Ingenieurbüro Ruess und Hausherr, Switzerland.
- Hosseini, A., Banakar, A. and Gorjian, S. (2018). Development and performance evaluation of an active solar distillation system integrated with a vacume-type heat exchanger. *Desalination*, 435, 45-59.
- Kabeel, A. E., and Almagar, A. M. (2013, November). Seawater greenhouse in desalination and economics. In *Seventeenth International Water Technology Conference, IWTC17*.
- Kabeel, A. E., Omara, Z. M., and Essa, F. A. (2014). Improving the performance of solar still by using nanofluids and providing vacuum. *Energy conversion and management*, 86, 268-274.
- Karaca, C., Tezcan, A., Büyüktaş, K., Büyüktaş, D., & Baştuğ, R. (2018). Equations Developed to Estimate Evapotranspiration in Greenhouses. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences*, 28(4), 482-489.
- Lindblom, J. (2012). *Condensation irrigation: a combined system for desalination and irrigation* (Doctoral dissertation, Luleå tekniska universitet).
- Lindblom, J., and Nordell, B. (2012). Experimental Study of Underground Irrigation by Condensation of Humid Air in Perforated Pipes. *Luleå tekniska universitet*.
- Lindblom, J., and Nordell, B. (2006). Subsurface irrigation by condensation of humid air. *Sustainable Irrigation Management, Technologies and Policies*, 96, 181.

- Lindblom, J., and Nordell, B. (2007). Underground condensation of humid air for drinking water production and subsurface irrigation. *Desalination*, 203(1-3), 417-434.
- Manchanda, H., and Kumar, M. (2017). Performance analysis of single basin solar distillation cum drying unit with parabolic reflector. *Desalination*, 416, 1-9.
- Mashaly, A. F., Alazba, A. A., Al-Awaadh, A. M., and Mattar, M. A. (2015). Area determination of solar desalination system for irrigating crops in greenhouses using different quality feed water. *Agricultural Water Management*, 154, 1-10. March 6, 2015, from <http://www.elsevier.com/locate/agwat>.
- Moazed, H., Ghaemi, A. A., and Rafiee, M. R. (2014). Evaluation of several reference evapotranspiration methods: a comparative study of greenhouse and outdoor conditions. *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering*, 38(C2), 421-437.
- Ni, G., Zandavi, S. H., Javid, S. M., Boriskina, S. V., Cooper, T. A., and Chen, G. (2018). A salt-rejecting floating solar still for low-cost desalination. *Energy & Environmental Science*, 11(6), 1510-1519.
- Okati, V., Farsad, S. and Behzadmehr, A. (2018). Numerical analysis of an integrated desalination unit using humidification – dehumidification and subsurface condensation processes. *Desalination*, 433, 172-185.
- Okati, V., Farsad, S. and Behzadmehr, A. (2016). Analysis of a solar desalinators (humidification – dehumidification cycle) including a compound system consisting of a solar humidifier and subsurface condenser using DoE. *Desalination*, 397, 9-21.
- Pal, P., Nayak, A. K., and Dev, R. (2018). A modified double-slope basin-type solar distiller: experimental and enviro-economic study. *Evergreen*, 5(1), 52-61.
- Poblete, R., and Painemal, O. (2018). Recovering water from brine: Assessments of feasibility and applicability to irrigation processes. *Desalination*, 439, 17-24.
- Reca, J., Trillo, C., Sánchez, J. A., Martínez, J., and Valera, D. (2018). Optimization model for on-farm irrigation management of Mediterranean greenhouse crops using desalinated and saline water from different sources. *Agricultural Systems*.
- Rafeei, M. R., Moazed, H., and Boroomandnasab, A. G. S. (2016). FAO-56 Method for Estimating Evapotranspiration and Crop Coefficients of Eggplant in Greenhouse and Outdoor Conditions.
- Salter, P. J., and Williams, J. B. (1965). The influence of texture on the moisture characteristics of soils: II. Available-water capacity and moisture release characteristics. *Journal of Soil Science*, 16(2), 310-317.
- Sarkamarian, F., Jouzani, G. S., and Moradi, F. (2015). Fast production of enriched biocompost from sugarcane bagasse using biotechnological process. *Journal of Crop Technology*, 9, 49-64. (In Farsi)
- Shahabifar, M., Assari, M., Kouchakzadeh, M., and Mirlatif, S. M. (2010). Lysimetric evaluation of common methods of calculating standard grass reference crop evapotranspiration in greenhouse. *Iranian Journal of Water Research in Agriculture*, 24(1), 13-19. (In Farsi)
- Singh, A. K., Singh, D. B., Mallick, A., and Kumar, N. (2018). Energy matrices and efficiency analyses of solar distiller units: a review. *Solar Energy*, 173, 53-75.
- Tiwari, G. N. and Sahota, L. (2017). Review on energy and economic efficiencies of passive and active solar distillation systems. *Desalination*, 401, 159-179.
- Trombe, F., and Foex, M. (1961, August). Utilisation of solar still energy for simultaneous distillation of brackish water and air conditioning of hot houses in arid regions. UN Conf. On new sources of energy. In UN Conf. on New Sources of Energy.
- Waller, P., and Yitayew, M. (2014). *Irrigation and Drainage Engineering*. Springer Verlag. 742 pages.
- Yousefi, B., Boroomand-Nasab, S., Moazed, H., and Nordell, B. (2017). Condensation Irrigation Field Test: Measurements of Soil Moisture. *International Journal of Basic Sciences & Applied Research*, 6(3), 263-268.
- Yousefi, B. (2012). Application of Condensation Irrigation in desalination of saline waters and reuse in irrigation and drinking water. Thesis of Master of Science, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahwaz: 65. (In Farsi)
- Yousefi, B., Behzaad, M. and Boroomandnasab, S. (2010). Condensation and Distillation Irrigation. 3rd Irrigation and Drainage Network Management National Conference. 1-3 March, Shahid Chamran University of Ahwaz: 5. (In Farsi)
- Yousefi, B., Behzaad, M., Boroomandnasab, S. and Rahmaanshaahizehaabi, M. (2011). Condensation Irrigation. 4th Iran Water Resources Management Conference. 3-4 May, Amirkabir University of Technology, Tehran: 7. (In Farsi)
- Yousefi, B., and Boroomandnasab, S. (2015). Desalination Using the Condensation Irrigation System (A Case Study of the Research Farm of Shahid Chamran University of Ahwaz). *Journal of Water and Wastewater*, 26(3), 127-133. (In Farsi)
- Yousefi, B., Boroomandnasab, S. and Chaibi, M. T. (2012). Assessment of the Performance of Condensation Irrigation System: First Results. *World Rural Observation*. 4(3), 14 – 17.