

توزیع تعرق و کمبود فشار بخار در گلخانه‌ی تجاری

سید معین الدین رضوانی^۱، حمید زارع ایبانه^{۲*} و محسن گودرزی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۳

چکیده

بخش کشاورزی عمده‌ترین مصرف کننده آب در ایران است. محدودیت منابع آب منجر به استفاده از فناوری‌های جدید از جمله کشت گلخانه‌ای برای بهره‌برداری بهینه از این منابع شده است. در کشت گلخانه‌ای مدیریت شرایط اقلیمی بسیار مهم است. با هدف بررسی شرایط اقلیمی و توزیع مکانی و زمانی رطوبت (کمبود فشار بخار) و تعرق، مطالعه‌ای در گلخانه‌ای تجاری با مدیریت بهره‌بردار و وسعت ۴۳۳۳ مترمربع با ۴ اندازه‌گیری ۲۴ ساعته در فصل‌های سرد و گرم سال انجام شد. با توجه به مرحله رشد محصول (ارتفاع و حجم پوشش گیاهی) بین ۲۱ تا ۳۳ دیتالاگر دما و رطوبت نسبی داخل گلخانه را در دو ارتفاع در سطح افقی ثبت می‌کردند. بررسی توزیع کمبود فشار بخار با توجه به معیارهای موجود نشان داد با وجود مطلوب بودن دامنه میانگین کمبود فشار بخار، توزیع آن در ساعات مختلف شبانه روز و در سطح گلخانه می‌تواند بسیار متغیر باشد و دامنه‌ای از شرایط نامطلوب تا مطلوب را داشته باشد. توزیع تعرق نیز تقریباً منطبق بر توزیع کمبود فشار بخار در گلخانه بود. درصد تفاوت حداکثر و حداقل تعرق تغییرات مجموع تعرق روزانه در سطح گلخانه در اندازه‌گیری‌های زمستان در سطح گلخانه ۲۱ تا ۴۶ و در بهار ۲۸ درصد بود. در نتیجه بیان وضعیت اقلیمی گلخانه تنها با استفاده از میانگین پارامترهای اقلیمی بدون در نظر گرفتن توزیع مکانی (در سطح گلخانه) و زمانی (شبانه روز) آن‌ها می‌تواند سبب بروز خطا در تنظیم شرایط اقلیمی گلخانه شود. همچنین شناخت تفاوت‌های مقدار و توزیع تعرق می‌تواند در بهینه کردن برنامه آبیاری با هدف افزایش کارایی و کاهش مصرف آب استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: رطوبت، خیار، گوجه فرنگی، همگنی، یکنواختی

مقدمه

در سال‌های اخیر با افزایش جمعیت و محدودیت آب و زمین‌های قابل کشت در ایران سرمایه‌گذاری قابل‌توجهی در تولیدهای گلخانه‌ای صورت گرفته است (خشخوی و همکاران، ۱۳۹۶؛ زارعی، ۱۳۹۶). سطح گلخانه‌های سبزی و صیفی، توت فرنگی و گیاهان دارویی ایران در سال ۱۳۹۰ برابر ۵۹۴۶ هکتار بود که با رشد ۵۴/۱ درصدی در سال ۱۳۹۶ به ۹۱۶۴ هکتار رسید (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۹۴ و ۱۳۹۷). در همین مدت سطح گلخانه‌ها در استان همدان از ۶۳/۶۵ هکتار با رشد ۲۷/۵۲ درصدی به ۸۱/۳ هکتار رسید. حدود ۵۵ درصد سطح زیرکشت گلخانه‌های استان همدان به خیار و پس از آن ۱۵ درصد به گوجه فرنگی اختصاص دارد (وزارت جهاد

کشاورزی، ۱۳۹۴ و ۱۳۹۷).

دما و رطوبت دو متغیر اصلی در کشت گلخانه‌ای هستند که بر رشد و عملکرد محصول مؤثرند (Ponce et al., 2015; Gruda et al., 2017; Konopacki et al., 2018; Shamshiri et al., 2018). شرایط رطوبتی گلخانه با رطوبت نسبی یا کمبود فشار بخار بیان می‌شود (Castilla, 2013) است. ولی کمبود فشار بخار یا اختلاف فشار بخار اشباع با فشار واقعی، به‌عنوان نشانگر اقلیم گلخانه وضعیت رطوبتی گلخانه را بهتر نشان می‌دهد (Konopacki et al., 2018; Shamshiri et al., 2018).

برای حد پایینی کمبود فشار بخار آب هوا (رطوبت بالا) مقادیر ۰/۲ kPa و ۰/۳ kPa پیشنهاد شده است (Grange and Hand, 1987; Prenger and Ling, 2001; Ponce et al., 2015; Konopacki et al., 2018; Shamshiri et al., 2018). حد بالایی کمبود فشار بخار آب هوا (رطوبت کم) نیز ۱/۰ kPa است (Grange and Hand, 1987; Konopacki et al., 2018; Shamshiri et al., 2018). کمبود فشار بخار کمتر از حد پایینی (≤ 0.2 kPa) سبب کمبود کلسیم در برگ‌ها (Barker et al., 1987; Barker, 1990; Ponce et al., 2015) و کاهش سطح برگ (Barker et al., 1987; Ponce et al., 2015) و رشد بیماری‌های قارچی و

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
۳- دانشیار گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
* - نویسنده مسئول:
(Email: zare@basu.ac.ir)

دما و رطوبت و تعداد سنسورها با استفاده از فناوری سنسور بی‌سیم در ۶ گلخانه با محصولات ژاربر، ماترکاریا، گوجه فرنگی و خیار با مساحت‌های ۶۱۶۰ تا ۱۳۷۶۰ متر مربع نشان داد حداقل ۹ سنسور در هکتار برای بررسی توزیع افقی دما و رطوبت ضروری است. از این شبکه حسگرها می‌توان برای تشخیص مناطق سرد و مرطوب درون گلخانه و مناطق با خطر بالای بیماری‌های قارچی استفاده کرد (Balendonck et al., 2010).

در بسیاری از مطالعات اقلیم گلخانه همگن فرض شده در حالی که در واقعیت متغیرهای اقلیمی در گلخانه همگن نیستند (Katsoulas et al., 2017). همگنی اقلیم گلخانه سبب همگنی و کیفیت بالای محصول، کمتر شدن بیماری‌ها و در نتیجه استفاده کمتر از قارچ‌کش‌ها و صرفه‌جویی انرژی می‌شود (Balendonck et al., 2014; Balendonck et al., 2010). ناهمگنی اقلیم گلخانه می‌تواند سبب اختلاف معنی‌دار عملکرد، بهره‌وری، کمیت و کیفیت محصول و توسعه بیماری‌ها شود (Katsoulas et al., 2017). تفاوت‌های دائمی در توزیع اقلیمی افقی، منجر به کمتر شدن یکنواختی محصول می‌شود (Balendonck et al., 2014).

کاتسولاس و همکاران در تحقیقی متوسط کمبود فشار بخار برای تهویه طبیعی و سرمایه‌ی مه‌پاش را به ترتیب حدود ۷ kPa و ۱ kPa و ضریب تغییرات کمبود فشار بخار را به ترتیب ۰/۰۶ و ۰/۳۹ بدست آوردند. نتایج نشان داد گرچه تهویه طبیعی در مه‌پاش کردن شرایط اقلیمی مطلوب داخل گلخانه موفق نبود، لیکن توزیع اقلیمی را بسیار همگن‌تر می‌کرد (Katsoulas et al., 2012).

مطالعه‌ی مصرف و بازده انرژی در گلخانه‌های استان همدان نشان داد تهویه طبیعی به تنهایی قادر به کنترل شرایط اقلیمی گلخانه نبوده و شرایط محیطی برای تولید محصول مناسب نیست. از طرفی به دلیل مصرف انرژی در فصل سرد سال تمایل به تهویه کمتر به دلیل از دست دادن انرژی می‌باشد (رضوانی و سلگی، ۱۳۹۴). هدف از انجام این تحقیق بررسی توزیع مکانی و زمانی کمبود فشار بخار (با توجه به نوع محصول و دامنه‌های رطوبتی مطلوب برای رشد محصول) و تعرق در فصل‌های گرم و سرد سال، داخل یک گلخانه تجاری در استان همدان بود.

مواد و روش‌ها

اندازه‌گیری‌ها در گلخانه‌ی تجاری کوانست با دیوارهای جانبی و پوشش پلاستیکی ۲۰۰ میکرون که سقف آن علاوه بر آن دارای لایه داخلی ۶۰ میکرون نیز بود، در شهرستان تویسرکان استان همدان با طول ۴۸°۱۷'۵۹" و عرض ۳۴°۲۸'۳۵" جغرافیای و ارتفاع ۱۶۱۷ m در زمستان و تابستان سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ انجام شد. برخی مشخصات اقلیمی ایستگاه هواشناسی سینوپتیک تویسرکان از آغاز تاسیس در سال ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۶ در جدول یک آورده شده است.

صدمه به عملکرد کمی و کیفی محصول (Grange and Hand, 1987; Barker et al., 1987; Barker, 1990; Prenger and Ling, 2001; Ponce et al., 2015; Gruda et al., 2017; Shamshiri et al., 2018) می‌شود. کمبود فشار بخار بیشتر از حد بالایی (≥ 10 kPa) سبب تنش آبی و بنابراین کاهش رشد گیاه به دلیل بسته شدن روزنه‌ها برای حفظ آب می‌شود (Grange and Hand, 1987; Ponce et al., 2015). پرنگر و لینگ یادآور شدند دامنه کمبود فشار بخار که پاتوزن‌های قارچی دوام می‌آورند $0.43 \leq VPD < 0.7$ است (Prenger and Ling, 2001). کاستیلا حد بالایی کمبود فشار بخار را در زمستان ۱/۱ kPa و در تابستان ۲/۷ kPa گزارش کرد (Castilla, 2013).

تعرق عاملی مهم است که می‌تواند با بهینه کردن برنامه آبیاری موجب افزایش کارایی مصرف آب و در نتیجه آب‌اندوزی شود. نتایج بررسی توزیع تعرق در یک گلخانه ۵۰۰۰ متر مربعی در دوره کشت تابستانه خیار نشان داد تعرق در طول روز در قسمت جنوبی گلخانه بیشتر از قسمت شمالی و در طول شب عکس آن است. ضمن آن‌که مقادیر تعرق شبانگهی کوچکتر و به همین دلیل مقادیر مشاهداتی در طول شبانه روز مشابه مشاهدات روزانه بود (Ferentinos et al., 2017). بولارد و ونگ در تحقیقی با مدل کردن تهویه در یک گلخانه تونلی با مساحت ۱۷۶ متر مربع و محاسبه تعرق محصول نشان دادند مقدار تعرق در قسمت شمالی گلخانه به علت کاهش سرعت جریان هوا و تشعشع، ۳۰٪ کمتر از قسمت جنوبی آن است (Boulard and Wang, 2002). مونتر و همکاران اثر رطوبت و درجه حرارت را روی مقاومت پوشش گیاهی گل شعمدانی در گلخانه با اندازه‌گیری آب مصرفی بدست آمده از معادله پنمن مطالعه کردند. نتایج نشان داد از کمبود فشار بخار ۱/۴ kPa تا ۳/۴ kPa و دمای محیط 26°C تا 36°C کاهش در مقاومت پوشش گیاهی مشاهده نشد (Montero et al., 2001). موت و پیک در مطالعه‌ای گلخانه‌ای از گیاه قلب ارغوانی (*Tradescantia pallida*) برای ارزیابی پاسخ روزنه‌ها به دما و رطوبت در تاریکی استفاده کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که عکس‌العمل روزنه به رطوبت در تاریکی و نور مشابه است، که نشان‌دهنده عدم وابستگی مکانیزم پاسخ‌دهی به رطوبت در روزنه به فرآیندهای ناشی از نور است (Mott and Peak, 2010).

اخیرا مطالعاتی بر روی توزیع افقی و همگنی کمبود فشار بخار و تعرق در گلخانه‌ها با استفاده از سنسورها صورت گرفته است (Katsoulas et al., 2012; Balendonck et al., 2014; Katsoulas et al., 2017; Ferentinos et al., 2017). گلخانه‌های مدرن برای داشتن تصویری واقعی از توزیع متغیرهای اقلیمی گلخانه اندازه‌گیری‌ها می‌بایست در نقاط مختلف اطراف پوشش گیاهی انجام شود (Katsoulas et al., 2017). بررسی‌های زمین‌آماري بلانداک و همکاران در خصوص توزیع زمانی و مکانی

جدول ۱- برخی مشخصات اقلیمی ایستگاه هواشناسی سینوپتیک تویسرکان از سال ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۶

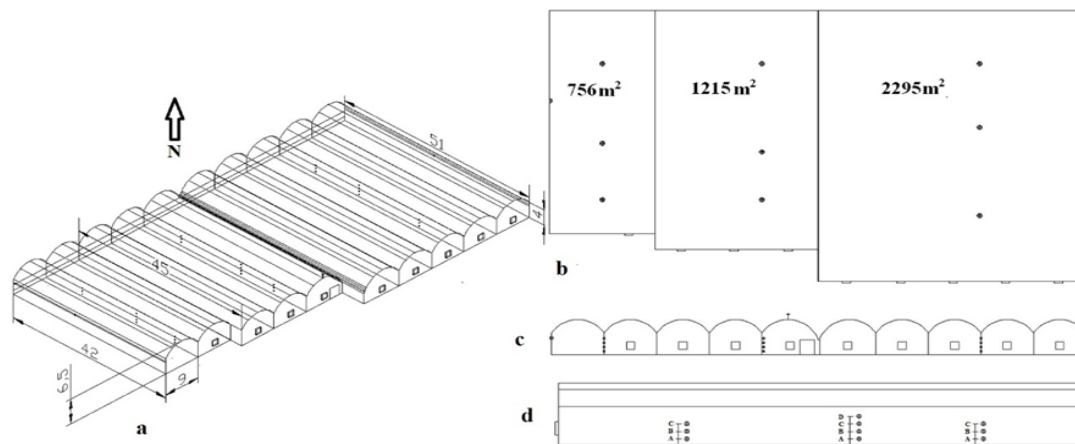
متغیر اقلیمی	متغیر اقلیمی	متغیر اقلیمی
حد اقل مطلق دما	$-۱۹/۴^{\circ}\text{C}$	میانگین مینیمم رطوبت نسبی
میانگین حد اقل دما	$۷/۳^{\circ}\text{C}$	میانگین تعداد روزهای با دمای $\geq 35^{\circ}\text{C}$
حداکثر مطلق دما	$۴۱/۲^{\circ}\text{C}$	میانگین تعداد روزهای با دمای $\leq 10^{\circ}\text{C}$
میانگین حداکثر دما	$۱۹/۹^{\circ}\text{C}$	سمت غالب باد
میانگین دمای سالانه	$۱۳/۲^{\circ}\text{C}$	حداکثر سرعت باد
مجموع میانگین تعداد روزهای یخبندان	۷۶/۷	متوسط سرعت باد
میانگین رطوبت نسبی	۴۷٪	ساعات آفتابی سالانه
میانگین ماکزیمم رطوبت نسبی	۶۶/۳٪	۲۹۹۰ ساعت

بود. در اندازه‌گیری اول و دوم، پوشش گیاهی از حدود ارتفاع ۱۴۰ cm شروع و تا بالای ارتفاع ۲۲۰ cm ادامه می‌یافت. متوسط ارتفاع پوشش گیاهی در اندازه‌گیری سوم ۱۹۰ cm بود. برای اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی ۴۰ دستگاه دیتالاگر طراحی و ساخته شد. از سنسور دما و رطوبت نسبی SHT20 (SENSIRION, Switzerland) با محدوده کاری 40°C تا 125°C و دقت 0.3°C (در محدوده دمای 5°C - 60°C) و رطوبت نسبی با محدوده کاری 10% - 0% و دقت 3% (در محدوده رطوبت نسبی 80% - 20%)، استفاده شد. میکروکنترلر مورد استفاده (Atmega32a (Atmel, Taiwan) و آی سی ساعات Maxim (Dallas Integrated) DS1307 (Semiconductor) بود. برای اندازه‌گیری طول گلخانه به سه بخش تقسیم شد و در وسط یک سوم اول، دوم و سوم دیتالاگرها به صورت عرضی در سه نقطه (دو نقطه جانبی و وسط گلخانه) نصب شدند (شکل ۱). در سه اندازه‌گیری اول دیتالاگرها در تمام ۶ نقطه جانبی در دو ارتفاع ۱۴۰ و ۲۲۰ سانتی‌متری (محدوده پوشش گیاهی) و در سه نقطه وسطی در ارتفاع‌های ۶۰، ۱۴۰، ۲۲۰ و ۳۰۰ سانتی‌متری از سطح زمین نصب شدند. در اندازه‌گیری چهارم به دلیل کوتاه بودن بوته‌ها دیتالاگرها در تمام نقاط در ارتفاع ۶۰ و ۲۲۰ سانتی‌متری از سطح زمین نصب شدند. در مرکز گلخانه لوکس متر YK-2005LX (Lux) در بالای پوشش گیاهی نصب بود که در هر دقیقه شدت نور ورودی به داخل گلخانه را به لوکس ثبت می‌کرد. در زمستان دو دریچه در سمت شرق و غرب گلخانه در طول روز از ساعت ۰۸:۳۰ تا ۱۶:۳۰ باز بودند و به این دلیل در وسط هر کدام از دریچه‌ها یک دیتالاگر نصب شد. در اندازه‌گیری سوم و چهارم در بهار و تابستان در کنار دو دریچه جانبی و دریچه انتهایی دیتالاگر نصب شد. دریچه‌های جانبی و انتهایی به طور دائم باز بودند و دریچه سقفی وسط گلخانه پس از خاموش شدن فن‌ها باز می‌شد. در هر ثانیه دما و رطوبت نسبی اندازه‌گیری و روی میکرو SD ذخیره می‌شد. پس از

مساحت گلخانه 4333 مترمربع، دارای ۱۰ دهانه ۹ متری، ارتفاع تا ناودانی ۴ و تا سقف ۶/۵ متر بود. به این دلیل که نیمی از گلخانه بعداً ساخته شده بود در وسط گلخانه ارتفاع تا ناودانی ۲/۷۵ متر بود و بین دو قسمت قدیم و جدید ۱/۵ متر فاصله بود که عرض کلی دهانه‌ها را به ۹۱/۵ متر می‌رساند. طول گلخانه در قسمت قدیمی ۵۱ متر بود که با ۵ دهانه مساحت آن ۲۲۹۵ متر مربع و در قسمت جدید ۳ دهانه به طول ۴۵ متر با مساحت ۱۲۱۵ متر مربع و دو دهانه به طول ۴۲ متر با مساحت ۷۵۶ مترمربع بود (شکل ۱). جهت گلخانه شمال شرقی - جنوب غربی بود. در دو اندازه‌گیری اول در تاریخ‌های ۱۳۹۶/۱۰/۲۰ و ۱۳۹۶/۱۰/۲۷ تعداد فن‌های خروجی نصب شده ۳ عدد بود که در هنگام اندازه‌گیری‌ها خاموش بودند. در دو اندازه‌گیری بعدی که در فصل گرم سال و تاریخ‌های ۱۳۹۷/۰۳/۲۰ و ۱۳۹۷/۰۵/۰۷ انجام شد تعداد فن‌های خروجی نصب شده ۹ عدد بود که از ساعت ۰۸:۳۰ تا ۲۰:۳۰ روشن بودند. دو دریچه تهویه روی دیوارهای جانبی در سمت شرق و غرب، یک دریچه سقفی در محل اتصال قسمت قدیم و جدید و یک دریچه نیز در دیواره انتهایی گلخانه (سمت شمال) قرار داشت. دریچه‌های جانبی از ارتفاع سه متری آغاز می‌شدند و تا ۱ متر قابلیت بازشدگی داشتند. با هدف جلوگیری از تلفات انرژی ناشی از نشت یا تبادل با هوای خارج در زمستان، به جزء دریچه سقفی موجود بین قسمت قدیم و جدید، در سالن‌های دیگر این گلخانه دریچه سقفی تعبیه نشده بود. در دو اندازه‌گیری زمستان محصول کشت شده گوجه فرنگی (رقم ازمیر) بود که در مرحله رسیدگی میوه قرار داشت. در اولین اندازه‌گیری بهاره محصول خیار (رقم ناهید) در مرحله رسیدگی میوه و در دومین اندازه‌گیری نشاء گوجه فرنگی (رقم ازمیر) در مرحله رشد ابتدایی بود. دوره کشت گوجه فرنگی گلخانه‌ای در استان همدان از اواسط مرداد تا اواخر دی و خیار از نیمه دوم بهمن تا اوایل مرداد است. کشت روی پشته‌هایی با فاصله ۱۵۰ cm دو ردیف بوته با آرایش $37\text{ cm} \times 36/0\text{ cm}$ کشت شده

BMP180 (Germany) با دقت ۰/۱۲ hPa، سرعت باد با دقت m/s ۰/۱، میزان بارش با دقت ۰/۱ mm و جهت باد (شمال جغرافیایی معادل صفر درجه) بود. اندازه‌گیری هر دو ثانیه یک بار انجام و داده‌های ایستگاه هواشناسی روی یک میکرو SD ثبت می‌شد.

اتمام اندازه‌گیری میانگین ساعتی آن بدست آمد. در خارج از گلخانه یک دستگاه ایستگاه هواشناسی APRS روی سقف گلخانه در ارتفاع ۷/۵ از سطح زمین نصب شده بود. تجهیزات آن شامل سنسور دما و رطوبت نسبی SHT10 (SENSIRION, Switzerland) به ترتیب با دقت دما و رطوبت نسبی ۰/۵ °C و ۴/۵٪، فشار هوا (BOSCH،



شکل ۱- گلخانه مورد مطالعه

$$e_a = e_s \frac{RH}{100} \quad (۳)$$

$$e_s = 6.894757 e^{f(R)} \quad (۴)$$

$$f(R) = \frac{-10440}{T_R} - 11.29 - 0.02702 \times T_R + 1.289 \times 10^{-5} \cdot T_R^2 - 2.478 \times 10^{-9} T_R^3 + 6.546 \ln(T_R) \quad (۵)$$

$$T_R = 491.67 + 1.8 T \quad (۶)$$

$$s = 0.04145 e^{0.06088 T} \quad (۷)$$

VPD = کمبود فشار بخار به kPa به e_a ، فشار بخار واقعی به kPa به e_s ، فشار بخار اشباع به kPa ، $f(R)$ تابع درجه حرارت هوا، s = شیب منحنی فشار بخار اشباع به $^{\circ}C^{-1} kPa$ ، T_R = دمای هوا به $^{\circ}C$ ، T ، R = دمای هوا به $^{\circ}C$.

برای تخمین شاخص سطح برگ در کشت گوجه فرنگی از ۶ نقطه در سطح گلخانه (یک سوم اول، دوم و سوم) در هر نقطه دو بوته و در مجموع ۱۲ بوته انتخاب شد. طول و عرض برگ مرکب در بوته‌های انتخاب شده اندازه‌گیری و شاخص سطح برگ بدست آمد. برای محاسبه سطح برگ مرکب از روابط رضوانی و همکاران (۱۳۹۵) استفاده شد:

$$A = 0.6393(L \times W)^{0.9046} \quad r = 0.988 \quad F = 425^{***}$$

L و W به ترتیب طول و عرض برگ مرکب به متر

برای تخمین شاخص سطح برگ خیار تعداد ۵۱ برگ انتخاب و با اندازه‌گیری طول و عرض برگ و مساحت آن‌ها رابطه زیر برای محاسبه سطح یک برگ بدست آمد و از ۱۲ بوته برای تخمین شاخص سطح برگ استفاده شد:

$$A = 0.7775 (W \times L) + 0.0003 r^2 = 0.9916 F = 5781.87^{***}$$

در هر دما و رطوبت نسبی برای محاسبه میزان تعرق گیاه در داخل گلخانه با استفاده از شرایط محیطی حاکم بر آن، از رابطه استانگلینی با استفاده از رابطه یک بدست می‌آید (Prenger et al., 2002; Donatelli et al., 2006; Fazlil-Ilahil, 2009; Pamungkas et al., 2006; زارعی و همکاران، ۱۳۹۷). در این رابطه با قابل اغماض در نظر گرفتن شار گرمایی خاک یا جمله ذخیره انرژی، چگالی شار گرمای نهان تبخیر (Prenger et al., 2002; Donatelli et al., 2006; Pamungkas et al., 2006) میزان تبخیر یا در واقع تعرق از پوشش گیاهی (Stanghellini, 1987; Prenger et al., 2002)

$$T = 2 LAI \frac{1}{\lambda} \frac{s (R_n - G) + K_t \frac{VPD \rho C_p}{T_R}}{s + \gamma (1 + \frac{T_c}{r_a})} \quad (۱)$$

که در آن؛ T = تعرق گیاه برحسب میلی‌متر در ساعت، λ = گرمای نهان تبخیر به $MJ kg^{-1}$ ، R_n = تشعشع خالص روزانه یا ساعتی به $MJ m^{-2} day^{-1}$ یا $MJ m^{-2} h^{-1}$ ، C_p = حرارت ویژه هوا به $^{\circ}C^{-1} MJ kg^{-1}$ ، K_t = ضریب تبدیل به $h^{-1} s$ برای R_n تشعشع خالص روزانه یا ساعتی به $MJ m^{-2} h^{-1}$ ، ρ = چگالی هوای متوسط $kg m^{-3}$ ، γ = ثابت سایکومتریک به $^{\circ}C^{-1} kPa$ ، r_a = مقاومت آئرو‌دینامیکی به $s m^{-1}$ ، r_c = مقاومت پوشش گیاهی به $s m^{-1}$ ، r_R = مقاومت تابشی به $s m^{-1}$ ، LAI = شاخص سطح برگ به $m^2 m^{-2}$ ، G = شار گرمایی خاک به $MJ m^{-2} h^{-1}$.

کمبود فشار بخار از روابط زیر بدست می‌آید:

$$VPD = e_s - e_a \quad (۲)$$

است، به دلیل عدم وجود تشعشع غیر یکنواختی حرارتی در سطح گلخانه کمتر است، هر چند از نظر شرایط اقلیمی مقدار آن در دامنه مطلوب نیست و از ساعت ۰۱:۰۰ تا ۰۶:۰۰ مقدار آن به کمتر از ۰/۴۳ کیلو پاسکال می‌رسد (شکل ۲). همانگونه که مشاهده می‌شود توزیع مجموع تعرق منطبق بر توزیع میانگین VPD در سطح گلخانه است (شکل‌های ۲، ۴ و ۵). مجموع تعرق روزانه و شبانه با ۲/۶۷ و ۲/۰۵ میلی‌متر به ترتیب ۵۶/۶ و ۴۳/۴ درصد از کل تعرق را شامل می‌شوند. علت اینکه تعرق شبانه قسمت زیادی از کل تعرق را شامل می‌شود را می‌توان به کوتاهی روز و نیز کارکرد کوره‌ها در شب نسبت داد که سبب شده VPD در سطحی که تعرق صورت بگیرد باقی بماند که با مطالعه (Moot and Paek, 2010) مبنی بر عکس‌العمل یکسان روزنه‌ها به تغییرات رطوبت در نور یا تاریکی همخوانی دارد. نتایج نشان داد تغییرات مجموع تعرق روزانه در سطح گلخانه به گونه‌ای است که درصد تفاوت حداکثر و حداقل تعرق در سطح گلخانه به ۳۴ تا ۴۶ درصد می‌رسد (شکل ۵) که با نتایج Boulard and Wang (2002) همخوانی دارد. رابطه بین تعرق و کمبود فشار بخار در روز به صورت خطی و در شب درجه دو بدست آمده است (شکل ۳). همانطور که در شکل ۶ پیداست گلخانه از نظر رطوبت به سه ناحیه تقریباً منطبق بر مساحت این نواحی تقسیم شده است. عدم تقارن در شکل گلخانه و تقسیم آن به سه ناحیه با مساحت‌های ۲۲۹۵، ۱۲۱۵ و ۷۵۶ متر مربع سبب شده نسبت سطح قسمت قدیمی گلخانه به قسمت‌های جدید با سه و دو دهانه به ترتیب ۸۹٪ و ۲۰٪ بیشتر باشد. در نتیجه حجم تعرق در قسمت قدیمی بیشتر بوده که همراه با جریان هوای ورودی از دریچه جانبی غربی (جهت باد ۲۳۰°) سبب حرکت رطوبت از سمت غرب به شرق گلخانه شده است. بازشدگی کم دریچه‌ها (۳۳m²) معادل ۰/۸ درصد سطح گلخانه که به دلیل سردی هوای پیرامونی گلخانه با مقدار توصیه شده ۲۵ درصد سطح گلخانه (زارعی، ۱۳۹۶) فاصله زیادی دارد سبب کندی سرعت تهویه شده و باعث تجمع رطوبت در سمت شرقی گلخانه می‌شود. در شکل ۷ نیمرخ طولی جنوب غربی به شمال شرقی تعرق نشان می‌دهد مقدار تعرق در طول روز از جنوب غربی به شمال شرقی روند کاهشی و در شب روند افزایشی دارد که با مطالعات (Ferentinos et al., 2017) و (Boulard and Wang, 2002) همخوانی دارد. اما تعرق ۲۴ ساعته از سمت جنوب غربی به شمال شرقی روند افزایشی دارد که با تحقیق فرنتینوس و همکاران (۲۰۱۷) تفاوت دارد. این تفاوت ناشی از زمان اندازه‌گیری است. اندازه‌گیری فرنتینوس و همکاران (۲۰۱۷) در تابستان انجام شده و تعرق در طول روز بسیار بزرگ‌تر از مقدار آن در شب بوده و در نتیجه توزیع مقدار کل تعرق از تعرق روز تبعیت کرده است. اندازه‌گیری اخیر در زمستان انجام شده و به دلیل استفاده از سامانه گرمایشی دما و مقدار VPD در طول شب

به ترتیب طول و عرض برگ به متر W و L از ضریب تغییرات به عنوان شاخص همگنی کمبود فشار بخار و تعرق گلخانه استفاده شد (Bartzanas et al., 2004; Katsoulas et al., 2012; Kittas et al., 2012). مقادیر کم این نسبت شرایط همگن‌تر را نشان می‌دهد (Katsoulas et al., 2012; Kittas et al., 2012). با توجه به منابع ذکر شده دامنه کمبود فشار بخار به صورت: $0/2 < \text{VPD} < 0/4$ نامطلوب، صدمه به گیاه و کاهش محصول؛ $0/43 - 0/20$ رشد بیماری‌های قارچی؛ $0/43 - 1/0$ دامنه مطلوب برای رشد گیاه؛ $1/0 > \text{VPD}$ تنش آبی و کاهش رشد گیاه، تقسیم‌بندی شد.

نتایج و بحث

اندازه‌گیری اول از ساعت ۱۴:۰۰ روز ۱۳۹۶/۱۰/۲۰ تا ساعت ۱۴:۰۰ روز ۱۳۹۶/۱۰/۲۱ انجام شد و شاخص سطح برگ گوجه فرنگی $3/35 \text{ m}^2/\text{m}^2$ بدست آمد. در این تاریخ دریچه‌های جانبی سمت غرب و شرق به ترتیب ۰/۳ متر ($12/6 \text{ m}^2$) و ۰/۴ متر ($2/4 \text{ m}^2$) باز بودند. میانگین VPD شبانه روز، روزانه و شبانه به ترتیب ۰/۶۹، ۰/۹۰ و ۰/۵۱ کیلو پاسکال بود که در دامنه مطلوب قرار داشتند (جدول ۲). مقدار میانگین VPD در ارتفاع‌های ۱۴۰ و ۲۲۰ سانتی‌متر نیز به ترتیب برابر ۰/۶۱، ۰/۷۶ کیلو پاسکال بود. حداقل VPD مشاهده شده ۰/۲ kPa و حداکثر آن ۱/۹ kPa بود (شکل ۲). بررسی توزیع VPD در ساعات مختلف شبانه روز نشان داد با وجود قرار گرفتن میانگین VPD در دامنه مطلوب در ساعات شبانه در قسمت غربی مقدار VPD کمتر از ۰/۴۳ kPa بود که می‌تواند سبب رشد بیماری‌های قارچی شود (Prenger and Ling, 2001). بررسی ساعتی این متغیر نشان داد کاهش VPD به زیر ۰/۴۳ kPa در ساعاتی از شب تا نیمی از گلخانه را فرا گرفته بود و این شرایط تا ساعت ۱۱:۰۰ نیز ادامه یافت. ولی در ساعت ۱۴:۰۰ در تمام گلخانه VPD به بالاتر از ۱/۰ kPa (۱/۱ kPa تا ۱/۷ kPa) رسید. این وضعیت نشان می‌دهد در حالی که در شب به دلیل عدم تهویه و پایین بودن دما، رطوبت بالا رفته و VPD کاهش یافته، در ساعت ۱۴:۰۰ محصول تحت تنش خشکی هوا قرار گرفته است. این در حالی است که توزیع میانگین روزانه VPD در سطح گلخانه در شرایط مطلوب قرار داشت (شکل ۴). در فاصله بین باز شدن دریچه‌های جانبی در ساعت ۰۸:۳۰ تا حدود ظهر که هوای داخل گلخانه گرم می‌شود، ورود هوای سرد از دریچه تهویه غربی با پایین آوردن دما در این ناحیه سبب کاهش ظرفیت نگهداری رطوبت هوا شده (Konopacki et al., 2018) و در نتیجه مقدار VPD در این ناحیه از قسمت شرقی گلخانه کمتر است. این غیر یکنواختی خود را در ضریب تغییرات افقی VPD نشان می‌دهد (جدول ۲). ضریب تغییرات کمبود فشار بخار در روز ۰/۳۲ و در شب ۰/۰۹ است. کمبود فشار بخار شبانه یکنواخت‌تر

برای تعرق مناسب بوده است در نتیجه مقدار تعرق در شب بر توزیع مقدار کل تعرق موثر بوده است.

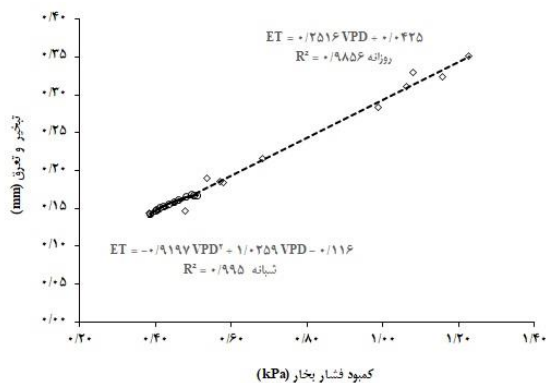
جدول ۲- مقادیر متوسط و ضریب تغییرات تعرق و کمبود فشار بخار

		۱۳۹۶/۱۰/۲۰	۱۳۹۶/۱۰/۲۷	۱۳۹۷/۰۳/۲۰	۱۳۹۷/۰۵/۰۷
		کمبود فشار بخار	کمبود فشار بخار	کمبود فشار بخار	کمبود فشار بخار
		(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)
میانگین	کل	-۰/۶۹	۴/۷۱	۴/۷۱	۴/۷۳
	ارتفاع ۱	-۰/۶۱	۰/۵۹	۱/۵۹	۴/۷۰
	ارتفاع ۲	۰/۷۶	۰/۷۲	۱/۸۷	۴/۷۷
روزانه	کل	-۰/۹۰	۲/۶۷	۲/۴۶	۶/۲۱
	ارتفاع ۱	-۰/۷۹	۰/۶۸	۲/۴۵	۶/۵۲
	ارتفاع ۲	۱/۰	۰/۸۱	۲/۹۱	۶/۶۷
شبانه	کل	-۰/۵۱	۲/۰۵	۲/۲۵	۲/۱۲
	ارتفاع ۱	-۰/۴۵	۰/۵۱	۰/۱۵	۲/۱۲
	ارتفاع ۲	-۰/۵۶	۰/۶۵	۰/۱۳	۲/۱۰
ضریب تغییرات ۲۴ ساعته	کل	-۰/۴۷	-۰/۳۷	۰/۳۶	۰/۹۰
	ارتفاع ۱	-۰/۴۹	۰/۴۰	۱/۰۰	-۰/۶۸
	ارتفاع ۲	-۰/۴۵	۰/۳۴	۱/۰۱	-۰/۷۱
ضریب تغییرات توزیع افقی	کل	-۰/۲۷	-۰/۲۳	۰/۱۹	۰/۲۰
	ارتفاع ۱	-۰/۲۹	۰/۲۳	۰/۱۷	-۰/۰۵
	ارتفاع ۲	-۰/۲۲	۰/۱۸	۰/۱۸	-۰/۰۶

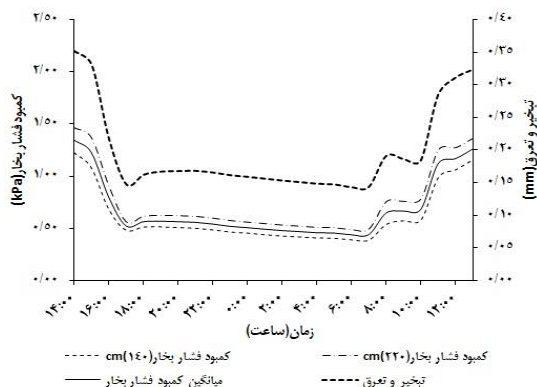
ارتفاع ۱ و ارتفاع ۲ به ترتیب ارتفاع ۱۴۰ و ۲۲۰ سانتی متری از کف گلخانه در تاریخ‌های ۱۳۹۶/۱۰/۲۰، ۱۳۹۶/۱۰/۲۷ و ۱۳۹۷/۰۳/۲۰

ارتفاع ۱ و ارتفاع ۲ به ترتیب ارتفاع ۶۰ و ۲۲۰ سانتی متری از کف گلخانه در تاریخ ۱۳۹۷/۰۵/۰۷

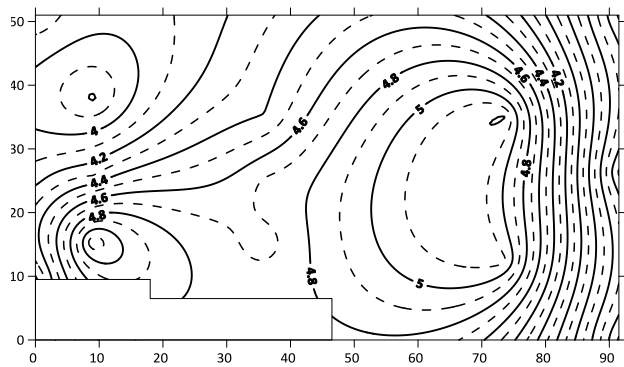
کل تمام نقاط اندازه‌گیری در ارتفاع‌های ۱ و ۲



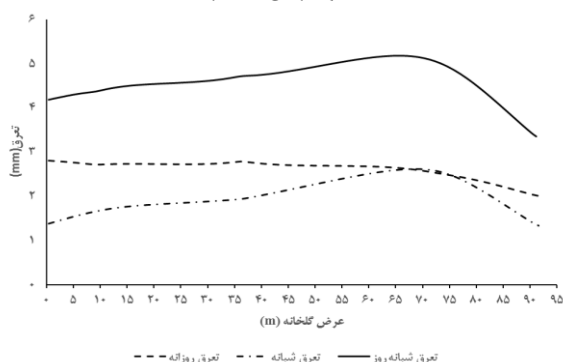
شکل ۳- رابطه کمبود فشار بخار و تعرق در تاریخ ۱۳۹۶/۱۰/۲۰



شکل ۲- تغییرات کمبود فشار بخار و تعرق در تاریخ ۱۳۹۶/۱۰/۲۰

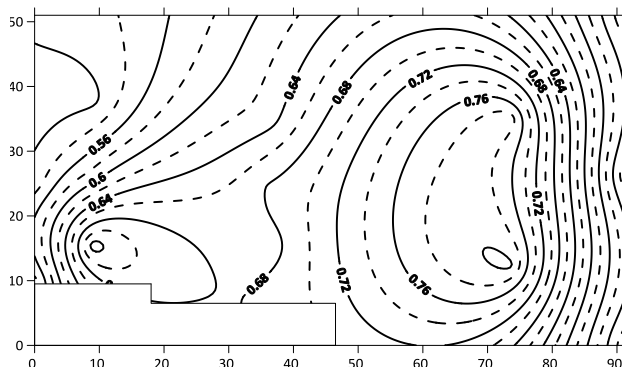


شکل ۵- توزیع مجموع تعرق شبانه روز در تاریخ ۱۳۹۶/۱۰/۲۰ (طول و عرض به متر)

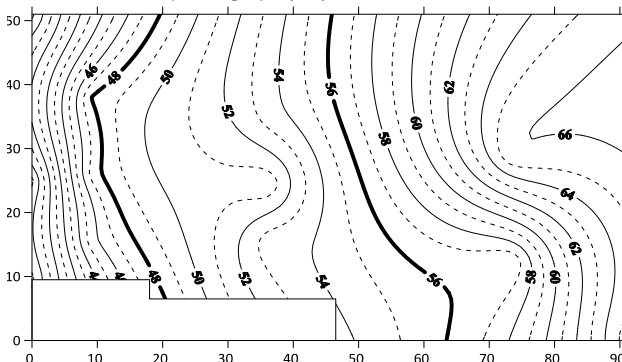


شکل ۷- نیمرخ طولی جنوب غربی به شمال شرقی تعرق در تاریخ ۱۳۹۶/۱۰/۲۰

مقاومت روزنه‌ای به علت عدم وجود نور دانست (Castilla, 2013) همانند اندازه‌گیری قبلی روند تعرق ۲۴ ساعته همخوانی زیادی با روند میانگین VPD دارد (شکل ۸). نتایج نشان داد تغییرات مجموع تعرق روزانه در سطح گلخانه به گونه‌ای است که درصد تفاوت حداکثر و حداقل تعرق در سطح گلخانه به ۲۴ تا ۴۸ درصد می‌رسد که با نتایج (Boulard and Wang, 2002) همخوانی دارد. بررسی توزیع مکانی VPD در ساعت ۰۶:۰۰ نشان می‌دهد ناحیه غربی گلخانه دارای مقادیر کمتر VPD نسبت به ناحیه شرقی گلخانه است (شکل ۱۰). بررسی توزیع VPD در ساعت ۱۴:۰۰ نشان می‌دهد در مجموع گلخانه در شرایط مطلوب قرار دارد (شکل ۱۱). هر چند توزیع VPD در این دو تاریخ مشابه است اما مقدار VPD در تاریخ ۱۳۹۶/۱۰/۲۰ (۱/۳۵ kPa) بیشتر از ۱۳۹۶/۱۰/۲۷ (۱/۰۵ kPa) می‌باشد. علت آن را می‌توان شرایط هوای ورودی به گلخانه دانست به طوری که در ساعت ۱۴:۰۰ دمای بادی که از دریچه غربی وارد گلخانه می‌شد در اندازه‌گیری اول و دوم به ترتیب برابر $16/5^{\circ}\text{C}$ و $12/9^{\circ}\text{C}$ و رطوبت نسبی هوا $36/7$ و $38/1$ درصد بود. دمای بالاتر در رطوبت تقریباً برابر سبب خشکی بیشتری شده است.

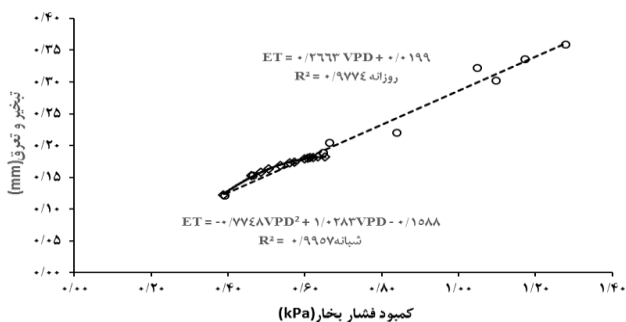


شکل ۶- توزیع متوسط کمبود فشار بخار شبانه روز در تاریخ ۱۳۹۶/۱۰/۲۰ (طول و عرض به متر)

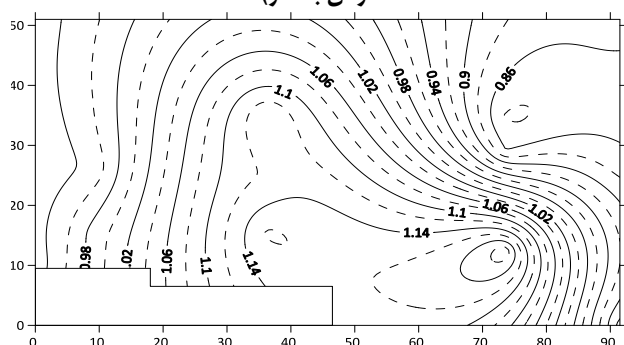


شکل ۸- توزیع رطوبت نسبی گلخانه در ساعت ۱۴:۰۰ تاریخ ۱۳۹۶/۱۰/۲۰ (طول و عرض به متر)

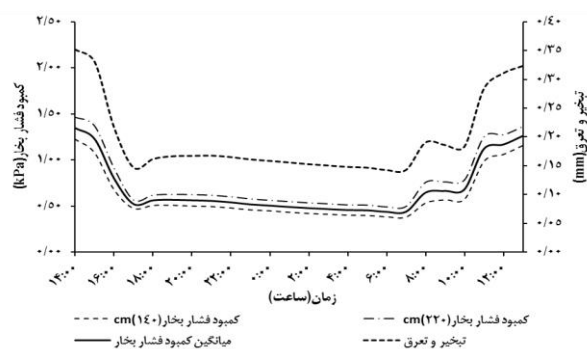
اندازه‌گیری دوم از ساعت ۱۴:۰۰ روز ۱۳۹۶/۱۰/۲۷ تا ساعت ۱۴:۰۰ روز ۱۳۹۶/۱۰/۲۸ انجام شد. با توجه عدم تغییر پوشش گیاهی نسبت به اندازه‌گیری قبلی در این تاریخ نیز شاخص سطح برگ $3/35 \text{ m}^2/\text{m}^2$ در نظر گرفته شد. دریچه‌های سمت غرب و شرق به ترتیب $0/3 \text{ m}$ متر ($12/6 \text{ m}^2$) و $0/4 \text{ m}$ متر ($20/4 \text{ m}^2$) باز بودند. میانگین VPD شبانه روز، روزانه و شبانه در حدود مناسب برای محصول قرار دارند (جدول ۲). از ساعت ۱۶:۰۰ تا ۱۷:۰۰ مقدار متوسط VPD به کمتر از $0/43 \text{ kPa}$ و از ساعت ۱۱:۰۰ تا ۱۳:۰۰ به بیشتر از $1/0 \text{ kPa}$ می‌رسد (شکل ۸). در این تاریخ نیز رابطه بین تعرق و کمبود فشار بخار در روز به صورت خطی و در شب درجه دو بدست آمده است (شکل ۹) که نشان می‌دهد در طول روز با وجود بالا بودن کمبود فشار بخار بالاتر از $1/1 \text{ kPa}$ (Castilla, 2013) کاهش تعرق صورت نگرفته و توان گیاه برای تعرق با خشکی هوا کاهش نیافته است. در واقع خشکی هوا آنقدر زیاد نیست که سبب بسته شدن روزنه‌ها شود (Grange and Hand, 1987; Ponce et al., 2015). در شب تعرق به صورت خطی افزایش نیافته و پس از حدود کمبود فشار بخار $0/6 \text{ kPa}$ به حد نسبتاً ثابتی می‌رسد. دلیل آن را نیز می‌توان کمتر بودن کمبود فشار بخار هوا نسبت به روز و افزایش



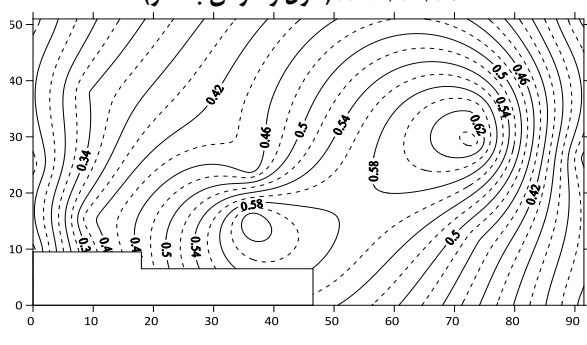
شکل ۹- رابطه کمبود فشار بخار و تعرق در تاریخ ۱۳۹۶/۱۰/۲۷ (طول و عرض به متر)



شکل ۱۱- توزیع کمبود فشار بخار در ساعت ۱۴:۰۰ تاریخ ۱۳۹۶/۱۰/۲۷ (طول و عرض به متر)



شکل ۸- تغییرات کمبود فشار بخار و تعرق در تاریخ ۱۳۹۶/۱۰/۲۷ (طول و عرض به متر)



شکل ۱۰- توزیع کمبود فشار بخار در ساعت ۶:۰۰ تاریخ ۱۳۹۶/۱۰/۲۷ (طول و عرض به متر)

ساعت ۰۵:۰۰ مشاهده شد که بیشترین مقدار متوسط ساعتی رطوبت نسبی (۹۴/۶ درصد) و کمترین متوسط ساعتی دما (۱۲/۳°C) نیز در آن ساعت ثبت شده است. در خرداد کوره‌ها خاموش بودند و میانگین دمای شب داخل گلخانه ۱۴/۴°C (دامنه ۱۷/۷°C - ۱۲/۷°C) بود. متوسط دمای شب خارج از گلخانه ۱۶/۶°C (دامنه ۱۹/۶°C - ۱۳/۰°C) بود. علت کمتر بودن دمای داخل گلخانه نسبت به خارج گلخانه در شب پدیده وارونگی حرارتی^۱ است که در شب‌های صاف و آرام وقتی تلفات تشعشی از گلخانه به آسمان بیشتر از مقدار ورودی به آن است، رخ می‌دهد (Castilla, 2013). تهویه طبیعی به دلیل آرام بودن هوا (سرعت باد کمتر از ۰/۳ متر بر ثانیه) و پدیده وارونگی دمایی (سردتر و در نتیجه سنگین‌تر بودن هوای داخل گلخانه از محیط پیرامونی و نیز سکون هوا) به خوبی صورت نمی‌گرفت. با کاهش دما و سکون هوای داخل گلخانه مقدار رطوبت شبانه به شدت افزایش یافت. در این شب پایین‌ترین میانگین VPD در کل اندازه‌گیری‌ها مشاهده می‌شود که دلیل آن پایین بودن دما (۱۴/۴°C) و بالا بودن رطوبت (۹۲/۰ درصد) است. رابطه بین کمبود فشار بخار و تعرق

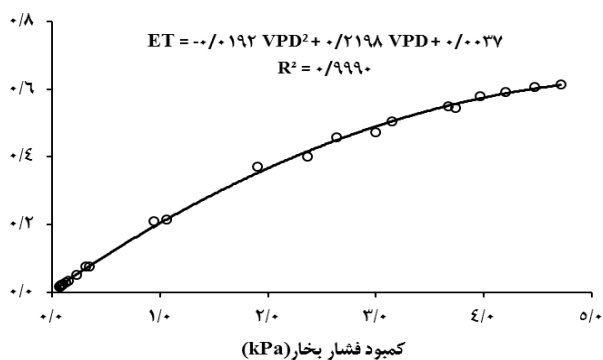
اندازه‌گیری سوم از ساعت ۱۵:۰۰ روز ۱۳۹۷/۰۳/۲۰ تا ساعت ۱۵:۰۰ روز ۱۳۹۷/۰۳/۲۱ انجام شد. محصول کشت شده در این تاریخ خیار بود و شاخص سطح برگ ۳/۱۹ m²/m² بدست آمد. درپچه سمت غرب ۰/۲۶ متر (۱۰/۹ m²)، درپچه سمت شرق ۰/۱۲ متر (۶/۱ m²) و درپچه انتهایی ۱/۱۷ متر (۱۰۳/۵ m²) باز بودند. به دلیل روشن بودن فن‌ها از ساعت ۰۸:۳۰ تا ۲۰:۰۰ درپچه‌های جانبی باز شدگی کمتری داشتند تا جریان هوا از درپچه انتهایی وارد و پس از عبور از میان ردیف‌ها رطوبت و حرارت زیادی توسط فن‌های خروجی از گلخانه خارج شوند.

میانگین VPD در طول شبانه روز از مقدار حداکثر (۱ kPa) بالاتر بود (جدول ۲). متوسط VPD در روز و شب به ترتیب برابر با ۰/۶۸ kPa (تنش خشکی) و ۰/۱۴ kPa (رطوبت بالا) است. این اختلاف شدید بین VPD در روز و شب خود را به صورت ضریب تغییرات بزرگ ۲۴ ساعته نشان داد (جدول ۲). اما مقدار ضریب تغییرات میانگین ساعتی توزیع افقی VPD سطح گلخانه کم بود که نشان از یکنواختی آن در سطح گلخانه در هر ساعت بود. مقدار VPD از ساعت ۲۲:۰۰ به زیر ۰/۲ kPa نزول پیدا می‌کند و تا ساعت ۰۶:۰۰ ادامه می‌یابد (شکل ۱۲). کمترین VPD برابر با ۰/۰۶ kPa در

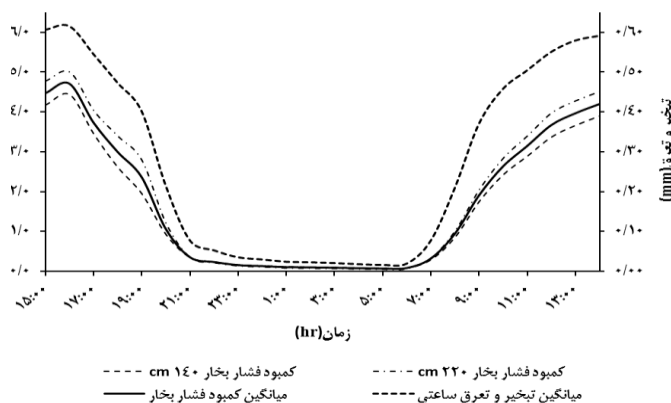
1 - Thermal inversion

بهار بیشتر باشد. دوم میانگین دمای روز و شب در این تاریخ به ترتیب $29/3^{\circ}\text{C}$ و $14/4^{\circ}\text{C}$ است، در حالی که در تاریخ $1396/10/20$ به ترتیب $22/7^{\circ}\text{C}$ و $16/4^{\circ}\text{C}$ است. در واقع تفاوت دما در شب و روز در $19/4^{\circ}\text{C}$ و $18/1^{\circ}\text{C}$ است. در واقع تفاوت دما در شب و روز در اندازه‌گیری زمستان بسیار کمتر از اندازه‌گیری بهار بوده است و به دلیل کارکرد کوره‌ها دمای شب در دی بیشتر از خرداد است. شرایط وارونگی حرارتی، کاهش دما و سکون هوا سبب افزایش رطوبت و کاهش شدید کمبود فشار بخار در شب شده بود که این خود بر کاهش تعرق در شب موثر بوده است. این شرایط سبب شده تا ضریب تغییرات ۲۴ ساعته تعرق $0/90$ شود که $2/5$ برابر مقادیر بدست آمده در زمستان می‌باشد. اما ضریب تغییرات افقی میانگین ساعتی تعرق $0/20$ بدست آمده که تقریباً برابر با مقادیر محاسبه شده در زمستان است. یعنی هرچند در طی شبانه روز تغییرات تعرق زیاد است ولی توزیع افقی میانگین ساعتی تعرق در سطح گلخانه تقریباً یکنواخت است.

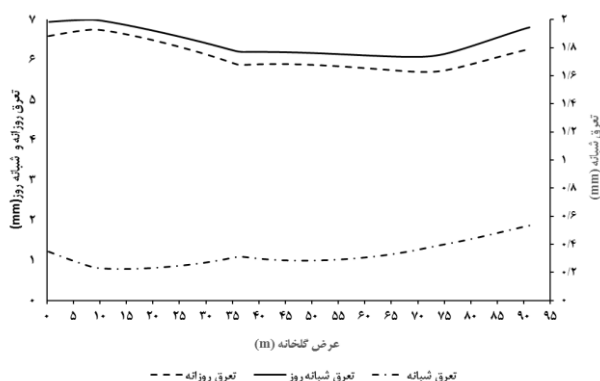
(شکل ۱۳) نشان می‌دهد هر چند تعرق به حد نسبتاً ثابتی رسیده ولی با وجود رسیدن کمبود فشار بخار هوا به $4/71\text{ kPa}$ شاهد کاهش تعرق نمی‌باشیم. در این نمودار تمام نقاط بالاتر از کمبود فشار بخار $1/0\text{ kPa}$ مربوط به روز هستند و مقادیر کم مشاهده شده مربوط به شب و صبح قبل از شروع به کار فن‌های خروجی می‌باشد. به طوری که میانگین کمبود فشار بخار ساعت $07:00$ تا $08:00$ برابر $0/31\text{ kPa}$ است ولی میانگین ساعت $08:00$ تا $09:00$ به $0/94\text{ kPa}$ می‌رسد. در واقع از ساعت $08:30$ که فن‌ها شروع به کار کرده‌اند با خروج رطوبت همراه با افزایش دمای محیط از $15/3^{\circ}\text{C}$ به $20/3^{\circ}\text{C}$ طی همین مدت مقدار کمبود فشار بخار افزایش یافته است. مقدار مجموع تعرق ۲۴ ساعته $6/50$ میلی‌متر است که سهم تعرق روز با $6/21$ میلی‌متر $95/5$ درصد کل تعرق است. نسبت به اندازه‌گیری زمستان که سهم تعرق شبانه بین 43 تا 48 درصد کل تعرق است سهم تعرق شبانه در این تاریخ $4/5$ درصد است. علت این تفاوت می‌تواند چند جنبه داشته باشد. اول طول متفاوت روز و شب در زمستان و بهار که سبب می‌شود مقدار تجمعی تعرق در طول روز در



شکل ۱۳- رابطه کمبود فشار بخار و تبخیر و تعرق در تاریخ $1397/03/20$



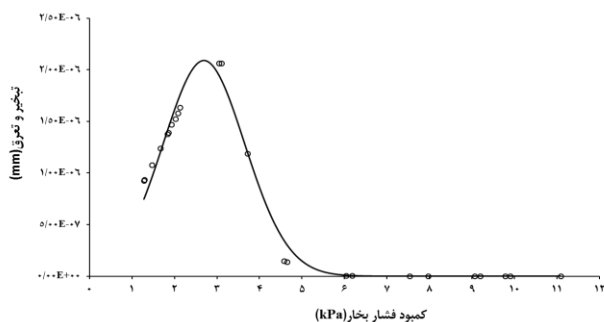
شکل ۱۲- تغییرات کمبود فشار بخار و تبخیر و تعرق در تاریخ $1397/03/20$



شکل ۱۴- رابطه کمبود فشار بخار و تعرق در تاریخ $1396/10/27$

تعرق محاسبه شده نیز بسیار کم است و در جدول ۲ آورده نشده است. ولی برای داشتن درک بهتر در شکل ۱۵ مقدار تعرق در مقابل کمبود فشار بخار رسم شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود به دلیل مقدار بالای کمبود فشار بخار در طول روز عملاً گیاه به سبب بسته شدن روزنه‌ها (Grange and Hand, 1987; Ponce et al., 2015) قادر به تعرق نیست ولی در شب با کم شدن این مقدار تعرق صورت می‌گیرد. در حالی که در اندازه‌گیری‌های پیشین تغییرات تعرق منطبق بر کمبود فشار بخار بود. در این اندازه‌گیری به دلیل افزایش شدید کمبود فشار بخار شرایط عکس آن است و با افزایش کمبود فشار بخار مقدار تعرق کاهش می‌یابد. در شکل ۱۶ رابطه کمبود فشار بخار با تعرق نشان می‌دهد بعد از کمبود فشار بخار ۳/۱۱ kPa مقدار تعرق بشدت کاهش یافته و از حدود ۴/۵ kPa به بعد تقریباً به صفر میل پیدا می‌کند که با نتیجه (Montero et al., 2001) مبنی بر کاهش نیافتن مقاومت پوشش گیاهی (در واقع مقاومت روزنه‌ای) از کمبود فشار بخار ۱/۴ kPa تا ۳/۴ kPa همخوانی دارد.

در این شب میانگین سرعت باد ۰/۶۸ متر بر ثانیه بود که جریان هوای کم (سرعت باد از ۰/۳ تا ۱/۵ متر بر ثانیه) در نظر گرفته می‌شود و با توجه به صاف بودن آسمان در این تاریخ نیز شاهد پدیده وارونگی حرارتی هستیم. رطوبت نسبی شب داخل گلخانه و محیط پیرامونی به ترتیب ۳۶/۶ و ۲۶/۴ درصد است. وارونگی حرارتی در این تاریخ با کاهش دما و افزایش رطوبت داخل گلخانه باعث کم شدن VPD شده است هرچند هنوز از حدود مجاز بسیار بالاتر است و عملاً کنترلی روی آن نیست.

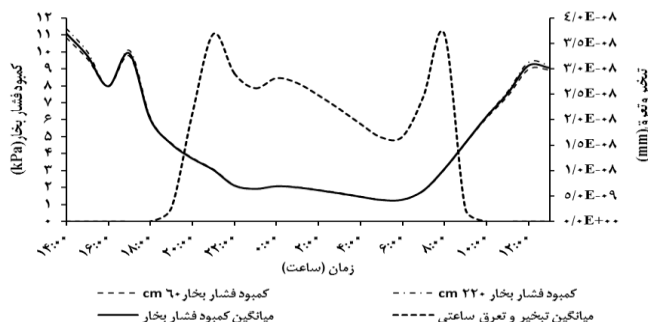


شکل ۱۶- تغییرات کمبود فشار بخار و تبخیر و تعرق در تاریخ ۱۳۹۷/۰۵/۰۷

گلخانه کمک کند. به عنوان نمونه میانگین VPD در فصل سرد سال در دامنه مطلوب قرار دارد، اما نتایج نشان داد که قسمت غربی گلخانه مستعد رشد بیماری‌های قارچی بود که به صورت مشاهده‌ای نیز بوته‌های بیمار و از بین رفته در این قسمت گلخانه قرار داشتند. در فصل گرم سال شب‌ها به دلیل صافی هوا، عدم وجود یا سرعت بسیار کم

بررسی توزیع مجموع تعرق روزانه در سطح نشان داد که درصد تفاوت حداکثر و حداقل تعرق در سطح گلخانه به ۲۸ درصد می‌رسد که با نتایج (Ferentinos et al., 2017) هم‌خوانی دارد. در شکل ۱۴ نیمرخ طولی جنوب غربی به شمال شرقی تعرق نشان می‌دهد مقدار تعرق در طول روز از جنوب غربی به شمال شرقی روند کاهشی و در شب افزایشی دارد که با مطالعات (Ferentinos et al., 2017) و (Boulard and Wang, 2002) هم‌خوانی دارد. همانند تحقیق (Ferentinos et al., 2017) که در تابستان انجام شده بود، تعرق ۲۴ ساعته از سمت جنوب غربی به شمال شرقی روند افزایشی دارد.

اندازه‌گیری چهارم از ساعت ۱۴:۰۰ روز ۱۳۹۷/۰۵/۰۷ تا ساعت ۱۴:۰۰ روز ۱۳۹۷/۰۵/۰۸ انجام شد. میانگین VPD در تمام شرایط بالاتر از حد مجاز است (جدول ۲ و شکل ۱۵). در اوائل رشد حداقل و حداکثر حدود مطلوب کمبود فشار بخار به ترتیب ۰/۲ kPa و ۰/۸۴۵ kPa و حدی که بالاتر از آن VPD برای محصول مخرب است ۲/۲۴۸ kPa می‌باشد (Shamshiri et al., 2018). مقادیر محاسبه شده جز در شب که مقدار آن نزدیک به حد بالای VPD مخرب است، در باقی شرایط بسیار بالاتر از آن است. در تمام ساعات شبانه روز مقدار متوسط ساعتی $VPD \geq 1/27$ kPa که از حد مجاز بالاتر است (شکل ۱۵). میانگین کمبود فشار بخار ۲۴ ساعته ۴/۷۳ است. میانگین کمبود فشار بخار روزانه و شبانه به ترتیب ۶/۵۹ و ۲/۱۲ است (جدول ۲ و شکل ۱۵) که مقدار روزانه آن قابل مقایسه با نتایج (Katsoulas et al., 2012) در تهویه طبیعی می‌باشد. با توجه به اینکه شاخص سطح برگ بسیار کوچک بود ($0/0018 \text{ m}^2/\text{m}^2$) مقدار



شکل ۱۵- تغییرات دما و رطوبت در تاریخ ۱۳۹۷/۰۵/۰۷

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد با وجود میانگین مطلوب مقادیر کمبود فشار بخار، دامنه این مقادیر چه در ساعات مختلف، چه در سطح گلخانه می‌تواند بسیار متغیر باشد و شناخت توزیع این متغیر می‌تواند به مدیریت بهتر

فرآورده‌های گلخانه‌ای در ایران. گزارش نهایی پژوهشی. فرهنگستان علوم جمهوری اسلامی ایران.

وزارت جهاد کشاورزی. عملکرد گلخانه‌های کشور طی سال‌های ۹۳-۱۳۹۰. ۱۳۹۴. معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات، تهران.

وزارت جهاد کشاورزی. گزارش اطلاعات سطح، تولید و عملکرد در هکتار محصولات باغبانی کل کشور در سال ۱۳۹۶. ۱۳۹۷. معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات، تهران.

Barker, J.C., Welles, G.W.H and van Uffelen, J.A.M. 1987. The effects of day and night humidity on yield and quality of glasshouse cucumbers. *J Hort Sci* 62(3): 363-370.

Bakker, J.C. 1990. Effects of day and night humidity on yield and fruit quality of glasshouse tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *J Hort Sci* 65: 323-331.

Balendonck, J., Sapounas, A.A., Kempkes, F., Van Os, E.A., Van der Schoor, R., Van Tuijl, B.A.J and Keizer, L.C.P. 2014. Using a wireless sensor network to determine climate heterogeneity of a greenhouse environment. *Acta Hort* 1037: 539-546.

Balendonck, J., Van Os, E.A., Van der Schoor, R., Van Tuijl, B.A.J and Keizer, L.C.P. 2010. Monitoring spatial and temporal distribution of temperature and relative humidity in greenhouses based on wireless sensor technology. In *AgEng 2010: Towards environmental technologies*, Clermont-Ferrand, France.

Bartzanas, T., Boulard, T. and Kittas, C. 2004. Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse. *Biosyst Eng* 88(4): 479-490.

Castilla, N. 2013. *Greenhouse technology and management*. 2nd ed. CABI.

De Pascale, D., Stanghellini, C. 2011. High temperature control in Mediterranean greenhouse production: the constraints and the options. *Acta Hort* 893: 103-116.

Donatelli, M., Bellocchi, G. and Carlini, L. 2006. Sharing knowledge via software components: Models on reference evapotranspiration. *EUR J AGRON* 24: 186-192.

Fazlil-Ilahil, W. F. 2009. *Evapotranspiration models in greenhouse*. MSc, Wageningen agricultural University, Wageningen, Netherlands.

Ferentinos, K.P., Katsoulas, N., Tzounis, A., Bartzanas, T and Kittas, C. 2017. Wireless sensor networks for greenhouse climate and plant condition assessment. *Biosyst Eng* 153: 70-81. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2016.11.005

باد شاهد پدیده وارونگی حرارتی در نتیجه کاهش دما و افزایش رطوبت نسبی داخل گلخانه نسبت به محیط پیرامونی هستیم که نشان دهنده عدم کارایی تهویه طبیعی برای ایجاد شرایط مطلوب در گلخانه است. در اندازه‌گیری خرداد با استفاده از تجهیزات موجود (کوره‌ها و فن‌های خروجی) یا پوشش پلی اتیلن IR (IR-PE) با جلوگیری از وارونگی هوا در گلخانه امکان بهبود شرایط محیطی داخل گلخانه وجود داشت. توزیع تعرق تقریباً منطبق بر توزیع کمبود فشار بخار در گلخانه است که نشان دهنده تاثیر زیاد کمبود فشار بخار بر تعرق است. تغییرات مجموع تعرق روزانه در سطح گلخانه به گونه‌ای است که در اندازه‌گیری‌های زمستان درصد تفاوت حداکثر و حداقل تعرق در سطح گلخانه به ۲۱ تا ۴۶ و در بهار به ۲۸ درصد می‌رسد. علت اینکه در خرداد درصد تفاوت حداکثر و حداقل تعرق کمتر از دی است را می‌توان به درصد بالای مقدار تعرق روزانه از کل تعرق در خرداد (۹۵٪) نسبت به دی (۵٪) دانست. نتایج نشان داد برای بیان وضعیت اقلیمی گلخانه استفاده از میانگین پارامترهای اقلیمی نظیر کمبود فشار بخار بدون در نظر گرفتن توزیع مکانی (در سطح گلخانه) و زمانی (شبان روز) آنها سبب بروز خطا در تنظیم شرایط اقلیمی گلخانه می‌شود. شناخت تفاوت‌های مقدار و توزیع تعرق نیز می‌تواند در بهینه کردن برنامه آبیاری با هدف افزایش کارایی و کاهش مصرف آب استفاده شود.

منابع

رضوانی، س.، دهقانی سانجیح، بیات ف.، زارع ایبانه، ح. ۱۳۹۵. تعیین عمق و دور آبیاری برای زراعت گلخانه‌ای گوجه‌فرنگی در منطقه همدان. *مجله آبیاری و زهکشی ایران*. ۱۰: ۶-۷۷۰-۷۸۵.

رضوانی، س.، سلگی، م. ۱۳۹۴. ارزیابی فنی و اقتصادی مصرف و بازده انرژی در کشت خیار گلخانه‌های استان همدان. گزارش نهایی پژوهشی. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. شماره ثبت ۴۸۴۴۷.

زارعی، ق. چالش‌های سازهای گلخانه‌ها در ایران. ۱۳۹۶. *مجله پژوهش‌های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی*. ۲: ۱۶۲-۱۴۹.

زارعی، ق.، سالمی، ح.، ر.، رضوانی، س. و اسفندیاری، ص. ۱۳۹۷. تعیین نیازآبی خیار گلخانه‌ای در سطح کشور. گزارش نهایی پژوهشی. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. شماره ثبت ۵۴۲۴۷.

خوشخوی، م.، مبللی، م.، عزیززی، م.، وحدتی، ک.، گریگوریان، و.، تفضلی، ع. ۱۳۹۶. بررسی مسائل و مشکلات گلخانه‌ها و

- high temperatures and low humidities in greenhouses. *Agr. For. Meteorol.* 107:323-332.
- Mott, K.A and Peak, D. 2010. Stomatal responses to humidity and temperature in darkness. *Plant, Cell and Environment.* 33: 1084-1090.
- Pamungkas, A. P., Hatou, K and Morimoto, T. 2014. Evapotranspiration Model Analysis of Crop Water Use in Plant Factory System. *Environ. Control Biol.* Vol. 52. No. 3: 183-188.
- Prenger, J.J and Ling, P.P. 2001. Greenhouse Condensation Control Understanding and Using Vapor Pressure Deficit (VPD). Fact Sheet AEX-804. The Ohio state University. Wooster OH. 4 p.
- Prenger, J.J., Fynn, R.P and Hansen, R.C. 2002. A comparison of four evapotranspiration models in greenhouse environment. *T ASAE* 45: 1779-1788.
- Ponce, P., Molina, A., Cepeda, P., Lugo, E., Maccleery, B. 2015. Greenhouse design and control. 1st ed. The Netherlands: CRC Press.
- Shamshiri, R., Jones, J., Thorp, K. R., Ahmad, D., Man, H.C. and Taheri, S. 2018. Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: a review. *Int Agrophys* 32: 287-302.
- Stanghellini, C., 1987. Transpiration of greenhouse crops. An aid to climate management. Ph.D. Dissertation. Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 150 pp.
- Tüzel, Y and Öztekin, G.B. 2017. PART III: CROP TECHNOLOGIES: 1 Tomato. In: Baudoin, W., Nersisyan, A., Shamilov, A., Hodder, A., Gutierrez, D., De Pascale, S., Nicola, S., Chairperson, V., Gruda, N., Urban, L and Tany, J., editors. Good agricultural practices for greenhouse vegetable production in the South East European countries: Principles for sustainable intensification of smallholder farms. Fao plant production and protection paper 230. Rome. Italy. Food and agricultural organization of the United Nations, pp. 271-286.
- Grange, R.L and Hand, D.W. 1987. A review of the effects of atmospheric humidity on the growth of horticultural crops. *J Hortic Sci* 62: 125-134.
- Gruda, N., Sallaku, G and Balliu, A. 2017. PART III: CROP TECHNOLOGIES: 2. Cucumber. In: Baudoin W, Nersisyan, A., Shamilov, A., Hodder, A., Gutierrez, D., De Pascale, S., Nicola, S., Chairperson, V., Gruda, N., Urban, L and Tany, J., editors. Good agricultural practices for greenhouse vegetable production in the South East European countries: Principles for sustainable intensification of smallholder farms. Fao plant production and protection paper 230. Rome. Italy. Food and agricultural organization of the United Nations, pp. 287-299.
- Holder, R and Cockshull, K.E. 1990. Effects of humidity on the growth and yield of glasshouse tomatoes. *J Hortic Sci* 65(1): 31-39.
- Katsoulas, N., and Kittas, C. 2008. Impact of greenhouse microclimate on plant growth and development with special reference to the solanaceae. *The Eur J Plant Sci Biotechnol.* 2(special issue 1):31-44.
- Katsoulas, N., Kittas, C and Bartzanas, T. 2012. Microclimate Distribution in a Greenhouse Cooled by a Fog System. *Acta Hort* 927: 773-778.
- Katsoulas, N., Ferentinos, K.P., Tzounis, A., Bartzanas, T and Kittas, C. 2017. Spatially distributed greenhouse climate control based on wireless sensor network measurements. *Acta Hort* 1154: 111-120.
- Kittas, C., Katsoulas, N., Papa, K., Thanasenaris, A and Bartzanas, T. 2012. Improvement of greenhouse microclimate distribution by means of air mixing fans. *Acta Hort* 927: 589-594.
- Konopacki, P.J., Treder, W and Klamkowski, K. 2018. Comparison of vapour pressure deficit patterns during cucumber cultivation in a traditional high PE tunnel greenhouse and a tunnel greenhouse equipped with a heat accumulator. *Span J Agric Res* 16 (1): e0201.
- Montero J. I., Antóna, A., Muñoz, P and Lorenzo, P. 2001. Transpiration from geranium grown under

Distribution of Transpiration and Vapour Pressure Deficit in a Commercial Greenhouse

S. Rezvani¹, H. Zare Abyane^{2,*}, M. Goodarzi³

Received: May.04, 2019

Accepted: Jun.24, 2019

Abstract

The agricultural sector is the main water user in Iran. Water resource constraints have led to the use of new technologies, including greenhouse cultivation, for optimal utilization of these resources. Climatic conditions management is very important in greenhouse cultivation. To investigate the climatic conditions and spatial and temporal distribution of humidity (vapour pressure deficit) and transpiration, a study was carried out in a commercial greenhouse managed by the beneficiary, with an area of 4333 m² with four 24-hours measurements in cold and warm seasons. According to growth stage (height and vegetation volume) 21-33 data loggers recorded temperature and relative humidity in two horizontal levels inside the greenhouse. The study of the distribution of vapour pressure deficit according to existing criteria showed that, despite the desirability of the average range of vapour pressure deficit, their distribution in different hours of the day and at the greenhouse level can be very variable and range from unfavorable to desirable conditions. The distribution of transpiration was almost in line with the distribution of vapor pressure loss in the greenhouse. The percentage difference between the maximum and minimum transpiration of changes in total daily transpiration at the greenhouse level in winter measurements was 21 to 46 in the greenhouse and 28% in the spring. As a result, the expression of the climate of a greenhouse only by using the average climate parameters lead to an error in the climate conditions of the greenhouse, irrespective of spatial distribution (at the greenhouse level) and time (day and night). Also, recognizing differences in the amount and distribution of transpiration can be used to optimize irrigation programming with the aim of increasing efficiency and reducing water consumption.

Keywords: Cucumber, Homogeneity, Humidity, Tomato, Uniformity

1- Ph.D. Candidate, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

2- Professor, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

3- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

(* - Corresponding Author Email: zare@basu.ac.ir)