

## ارزیابی و برآورد تبخیر- تعرق خیار گلخانه‌ای در مراحل مختلف رشد

فریده فتحعلیان<sup>۱\*</sup> - روزبه موذن زاده<sup>۲</sup> - محمد رضا نوری امامزاده‌بی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۸۷/۹/۴

تاریخ پذیرش: ۸۸/۷/۵

### چکیده

برآورد دقیق میزان آب مصرفی یک گیاه در کل دوره رشد و آگاهی از چگونگی مصرف این میزان آب در دوره‌های مختلف رشد گیاه می‌تواند نقش بسیار مهمی در مدیریت حاکم بر منابع آب، مدیریت توأم آب و خاک و اعمال برنامه‌های منظم و صحیح آبیاری داشته باشد. این موضوع در محیط درون گلخانه با شرایطی مختص به همین محیط همراه می‌گردد. هدف از این تحقیق ارائه یک مدل پیشنهادی به منظور برآورد مناسب و دقیق تبخیر- تعرق خیار گلخانه‌ای است. در این راستا از دو میکرولاسیمتر مشابه با قطر ۲۸ و ارتفاع ۳۰ سانتیمتر، به صورت همزمان، برای کشت خیار در گلخانه استفاده شد. تبخیر- تعرق این گیاه به روش وزنی و به صورت روزانه در هر دو میکرولاسیمتر اندازه‌گیری گردید. از داده‌های میکرولاسیمتر اول برای اشتقاق مدل‌های پیشنهادی و از داده‌های میکرولاسیمتر دوم برای اعتبار سنجی مدل‌های مذکور استفاده شد. مدل‌های پیشنهادی در تمامی مراحل رشد از طریق ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، رسم مقادیر اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر برآورد شده و آماره  $t$  ارزیابی شدند. مدل پیشنهادی در ابتدا برای تمام دوره رشد این محصول و در قالب یک تک معادله رگرسیونی با متغیرهای مستقلی نظیر شیب منحنی فشار بخار و رطوبت نسبی ارائه گردید. ولی از آنجا که عملکرد این تک معادله مناسب ارزیابی نشد ( $RMSE = 46/61$  درصد)، برای هر کدام از مراحل چهار گانه دوره رشد، معادله‌ای مجزا پیشنهاد گردید. نتایج نشان داد که مدل‌های پیشنهادی، برآورد مناسبی از تبخیر- تعرق خیار گلخانه‌ای داشته است. متوسط مقادیر تبخیر- تعرق به کمک مدل‌های پیشنهادی در چهار مرحله رشد به ترتیب ۰/۳۹۸، ۱/۷۹، ۳/۴۲۸ و ۲/۰۶۱ میلیمتر به دست آمد. مقادیر RMSE نیز برای چهار مرحله رشد به کمک مدل‌های پیشنهادی ۱۵/۷۸، ۱۱/۴۸، ۹/۱۱ و ۷/۰۸ درصد به دست آمد. ضریب تبیین حاصل از رسم مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده از ۰/۴ (استفاده از یک تک معادله) تا ۰/۹۵ (استفاده از معادلات مختلف در مراحل متفاوت رشد) متغیر بود. از سوی دیگر مدل‌های پیشنهادی بسیار معنی‌دار بودند ( $p < 0/05$ ).

واژه‌های کلیدی: گلخانه، میکرولاسیمتر، تبخیر- تعرق، خیار

### مقدمه

است. خیار به عنوان یکی از مهمترین و پر مصرف‌ترین سبزیجاتی است که معمولاً در قالب میوه مصرف می‌شود. تولید سالانه این محصول در سطح دنیا بالغ بر ۴۰ میلیون تن برآورد می‌شود. سطح زیر کشت کنونی خیار در ایران ۷۸۱۹۷ هکتار و میزان تولید آن به طور متوسط ۲۲ تن در هکتار است. هم چنین حدود ۴۵ درصد از سطوح زیر کشت گلخانه‌ای به سبزیجات گلخانه‌ای نظیر گوجه، فلفل و خیار اختصاص یافته است.

در سالیان اخیر تحقیقات زیادی در مورد تعیین تبخیر- تعرق گیاهان گلخانه‌ای صورت پذیرفته است (۵، ۱۰، ۱۸ و ۱۹). یانگ و همکاران (۲۱) به منظور برآورد تبخیر- تعرق خیار گلخانه‌ای از فرض خطی بودن رابطه میان میزان تعرق و تشعشعات داخل گلخانه استفاده نمودند. کردا (۱۱) برای برآورد تبخیر- تعرق گیاهان خیار، گوجه فرنگی و خربزه روابط شماره ۱ و ۲ را ارائه کرد که نتایج حاصل از آن

بخش کشاورزی مهمترین بخش مصرف کننده آب بوده و مصرف بهینه و افزایش بهره‌وری آب در این بخش، سهم به‌سزایی در حفظ آن دارد. برای تدوین یک برنامه آبیاری مناسب و اعمال مدیریتی تخصصی و آگاهانه، تخمین تبخیر- تعرق گیاه ضروری است. تحقیقات متعددی در مبحث برآورد نیاز آبی گیاهان صورت گرفته و در این راستا مدل‌های مختلفی برای تخمین نیاز آبی گیاه ارائه شده

۱ و ۳- به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهر کرد

\* - نویسنده مسئول: (Email: fathalian\_f@yahoo.com)

۲- دانشجوی دکتری رشته آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

تبعیت می‌نماید. مائو و همکاران (۱۴) تأثیر کم آبیاری را بر میزان عملکرد خیار گلخانه‌ای مورد بررسی قرار داده و دریافتند که عملکرد این محصول به شدت از حجم کل آب آبیاری در هر مرحله از رشد، تأثیر می‌پذیرد. آنها همچنین رابطه میان میزان محصول به دست آمده و حجم آب مصرفی را خطی، ولی رابطه میان تبخیر- تعرق و عملکرد را به شکل تابعی از درجه دوم معرفی نمودند. مدرانو و همکاران (۱۵) بیشترین میزان تعرق از واحد سطح برگ گیاه خیار گلخانه‌ای را در دو سیکل پاییزه و بهاره به ترتیب در حدود ۳۵۰ و ۴۵۰ (گرم در متر مربع در ساعت) به دست آوردند. لیتاگو و همکاران (۱۲) همبستگی نسبتاً مناسب و البته معکوسی میان رطوبت نسبی و تبخیر- تعرق گوجه فرنگی در داخل گلخانه گزارش نمودند ( $R^2 = 0.76$ ). بابتیستا و همکاران (۳) در درون گلخانه‌ای غیر گرمایی در پرتغال، در مورد گیاه گوجه‌فرنگی که در خاک کشت شده بود تحقیقی را انجام دادند. در این تحقیق پارامترهای هواشناسی از قبیل دمای تر و خشک، دمای هوا و برگ گیاه و تشعشع خورشیدی توسط یک دستگاه ذخیره داده، ثبت شد. برای اندازه‌گیری تبخیر- تعرق، یک لایسیمتر مورد استفاده قرار گرفت و داده‌های مربوط به آبیاری، زهکشی و میزان رطوبت خاک اندازه‌گیری شد. برای تعیین تبخیر- تعرق (میلی‌متر در روز) نیز از معادله زیر استفاده کردند:

$$ET = \alpha \times SR_i + \beta \times VPD \quad (4)$$

که در آن  $SR_i$  تشعشع خورشیدی درون گلخانه (میلی‌متر در روز)،  $VPD$  کمبود فشار بخار اشباع (میلی‌بار) و  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایب رگرسیونی می‌باشند. از آنجایی که تأثیر  $VPD$  خیلی مشهود نبود از آن صرف نظر شد و معادله ۵ را با ضریب همبستگی ۰/۷۲ به دست آوردند (میلی‌متر در روز) که نتایج نزدیکی با مقادیر اندازه‌گیری شده داشت:

$$ET = 5.5 + 0.179 \times SR_i \quad (5)$$

ارگاز و همکاران (۱۷) از لایسیمتر زهکش‌دار برای تعیین تبخیر- تعرق چهار محصول خربزه، لوبیای سبز، هندوانه و فلفل در گلخانه استفاده کرده و میزان تغییرات فصلی تبخیر- تعرق بین این چهار محصول را ۱۷۰ تا ۳۷۱ میلی‌متر گزارش کردند. مولر و همکاران (۱۶) میزان تبخیر- تعرق فلفل را در داخل گلخانه و در پرمصرف‌ترین مرحله رشد در حدود ۱/۸ تا ۲/۱ میلی‌متر در روز گزارش کردند. آنالیز حساسیت مدل معرفی شده توسط آنها که مقاومت لایه مرزی را نیز در نظر می‌گرفت نشان داد که تابش، سرعت باد و کمبود فشار بخار مهمترین پارامترهای تعیین تبخیر- تعرق گلخانه‌ای بودند. هارماتو و همکاران (۸) به اختلاف ۵ درصدی تبخیر- تعرق داخل گلخانه برای گیاه گوجه فرنگی در قیاس با خارج گلخانه در مراحل اولیه رشد اشاره داشته و خاطر نشان ساختند که این اختلاف به حدود ۳۰ درصد در

به مقادیر واقعی بسیار نزدیک بود ( $R^2 = 0.92$ ). این مدل تبخیر- تعرق را با استفاده از دمای روزانه ( $T$ )، تبخیر از تشت ( $Ep$ ) و تشعشع درون گلخانه ( $R$ ) تخمین می‌زند.

$$ET_a = f(Ep - a_1 - a_2 T) / 58.5 a_3 \quad (1)$$

$$f = 58.5(ET_a / R) \quad (2)$$

که در آن  $ET_a$  تبخیر- تعرق واقعی گیاه (میلی‌متر)،  $f$  معادل تشعشع تبخیر- تعرق (بخشی از تشعشع که صرف تبخیر- تعرق می‌شود) و  $a_1$ ،  $a_2$  و  $a_3$  ضرایب رگرسیونی هستند. عدد ۵۸/۵ در رابطه ۲ نیز یک ضریب تجربی محسوب می‌شود.

لورنزو و همکاران (۱۳) در اسپانیا ابتدا تبخیر- تعرق خیار ( $ET_C$ ) را توسط یک لایسیمتر وزنی به دست آوردند و سپس یک معادله رگرسیونی دو متغیره برای معادله پنمن-مانتیت تعریف کردند که دارای دو جزء تابش خورشیدی ( $G$ ) و کمبود فشار بخار هوا ( $VPD$ ) بود. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌داد که  $VPD$  در مراحل اولیه رشد تأثیر زیادی روی  $ET_C$  دارد و رابطه بین آنها یک رابطه خطی است، در حالی که رابطه  $ET_C$  و  $G$  حالت نمایی دارد. در هر صورت این معادله از یک رگرسیون دو متغیره به دست آمده بود و در مقایسه با داده‌های لایسیمتری با خطای بیش برآورد همراه بود. در تحقیقی دیگر، الیادز (۷) تبخیر- تعرق خیار را در یک گلخانه گرمایی برای دو دوره کشت، درون لایسیمتر زهکش‌دار به دست آورد. تبخیر- تعرق گیاهان کشت شده در فصل پاییز، به طور تدریجی از ۰/۲ تا ۱/۱ میزان تبخیر از تشت کلاس  $A$  ( $E_{pan}$ )، که خارج از گلخانه قرار داده شده بود، تغییر می‌کرد. برای کل دوره کشت، میزان متوسط آب مصرفی گیاه برابر  $0.7 E_{pan}$  بود که مابین ۰/۶ تا ۵/۷ میلی‌متر در روز متغیر بود. تازل و مریک (۲۰) طی تحقیقی تبخیر- تعرق گیاه گوجه فرنگی گلخانه‌ای را تخمین زدند. نتایج حاصل نشان داد تبخیر- تعرق گیاه گوجه‌فرنگی برای فصول مختلف و محیط کشت‌های مختلف، متفاوت است. تبخیر- تعرق فصلی بین ۲۰۴/۴ تا ۲۹۶/۶ میلی‌متر در پاییز و ۳۹۱/۵ تا ۵۴۱/۱ میلی‌متر در بهار تغییر می‌کرد. بیشترین تبخیر- تعرق روزانه ۴/۴ میلی‌متر در پاییز و ۸/۲ میلی‌متر در فصل بهار بود. آنها همچنین به کمک تشعشع خورشیدی داخل گلخانه ( $R_G$ )، تبخیر- تعرق گیاه مرجع ( $ET_o$ ) در گلخانه را بصورت رابطه ۳ معرفی نمودند.

$$ET_o = (0.67 \times R_G) / 2.5 \quad (3)$$

بلانکو و فولگاتی (۴)، طی تحقیقی در مورد گیاه خیار گلخانه‌ای در کشور برزیل به این نتیجه رسیدند که میزان تبخیر- تعرق و ضریب گیاهی خیار، در اثر کاربرد آب شور کاهش می‌یابد. آنها اشاره کردند که این کاهش در مورد میزان تبخیر- تعرق از رابطه خطی

مراحل میانی و انتهایی رشد هم می‌رسد.

هدف از این تحقیق ارائه مدلی به منظور برآورد تبخیر- تعرق خیار داخل گلخانه می‌باشد تا به کمک آن بتوان با تنش‌های احتمالی ناخواسته در دوره‌های مختلف رشد گیاه خیار گلخانه‌ای مقابله و تولید را به بیشترین مقدار ممکن نزدیک نمود.

## مواد و روش‌ها

این تحقیق در گلخانه‌ای شمالی- جنوبی وابسته به مؤسسه تحقیقات گیاهپزشکی، واقع در شمال تهران انجام شد. این گلخانه تحقیقاتی دارای پوشش پلاستیکی با مساحت ۲۰۱ متر مربع بوده و اسکلت آن به صورت قوسی و چهار قلو و دارای چهار سالن می‌باشد. سیستم آبیاری مورد استفاده، آبیاری قطره‌ای بود. گلخانه مجهز به ادوات لازم برای اندازه‌گیری روزانه داده‌های هواشناسی از قبیل دماسنج برای قرائت دمای لحظه‌ای، دمای بیشینه و کمینه، رطوبت سنج برای قرائت رطوبت نسبی موجود در گلخانه، لوکس متر برای قرائت تابش خورشیدی داخل و خارج گلخانه و سیستم گرمایشی و سرمایشی بود.

قبل از انجام طرح، آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی روی خاک مورد استفاده صورت گرفت و بسترسازی خاک انجام شد. سپس دو میکرو لایسیمتر از جنس PVC با قطر ۲۸ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر برای کشت خیار و یک ترازوی دیجیتالی (با نام محک) با دقت یک صدم گرم در درون گلخانه تعبیه گردید. نتایج آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی انجام شده بدین صورت بود که EC و pH خاک به ترتیب با استفاده از دستگاه EC متر و pH متر مدل ۹۱۵PDC، به ترتیب ۳/۴۲ دسی زیمنس بر متر و ۷/۱۹ به دست آمد. بافت خاک لوم شنی و وزن مخصوص ظاهری آن ۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب به دست آمد. میزان رطوبت وزنی خاک در حالت ظرفیت زراعی (FC) نیز در آزمایشگاه و با استفاده از دستگاه صفحات فشاری، ۱۵ درصد به دست آمد.

عملیات کاشت بذرهای خیار در خرداد ۱۳۸۶ انجام شد. بذرهای خیار که از ۷۲ ساعت قبل خیس شده و جوانه زده بود، در ردیف‌هایی به طول ۱۴ متر و با فواصل ۴۰ سانتی‌متر از هم (شامل ۵ ردیف) در فضای گلخانه کاشته شد. همچنین به منظور اندازه‌گیری مقادیر واقعی تبخیر- تعرق، بذر خیار در درون دو میکرو لایسیمتر کشت گردید. در این تحقیق از بذر خیار رقم F1 L666، وزن ۱۰۰۰ دانه معادل ۲۵ گرم، درجه خلوص ۹۹ درصد و درصد جوانه‌زنی ۸۵ درصد استفاده شد. از آنجایی که گیاه خیار پس از سبز شدن جوانه و در مراحل ابتدایی رشد به میزان آب بسیار کمی نیاز دارد، تنها در حد مرطوب شدن سطح خاک و روزانه حدود ۱۰۰ گرم آب به میکرو لایسیمتر مربوطه اضافه می‌شد. پس از ۱۱ روز و با سه برگگی شدن گیاه خیار،

جهت عمیق شدن ریشه خیار به مدت ۱۰ روز به بوته‌ها آب داده نشد و مجدداً به مدت ۵ روز، روزانه ۱۰۰ گرم آب به گیاه داده شد. پس از آن آبیاری بر اساس رساندن رطوبت خاک به حد ظرفیت زراعی و با توزین روزانه میکرو لایسیمترها به روش وزنی انجام شد. با استفاده از وزن خاک خشک درون میکرو لایسیمتر ( $W_d$ ) و معادله ۶، وزن میکرو لایسیمتر حاوی خیار در حالت رطوبت FC محاسبه شد (با به دست آوردن  $\theta_{m(FC)}$ ).

$$\theta_{m(FC)} = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100 \quad (6)$$

که در آن  $W_d$  وزن خاک خشک (گرم) درون میکرو لایسیمتر،  $W_w$  وزن خاک مرطوب درون میکرو لایسیمتر (گرم) و  $\theta_{m(FC)}$  درصد رطوبت وزنی میکرو لایسیمتر حاوی خیار در حالت رطوبتی FC می‌باشد. همواره سعی گردید رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی باقی بماند (افزودن آب به میکرو لایسیمترها تا رسیدن وزن آنها به حالت ظرفیت زراعی ادامه داشت). در صورت وجود زه‌آب نیز مقدار آن ثبت می‌شد. مقادیر واقعی تبخیر- تعرق از اختلاف وزن میکرو لایسیمترها در دو روز متوالی، در یک زمان معین، و تبدیل آن به میلی‌متر حاصل گردید (میلی‌متر در روز). در نهایت با استفاده از پارامترهای هواشناسی اندازه‌گیری شده مؤثر بر تبخیر- تعرق، بهترین روابط که تبیین کننده میزان تبخیر- تعرق خیار گلخانه‌ای باشند، به دست آمدند. در ابتدا برای تمامی طول دوره رشد خیار گلخانه‌ای، یک مدل رگرسیونی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که استفاده از این تک معادله رگرسیونی برای تمام طول دوره رشد خیار نمی‌تواند بیانگر نیاز آبی واقعی این محصول باشد. بدین منظور در گام بعد، برای هر کدام از مراحل دوره رشد، به صورت جداگانه معادله رگرسیونی پیشنهاد شد تا برآورد مناسبتری از نیاز آبی این محصول به دست آید.

## ارزیابی مدل‌های پیشنهادی

پس از ارائه مدل‌های پیشنهادی برآورد کننده میزان تبخیر- تعرق خیار گلخانه‌ای به کمک داده‌های حاصل از میکرو لایسیمتر اول، این مدل‌ها به کمک داده‌های میکرو لایسیمتر دوم مورد ارزیابی و اعتبار سنجی قرار گرفتند. بدین منظور با استفاده از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، آماره t (t-statistics) و رسم مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده در مقابل یکدیگر، نتایج حاصل از مدل‌های پیشنهادی ارزیابی شدند. مقدار RMSE از رابطه ۷ به دست آمد:

$$RMSE = \left[ \sum_{i=1}^n (P_i - M_i)^2 / n \right]^{0.5} (100 / \bar{M}) \quad (7)$$

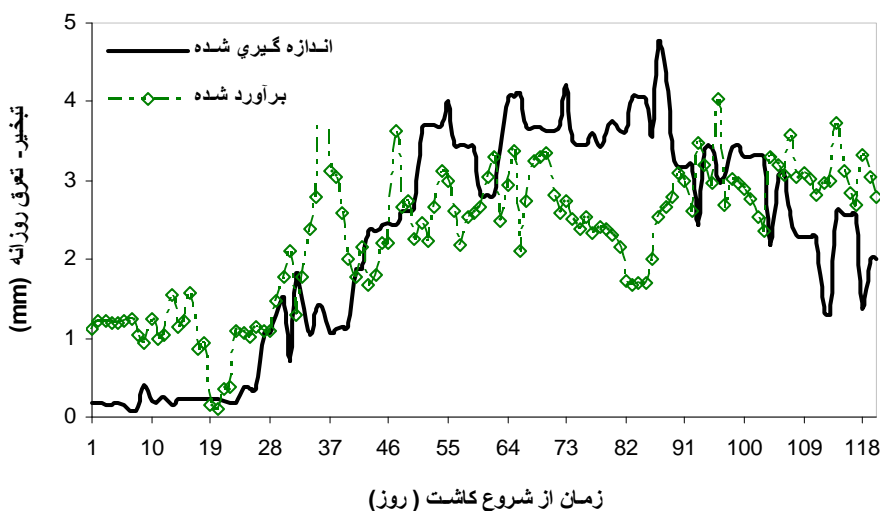
در این رابطه  $M_i$ ،  $P_i$  و  $\bar{M}$  به ترتیب مقادیر روزانه اندازه‌گیری شده، برآورد شده و متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر- تعرق

$$ET_c = 7.05 - 1.27R_a + 0.0781RH + 0.487 \frac{\Delta R_n}{\Delta + \gamma} \quad (۸)$$

همانطور که در شکل ۱ قابل مشاهده است، معادله ۸ (با سطح اطمینان ۹۵ درصد) برآورد مناسبی از مقادیر تبخیر- تعرق واقعی خیار در تمام طول دوره رشد نداشته است. به طوری که این معادله تبخیر- تعرق خیار را در مرحله ابتدایی و انتهایی رشد، خیلی بیشتر از مقدار واقعی و در مرحله حساس شکوفه و میوه‌دهی که گیاه خیار به تنش آبی بسیار حساس است، کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده است. استفاده از این تک معادله در برآورد مقادیر نیاز آبی گیاه خیار منجر به ایجاد تنش آبی و کاهش میزان عملکرد خواهد شد. ارزیابی ضعیف مدل پیشنهادی مذکور از یک سو و نتایج حاصل از آماره t که در قسمت ارزیابی مدل‌های پیشنهادی ارائه خواهد شد، از دیگر سو، منجر به عدم پذیرش این معادله شد.

#### ارائه مدل برای هر مرحله از دوره رشد

در این مرحله به منظور برآورد دقیقتر تبخیر- تعرق خیار گلخانه‌ای برای هر کدام از مراحل چهارگانه دوره رشد معادله‌ای مجزا پیشنهاد گردید. این معادلات به صورت روابط ۹ تا ۱۲ به ترتیب برای مراحل ابتدایی (روز ۱ تا ۳۰)، توسعه (روز ۳۱ تا ۵۰)، میانی (روز ۵۱ تا ۱۱۰) و انتهایی رشد (روز ۱۱۱ تا ۱۲۰) در نظر گرفته شدند.



(شکل ۱) - تبخیر- تعرق خیار گلخانه‌ای حاصل از تک معادله پیشنهادی (معادله ۸) در تمام دوره رشد

$$ET_{c1} = -2.9 + 0.175 T_{\min} + 0.0191 RH_{\text{mean}} \quad , \quad R^2 = 0.71 \quad (۹)$$

می‌باشند. مقدار RMSE کمتر از ۱۰ درصد مؤید برآوردی بسیار خوب، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد متوسط و بزرگتر از ۳۰ درصد برآوردی نامناسب تعریف شده است (۹).

## نتایج و بحث

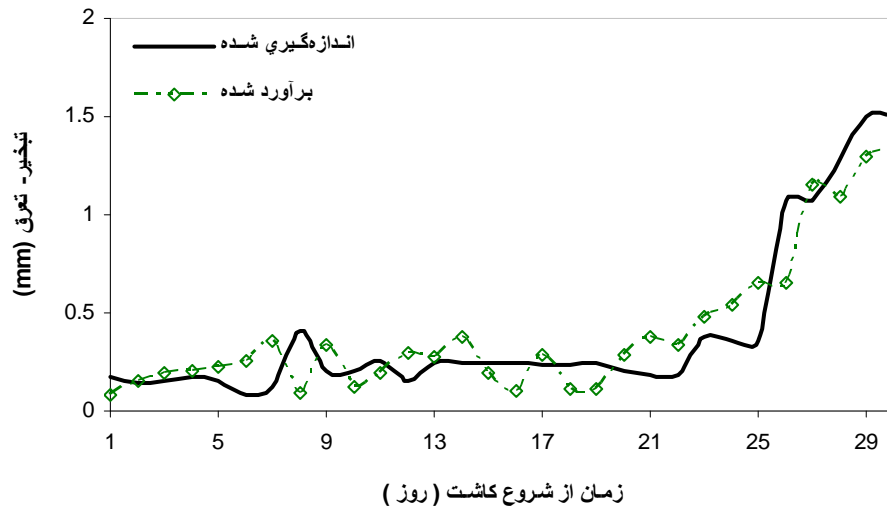
### ارائه تک معادله برای تمامی طول دوره رشد خیار

همانگونه که قبلاً شرح داده شد، در گام اول مدل پیشنهادی برای تمامی طول دوره رشد خیار ارائه شد. این معادله به صورت رابطه ۸ با  $R^2$  برابر ۰/۴۵ به دست آمد. در این معادله تابش برون زمینی ( $R_a$ )، رطوبت نسبی ( $RH$ )، شیب منحنی فشار بخار ( $\Delta$ )، تابش خالص خورشیدی ( $R_n$ ) و ضریب سایکرومتری ( $\gamma$ ) متغیرهای مستقل را تشکیل می‌دهند. لازم به توضیح است که انتخاب متغیرهای مستقل به کار رفته در تمامی مدل‌های پیشنهادی به منظور برآورد تبخیر- تعرق گیاه خیار در این تحقیق، در هر یک از مراحل مختلف دوره رشد، بر اساس تکنیک پیشرو و پسرو<sup>۱</sup> صورت پذیرفته است. بدین معنی که تمامی پارامترهای اندازه‌گیری شده که به نظر می‌رسید در برآورد تبخیر- تعرق مؤثر باشند وارد مدل شده و در نهایت، آنهایی که تأثیر چندانی در برآورد این خصوصیت نداشتند، از معادله نهایی حذف شدند. نمودار تبخیر- تعرق روزانه خیار که از معادله حاصله به دست آمده در شکل ۱ نمایش داده شده است.

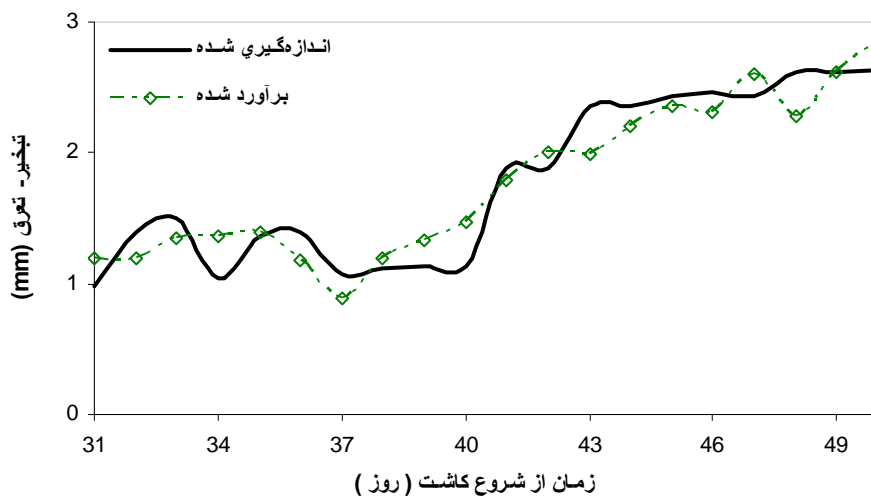
$$ET_{c2} = 145.6 - 20 R_a + 1.25 \frac{n}{N}, R^2 = 0.84 \quad (10)$$

$$ET_{c3} = -0.344 + 0.733 R_a - 0.0282 RH_{mean}, R^2 = 0.48 \quad (11)$$

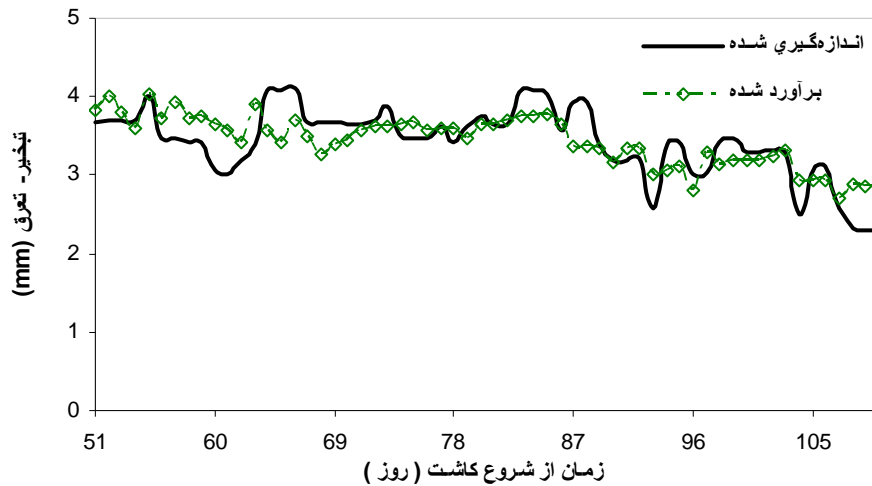
$$ET_{c4} = -11.1 - 0.704 \frac{\Delta R_n}{\Delta + \gamma} + 1.56(e_a - e_d) + 11.5 \frac{n}{N} + 0.105 RH_{mean}, R^2 = 0.92 \quad (12)$$



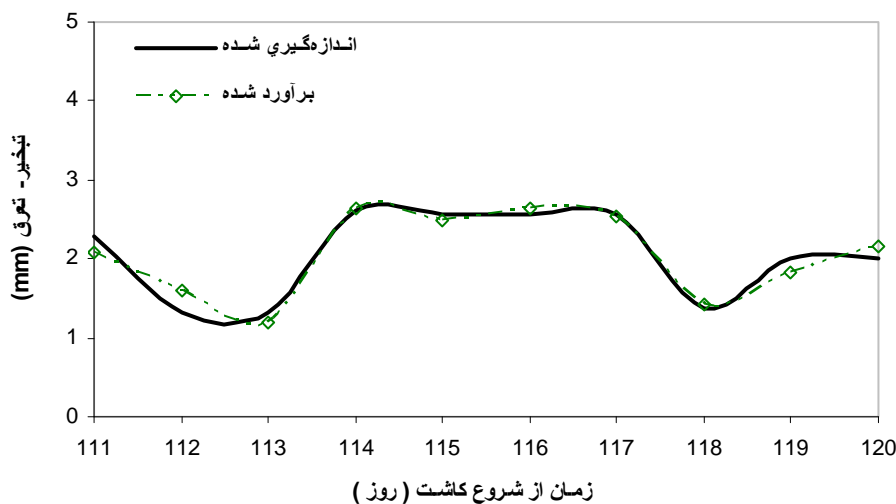
(شکل ۲) - تبخیر- تعرق خیار گلخانه‌ای در مرحله ابتدایی رشد (معادله ۹)



(شکل ۳) - تبخیر- تعرق خیار گلخانه‌ای در مرحله توسعه رشد (معادله ۱۰)



(شکل ۴)- تبخیر- تعرق خیار گلخانه‌ای در مرحله میانی رشد (معادله ۱۱)



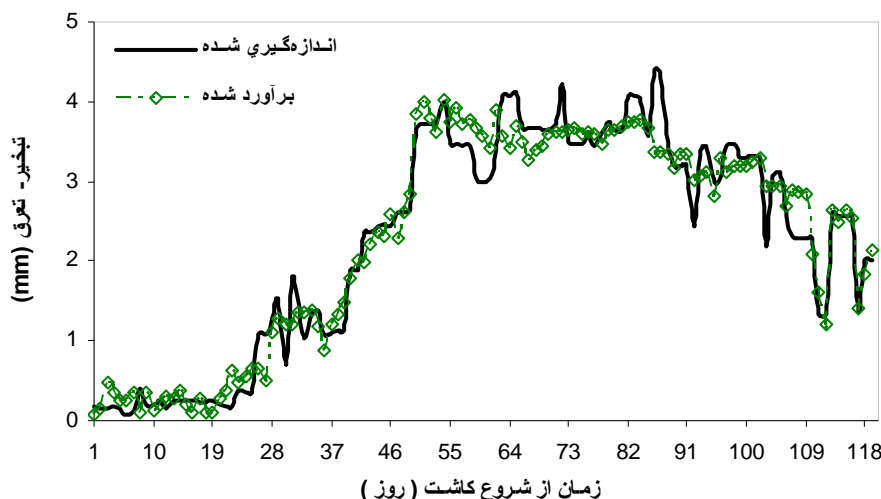
(شکل ۵)- تبخیر- تعرق خیار گلخانه‌ای در مرحله انتهایی رشد (معادله ۱۲)

ای کاملاً معنی‌دار بودند ( $p < 0.05$ ). این روابط متوسط مقادیر تبخیر- تعرق را که در چهار مرحله رشد ۰/۳۹۸، ۱/۷۷۹، ۳/۴۲۸ و ۲/۰۶۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شده بودند به ترتیب ۰/۴۰۶، ۱/۷۷۸، ۳/۴۳ و ۲/۰۵۸ میلی‌متر برآورد نمودند.

زمانی که مقادیر برآورد شده تبخیر- تعرق خیار گلخانه‌ای در هر کدام از مراحل چهار گانه رشد، توسط مدل‌های پیشنهادی مختص به همان دوره را در کنار یکدیگر قرار دهیم، مقادیر تبخیر- تعرق برآورد شده در تمام طول دوره رشد به صورت پیوسته حاصل می‌شوند که نتیجه آن در شکل ۶ ارائه شده است.

در این روابط  $T_{min}$  دمای کمینه،  $RH_{mean}$  متوسط رطوبت نسبی،  $R_a$  تابش برون زمینی،  $n/N$  درجه ابرناکی،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار،  $R_n$  تابش خالص خورشیدی،  $\gamma$  ضریب سایکرومتری و  $e_a - e_d$  کمبود فشار بخار اشباع می‌باشند.

ماتو و همکاران (۱۴) نیز برای برآورد میزان عملکرد خیار گلخانه‌ای، روابط رگرسیونی مجزایی برای هر کدام از مراحل رشد این گیاه ارائه نموده‌اند. مقادیر تبخیر- تعرق برآورد شده به کمک مدل‌های پیشنهادی مذکور، برای هر کدام از مراحل دوره رشد ترسیم شدند که نتایج حاصل از آن در شکل‌های ۲ تا ۵ قابل مشاهده است. تمامی معادلات پیشنهادی ارائه شده برای ۴ مرحله رشد خیار گلخانه-



(شکل ۶) - تبخیر- تعرق خیار گلخانه‌ای در کل مرحله رشد به صورت پیوسته (معادلات ۹ تا ۱۲)

(جدول ۱) - نتایج حاصل از آنالیز آماره t برای مقادیر برآورد شده تبخیر- تعرق خیار گلخانه‌ای

مرحله رشد	$ET_{pre} = a + b ET_{mea}$	
	a	b
تمامی مراحل رشد به صورت پیوسته (معادلات ۹ تا ۱۲)	۱/۳۷*	۰/۴۰۴*
مرحله ابتدایی رشد (معادله ۹)	۰/۰۹۵ <sup>ns</sup>	۰/۷۷۳ <sup>ns</sup>
مرحله توسعه رشد (معادله ۱۰)	۰/۲۰۲ <sup>ns</sup>	۰/۸۸ <sup>ns</sup>
مرحله میانی رشد (معادله ۱۱)	۰/۳۵ <sup>ns</sup>	۰/۷۵ <sup>ns</sup>
مرحله انتهایی رشد (معادله ۱۲)	۰/۱۵۷ <sup>ns</sup>	۰/۹۲۲ <sup>ns</sup>

\*- اختلاف معنی داری میان a با صفر و b با یک وجود دارد.

ns - اختلاف معنی داری میان a با صفر و b با یک وجود ندارد.

خط و b شیب خط) به شکل  $ET_{predicted} = a + b ET_{measured}$  تبیین می‌کند. حال فرض صفر ( $H_0$ ) که ادعای  $a = 0$  و  $b = 1$  را تعریف می‌کند، با آماره t تست می‌شود. مقادیر a و b برای تمامی مراحل رشد در جدول ۱ آورده شده‌اند.

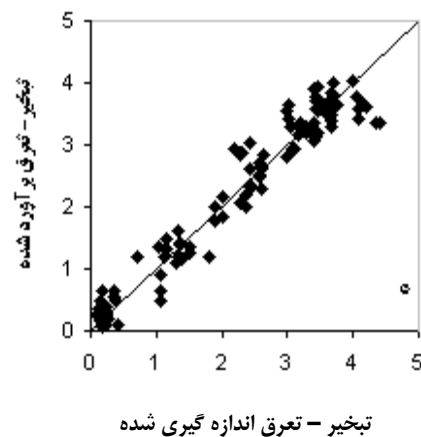
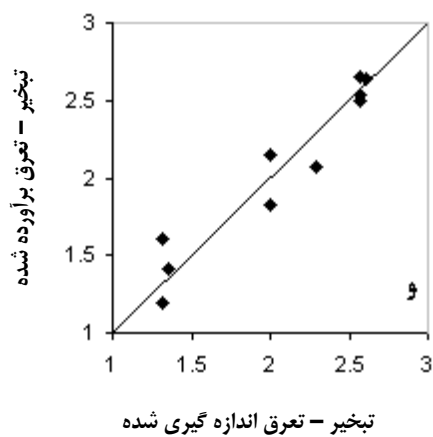
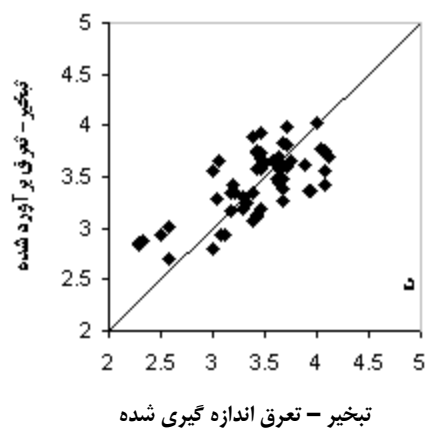
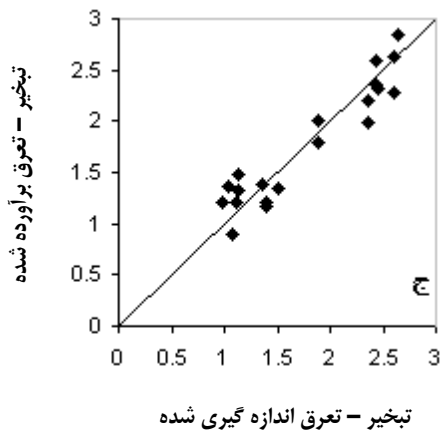
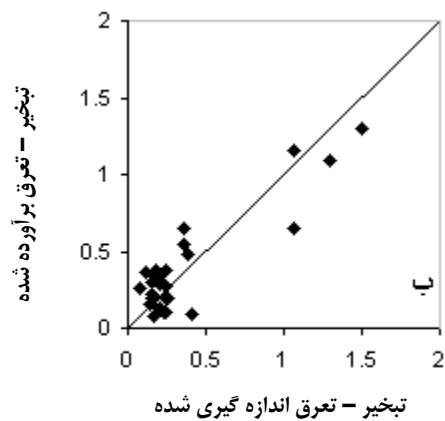
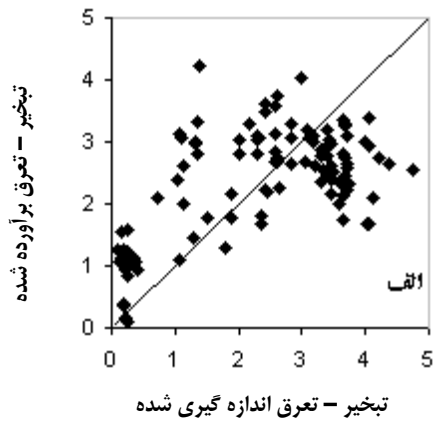
همانطور که از نتایج جدول ۱ مشخص است، چنانچه در تمامی مراحل رشد از تک معادله ۸ استفاده نماییم ضرایب a و b به ترتیب اختلاف معنی داری با صفر و یک خواهند داشت؛ حال آنکه در تمامی معادلات پیشنهادی، اختلاف a با صفر و b با یک معنی دار نیست. نتایج این جدول نیز دلیلی دیگر بر عملکرد نامناسب معادله ۸ در برآورد تبخیر- تعرق خیار گلخانه‌ای و کارایی روابط ۹ تا ۱۲ در برآورد همین خصوصیت است. در ادامه نیز مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده تبخیر- تعرق در تمام مراحل رشد در مقابل هم و نسبت به خط ۱:۱ (شکل ۷) و مقادیر برآورد شده و مقادیر باقیمانده<sup>۱</sup> در مقابل هم (شکل ۸)، رسم شدند.

همانگونه که از شکل ۶ پیداست، ادغام مدل‌های چهارگانه پیشنهادی در هر کدام از مراحل مختلف رشد، توانسته است هم‌خوانی بسیار مناسبی با مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر- تعرق داشته باشد. در ضمن ضریب همبستگی میان مقادیر برآورد و اندازه‌گیری شده تبخیر- تعرق در شکل ۶، ۰/۹۵ بدست آمد که حاکی از عملکرد مناسب مدل‌های پیشنهادی است. برای درک بهتر از چگونگی عملکرد مدل‌های پیشنهادی، این مدل‌ها به کمک روش‌های مختلف (رسم مقادیر اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر برآورد شده، ریشه میانگین مربعات خطا و آماره t) مورد ارزیابی واقع شدند.

#### ارزیابی مدل‌های پیشنهادی برآورد کننده تبخیر- تعرق

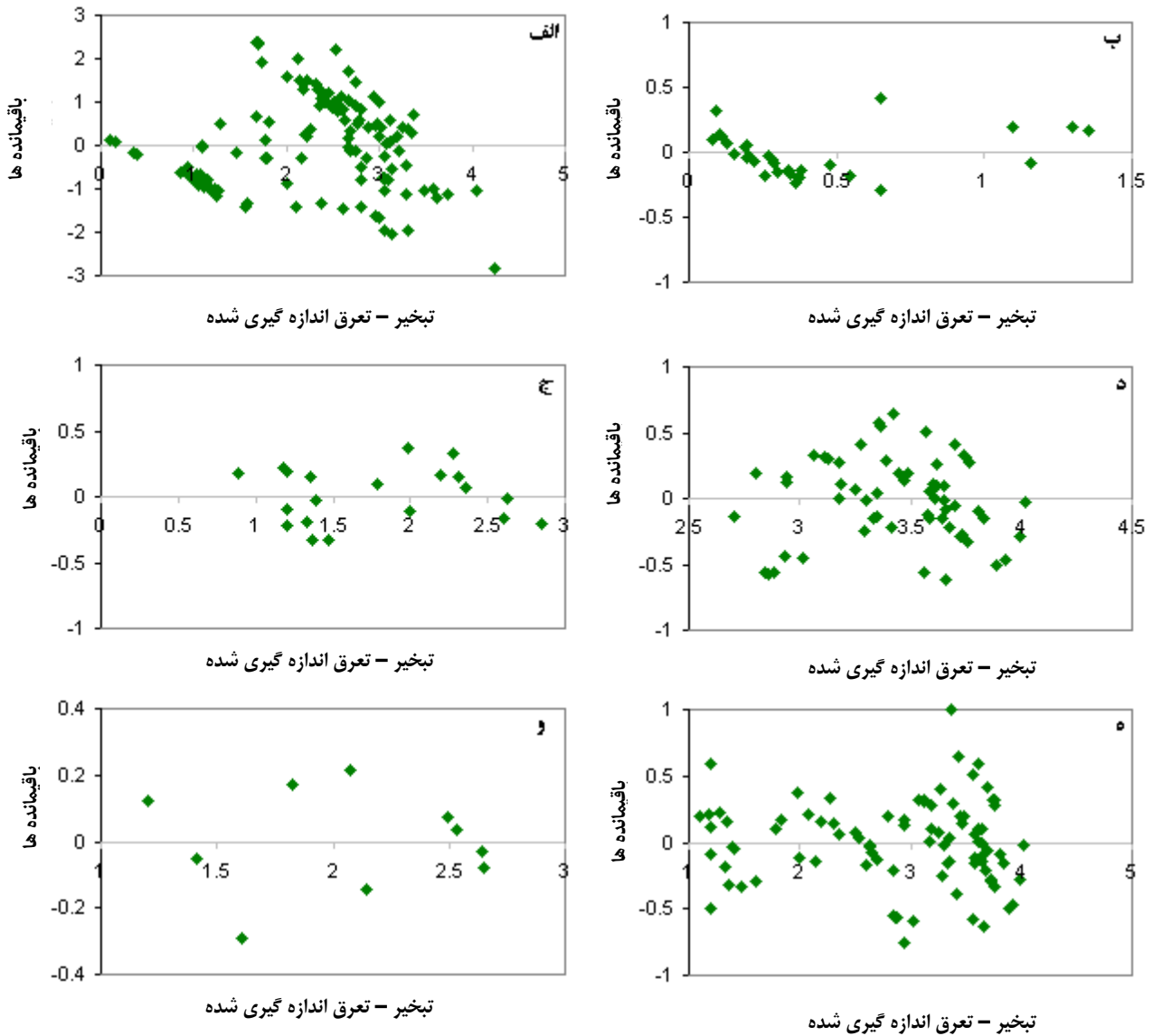
همانطور که قبلاً اشاره شد برای ارزیابی مدل‌های پیشنهادی از آماره t و ریشه میانگین مربعات خطا (معادله ۷) استفاده شد. در آماره t فرض بر آن است که رابطه میان تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده ( $ET_{measured}$ ) و برآوردی ( $ET_{predicted}$ ) در تک تک مراحل رشد از یک رابطه رگرسیونی خطی با ضرایب ثابت a و b (a عرض از مبدا

1- Residual



(شکل ۷) - مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده تبخیر- تعرق خیار گلخانه‌ای به کمک مدل‌های پیشنهادی برای (الف) تمامی مراحل رشد بعنوان یک مرحله (معادله ۸)، (ب) مرحله ابتدایی رشد (معادله ۹)، (ج) مرحله توسعه رشد (معادله ۱۰)، (د) مرحله میانی رشد (معادله ۱۱)، (و) مرحله انتهایی رشد (معادله ۱۲) و (ه) ترکیب مدل‌های پیشنهادی برای تمامی مراحل رشد بصورت پیوسته





(شکل ۸) - مقادیر برآورد شده تبخیر- تعرق و مقادیر باقیمانده‌ها در مقابل هم، (الف) تمامی مراحل رشد بعنوان یک مرحله (معادله ۸)، (ب) مرحله ابتدایی رشد (معادله ۹)، (ج) مرحله توسعه رشد (معادله ۱۰)، (د) مرحله میانی رشد (معادله ۱۱)، (و) مرحله انتهایی رشد (معادله ۱۲) و (ه) ترکیب مدل‌های پیشنهادی برای تمامی مراحل رشد بصورت پیوسته

(جدول ۲) - مقادیر RMSE (درصد) محاسبه شده برای مدل‌های پیشنهادی در تمامی مراحل رشد

وضعیت	RMSE	مرحله رشد
ضعیف	۴۶/۶۱	تمامی مراحل رشد (به عنوان یک مرحله)
خوب	۱۵/۷۸	مرحله ابتدایی رشد
خوب	۱۱/۴۸	مرحله توسعه رشد
بسیار خوب	۹/۱۱	مرحله میانی رشد
بسیار خوب	۷/۰۸	مرحله انتهایی رشد
خوب	۱۳/۳۸	تمام مراحل رشد (به صورت پیوسته)

چهار گانه رشد خیار ارائه شده‌اند، در دسته خوب یا بسیار خوب قرار می‌گیرند ( $RMSE < 20\%$ )، که تأییدی بر نتایج بدست آمده از جدول ۱ و شکل‌های ۷ و ۸ مبنی بر عملکرد مناسب مدل‌های پیشنهادی به منظور برآورد تبخیر- تعرق خیار گلخانه‌ای است.

### نتیجه‌گیری

هدف اصلی این تحقیق، تلاش به منظور برآورد دقیق و نزدیک به واقعیت تبخیر- تعرق گیاه خیار در محیط گلخانه بود. در این راستا، معادله‌ای که در گام نخست برای تمام طول دوره رشد خیار پیشنهاد گردید، نتوانست با دقت بالایی به این مهم دست یابد. از اینرو برای تک تک مراحل چهار گانه رشد این محصول، معادلاتی مجزا ارائه گردید. تمامی معادلات ارائه شده کاملاً معنی دار بودند ( $P < 0.05$ ). از مهمترین متغیرهای مستقل به کار رفته در مدل‌های ارائه شده جدید می‌توان به متوسط رطوبت نسبی، دمای کمینه، درجه ابرناکی، تابش خالص خورشیدی و کمبود فشار بخار اشباع اشاره کرد. این معادلات متوسط مقادیر واقعی تبخیر- تعرق را که در چهار مرحله رشد ۰/۳۹۸، ۱/۷۹، ۳/۴۲۸ و ۲/۰۶۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شده بودند، با دقت بسیار بالا و به ترتیب ۰/۴۰۶، ۱/۷۷۸، ۳/۴۳ و ۲/۰۵۸ میلی‌متر برآورد نمودند. رسم مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده تبخیر- تعرق، رسم مقادیر برآورد شده تبخیر- تعرق و مقادیر باقیمانده‌ها در مقابل هم و نتایج حاصل از آماره  $t$  که در این تحقیق به کار گرفته شدند، همگی دلیلی بر کارایی مدل‌های پیشنهادی بودند.

همانطور که در شکل ۷ قابل مشاهده است پراکنش مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده در نزدیکی خط ۱:۱ مناسب بوده و خط رگرسیونی در شکل (۷-ه) با  $R^2$  برابر با ۰/۹۵، تقریباً برخط یک به یک مماس می‌گردد. فتحی و کوچک زاده (۱) نیز مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده میزان تعرق خیار گلخانه‌ای را به کمک یک رابطه خطی ساده (بدون عرض از مبدأ) با ضریب همبستگی ۰/۸۱۷ برازش دادند. در تحقیق آنها، میزان تعرق به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی برآورد شده است.

در شکل ۸ نیز پراکنش بیشتر نقاط در اطراف صفر حکایت از توانایی بالای مدل در برآورد خصوصیت مورد بحث (تبخیر- تعرق) دارد. همانند شکل ۷، در شکل (۸-الف) که از معادله ۸ حاصل شده است، این پراکندگی در دامنه وسیعتری (۳- تا ۳+) در مقایسه با حالت‌های دیگر همین شکل ظاهر شده است. اگر چه نقاط حاصل در شکل (۸-ه) که تمامی مدل‌های پیشنهادی را در چهار مرحله دوره رشد خیار بصورت پیوسته در نظر می‌گیرد، در بازه (۱- تا ۱+) تغییر می‌کنند، ولی با کمی دقت بیشتر می‌توان دریافت که قسمت عمده نقاط در بازه (۰/۵- تا ۰/۵+) تغییر می‌کنند (با دامنه تغییر نقاط در شکل ۸-الف مقایسه کنید). این نتایج نشان می‌دهد که معادلات ارائه شده برای مراحل مختلف رشد خیار گلخانه‌ای، از دقت کافی برخوردار است.

روش دیگری که برای ارزیابی مدل‌های پیشنهادی استفاده شد، محاسبه ریشه میانگین مربعات خطا (معادله ۷) بود. نتایج حاصل از این قسمت در جدول ۲ آورده شده است.

با توجه به نتایج این جدول، تمام مدل‌هایی که به تفکیک مراحل

### منابع

- ۱- فتحی پ. و کوچک زاده م. ۱۳۸۳. تخمین تعرق خیار گلخانه‌ای با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی. مجله علوم خاک و آب، جلد ۱۸، شماره ۲، صفحه ۲۰۸ تا ۲۱۷.
- 2- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Rome, Italy.
- 3- Babtista J.F., Bailey B.J., and Meneses J.F. 2005. Measuring and modeling transpiration versus evapotranspiration of a tomato crop grown on soil in a Mediterranean greenhouse. Acta Horticulturae, 691: 313 – 319.
- 4- Blanco F.F. and Folegatti M. 2003. Evapotranspiration and crop coefficient of cucumber in greenhouse. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 7(2):285-291.
- 5- Boulard T., and Wang S. 2000. Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions. Agricultural and Forest Meteorology, 100:25-34.
- 6- Donatelli M., Bellocchi G. and Carlini L. 2006. Sharing knowledge via software components: Models of reference evapotranspiration. European Journal of Agronomy, 24:186–192.
- 7- Eliad G. 1988. Irrigation of greenhouse grown cucumbers. Journal of Horticultural Science, 63(2):235-239.
- 8- Harmanto Salokhe V.M., Babel M.S. and Tantau H.J. 2005. Water requirement of drip irrigated tomatoes grown in greenhouse in tropical environment. Agricultural Water Management, 71:225-242.
- 9- Jamieson P.D., Porter J.R. and Wilson D.R. 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. Fields Crop Research, 27:337-350.
- 10- Jolliet O. 1994. HORTITRANS, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses.

- Journal of Agricultural Engineering Research, 57:23–37.
- 11- Kirda C. 1998. Evapotranspiration Measurements of Greenhouse Grown Tomato, Melon and Cucumber. International Symposium on Arid Region Soils, 21-24 Sep, Izmir, Turkey.
  - 12- Litago G., Baptista F.J., Meneses J.F., Navas L.M., Bailey B.J. and Sanchez- Giron V. 2005. Statistical modelling of the microclimate in a naturally ventilated greenhouse. Biosystems Engineering, 92(3):365-381.
  - 13- Lorenzo P., Medrana E. and Sanchez M.C. 1998. Greenhouse crop transpiration: an implement to soilless irrigation management. Acta Horticulturae, 458: 113-119.
  - 14- Mao X., Liu, M., Wang X., Liu, C., Hou Z. and Shi J. 2003. Effects of deficit irrigation on yield and water use of greenhouse grown cucumber in the North China Plain. Agricultural Water Management, 61:219-228.
  - 15- Medrano E., Lorenzo P., Sa ́nchez-Guerrero M.C. and Montero J.I. 2005. Evaluation and modelling of greenhouse cucumber-crop transpiration under high and low radiation conditions. Scientia Horticulturae, 105: 163-175.
  - 16- M ́oller, M., Tanny, J., Li, Y. and Cohen, S. 2004. Measuring and predicting evapotranspiration in an insect-proof screenhouse. Agricultural and Forest Meteorology, 127:35-51.
  - 17- Orgaz F., Fernandes M.D., Bonachela S., Gallardo M. and Federes E. 2005. Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. Agricultural Water Management, 72:81-96.
  - 18- Papadakis G., Frangoudakis A., and Kyritsis S. 1994. Experimental investigation and modelling of heat and mass transfer between a tomato crop and the greenhouse environment. Journal of Agricultural Engineering Research, 57: 217–227.
  - 19- Pollet S. 1999. Application of the Penman-Monteith model to calculate the evapotranspiration of head lettuce *Lactuca sativa L. var capitata* in glasshouse conditions. Acta Horticulturae, 519:151-161.
  - 20- Tuzel I.H. and Meric M.K. 2001. Evapotranspiration of tomato plants grown in different soilless culture system. Acta Horticulturae, 559:555-559.
  - 21- Yang x., Short T.H., Fox R.D., and Bauerle W.L. 1990. Transpiration, leaf temperature and stomatal resistance of a greenhouse cucumber crop. Agricultural and Forest Meteorology, 51:197-209.



## Evaluation and Prediction of Greenhouse Cucumber Evapotranspiration at Different Growth Stages

F. Fathalian<sup>1\*</sup> - R. Moazenzadeh<sup>2</sup> - M.R. Nouri Emam zadei<sup>3</sup>

### Abstract

A precise estimation of water consumption throughout a crop's growth season and of the amount of water consumed in each growth stage may play an important role in water resources management, integrated water and soil management, and proper irrigation scheduling. In a greenhouse, this faces with the conditions specific to this environment. This study was conducted to propose a model to make an appropriate and accurate prediction of evapotranspiration (ET) for greenhouse cucumber. Two same microlysimeters with 28 cm diameter and 30 cm height were deployed simultaneously in the greenhouse for the cucumber culture. Amount of ET was measured daily by the weighing method in both microlysimeters. The data from the first microlysimeter were used to derive, and those from the second to validate the proposed models. The developed models were evaluated by root mean square error (RMSE), drawing measured versus predicted ET values, and t-statistics. The proposed model was initially developed in the form of a single regression equation with independent variables such as vapor pressure curve slope and relative humidity for the whole growth season; further however, a separate equation was developed for each of the four growth stages, as the initial model did not perform well (RMSE=46.61%). The results showed that the proposed models made appropriate predictions of greenhouse cucumber ET. Average amount of cucumber ET were obtained with proposed models 0.398, 1.79, 3.428 and 2.061 mm for four growth stages. RMSE values also were obtained 15.78, 11.48, 9.11 and 7.08 percentage for four growth stages. Correlation coefficient from measured and predicted values of cucumber ET varied from 0.4 (using single equation) to 0.95 (using variable equations for different growth stages). All of the proposed models were significant ( $p < 0.05$ ).

**Key words:** Greenhouse, Microlysimeter, Evapotranspiration, Cucumber

1,3- Former Graduate student, and Assistant prof., Water Engineering Department, Shahrekord University, Respectively (\* - Corresponding author, Email: fathalian\_f@yahoo.com)

2- PhD student, Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad