اندازه‌گیری و مدل‌سازی نیاز آبی و ضریب گیاهی خیار، گوجه‌فرنگی و فلفل با استفاده از میکرولایسیمتر در گلخانه

جهانگیر عابدی کوپایی[1*]، سید سعید اسلامیان[1] و محمدجواد زارعیان[2]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱/۲۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۸/۲۳)

چکیده

آگاهی از میزان تبخیر- تعرق گیاه در هر زمان در مدیریت سیستم‌های آبیاری گلخانه بسیار حائز اهمیت می‌باشد. تغییرات تبخیر-تعرق گیاهی در طول دوره رشد بر اساس نسبت بین تبخیر- تعرق گیاه و تبخیر- تعرق مرجع که به آن ضریب گیاهی (K_c) اطلاق می‌شود، بیان می‌شود. به منظور تعیین میزان تبخیر- تعرق سه گیاه خیار، گوجه‌فرنگی و فلفل، مطالعه‌ای به مدت هفت ماه در داخل گلخانه شیشه‌ای دانشگاه صنعتی اصفهان، با استفاده از میکرولایسیمتر انجام شد. برای به‌دست آوردن بیلان رطوبتی خاک داخل میکرولایسیمترها از روش وزنی استفاده گردید. هم‌زمان، میزان تبخیر- تعرق مرجع با استفاده از یک لایسیمتر زهکش‌دار تعیین گردید. نتایج نشان داد که مقدار کل تبخیر- تعرق مرجع در گلخانه طی هفت ماه انجام پژوهش، ۸۲۴ میلی‌متر بود. هم‌چنین مقدار کل تبخیر- تعرق خیار طی سه ماه و نیم دوره رشد ۲۰۲ میلی‌متر، گوجه‌فرنگی طی شش ماه دوره رشد ۵۲۴ میلی‌متر و برای فلفل طی هفت ماه دوره رشد ۶۶۷ میلی‌متر به‌دست آمد. تغییرات هفتگی ضریب گیاهی گیاهان مختلف طی دوره رشد نشان دهنده روند متغیر ضریب گیاهی بود، به نحوی که برای خیار مقدار متوسط ضریب گیاهی در دوره‌های ابتدایی، رشد و توسعه، میانی و پایانی به ترتیب ۰/۴۱، ۰/۶۹، ۰/۹۸ و ۰/۷۷ به‌دست آمد. برای گوجه‌فرنگی، این مقادیر به ترتیب ۰/۴۴، ۰/۶۸، ۱/۱۵ و ۰/۶۸ بود. برای فلفل نیز مقادیر ۰/۲۵، ۰/۵۳، ۱/۰۳ و ۰/۷۵ برای این مراحل رشد به‌دست آمد. برای یافتن ارتباط میان داده‌های اقلیمی گلخانه با میزان تبخیر- تعرق گیاه، با استفاده از نرم افزار SPSS اقدام به مدل‌سازی فرایند تبخیر- تعرق گردید. نتایج نشان داد که بهترین مدل پیشنهادی شامل یک معادله رگرسیونی غیر خطی مبتنی بر دمای متوسط روزانه، تشعشع خورشیدی و ارتفاع گیاه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: گلخانه، تبخیر- تعرق، رطوبت خاک، مرحله رشد گیاه

مقدمه

در کشور ایران با متوسط ریزش‌های آسمانی۲۵۲ میلی‌متر در سال و شرایط آب و هوائی خشک و نیمه‌خشک، استفاده بهینه از منابع محدود آب، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (۴). افزایش جمعیت و به موازات آن، افزایش تقاضا برای محصولات کشاورزی و هم‌چنین فصلی بودن تولید محصولات سبب شده که برای تأمین نیاز موجود راهکارهایی در نظر گرفته شود تا هم میزان تولید افزایش یابد و هم امکان تولید محصولات در خارج از فصل میسر باشد. از جمله این راهکارها کشت محصولات (اعم از سبزی و میوه) در گلخانه است (۷). سطح زیر کشت محصولات گلخانه‌ای طی سالیان اخیر افزایش چشمگیری داشته، که نشانگر رشد شتابان این صنعت مهم در ایران است (۳).

۱. دانشیاران گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: koupai@cc.iut.ac.ir

تاکنون تحقیقات متعددی در زمینه کشت‌های گلخانه‌ای صورت گرفته، اما تعیین نیاز آبی و برنامه‌ریزی آبیاری گیاهان گلخانه‌ای کمتر مورد توجه واقع شده است (۱). عدم مدیریت صحیح سیستم آبیاری در گلخانه مشکلاتی را به همراه خواهد داشت. به عنوان مثال، تخمین کم نیاز آبی و در نتیجه اعمال کم‌آبیاری باعث بروز علائمی نظیر توقف رشد، کوچکتر شدن برگ، کوتاه شدن فاصله میان گره‌ها، بد شکل شدن و ریزش برگ‌ها، سوختگی حاشیه برگ‌ها و کاهش عملکرد می‌شود. از طرف دیگر، آبیاری بیش از حد علاوه بر این‌که باعث افزایش رطوبت خاک و رطوبت زیر پوشش گلخانه می‌شود، موجب کاهش عبور نور به داخل گلخانه می‌گردد. در نتیجه، گیاهان دچار مشکلاتی نظیر افزایش ارتفاع، آبدار شدن ساقه و نرم و شکننده شدن آن، کاهش اکسیژن خاک و صدمه به ریشه و عدم جذب آب و مواد غذایی و در نهایت پژمردگی و توقف رشد می‌شوند (۲). بنابراین، با توجه به موارد فوق‌الذکر و دانستن اهمیت کشت‌های گلخانه‌ای، تخمین صحیح و دقیق نیاز آبی این گیاهان به منظور داشتن یک مدیریت خوب و مؤثر در آبیاری در شرایط کنترل شده گلخانه، امری اجتناب ناپذیر می‌باشد (۱۰).

در رابطه با مدیریت آبیاری و نیاز آبی گیاهان گلخانه‌ای، در دنیا مطالعات متعددی انجام گرفته است تا آب آبیاری با حداکثر راندمان ممکن در اختیار گیاهان گلخانه‌ای قرار گیرد. لیکن نتایج بررسی‌هایی که از منابع داخلی به دست آمده نشان دهنده آن است که در این زمینه تحقیقات گسترده‌ای انجام نگرفته است و توصیه مشخصی در خصوص آب مورد نیاز گیاهان گلخانه‌ای وجود ندارد. از طرفی، با توجه به این‌که مقدار آب مورد نیاز برای تولید محصولات گلخانه‌ای در مناطق و اقلیم‌های مختلف کشور متفاوت است، لذا به بررسی‌های بیشتری در این زمینه نیاز است (۳).

تبخیر- تعرق (Evapotranspiration) گیاه (ET_c) فاکتور اصلی در تدوین برنامه آبیاری مناسب و بهبود راندمان مصرف آب در آبیاری است. ET_c را می‌توان با اندازه‌گیری پیوسته تغییرات آب خاک با استفاده از لایسیمتر (Lysimeter) یا بیلان آب خاک تعیین و یا بر اساس تخمین تبخیر- تعرق مرجع (ET_0) و استفاده از ضریب گیاهی (Crop coefficient) برآورد کرد (۱۲).

کنترل سیستم خاک یا اتمسفر گلخانه به طور هم‌زمان بر اساس تعادل آب و انرژی پایه‌گذاری شده است. دو جزء در اندازه‌گیری و کنترل چرخه آب در گلخانه مهم می‌باشند که اولین جزء آن خاک (یا لایه ساختگی و مصنوعی نظیر هیدروپونیک) و دومین جزء آن آب اضافه شده، یا کم شده و یا ذخیره شده در ناحیه ریشه در دوره مورد نظر است (۱۰). در محیط باز، برای تخمین میزان تبخیر- تعرق گیاهان و در نتیجه دستیابی به میزان آب مصرفی و مورد نیاز آنها، روش‌های توازن انرژی، تجربی، آئرودینامیک و ترکیبی وجود دارد که هر کدام از این روش‌ها و فرمول‌ها برای یک منطقه آب و هوایی مناسب است. با توجه به محدودیت‌های تعیین پارامترهای مورد نیاز این روش‌ها در شرایط گلخانه، تعداد کثیری از این روش‌ها برای شرایط گلخانه‌ای مناسب نیستند. بنابراین استفاده از روش‌های مستقیم برآورد تبخیر- تعرق گیاهان در گلخانه، دقت برآورد میزان آب مصرفی گیاهان را تا حد چشمگیری افزایش می‌دهد. اصلی‌ترین روش اندازه‌گیری مستقیم تبخیر- تعرق، استفاده از لایسیمتر می‌باشد (۶).

لایسیمترها ابزاری هستند که می‌توان با استفاده از آنها کل مقدار آب ورودی و خروجی از ناحیه ریشه گیاه را اندازه‌گیری و بر اساس آن میزان تبخیر- تعرق گیاه را تعیین نمود. دو نوع اصلی لایسیمترها شامل لایسیمترهای وزنی و لایسیمترهای زهکش‌دار می‌باشند. تفاوت اصلی این دو نوع در نحوه اندازه‌گیری تغییرات رطوبتی خاک است. در لایسیمترهای وزنی، تغییرات رطوبت خاک از طریق وزن کردن اندازه‌گیری و ثبت می‌گردد، ولی برای اندازه‌گیری تغییرات رطوبتی خاک در لایسیمترهای زهکش‌دار نیاز به استفاده از روش‌های غیرمستقیم نظیر استفاده از تانسیومتر، نوترون‌متر و غیره است. لایسیمتر وزنی به مراتب بهتر از لایسیمتر زهکش‌دار بوده و تغییرات

روزانه تبخیر- تعرق را نسبت به رطوبت خاک با دقت لازم نشان می‌دهد. لایسیمتر وزنی قادر است که تبخیر- تعرق را برای مدتی کوتاه و حتی چند دقیقه تعیین کند (۹). درون گلخانه به دلیل فضای کم، به جای لایسیمتر از میکرولایسیمتر استفاده می‌شود که روش کار آن شبیه به لایسیمتر است و از فرمول زیر برای محاسبه تبخیر- تعرق در آن استفاده می‌گردد:

$$ET = I + P + SFI + LI + GW - RO - LO - L - DP - D_{rz}(\theta_f - \theta_i) \quad [۱]$$

که در آن:

ET = تبخیر- تعرق (سانتی‌متر)

I = عمق آب آبیاری (سانتی‌متر)

P = بارندگی (سانتی‌متر)

SFI = جریان سطحی ورودی به سطح خاک (سانتی‌متر)

LI = جریان زیر سطحی که وارد خاک می‌شود (سانتی‌متر)

GW = مقدار آبی که از زیر زمین ممکن است وارد خاک شود (سانتی‌متر)

RO = رواناب سطحی که از خاک خارج می‌شود (سانتی‌متر)

LO = جریان آب زیر سطحی که از خاک خارج می‌شود (سانتی‌متر)

L = نیاز آبشویی که عبارت است از مقدار آبی که باید از خاک خارج شود تا شوری خاک از حد مورد نظر فراتر نرود (سانتی‌متر)

DP = نفوذ عمقی (جریان خروجی آب از خاک که مازاد بر نیاز آبشویی صورت می‌گیرد) (سانتی‌متر)

D_{rz} = عمق توسعه ریشه‌ها (سانتی‌متر)

θ_f = رطوبت حجمی خاک در شروع دوره مورد نظر (اعشار)

θ_i = رطوبت حجمی خاک در انتهای دوره مورد نظر (اعشار)

رابطه فوق به نام بیلان آب یا بیلان رطوبتی خاک موسوم است و با اندازه‌گیری و کنترل دقیق پارامترهای آن برای لایسیمتر، مقدار تبخیر- تعرق در هر فاصله زمانی دلخواه مشخص می‌شود. در گلخانه به دلیل شرایط خاص خود، پارامترهای P، SFI، LI، GW، RO و LO معمولاً صفر یا بسیار ناچیز هستند و می‌توان در معادلات مربوط به کاربرد لایسیمترها در گلخانه، از آنها صرف‌نظر کرد و مقدار آنها را ناچیز فرض نمود (۹ و ۱۲).

پارامتر دیگری که در اندازه‌گیری‌های مربوط به نیاز آبی گیاهان حائز اهمیت است، ضریب گیاهی (K_c) می‌باشد. ضریب گیاهی نسبت تبخیر- تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد به تبخیر- تعرق پتانسیل یا تبخیر- تعرق گیاه مرجع می‌باشد (۱۲).

بیشترین تأثیر اقلیم در تبخیر- تعرق مرجع گنجانده شده است. بنابراین همان‌طور که تبخیر- تعرق مرجع نمایه‌ای از تقاضای تبخیر در یک اقلیم مشخص است، ضریب گیاهی به طور عمده به ویژگی‌های گیاه و به طور محدودتر، به اقلیم بستگی دارد. این ویژگی موجب به کارگیری ضرایب گیاهی استاندارد در مناطق و اقلیم‌های گوناگون و پذیرش آن به عنوان پارامتری مهم در محاسبات مربوط به نیاز آبی گیاهان شده است (۱۳). عوامل اصلی که روی ضریب گیاهی مؤثرند شامل نوع گیاه، اقلیم، تبخیر از سطح خاک و مرحله رشد گیاه می‌باشند (۱۲). به همین دلیل، ضریب گیاهی یک گیاه مشخص در طول دوره رشد به دلیل تفاوت تبخیر- تعرق در مراحل مختلف تغییر خواهد کرد. بر این اساس، دوره رشد گیاه را می‌توان به چهار مرحله متمایز اولیه (Initial stage)، توسعه گیاه (Crop development stage)، میانی (Mid-season stage) و پایانی (Late season stage) تقسیم بندی نمود (۱۹).

تاکنون مدل‌های مختلفی برای تخمین نیاز آبی گیاهان ارائه شده است، اما اطلاعات کاملی در مورد رفتار آنها در شرایط گلخانه‌ای وجود ندارد که دلیل آن واسنجی خاص شرایط خود می‌باشد. علاوه بر آن، معادلات تجربی و ترکیبی زیادی نیز برای محاسبه تبخیر- تعرق، توسط محققین ارائه شده است که برای شرایط گلخانه به کار رفته و در صورت نیاز واسنجی کرده‌اند تا اختلاف تبخیر- تعرق محاسبه شده و تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده حداقل گردد (۱۴).

ماملی و همکاران (۱۷) از میکرولایسیمتر برای اندازه‌گیری تبخیر- تعرق گوجه‌فرنگی در گلخانه استفاده کردند و بیان نمودند که میکرولایسیمترها سیستمی مطمئن و قابل اعتماد برای اندازه‌گیری تبخیر- تعرق گیاهی می‌باشند.

لورنزو و همکاران (۱۶) تبخیر- تعرق خیار را در گلخانه

توسط یک لایسیمتر وزنی به‌دست آوردند. سپس یک رگرسیون دو متغیره برای معادله پنمن- مانتیث تعریف گردید که دارای دو جزء تابش خورشیدی (R_s) و کمبود فشار بخار هوا (VPD) بود. اندازه‌گیری‌ها نشان داد که فشار بخار هوا در مراحل اولیه رشد تأثیر زیادی روی تبخیر- تعرق گیاهی دارد و رابطه بین آنها یک رابطه خطی است، در حالی که رابطه تبخیر- تعرق گیاهی و تابش خورشیدی حالت نمایی داشت.

ارگاز و همکاران (۱۸) از لایسیمترهای زهکش‌دار برای تعیین تبخیر- تعرق چهار گیاه خربزه، هندوانه، فلفل و لوبیا سبز در یک گلخانه پلاستیکی استفاده کردند. آنها بدین نتیجه رسیدند که میزان تبخیر- تعرق در داخل گلخانه معمولاً کمتر از میزان آن برای شرایط خارج گلخانه می‌باشد. در مورد گیاهانی که فاقد داربست بودند (خربزه و هندوانه) حداکثر مقدار K_c بین ۱ تا ۱/۱ به دست آمد که مشابه با مقادیر محیط آزاد بود. در مقابل، حداکثر میزان K_c برای گیاهانی که در طول دوره رشدشان به وسیله داربست‌هایی در راستای عمودی کنترل شدند (لوبیا سبز و فلفل) بین ۱/۳ تا ۱/۴ به دست آمد. در مورد این نوع از گیاهان، مقادیر تبخیر- تعرق اندکی بیشتر از شرایط خارج گلخانه به دست آمد. آنها دلیل این موضوع را به خاطر فضاهای داخلی زیاد برگ‌ها ، که سهم زیادی در به جریان انداختن هوا و نیز عبور تشعشع خورشیدی ایفا می‌کرد، اعلام کردند.

عابدی کوپایی و همکاران (۸)، مقدار تبخیر- تعرق مرجع را در داخل یک گلخانه شیشه‌ای با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی و هم‌چنین ۴ روش فیزیکی پنمن، پنمن- مانتیث، استنگلینی و فین تخمین زدند. برای بررسی دقت روش‌های مذکور از داده‌های لایسیمتری گیاه چمن کشت شده در گلخانه استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی بهترین تخمین را از تبخیر- تعرق مرجع ارائه می‌دهد. هم‌چنین روش‌های استنگلینی، پنمن- مانتیث، فین و پنمن به ترتیب از لحاظ میزان دقت در تخمین تبخیر- تعرق در گلخانه مورد مطالعه قرار گرفتند.

هدف از پژوهش حاضر، اندازه‌گیری و مدل‌سازی میزان تبخیر- تعرق سه گیاه مهم گلخانه‌ای خیار، گوجه‌فرنگی و فلفل در یک گلخانه شیشه‌ای می‌باشد. در طول این تحقیق هم‌زمان با اندازه‌گیری میزان آب مصرفی گیاهان مذکور، میزان تبخیر- تعرق پتانسیل نیز در درون گلخانه در کل مدت انجام آزمایش اندازه‌گیری گردید و با استفاده از داده‌های به‌دست آمده، ضرایب گیاهی مربوط به هر گیاه تعیین و با استفاده از آنها، مراحل رشد گیاهان تشخیص داده شد. در نهایت با استفاده از روابط رگرسیونی در قالب نرم‌افزار SPSS، معادله رگرسیونی مناسب برای تخمین نیاز آبی هر یک از گیاهان به دست آمد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در گلخانه شیشه‌ای دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان به مدت هفت ماه از تاریخ ۱۳۸۷/۱۰/۱۵ تا ۱۳۸۸/۵/۱۵ انجام پذیرفت. طول جغرافیایی محل قرارگیری گلخانه '۲۸°۵۱ شرقی، عرض جغرافیایی آن '۴۲°۳۲ شمالی و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۶۲۴ متر بود. این گلخانه از نوع شمالی- جنوبی و مرکب انگشتی (شانه‌ای) است. خاک مورد استفاده برای کشت گیاهان و نیز چمن دارای بافت لوم رسی شنی که در منطقه اصفهان بخش عمده‌ای از خاک بستر گلخانه‌ها را تشکیل می‌دهد، بود.

برای تعیین میزان تبخیر- تعرق مرجع در طی دوره آزمایش، از یک لایسیمتر زهکش‌دار که در آن چمن کشت شده بود، استفاده گردید. طبق مطالعات صورت گرفته، عمق توسعه ریشه چمن در فضای آزاد و با اعمال دور آبیاری گوناگون، به ندرت به بیش از ۱ متر می‌رسد (۱۲). این در حالی است که در هنگام اندازه‌گیری تبخیر- تعرق مرجع، آبیاری‌ها معمولاً به صورت روزانه و با اعمال حداقل تنش رطوبتی انجام می‌گیرد. به همین لحاظ عمق توسعه ریشه چمن در چنین شرایطی حتی از مقدار ۱ متر نیز کمتر خواهد بود (۱۸). عابدی کوپایی و همکاران (۵) نیز با انجام مطالعه‌ای یکساله برای بررسی میزان تبخیر- تعرق چمن در همین گلخانه، دریافتند که عمق توسعه ریشه از ۶۰

سانتی‌متر فراتر نرفته است. بنابراین، لایسیمترهای با قطر ۴۷ و ارتفاع ۹۸ سانتی‌متر برای کاشت چمن انتخاب گردید که از پلاستیک فشرده ساخته شده بودند. طی دوره رشد چمن، همواره ارتفاع چمن در ۱۲ سانتی‌متری نگه داشته می‌شد. برای یکنواخت شدن تغییرات رطوبت حجمی خاک نسبت به عمق، سعی گردید تا در هنگام پر کردن لایسیمترها، تراکم خاک تا حد ممکن یکنواخت گردد. برای برداشت آب زهکش شده از هر لایسیمتر، شیری در انتهای آن تعبیه گردید تا زه‌آب خارج شده از آن را به داخل ظرف قرار داده شده در زیر شیر هدایت کند. برای به‌دست آوردن تغییرات ذخیره رطوبتی خاک (ΔS)، از تانسیومتر استفاده گردید. با قرائت روزانه تانسیومترهای واقع در اعماق ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متری و استفاده از منحنی واسنجی تانسیومتر، میزان رطوبت حجمی خاک در هر زمان تعیین گردید و با استفاده از معادله بیلان رطوبتی (معادله ۱)، میزان تبخیر- تعرق روزانه تعیین گردید.

از آنجایی‌که هدف از آبیاری لایسیمتر جلوگیری از وارد آمدن تنش رطوبتی به چمن برای حداکثر پتانسیل تبخیر- تعرق بود، بنابراین بایستی قبل از رسیدن رطوبت خاک به حالت بحرانی، آبیاری انجام می‌پذیرفت. میزان رطوبت خاک در حالت بحرانی از رابطه زیر به دست آمد:

$$\theta_c = \theta_{pwp} + (1 - MAD)(\theta_{fc} - \theta_{pwp}) \qquad [2]$$

که در این رابطه:

θ_c= رطوبت حجمی بحرانی خاک یا به عبارت دیگر رطوبتی است که بایستی آبیاری در آن نقطه انجام گیرد (درصد)

θ_{pwp}= رطوبت حجمی خاک در حالت پژمردگی دائم (درصد)

θ_{fc}= رطوبت حجمی خاک در حالت ظرفیت زراعی (درصد)

MAD= تخلیه مجاز رطوبتی خاک که برای چمن این مقدار برابر با ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود (۱۲) و طبق پیشنهاد عابدی کوپایی و همکاران (۵)، برای جلوگیری از هر گونه تنش آبی این مقدار برابر با ۰/۳ در نظر گرفته شد.

با قرائت روزانه تانسیومتر، هنگامی که رطوبت خاک به حالت بحرانی می‌رسید، آبیاری لایسیمتر انجام می‌گرفت و از آنجایی‌که میزان تبخیر- تعرق در دوره‌های زمانی متفاوت تغییر می‌نمود، بنابراین دور آبیاری متغیر و میزان آب داده شده به لایسیمتر ثابت بود. مقدار آب مورد نیاز در هر مرتبه آبیاری برای رساندن رطوبت خاک به حالت FC از رابطه زیر به‌دست آمد:

$$V_i = \frac{\pi}{4} D^2 \times (\theta_{fc} - \theta_{pwp}) \times MAD \times R_d \qquad [3]$$

که در آن:

V_i= حجم آب مورد نیاز برای آبیاری لایسیمتر (cm^3)

D= قطر لایسیمتر زهکش‌دار (cm)

R_d= عمق مؤثر ریشه (بین ۴۵ تا ۷۵ سانتی‌متر).

برای به دست آوردن نیاز آبی و ضریب گیاهی سه گیاه خیار، گوجه‌فرنگی و فلفل، بایستی این گیاهان در محیطی کشت می‌شدند که بتوان بیلان آب آنها را تحت کنترل داشت. بدین منظور، از سه عدد میکرولایسیمتر به قطر ۳۰ و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر برای کشت هر یک از گیاهان استفاده گردید. ابعاد انتخابی برای میکرولایسیمترها بر این اساس تعیین شد که آبیاری در گلخانه عموماً به صورت روزانه و بدون اعمال هیچگونه تنش آبی صورت می‌گیرد. بنابراین رطوبت خاک در منطقه محدودی از سطح خاک همواره در حالت ظرفیت زراعی قرار دارد و بنابراین توسعه ریشه‌ها سطحی می‌باشد. ثانیاً به دلیل محدودیت فضا در گلخانه بایستی فاصله بین گیاهان را در حد معقولی در نظر گرفت که معمولاً فاصله ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متری برای این گیاهان مناسب است (۱۸). میکرولایسیمترها از یک گلدان پلاستیکی ضخیم و بزرگ ساخته شده بودند که جنس آنها از نوع پلاستیک فشرده و غیرشکننده بود. برای انجام زهکشی مناسب از میکرولایسیمترهای ساخته شده، مقداری شن در کف آنها ریخته شد تا جریان آب را به سمت مجاری تعبیه شده در انتهای میکرولایسیمتر، تسهیل کند. گیاهان قبل از کشت درون میکرولایسیمتر، به صورت نشا کاشته شدند. با گذشت یک هفته از جوانه زنی، نشای گیاهان برای کشت به میکرولایسیمترها منتقل گردید و در هر کدام از آنها سه عدد بوته کاشته شد که پس از گذشت یک هفته به یک بوته تنک

گردیدند تا شرایط به شرایط واقعی در گلخانه نزدیکتر شود (در گلخانه معمولاً این گیاهان در فواصل مشخص و به تعداد واحد کشت می‌شوند). برای رشد بهتر گیاهان، به‌وسیله داربست‌های تعبیه شده در میکرولایسیمترها، گیاهان در راستای عمودی کنترل شدند.

برای تعیین زمان آبیاری میکرولایسیمترها از روش وزنی استفاده گردید. بدین منظور، ابتدا وزن هر کدام از میکرولایسیمترها در حالت ظرفیت زراعی تعیین شد. سپس با توجه به اطلاعات برداشت شده، میزان آب آبیاری برای هر کدام از میکرولایسیمترها به صورت زیر محاسبه گردید:

$$M_{wi} = M_{fci} - M_i \qquad [۴]$$

که:

M_{wi}= مقدار آب لازم برای آبیاری میکرولایسیمتر i ام (گرم)

M_{fci}= وزن میکرولایسیمتر i ام در حالت ظرفیت زراعی (گرم)

M_i= وزن میکرولایسیمتر i ام پیش از انجام آبیاری (گرم)

از آنجایی که در اکثر سیستم‌های کشت گلخانه‌ای، آبیاری با استفاده از سیستم‌های آبیاری موضعی و به صورت روزانه و حتی چند مرتبه در یک روز انجام می‌پذیرد، بنابراین همواره خاک در حالت ظرفیت زراعی قرار داشته و تنشی به گیاه وارد نمی‌شود. در این تحقیق نیز برای یکسان سازی شرایط با حالت واقعی و جلوگیری از وارد آمدن هرگونه تنش رطوبتی به گیاهان، آبیاری‌ها به صورت روزانه انجام می‌گرفت. ولی میزان آب آبیاری در هر روز متفاوت بود. بدین منظور، تمامی میکرولایسیمترها رأس ساعت ۱۸ هر روز به وسیله یک ترازوی دیجیتالی با دقت ۱۰ گرم وزن می‌شدند تا اختلاف وزن هر کدام از آنها با حالت ظرفیت زراعی تعیین گردد. سپس برای رساندن هر کدام از آنها به حالت ظرفیت زراعی، مقدار آب لازم از رابطه ۴ محاسبه و آبیاری انجام می‌گرفت.

به دلیل این‌که اختلاف وزن هر کدام از لایسیمترها در دو مقطع زمانی متوالی بیانگر میزان آب مصرفی آن گیاه بود، بنابراین با استفاده از فرمول زیر، مقدار ضریب گیاهی در هر مقطع زمانی دلخواه محاسبه گردید:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \qquad [۵]$$

که:

K_c= ضریب گیاهی در مدت مورد نظر

ET_c= تبخیر- تعرق گیاه مورد نظر در گلخانه

ET_o= تبخیر- تعرق مرجع در گلخانه

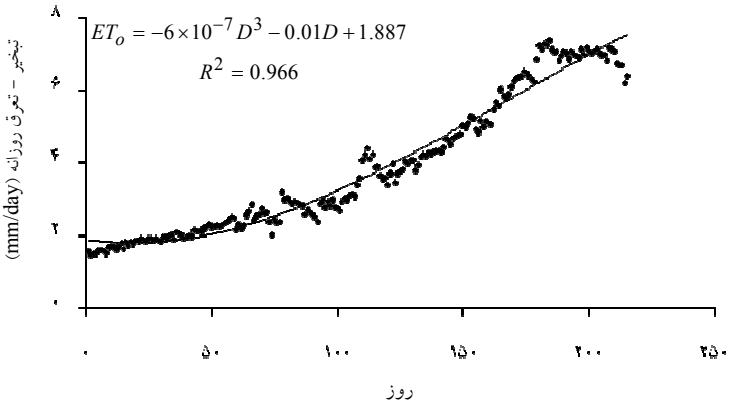
با توجه به این‌که بیان نمودن ضریب گیاهی در فواصل روزانه به علت کم بودن تغییرات تبخیر- تعرق در یک دوره ۲۴ ساعته، چندان گویا نبود، بنابراین ضرایب گیاهی بر اساس بازه‌های هفتگی به‌دست آمدند و نمودار تغییرات ضریب گیاهی آنها نسبت به طول دوره رشد رسم گردید. هم‌زمان، پارامترهای هواشناسی گلخانه نظیر حداکثر و حداقل دمای روزانه و رطوبت نسبی حداقل و نیز تشعشع خورشیدی به صورت روزانه برداشت گردیدند.

با اتمام مراحل رشد گیاهان و تعیین مقادیر تبخیر- تعرق روزانه و نیز ضرایب گیاهی در طول دوره رشد، با استفاده از تمامی پارامترهای برداشت شده در طی تحقیق شامل دمای روزانه، رطوبت نسبی، تشعشع خورشیدی، تبخیر از تشت و ارتفاع گیاه، اقدام به مدل‌سازی فرایند تبخیر- تعرق گیاهان کشت شده در گلخانه در قالب نرم‌افزار SPSS گردید. بدین منظور، ابتدا داده‌های برداشت شده طی دوره آزمایش بر حسب روز مرتب گردید. داده‌هایی که برای مدل‌سازی استفاده شد شامل متوسط دما، رطوبت نسبی، تشعشع خورشیدی و ارتفاع گیاه بود. برای شروع مدل‌سازی، ابتدا داده‌ها به دو قسمت تقسیم‌بندی شدند: ۷۰٪ داده‌ها برای واسنجی مدل و ۳۰٪ باقی‌مانده برای اعتبارسنجی مدل استفاده شدند. برای انتخاب داده‌های تصادفی، ازتابع RAND نرم‌افزار Excel استفاده شد. به دلیل این که رگرسیون خطی دارای نتایج چندان رضایت-بخشی نبود، از رگرسیون غیر خطی برای مدل‌سازی استفاده شد.

مرحله اول برای ساخت این مدل غیر خطی، تعیین پارامترهای حساس در هر مدل بود. برای تعیین پارامترهای حساس، از رگرسیون چند متغیره خطی و روش Backward و

جدول ۱. زمان و طول دوره رشد محصولات کشت شده در گلخانه

گیاه	دوره رشد	طول دوره رشد
خیار	۸۷/۱۰/۱۵ – ۸۸/۱/۲۹	۱۰۵ روز
گوجه‌فرنگی	۸۷/۱۰/۱۵ – ۸۸/۴/۱۱	۱۸۰ روز
فلفل	۸۷/۱۰/۱۵ – ۸۸/۵/۱۵	۲۱۵ روز



شکل ۱. نمودار تغییرات روزانه تبخیر- تعرق مرجع در گلخانه طی دوره آزمایش

Forward استفاده شد. بعد از مشخص شدن پارامترهای حساس، رگرسیون غیرخطی چند متغیره برای پارامترهای حساس تعریف گردید. با توجه به این‌که بهترین مدل بایستی دارای حداقل پارامترهای لازم و بیشترین دقت باشد، برای هر گیاه ابتدا چند مدل مختلف تعریف گردید و در نهایت از تلفیق مدل‌های مختلف یک مدل کلی برای محاسبه نیاز آبی هر یک از گیاهان پیشنهاد شد.

نتایج و بحث

تبخیر- تعرق مرجع

با توجه به این‌که دوره رشد هر کدام از گیاهان با هم متفاوت بود، بنابراین با گذشت زمان، ابتدا دوره رشد خیار، سپس گوجه‌فرنگی و در نهایت فلفل به پایان رسید، که با پایان یافتن دوره رشد فلفل، داده‌برداری‌ها نیز متوقف گردید. جدول ۱ زمان رشد و نیز طول دوره رشد هر یک از گیاهان را نشان می‌دهد.

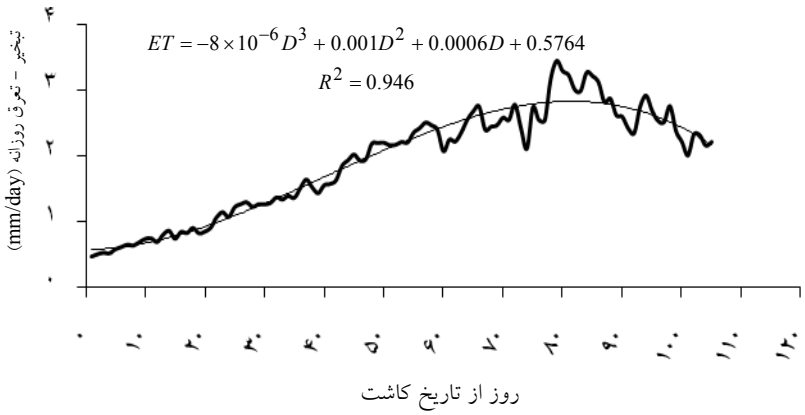
بر همین اساس، میزان تبخیر- تعرق مرجع در درون گلخانه طی ۲۱۵ روز که برابر با طولانی‌ترین دوره رشد بین سه گیاه، یعنی دوره رشد فلفل بود، اندازه‌گیری شد. شکل ۱ روند تغییرات تبخیر- تعرق پتانسیل روزانه را طی دوره رشد گیاهان نشان می‌دهد.

نتایج نشان داد که نیمه اول دی با میانگین روزانه تبخیر- تعرق ۱/۶ میلی‌متر در روز و نیمه اول مرداد ماه با میانگین روزانه تبخیر- تعرق ۶/۸ میلی‌متر در روز، به ترتیب دارای کمترین و بیشترین میزان تبخیر- تعرق روزانه بوده‌اند. هم‌چنین طی مدت آزمایش، مقدار کل تبخیر- تعرق مرجع ۸۲۴ میلی‌متر تعیین گردید.

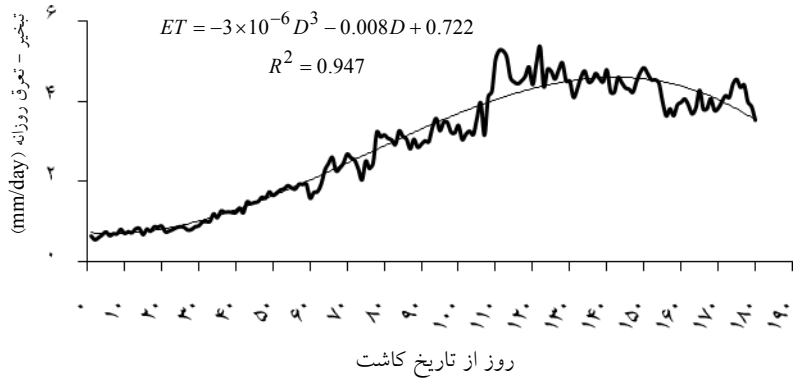
تبخیر- تعرق گیاهان

شکل‌های ۲، ۳ و۴ به ترتیب روند تغییرات آب مصرفی یا تبخیر- تعرق گیاه را برای خیار، گوجه‌فرنگی و فلفل نشان می‌دهند.

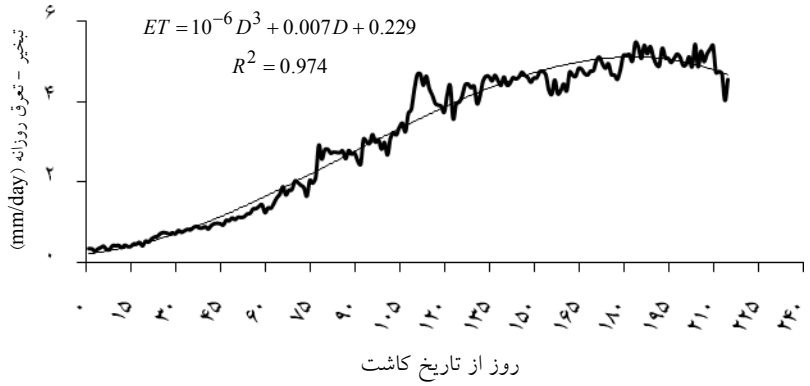
بیشترین میزان متوسط تبخیر- تعرق ماهانه خیار به مقدار ۲/۷۱ میلی‌متر در روز و در فروردین ماه به‌دست آمد. برای



شکل ۲. روند تغییرات روزانه آب مصرفی خیار در گلخانه



شکل ۳. روند تغییرات روزانه آب مصرفی گوجه‌فرنگی در گلخانه



شکل ۴. روند تغییرات روزانه آب مصرفی فلفل در گلخانه

گوجه‌فرنگی این مقدار ۴/۶۶ میلی‌متر در روز بود و در اردیبهشت ماه رخ داد. برای فلفل نیز بیشترین مقدار تبخیر- تعرق ماهانه به میزان ۵/۰۴ میلی‌متر در روز و در تیر ماه به وقوع پیوست. از طرف دیگر، خیار در کل دوره رشد خود، ۲۰۲ میلی‌متر، گوجه‌فرنگی ۵۲۴ میلی‌متر و فلفل ۶۶۷ میلی‌متر تبخیر- تعرق داشته‌اند.

چارت‌زولاکیس و دروسوس (۱۱) در یونان، نیاز آبی خیار گلخانه‌ای را در طول سه ماه و نیم دوره رشد، ۲۹۰ میلی‌متر

گزارش نمودند. کامورا و همکاران (۱۵) در ژاپن، نیاز آبی خیار گلخانه‌ای را با استفاده از روش‌های آبیاری قطره‌ای و لوله‌های نیمه‌تراوا به ترتیب ۱۸۰ و ۳۳۶ میلی‌متر در طول دوره رشد به دست آوردند. مقایسه نتایج به‌دست آمده توسط این محققین با نتایج حاصله از این تحقیق، بیانگر این نکته است که در روش آبیاری قطره‌ای نسبت به سایر روش‌های آبیاری در گلخانه آب کمتری برای رشد گیاه مصرف شده است که دلیل آن را می‌توان ماهیت سیستم‌های آبیاری قطره‌ای در گلخانه دانست که اکثراً آب را به صورت روزانه و با مقادیر کم در اختیار گیاه قرار می‌دهند تا علاوه بر تأمین روزانه رطوبت خاک مورد نیاز گیاه و عدم وارد شدن تنش به گیاه، مانع از تلفات ناشی از نفوذ عمقی گردد. در این تحقیق نیز چون آبیاری گیاهان به صورت روزانه انجام می‌گرفت، بنابراین همانند روش‌های آبیاری موضعی، تلفات ناشی از نفوذ عمقی کم بود و رطوبت لازم همواره در عمق مؤثر ریشه‌ها فراهم می‌گردید. تازل و مریک (۲۰) نیاز آبی گوجه‌فرنگی کشت شده در گلخانه را بین ۳۹۱ تا ۵۴۱ میلی‌متر تعیین نمودند که عدد ۵۲۴ میلی‌متر به‌دست آمده در این تحقیق برای گوجه‌فرنگی را تأیید می‌کند. دورنباس و کاسام (۱۲) نیاز آبی فلفل را در گلخانه بین ۶۰۰ تا ۱۲۵۰ میلی‌متر تخمین زدند که تأیید کننده مقدار به‌دست آمده در این پژوهش است.

محاسبه ضرایب گیاهی

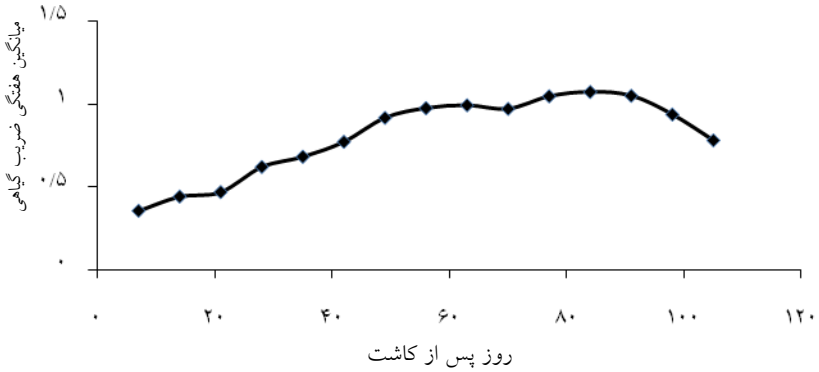
پس از جمع‌آوری داده‌های روزانه مربوط به میزان آب مصرفی گیاهان کشت شده در گلخانه و داشتن مقدار تبخیر- تعرق روزانه، با تقسیم نمودن مقدار تبخیر- تعرق گیاهی به تبخیر- تعرق مرجع، ضرایب گیاهی (K_c) برای هر کدام از گیاهان به دست آمد. نمودارهای رسم شده برای ضرایب گیاهی هر سه گیاه گویای این مطلب هستند که نمودار تبخیر- تعرق همانگونه که انتظار می‌رود، یک روند صعودی، ثابت و سپس نزولی را طی می‌کند، که نشان دهنده مراحل مختلف رشد گیاه است.

تغییرات نوسانی ضریب گیاهی در دوره میانی برای هر سه گیاه بیشتر از سایر مراحل بوده که دلیل آن تکرار پدیده میوه‌دهی و برداشت محصول طی دوره میانی است که بر ضریب گیاهی تأثیرگذار می‌باشد. شکل‌های ۵، ۶ و ۷ به ترتیب ضرایب گیاهی متوسط هفتگی خیار، گوجه‌فرنگی و فلفل را نشان می‌دهند.

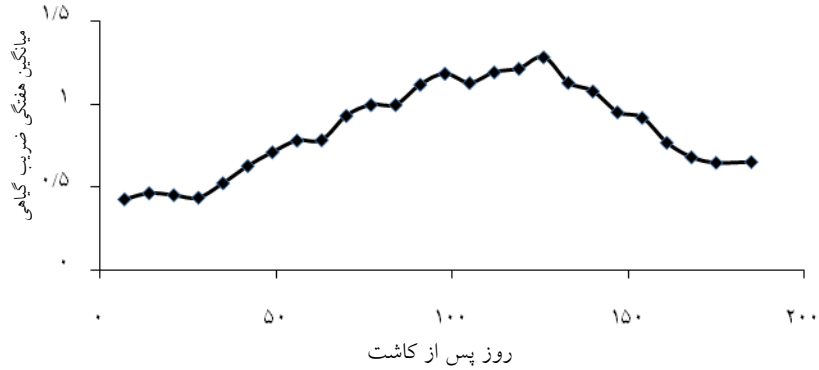
با دقت در روند داده‌ها، مراحل رشد گیاه به چهار مرحله ابتدایی، مرحله توسعه گیاه، مرحله میانی و مرحله پایانی تقسیم گردیدند. در مرحله ابتدایی، ضریب گیاهی نسبت به مرحله رشد و توسعه دارای مقدار کمتری بود و در مرحله رشد و توسعه ضریب گیاهی به سرعت افزایش یافت. در مرحله میانی، ضریب گیاهی به سمت مقدار ثابتی میل می‌کرد و تغییرات آن در این مرحله نسبت به بقیه مراحل بسیار اندک بود. حداکثر مقدار ضریب گیاهی در مرحله میانی رخ داد که دلیل آن نیاز زیاد آب گیاه در نتیجه محصول‌دهی است. در نهایت، با شروع افت ضریب گیاهی، مرحله پایانی رشد گیاه به وقوع پیوست. جدول ۲ طول هر یک از مراحل رشد گیاهان و نیز مقدار ضریب گیاهی را در هر یک از این مراحل نشان می‌دهد.

نتایج حاصل نشان داد که بیشترین مقدار ضریب گیاهی خیار برابر با ۱/۰۷ در هفته دوازدهم رشد، گوجه‌فرنگی ۱/۲۸ در هفته هجدهم رشد و فلفل ۱/۰۸ طی هفته‌های هفدهم و هجدهم رشد حاصل شد.

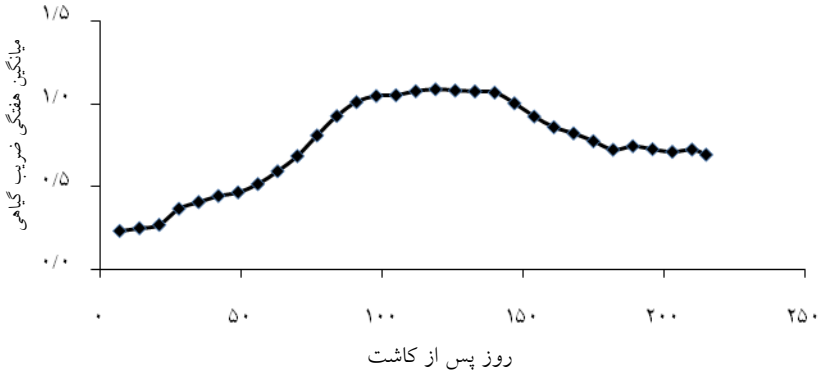
لورنزو و همکاران (۱۶)، مقدار ضریب گیاهی فلفل را در اسپانیا در مرحله ابتدایی رشد ۰/۲ و در مرحله پایانی رشد ۰/۸گزارش نمودند که به مقدار ۰/۲۵ و ۰/۷۵ به‌دست آمده در این تحقیق بسیار نزدیک است. هم‌چنین آنها حداکثر ضریب گیاهی را در مرحله میانی رشد، ۱/۴ تعیین کردند که در مقایسه با عدد ۱/۱۸ در این تحقیق اندکی بیشتر است. ارگاز و همکاران (۱۸) مقدار ضریب گیاهی فلفل را در مرحله ابتدایی رشد ۰/۲، در مرحله میانی ۱/۳ و در مرحله پایانی رشد ۰/۹ تعیین کردند. علت تغییرات اندک در این اعداد آن است که در برخی موارد به علت همپوشانی نزدیک مراحل رشد گیاه، مراحل چهارگانه رشد به مراحل سه‌گانه تبدیل می‌شود و در آن مرحله رشد و توسعه در مراحل ابتدایی و میانی تلفیق می‌گردد و



شکل ۵. میانگین هفتگی ضریب گیاهی خیار طی دوره رشد



شکل ۶ . میانگین هفتگی ضریب گیاهی گوجه‌فرنگی طی دوره رشد



شکل ۷. میانگین هفتگی ضریب گیاهی فلفل طی دوره رشد

جدول ۲. مقادیر مختلف ضریب گیاهی و طول دوران مختلف رشد هر یک از گیاهان

مرحله رشد	خیار		گوجه‌فرنگی		فلفل	
	طول دوره	K_c	طول دوره	K_c	طول دوره	K_c
ابتدایی	۱۵	۰/۴۱	۲۵	۰/۴۴	۳۰	۰/۲۵
توسعه گیاه	۲۰	۰/۶۹	۳۵	۰/۶۸	۴۰	۰/۵۳
میانی	۵۵	۰/۹۸	۹۰	۱/۱۵	۱۰۰	۱/۰۳
پایانی	۱۵	۰/۷۷	۳۰	۰/۶۸	۴۵	۰/۷۵

جدول ۳. ضرایب رگرسیونی معادلات ارائه شده برای تخمین نیاز آبی گیاهان کشت شده در گلخانه

گیاه	خیار	گوجه‌فرنگی	فلفل
a_1	۰/۰۰۴	۰/۵۷۷	$۴/۱ \times ۱۰^{-۶}$
a_2	−۰/۰۳۵	۰/۱۵۸	۰/۱۴۳
a_3	۰/۲۳۴	−۰/۷۷۶	−۰/۴۱
a_4	۱/۱۲	۰/۹۳۷	۳/۱۴۷

جدول ۴. دقت روابط به‌دست آمده برای پیش‌بینی میزان تبخیر- تعرق گیاهان

پارامتر	خیار	گوجه‌فرنگی	فلفل
MSE	۰/۰۷۷	۰/۰۳۵۷	۰/۰۱۹
$\mathbf{R^2}$	۰/۹۰۱	۰/۹۱۱	۰/۹۳۶

بنابراین اعداد گاه اندکی با هم متفاوت می‌کردند که در صورتی که مرحله رشد و توسعه از بقیه مراحل رشد تفکیک گردد، اعداد به یکدیگر نزدیکتر خواهند شد.

مدل‌سازی تبخیر- تعرق گیاهان کشت شده در گلخانه

همانگونه که ذکر گردید، با استفاده از نرم‌افزار SPSS برای هر سه گیاه، معادلات رگرسیونی غیر خطی متعددی برای پیش‌بینی میزان تبخیر- تعرق گیاهی، به‌دست آمد. در اکثر این روابط، تبخیر- تعرق هر گیاه به پارامترهای تشعشع، دمای متوسط و ارتفاع گیاه وابسته بود. بنابراین مقدار تبخیر- تعرق سه گیاه خیار، گوجه‌فرنگی و فلفل در گلخانه مورد مطالعه به صورت یک معادله کلی به فرم زیر ارائه شد:

$$ET_c = a_1 R_n^{a_2} T_{avg}^{a_3} H^{a_4} \qquad [۶]$$

در این معادله:

R_n= تشعشع معادل تبخیر- تعرق (میلی‌متر در روز)

T_{avg}= میانگین دمای روزانه ($^{\circ}$C)

H= ارتفاع گیاه (سانتی‌متر)

که a_1، a_2، a_3 و a_4 ضرایب رگرسیون برای معادله فوق هستند که برای هر گیاه در جدول ۳ ارائه شده‌اند. معادله ۶ را می‌توان برای برآورد میزان تبخیر روزانه خیار، گوجه‌فرنگی و فلفل با استفاده از ضرایب ارائه شده، به کار برد.

برای مقایسه دقت مدل تعریف شده برای هر یک از گیاهان، ابتدا مقدار تبخیر- تعرق گیاهی از مدل ساخته شده بر اساس ۷۰٪ داده‌ها برای مقادیر ۳۰٪ باقی‌مانده محاسبه و سپس این مقدار با مقادیر اصلی مقایسه گردید. روش کار بدین صورت بود که معادله به‌دست آمده با استفاده از ۷۰٪ کل داده‌های هواشناسی و تبخیر- تعرق گیاهی ساخته شده بود و برای مقایسه، داده‌های هواشناسی ۳۰٪ باقی‌مانده وارد مدل شد و تبخیر- تعرق به‌دست آمده از مدل با مقادیر واقعی تبخیر- تعرق این تعداد داده‌ها مقایسه شد. جدول ۴ دقت رابطه به‌دست آمده برای پیش‌بینی میزان تبخیر- تعرق هر گیاه را نشان داده است. همان‌گونه که از جدول ۴ مشخص است، کمترین مقدار MSE و نیز بیشترین مقدار R^2 برای فلفل به دست آمده است که همانگونه که ذکر شد، به دلیل تعداد داده‌های بیشتر به علت طولانی‌تر بودن دوره رشد فلفل و در نتیجه دقت بیشتر در به دست آوردن مدل رگرسیونی مورد نظر بوده است. به همین ترتیب، دقت مدل به دست آمده در پیش‌بینی تبخیر- تعرق گوجه‌فرنگی بیشتر از خیار بوده است.

نتیجه‌گیری

مقادیر ضریب گیاهی برای سه گیاه خیار، گوجه‌فرنگی و فلفل در طول دوره رشد به صورت روزانه و هفتگی نشان داد که

ضریب گیاهی در ابتدا دارای یک روند صعودی، سپس یک روند تقریباً ثابت و در نهایت یک روند نزولی بود.

با بررسی روند تغییرات ضریب گیاهی، مقادیر ضریب گیاهی در دوره‌های مختلف رشد برای هر یک از گیاهان تعیین شد. برای خیار، مقدار متوسط ضریب گیاهی در مرحله ابتدایی رشد ۰/۴۱، در مرحله توسعه یافتگی ۰/۶۹، در مرحله میانی ۰/۹۸ و در مرحله پایانی رشد ۰/۷۷ به‌دست آمد. ضریب گیاهی متوسط گوجه‌فرنگی نیز در دوره ابتدایی رشد ۰/۴۴، دردوره توسعه یافتگی ۰/۶۸، در دوره میانی ۱/۱۵ و در دوره پایانی ۰/۶۸ بود. مقدار ضریب گیاهی در دوره‌های ابتدایی، توسعه یافتگی، میانی و پایانی رشد فلفل به ترتیب ۰/۲۵، ۰/۵۳، ۱/۰۳ و ۰/۷۵ به‌دست آمد.

با تلفیق مدل‌های مختلف، یک مدل رگرسیونی غیر خطی مبتنی بر پارامترهای متوسط دمای روزانه، درصد تابش خورشیدی و ارتفاع گیاه تعریف گردید که ضرایب ثابت آن برای هر گیاه متغیر بود. دقت این مدل رگرسیونی در فلفل (R^2=۰/۹۳۶) بیشتر از گوجه‌فرنگی (R^2=۰/۹۱۱) و خیار (R^2=۰/۹۰۱) بود که دلیل آن را می‌توان بیشتر بودن تعداد داده‌های مربوط به فلفل نسبت به دو گیاه دیگر به دلیل طولانی-تر بودن دوره رشد آن دانست.

منابع مورد استفاده

۱. احسانی، م. و هـ خالدی. ۱۳۸۲. بهره‌وری آب کشاورزی. کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ۱۱۵ صفحه.

۲. جعفرنیا، س. و م. همائی. ۱۳۸۵. راهنمای جامع و مصور کشت گلخانه‌ای خیار و گوجه‌فرنگی. انتشارات سخن گستر،۳۸۴ صفحه.

۳. دهقانی سانیج، ح.، ق. زارعی و ن. حیدری. ۱۳۸۶. بررسی مدیریت آبیاری و کارایی مصرف آب در گلخانه‌ها و مسائل و چالش‌ها. اولین کارگاه فنی ارتقاء کارایی مصرف آب با کشت محصولات گلخانه‌ای، لوح فشرده.

۴. سایت مرکز آمار ایران. ۱۳۸۸. http://www.sci.org.ir.

۵. عابدی کوپایی، ج.، س. س. اسلامیان، م. ج. امیری و ع. ا. رامین. ۱۳۸۷. مقایسه تبخیر وتعرق مرجع در درون و بیرون گلخانه شیشه‌ای. مجموعه مقالات سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تبریز، لوح فشرده.

۶. علیزاده. ا. ۱۳۸۳. *رابطه آب و خاک و گیاه*. انتشارات آستان قدس رضوی،۴۷۰ صفحه.

۷. نژاد عسگری، ح. ۱۳۸۰. روش‌های پیشرفته آبیاری در گلخانه. مجله مزرعه، ۲۸: ۳۲-۴۶.

8. Abedi-Koupai, J., M. J. Amiri and S. S. Eslamian. 2009. Comparison of artificial neural network and physically based models for estimating of reference evapotranspiration in greenhouse. Aust. J. Basic Appl. Sci. 3: 2528-2535.
9. Aboukhaled, A., A. Alfaro and M. Smith. 1982. Lysimeter. Irrigation and Drainage Paper No. 39, FAO, Rome, Italy, 69 p.
10. Baille, A. 2000. Principle and methods for predicting crop water requirement in greenhouse environments. Cheam Options Medit. 31: 177-187.
11. Chartzoulakis, K. and N. Drosos. 1995. Irrigation requirements of greenhouse vegetables in Crete. INRA-CIHEAM 31: 215-221.
12. Doorenbos, J. and W. O. Pruitt. 1977. Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper NO. 24, FAO, 144 p.
13. Grattan, S. R., W. Bowers, A. Dong, R. L. Snyder, J. J. Carroll and W. George. 1998. New crop coefficients estimate water use of vegetables, row crops. Calif. Agric. 52(1): 16-21.
14. Kirda, C. 1998. Evapotranspiration measurements of greenhouse grown tomato, melon and cucumber. International Symposiom on Arid Region Soils, 21-24 Sep., Izmir, Turkey.
15. Komoura, M., A. K. Arimata, A. Mizuta, T. Takasu and A. Yonegasd. 1990. Fundamental studies on the water irrigation method, water requirement and effect of irrigation for greenhouse cucumber. Acta Hortic. 253: 165-179.
16. Lorenzo, P., E. Medrana and M. C. Sanchez. 1998. Greenhouse crop transpiration: An implement to soilless

irrigation management. Acta Hortic. 458: 113-119.
17. Mameli, M. G., A. Sirigu, A. Soddu, F. Chessa and S. Meloni. 2004. The use of microlysimeters for the measurement of ET_M (maximum evapotranspiration) on camone tomato. Acta Hortic. 664: 377-382.
18. Orgas, F., M. D. Fernandes, S. Bonachele, M. Galardo and E. Fereres. 2005. Evapotranspiration of horticultural crops in a unheated plastic greenhouse. Agric. Water Manage. 72: 81-96.
19. Snyder, R. L., B. J. Lanini, D. A. Shaw and W. O. Pruitt. 1989. Using reference evapotranspiration (ET_o) and crop coefficients to estimate crop evapotranspiration (ET_c) for trees and vines. Leaflet No. 21428, Cooperative Extension, Univ. of California, Berkeley, CA, 8 p.
20. Tuzel, I. H. and M. K. Meric. 2001. Evapotranspiration of tomato plants grown in different soilless culture system. Acta Hort. 559: 555-559.