

اندازه‌گیری و مدل‌سازی تبخیر - تعرق خیار در شرایط درون گلخانه

روزبه مودن زاده¹

تاریخ دریافت: 1393/05/14

تاریخ پذیرش: 1393/11/04

چکیده

فقدان سناریوهای صحیح مدیریتی در زمینه تدوین و اعمال برنامه‌ریزی‌های مناسب آبیاری از قبیل تعیین دقیق نیاز آبی گیاهان، منجر به هدررفت آب و کاهش راندمان آبیاری می‌گردد. در درون گلخانه این مهم از شرایط خاص درون گلخانه متأثر خواهد بود. در این تحقیق سعی شده تا میزان تبخیر-تعرق گیاه خیار گلخانه‌ای با استفاده از تکنیک‌های رگرسیون و شبکه‌های عصبی مصنوعی برآورد و نتایج با یکدیگر مقایسه گردد. از اینرو همزمان با کاشت خیار در داخل گلخانه از شش میکرو لایسیمتر مشابه نیز استفاده شد تا مقادیر واقعی تبخیر-تعرق این گیاه به روش وزنی اندازه‌گیری شوند. از متوسط داده‌های سه میکرو لایسیمتر برای ساخت توابع رگرسیونی (آموزش شبکه در شبکه عصبی) و از متوسط داده‌های سه میکرو لایسیمتر دیگر برای اعتبارسنجی نتایج استفاده شد. به منظور ارزیابی نتایج به دست آمده از شاخص‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب کارایی نش-ساتکلیف (Ens)، درصد انحراف (PBIAS) و نسبت ریشه میانگین مربعات خطا به انحراف استاندارد (PSR) استفاده شد. نتایج نشان داد که استفاده از یک تک معادله رگرسیونی برای تخمین تبخیر-تعرق خیار گلخانه‌ای عملکرد مناسبی به همراه نخواهد داشت. از اینرو دوره رشد خیار به 4 مرحله تقسیم و برای هر دوره معادله جدیدی ارائه شد. ضرایب همبستگی میان مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده تبخیر-تعرق از 0/4 (تمامی دوره رشد بعنوان یک مرحله در رگرسیون) تا 0/96 (در شبکه عصبی) متغیر بود. مقدار تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده در کل دوره رشد 273/45 میلیمتر و مقادیر برآورد شده آن به کمک تکنیک رگرسیون؛ قبل و بعد از تفکیک دوره رشد به ترتیب 275/7 و 275/6 میلیمتر و به کمک تکنیک شبکه عصبی 272/45 میلیمتر به دست آمد. اگرچه نتایج حکایت از بهبود چشمگیر در برآورد تبخیر-تعرق بواسطه تقسیم‌بندی دوره رشد خیار گلخانه‌ای در تکنیک رگرسیون دارد، با اینحال نتایج حاصل از شبکه عصبی بهتر ارزیابی شده است. نتایج آزمون آماری تی تست نشان داد که اختلاف میان مقادیر برآورد شده به کمک تکنیک شبکه عصبی با تکنیک رگرسیون بصورت یکجا و یا زمانی که مراحل رشد تفکیک شود به ترتیب معنی‌دار و غیر معنی‌دار بوده است ($p < 0/05$). مقادیر شاخص‌های RMSE، Ens، PBIAS و PSR به ترتیب از 1/06، -0/59، -0/008 و 0/77 در برآورد رگرسیون تا 0/267، 0/033، -0/003 و 0/194 در برآورد شبکه عصبی متغیر بوده است.

واژه‌های کلیدی: رگرسیون، شبکه عصبی مصنوعی، مراحل رشد، میکرو لایسیمتر وزنی

مقدمه

ممکن و تاثیر گذار در دستیابی به چنین هدف مهمی تعیین و تامین دقیق آب مصرفی گیاهان مختلف است که تبخیر-تعرق (ET^2) نامیده می‌شود. کمبود مطالعات انجام شده در مورد آب مصرفی گیاهان گلخانه‌ای هنوز احساس می‌شود به طوری که با وجود کمبود منابع آبی، آبیاری عمدتاً بر اساس تجربه شخصی کشاورزان پایه‌ریزی می‌گردد (19). در سالیان اخیر این مطالعات خصوصاً در زمینه برآورد تبخیر-تعرق محصولات گلخانه‌ای روند چشمگیری به خود گرفته است (5، 7، 13، 18، 20، 21 و 22). ضریب همبستگی میان ضریب گیاهی هندوانه بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده لایسیمتری و مقادیر برآورد شده تبخیر-تعرق گیاه مرجع حاصل از روش‌های پنمن-

در دو دهه اخیر، کشت‌های گلخانه‌ای به گستردگی مورد استقبال کشاورزان ایرانی قرار گرفته، به نحوی که حدود 45 درصد از کل سطوح زیرکشت محصولات گلخانه‌ای به گیاهان خیار، گوجه فرنگی و فلفل اختصاص یافته است (3). هم‌اکنون قسمت عمده‌ای از آب مصرفی در بخش کشاورزی در کشورمان از سفره‌های آب زیرزمینی تامین می‌شود و از آنجا که بسیاری از دشت‌های کشور از نقطه نظر افت سطح آب زیرزمینی در وضعیت بحرانی قرار دارند اهمیت برنامه‌ریزی دقیق آبیاری بیش از پیش نمایان می‌گردد. یکی از راهکارهای

1- استادیار گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود

Email: romo_sci@shahroodut.ac.ir

میوه و محتوای آب گیاه اثرگذار است. لورنزو و همکاران (13) به این نتیجه رسیدند که در گلخانه‌های دارای سایه‌بان کیفیت گوجه فرنگی و عملکرد خیار افزایش ولی تعرق و جذب رو به بالای آب کاهش و راندمان کاربرد آب در حدود 47 و 62 درصد به ترتیب برای دو محصول بهبود یافته است. نتایج تحقیق کیو و همکاران (21) بمنظور بررسی تاثیر پنج تیمار متفاوت تراکم کشت بر روی تبخیر- تعرق و عملکرد گوجه فرنگی در گلخانه‌ای در شمال غرب کشور چین نشان داد که با افزایش تراکم کشت، تعداد میوه و عملکرد در گیاه کاهش ولی عملکرد کلی افزایش یافته است. آنها همچنین مقادیر ضریب گیاهی را برای تراکم‌های متفاوت کشت در بازه 0/77 تا 0/99 گزارش کرده‌اند. تاثیر آبیاری فارو یک در میان و سطوح مختلف نیتروژن بر روی حرکت آب و نیتروژن در خاک، تجمع نمک و رشد ریشه خیار در گلخانه‌ای خورشیدی مورد مطالعه قرار گرفت (25). نتایج تحقیق ایشان نشان داد که آبیاری فارو یک در میان با کاربرد مقادیر بهینه کود موجب افزایش کارایی مصرف آب و کاهش تجمع نمک در لایه‌های سطحی خاک شده است. یاقی و همکاران (24) تاثیر دو نوع مالچ پلاستیکی (شفاف و تیره) و دو شیوه آبیاری (فارو و قطره‌ای) را بر روی نیاز آبی، عملکرد محصول و زمان جوانه زنی خیار گلخانه‌ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که مالچ شفاف و آبیاری قطره‌ای بیشترین عملکرد محصول و کارایی مصرف آب را به همراه داشته است. رزمی و قائمی (1) مقادیر تبخیر- تعرق واقعی محصول گوجه فرنگی گلخانه‌ای را بر اساس روش بیلان آبی محاسبه و در چهار دور آبیاری در بازه 466 تا 679 میلی‌متر گزارش کرده‌اند. فتحعلیان و نوری (2) در تحقیقی میانگین مقادیر ضریب گیاهی خیار گلخانه‌ای را 0/14، 0/78، 1/37 و 0/86 به ترتیب در مراحل ابتدایی، توسعه، میانی و انتهایی رشد به دست آوردند.

از آنجا که در دو دهه اخیر کشت‌های گلخانه‌ای مورد استقبال کشاورزان قرار گرفته و از طرف دیگر منابع آبی کشور با توجه به افت شدید تراز آب زیرزمینی مستلزم نظارت و مدیریت دقیق و علمی می‌باشند، هدف این تحقیق امکان‌سنجی برآورد تبخیر- تعرق خیار گلخانه‌ای با استفاده از تکنیک رگرسیون چندگانه و شبکه‌های عصبی مصنوعی و ارزیابی نتایج حاصله از طریق مقایسه با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده لایسیمتری است تا آب مورد نیاز این محصول در برنامه‌ریزی‌های آبیاری بصورت دقیق تعیین و از هدررفت آب جلوگیری بعمل آید.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در گلخانه‌ای تحقیقاتی با مساحتی بالغ بر 300 متر مربع در مختصات جغرافیایی 51 درجه و 22 دقیقه طول شرقی و 35 درجه و 47 دقیقه عرض شمالی واقع در شهر تهران و به منظور برآورد

موتنیت و هارگریوز (روش اول) و ضریب گیاهی حاصل از گزارش فائو 56 (روش دوم) توسط لاولی و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است (14). نتایج این تحقیق حکایت از همبستگی مناسب و کم برآورد معنی دار میان مقادیر ضرایب گیاهی هندوانه کاشت شده به ترتیب در شرایط بدون مالچ و تحت شرایط مالچ داشته است. بلانکو و فولگاتی (4) به این نتیجه رسیدند که تبخیر- تعرق و ضریب گیاهی خیار هنگام استفاده از آب شور کاهش می‌یابد و کاهش تبخیر- تعرق از یک رابطه خطی تبعیت می‌نماید. بازیافت آب زهکشی به منظور افزایش راندمان کاربرد آب و نیترات و کاهش اثرات زیست محیطی در گلخانه‌های هیدروپونیک در کشور استرالیا مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که بازیابی آب زهکشی منجر به کاهش 33 درصدی آب شربی بوده که صرف آبیاری خیار گلخانه‌ای می‌شده است (9). دو تیمار آب شامل آب نسبتاً بدون املاح (حاوی 1 مول بر متر مکعب نمک طعام) و نسبتاً شور (حاوی 9 مول بر متر مکعب نمک طعام) برای آبیاری گیاه ژربرا و با استفاده از معادله پنمن - موتنیت در شرایط گلخانه‌ای و به منظور مطالعه رشد، تولید گل و تعرق آن مورد استفاده قرار گرفته است (6). نتایج تحقیق ایشان حکایت از همبستگی بالا میان مقادیر تعرق اندازه‌گیری و برآورد شده دارد ($R^2=0.93$). نتایج تحقیق مائو و همکاران (15) در زمینه تکنیک کم آبیاری بر روی رشد خیار گلخانه‌ای در شمال کشور چین نشان داد که عملکرد میوه تازه به شدت تحت تاثیر حجم کل آب آبیاری در هر مرحله از رشد گیاه بوده است. بهترین برآزش میان تبخیر- تعرق و عملکرد محصول در تحقیق ایشان از یک تابع چند جمله‌ای درجه دو تبعیت نموده است. هارماتو و همکاران (11) تاثیر چهار تیمار آبیاری (100، 75، 50 و 25 درصد تبخیر- تعرق) را بر روی رشد و عملکرد محصول گوجه فرنگی در شرایط گلخانه‌ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که تیمار آبیاری که 75 درصد تبخیر- تعرق گیاه را لحاظ نماید، مصرف بهینه آب را به همراه خواهد داشت. آياس و دمیرتاس (3) تاثیر کم آبیاری را بر روی میزان عملکرد خیار گلخانه‌ای در کشور ترکیه مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که تاثیر سطوح آبیاری بر روی میزان عملکرد، طول و قطر میوه و نسبت ماده خشک کاملاً معنی‌دار است. چو و همکاران (8) مقدار سطح برگ، وزن تازه و خشک خیار گلخانه‌ای را در قالب معادلات رگرسیونی و از روی متغیرهایی نظیر طول برگ، عرض برگ، مقدار SPAD، و ترکیبات مختلف این متغیرها برآورد نمودند. آنها به این نتیجه رسیدند که مقادیر SPAD دقت برآورد وزن ماده خشک را افزایش، بر روی دقت برآورد وزن تازه تاثیر کمی و بر روی دقت برآورد سطح برگ بدون تاثیر بوده است. تاثیر دو تیمار دور آبیاری (4 و 8 روز) و سه ضریب گیاهی (0/6، 0/8 و 1) بر روی میزان عملکرد خیار گلخانه‌ای توسط وانگ و همکاران مورد بررسی قرار گرفت (23). نتایج این تحقیق نشان داد که میزان آب آبیاری بصورت معنی دار و مثبت بر روی تعداد

رگرسیون چندگانه خطی

ابتدا از پارامترهای هواشناسی اندازه‌گیری شده در درون محیط گلخانه برای پیش‌بینی و استخراج معادلات رگرسیونی استفاده شد. سپس از تکنیک پیشرو (forward) و پسرو (backward) استفاده شد تا معادلات رگرسیونی با تعداد متغیرهای مستقل کمتر ولی با همان دقت در برآورد تبخیر - تفرق استخراج شوند تا کاربرد این معادلات ساده‌تر باشد. در ادامه دوره رشد گیاه بر اساس روند تغییرات مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر - تفرق به چهار مرحله مجزا تفکیک و برای هر مرحله معادله‌ای جداگانه ارائه گردید.

شبکه عصبی مصنوعی

مشابه سیستم‌های بیولوژیک، سیستم‌های شبکه عصبی ابتدا به منظور خاصی بایستی آموزش داده شوند. در این تحقیق الگوهای مختلف شبکه عصبی متشکل از نوع شبکه، تعداد لایه‌های مخفی، تعداد نرون در لایه مخفی، تابع فعالیت و الگوریتم‌های متفاوت آموزش به اجرا در آمد و نهایتاً بهترین الگوی شبکه عصبی انتخاب گردید.

ارزیابی نتایج

نتایج حاصل از برآورد تبخیر - تفرق با استفاده از تکنیک رگرسیون چندگانه خطی و شبکه عصبی مصنوعی از طریق شاخص‌های آماری RMSE (ریشه میانگین مربعات خطا)، Ens (ضریب کارایی نش - ساتکلیف)، PBIAS (درصد انحراف) و PSR (نسبت ریشه میانگین مربعات خطا به انحراف استاندارد) مورد ارزیابی قرار گرفتند. همچنین نتایج بر اساس آزمون آماره t و رسم مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده در مقابل هم مورد تحلیل قرار گرفتند. مقادیر شاخص‌های آماری فوق با استفاده از روابط 2 تا 5 قابل محاسبه می‌باشند:

$$RMSE = \left[\sum_{i=1}^n (ET_{mea} - ET_{pre})^2 / n \right]^{0.5} \quad (2)$$

$$Ens = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{mea} - ET_{pre})^2}{\sum_{i=1}^n (ET_{mea} - mean(ET_{mea}))^2} \quad (3)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{mea} - ET_{pre})}{\sum_{i=1}^n ET_{mea}} \quad (4)$$

$$PSR = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{mea} - ET_{pre})^2}{\sum_{i=1}^n (ET_{mea} - mean(ET_{mea}))^2} \right]^{0.5} \quad (5)$$

در این روابط ET_{pre} و ET_{mea} به ترتیب مقادیر تبخیر - تفرق اندازه‌گیری و برآورد شده و n تعداد کل داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشند. بهترین مقدار Ens یک است و مقادیر منفی آن حکایت از برآورد ضعیف در قیاس با متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. بهترین مقدار

تبخیر - تفرق واقعی محصول خیار صورت پذیرفت. بذر خیار مورد استفاده در این تحقیق از رقم F1 L666، وزن 1000 دانه آن معادل 25 گرم، درجه خلوص آن 99 درصد و درصد جوانه زنی آن 85 درصد بوده است. بذرهای خیار در خرداد ماه در درون گلخانه مذکور که دارای 25 ردیف با فواصل 40 سانتیمتر و طول 20 متر بود، کاشته شدند. به منظور اندازه‌گیری تبخیر - تفرق واقعی، بذرهای خیار بطور همزمان در داخل شش میکرولاسیسمتر مشابه وزنی با قطر 28 و ارتفاع 30 سانتیمتر نیز کاشته شدند. آبیاری محصول بصورت قطره‌ای انجام شد و پارامترهای اصلی هواشناسی موثر بر تبخیر - تفرق نظیر دما (توسط دماسنج)، رطوبت نسبی (توسط رطوبت سنج) و تابش خورشیدی (توسط لوکس متر) بصورت روزانه در داخل گلخانه اندازه‌گیری شدند. اندازه‌گیری‌های فیزیکی و شیمیایی لازم صورت پذیرفت و هدایت الکتریکی (EC) و اسیدیته خاک (Ph) به ترتیب 3/42 دسی زبمنس بر متر و 7/19 بدست آمدند. بافت خاک لوم شنی و وزن مخصوص ظاهری آن 1/4 گرم بر سانتیمتر مکعب بدست آمدند. رطوبت وزنی خاک در حد ظرفیت زراعی (FC) با استفاده از دستگاه صفحات فشاری در حدود 15 درصد بدست آمد. از آنجا که گیاه خیار در مراحل ابتدایی رشد (جوانه زدن) به میزان آب اندکی نیازمند است، تنها در حد مرطوب شدن سطح خاک و روزانه حدود 100 گرم آب به میکرولاسیسمترها اضافه می‌شد. پس از 11 روز و سه برگی شدن گیاه، جهت عمیق شدن ریشه خیار به مدت 10 روز به بوته‌ها آب داده نشد و مجدداً به مدت 5 روز، روزانه 100 گرم آب به گیاه داده شد. پس از آن آبیاری روزانه میکرولاسیسمترها بر اساس رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی تنظیم شد بنحوی که رطوبت میکرولاسیسمترها در هر بار آبیاری تا حد ظرفیت زراعی افزایش داده شده و میزان رطوبت کاهش یافته آن تا حد ظرفیت زراعی بعنوان تبخیر - تفرق واقعی همان روز منظور می‌گردید. در صورت وجود زه‌آب از میکرولاسیسمترها نیز مقدار آن اندازه‌گیری و در محاسبات وارد می‌شد. میزان آب آبیاری در هر نوبت بر اساس معادله 1 محاسبه شد.

$$(\theta_m)_{FC} = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه W_w و W_d به ترتیب وزن قبل و بعد آبیاری میکرولاسیسمترها بر حسب گرم و θ_m درصد رطوبت وزنی خاک در حد ظرفیت زراعی است. سایر شرایط محیطی درون گلخانه نیز برای رشد مطلوب محصول بطور منظم پایش می‌شد. سرانجام بر اساس پارامترهای هواشناسی اندازه‌گیری شده شامل دمای کمینه و بیشینه، رطوبت نسبی، تابش دریافتی و ترکیبات آنها، بهترین روابط رگرسیونی چندگانه و بهترین الگوریتم شبکه عصبی پایه‌ریزی شدند. از متوسط داده‌های سه میکرولاسیسمتر اول به منظور واسنجی معادلات رگرسیونی (آموزش شبکه عصبی) و از متوسط داده‌های سه میکرولاسیسمتر دیگر به منظور اعتبارسنجی نتایج استفاده شد.

در این روابط T_{min} دمای کمینه، RH رطوبت نسبی، R_a تابش برون زمینی، n/N درجه ابرناکی، Δ شیب منحنی فشار بخار، R_n تابش خالص خورشیدی، γ ضریب سایکرومتری و $e_a - e_d$ کمبود فشار بخار اشباع است. مائو و همکاران (15) نیز دوره رشد خیار را به سه مرحله تفکیک و از پنج تیمار مختلف آبیاری استفاده نمودند. نتایج تحقیق آنها مبین بروز متوسط مقادیر تبخیر - تعرق 2، 2/5، 3/3، 4/4 و 4/9 میلیمتر در روز برای تیمارهای مختلف آبیاری بوده درحالیکه در تحقیق ما متوسط مقادیر [اندازه گیری، پیش بینی] تبخیر - تعرق در تکنیک رگرسیون [0/43، 0/35]؛ [1/77، 1/79]؛ [3/44، 3/43] و [2/05، 2/06] میلیمتر در روز به ترتیب در چهار مرحله تفکیک شده رشد به دست آمدند. همچنین متوسط مقادیر برآورد شده تبخیر - تعرق در تمام طول دوره رشد در تکنیک رگرسیون و شبکه عصبی به ترتیب 2/29 و 2/27 میلیمتر در روز به دست آمدند، درحالیکه مقدار متناظر اندازه گیری شده آن 2/28 میلیمتر در روز بود. نتایج نشان داد که با فرض برقرار بودن تمام طول دوره رشد بعنوان یک مرحله (شکل 1- الف)، مقادیر اندازه گیری شده در بازه (0/08 تا 4/75) و مقادیر برآورد شده در بازه (0/13 تا 4/25) میلیمتر در روز متغیر خواهند بود. این درحالی است که دامنه این تغییرات به ترتیب (0/08 تا 1/5) و (0/13 تا 1/75) در مرحله اول؛ (0/71 تا 2/64) و (1/31 تا 4/25) در مرحله دوم؛ (2/18 تا 4/75) و (1/69 تا 4/13) در مرحله سوم و (1/32 تا 2/61) و (2/26 تا 3/74) در آخرین مرحله رشد به دست آمدند (شکل 1- ب تا 1- ه). همچنین مقدار کل تبخیر - تعرق در طول دوره رشد در حدود 273/45 میلیمتر اندازه گیری شد درحالیکه مقادیر برآوردی آن به کمک تکنیک رگرسیون برای زمانی که تمام دوره رشد یکجا لحاظ شود و یا اینکه دوره رشد تفکیک شود، به ترتیب 275/7 و 275/59 میلیمتر به دست آمدند. در تحقیقات مشابه مقادیر 93/1 تا 466/3 میلیمتر برای تبخیر - تعرق کل بادمجان به ازای ضرایب گیاهی متفاوت و مقادیر 361/6 و 562/3 میلیمتر برای تبخیر - تعرق کل فلفل زمانی که سیستم آبیاری به ترتیب بصورت قطره ای و فارو لحاظ شدند، گزارش شده اند (21 و 22).

نکته ای که قابل تامل بنظر می رسد آنست که اگرچه میزان تبخیر - تعرق کل گیاه در طول دوره رشد می تواند بعنوان معیاری کلی مدنظر متخصصین قرار گیرد ولی نمی تواند شاخص معتبری برای مقایسه مقادیر تبخیر - تعرق واقعی و برآورد شده باشد؛ زیرا که کم برآورد و بیش برآوردهای موضعی تبخیر - تعرق در سرتاسر طول دوره رشد می توانند اثرات هم را خنثی کرده و مقدار کل تبخیر - تعرق را ثابت نگه دارند. بعبارت دیگر مقدار کل تبخیر - تعرق نمی تواند بازگو کننده مناسبی از روند تغییرات تبخیر - تعرق در کل دوره رشد باشد، مشابه آنچه نتایج همین تحقیق نشان می دهد.

PBIAS صفر است. مقادیر مثبت این شاخص حکایت از کم برآورد مدل دارد. مقدار شاخص PSR از بهترین مقدار آن (صفر) که حکایت از وقوع مقدار صفر برای ریشه میانگین مربعات خطا دارد تا مقادیر مثبت بسیار زیاد متغیر است. هرچه مقدار این شاخص کمتر باشد، نتایج معتبرتر خواهد بود. همچنین تفاوت معنی داری یا غیرمعنی داری میان نتایج روش های شبکه عصبی و رگرسیون از طریق آزمون آماری تی تست مورد سنجش قرار گرفت.

نتایج و بحث

در این تحقیق مقادیر دما در بازه 11 تا 32 درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی در بازه 11 تا 61 درصد، درجه ابرناکی ما بین 0/23 تا 0/85 و میزان تابش در بازه 5/24 تا 7/27 مگا ژول بر متر مربع در روز متغیر بوده است. شکل 1 نشان دهنده مقادیر تبخیر - تعرق پیش - بینی شده با استفاده از تکنیک رگرسیون چندگانه برای حالتی است که تمام دوره رشد گیاه بعنوان یک مرحله در نظر گرفته شده باشد (شکل 1- الف) و یا اینکه دوره رشد گیاه به چهار مرحله تقسیم شده باشد (شکل 1- ب تا ه). همانگونه که نشان داده شده است زمانی که از یک تک معادله رگرسیونی برای برآورد تبخیر - تعرق در سرتاسر طول دوره رشد استفاده شد، مقادیر قابل توجهی خطا رخ داده بنحوی که اختلاف میان مقادیر اندازه گیری و برآورد شده تبخیر - تعرق در بیشترین حالت خود به حدود 2/86 میلیمتر در روز می رسد که مقدار قابل توجهی است (شکل 1- الف).

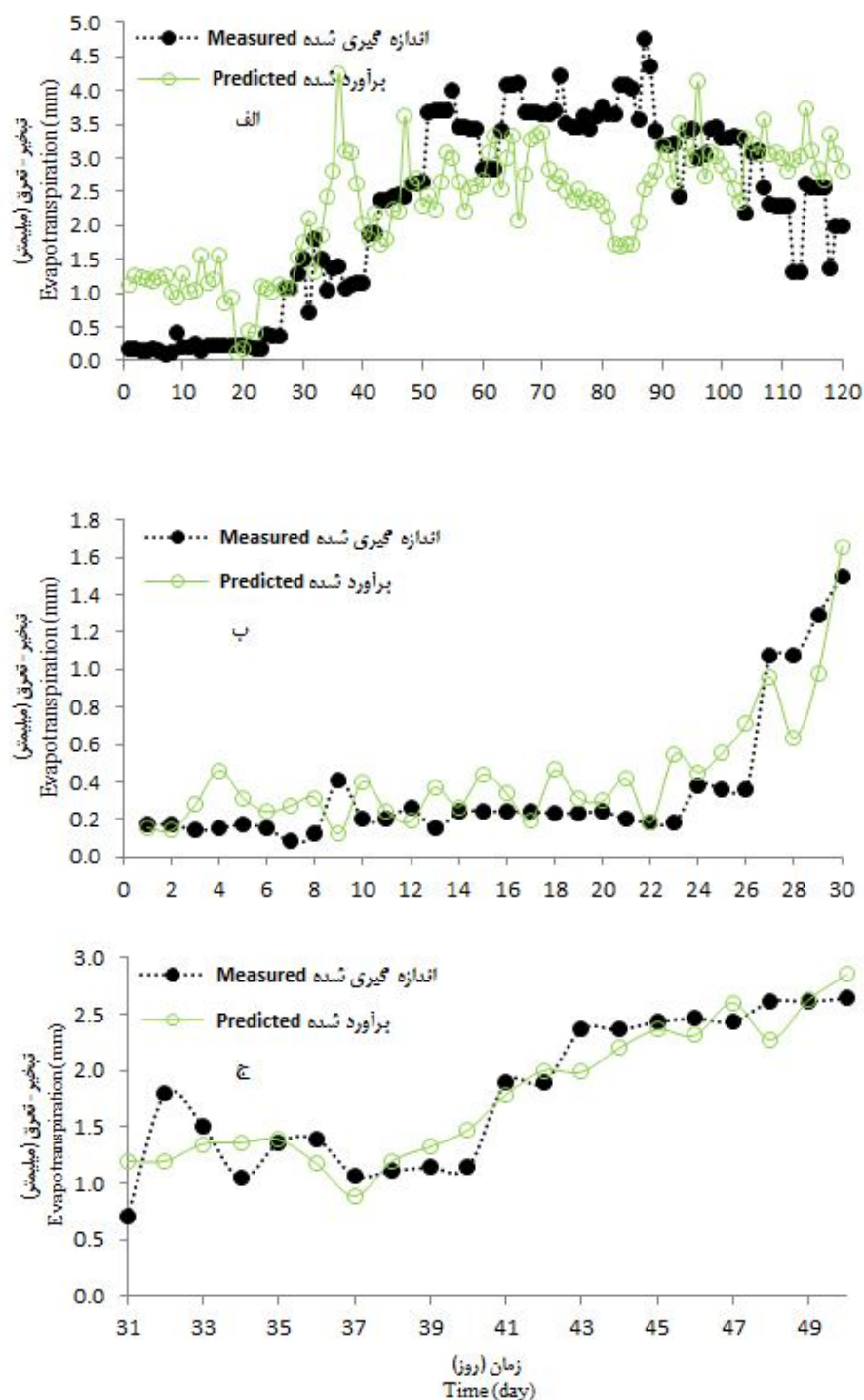
بیش برآورد تبخیر - تعرق خیار در مراحل اول و انتهایی رشد که منجر به کاهش کارایی مصرف آب خواهد شد و کم برآورد تبخیر - تعرق در مراحل گلدهی و میوه دهی که محصول به تنش آبی بسیار حساس است، از دیگر معایب استفاده از تک معادله رگرسیونی برای برآورد تبخیر - تعرق در طول دوره رشد می باشد. برعکس زمانی که دوره رشد محصول به چهار مرحله مجزا تفکیک شد، عملکرد تکنیک رگرسیون در برآورد تبخیر - تعرق بهبود یافت (شکل 1- الف تا 1- ه) بنحوی که مقدار اختلاف میان مقادیر اندازه گیری و برآورد شده که قبلا به آن اشاره شد (2/86 میلیمتر در روز) به حدود 1/32 میلیمتر در روز کاهش یافت. بنابراین برای هر یک از مراحل تفکیک شده دوره رشد، معادله ای جداگانه ارائه گردید که کاملاً معنی دار بوده ($p < 0/05$) و بصورت روابط 6 تا 9 به ترتیب برای مراحل مختلف رشد قابل تعریف می باشند.

$$ET_1 = -2.9 + 0.175T_{min} + 0.0191RH, R^2 = 0.71 \quad (6)$$

$$ET_2 = 145.6 - 20R_a + 1.25n/N, R^2 = 0.84 \quad (7)$$

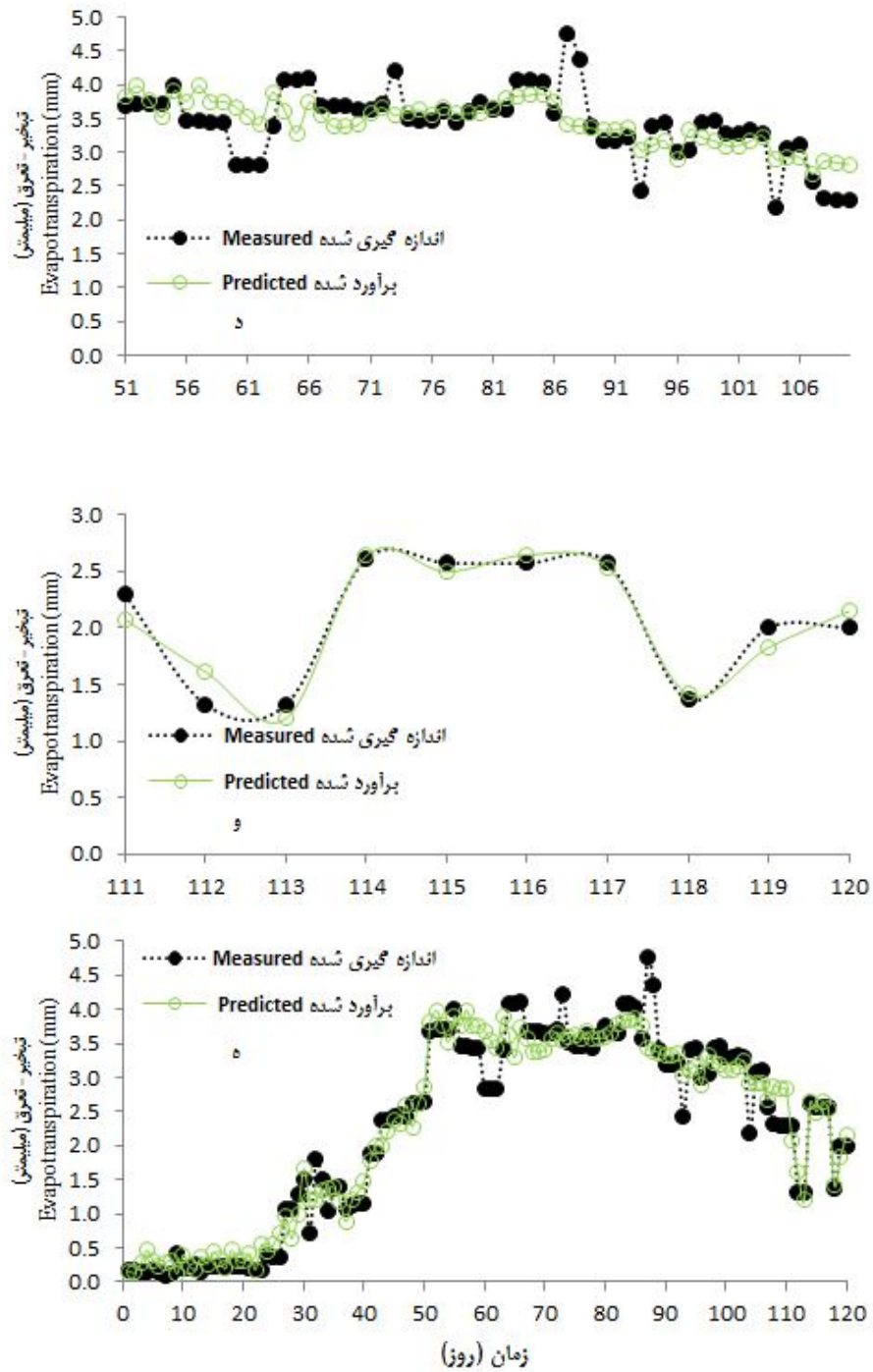
$$ET_3 = -0.344 + 0.733R_a - 0.0282RH, R^2 = 0.48 \quad (8)$$

$$ET_4 = -11.1 - 0.704(\Delta R_n/\Delta + \gamma) + 1.56(e_a - e_d) + 11.5(n/N) + 0.105RH, R^2 = 0.92 \quad (9)$$



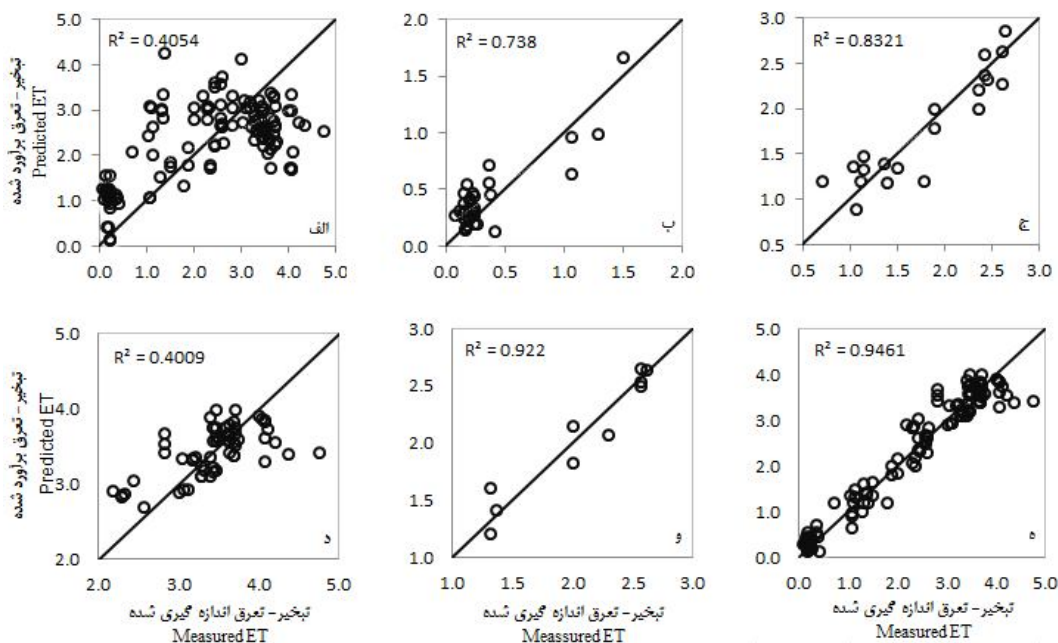
شکل 1- تبخیر - تعرق اندازه‌گیری و برآورد شده به کمک رگرسیون در مرحله اعتبار سنجی؛ الف) کل دوره رشد، ب) مرحله اول رشد، ج) مرحله دوم رشد

Figure 1- Measured and predicted evapotranspiration using regression in the validation period: a) whole growth period, b) first stage of growth, c) second stage of growth



ادامه شکل 1- تبخیر - تعرق اندازه گیری و برآورد شده به کمک رگرسیون در مرحله اعتبار سنجی؛ د) مرحله سوم رشد، و) مرحله آخر رشد، ه) نتایج مراحل تفکیک شده در کنار هم

Figure 1- (continued) Measured and predicted evapotranspiration using regression in the validation period: d) third stage of growth, e) last stage of growth, f) results of divided stages together



شکل 2- مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده تبخیر - تعرق به کمک رگرسیون در مرحله اعتبارسنجی؛ الف) کل دوره رشد، ب) مرحله اول، ج) مرحله دوم، د) مرحله سوم، و) مرحله آخر رشد، ه) نتایج مراحل تفکیک شده در کنار هم

Figure 2- Measured and predicted values of ET using regression in the validation period: a) whole growth period, b) first stage, c) second stage, d) third stage, e) last stage of growth, f) results of divided stages together

روی برنامه‌ریزی‌های آبیاری و تصمیمات مدیریتی منابع آب داشته باشد. مولر و همکاران مقدار ضریب همبستگی میان 47 داده اندازه‌گیری و برآورد شده تبخیر - تعرق ساعتی در مرداد ماه سال 1380 را حدود 0/82 گزارش کرده‌اند (17). در تحقیقی مشابه ضرایب همبستگی میان مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده تبخیر - تعرق گوجه فرنگی به کمک روابط استننگلینی، تاکاکورا و پنمن - مونتیت به ترتیب 0/72، 0/66 و 0/51 به دست آمده است (10). شاید بتوان یکی از دلایل برتری تحقیق حاضر در قیاس با تحقیق اخیر را (از نقطه نظر مقایسه ضرایب همبستگی) در عدم وابستگی نتایج به ضریب گیاهی دانست. زیرا که برآورد تبخیر - تعرق واقعی از روی تبخیر - تعرق گیاه مرجع از یک طرف کاملاً به ماهیت تجربی بودن روابط مذکور و از طرف دیگر به تعیین دقیق ضریب گیاهی حساس می‌باشد. اندازه‌گیری مستقیم تبخیر - تعرق واقعی در قالب مفهوم معادله بیلان آب و استفاده از میکرو لایسیمتر در این تحقیق توانسته خطاهای ناشی از عدم قطعیت‌های احتمالی مذکور را برطرف نماید.

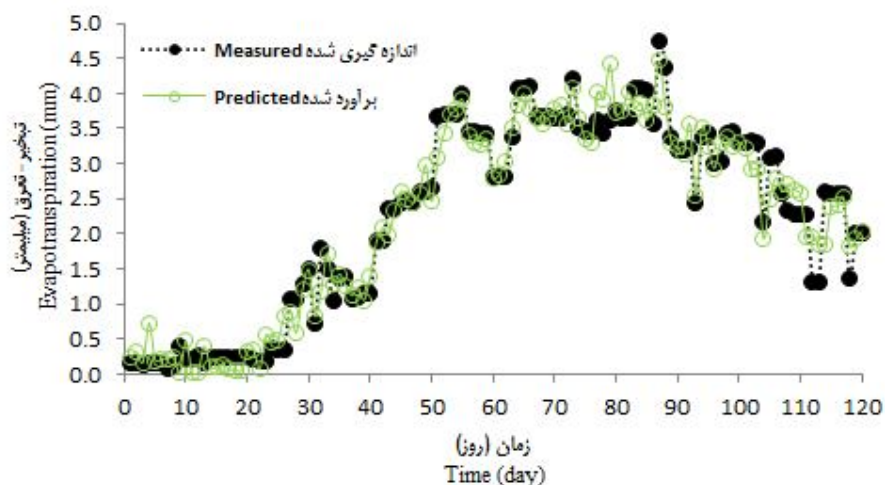
نتایج این تحقیق نشان داد که اگرچه تفکیک مراحل رشد باعث بهبود عملکرد شده، با اینحال هنوز هم در مراحل اول و خصوصاً در مرحله سوم رشد، نتایج می‌توانند از نقطه نظر دقت برآورد قابل بحث باشند. بنابراین همانند تکنیک رگرسیون، قابلیت و توانایی شبکه عصبی نیز در برآورد تبخیر - تعرق خیار گلخانه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. بعد از تعداد اجزای بسیار زیاد، بهترین نتایج برای شبکه

مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده تبخیر - تعرق در مقابل یکدیگر در شکل 2 نشان داده شده‌اند. همانطور که در این شکل مشخص است، با تفکیک مراحل رشد، پراکندگی نقاط در نزدیکی خط 1:1 بهبود یافته است. ضریب همبستگی میان مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده از 0/41 زمانی که تمام دوره رشد یکجا لحاظ شده (شکل 1- الف) تا 0/95 زمانیکه تمام چهار مرحله تفکیک شده در کنار هم قرار گرفته باشند (شکل 1- ه) متغیر بوده که خود تایید کننده عملکرد بهتر روابط رگرسیونی در هنگام تفکیک مراحل رشد است. مقادیر ضرایب همبستگی مذکور به ترتیب در حدود 0/74، 0/83، 0/4 و 0/92 برای هر یک از مراحل تفکیک شده رشد (شکل 1- ب تا 1- و) بدست آمدند. مدرانو و همکاران (16) در تحقیقی مشابه مقدار 0/89 و 0/97 را برای ضرایب همبستگی میان مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده تبخیر - تعرق خیار به ترتیب در سیکل پاییز و بهار گزارش کرده‌اند. کاسانوا و همکاران (7) مقادیر ضریب همبستگی میان مقادیر اندازه‌گیری شده لایسیمتری تبخیر - تعرق و مقادیر برآورد شده آن از طریق پنج روش تست تبخیر کلاس A، انومومتر پیچ، تبخیرسنج اندرسون، تابش فائو و پنمن - مونتیت - فائو را در بازه 0/72 تا 0/8 متغیر گزارش کرده‌اند.

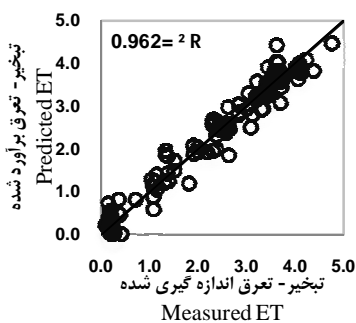
شکل 2 نشان دهنده این موضوع است که تفکیک مراحل رشد و برآورد جداگانه تبخیر - تعرق در هر کدام از این مراحل اگرچه زمان بر است، اما باعث بهبود نتایج شده و می‌تواند تاثیرات قابل توجهی بر

میلیمتر است. پراکنش مناسب میان مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده تبخیر- تعرق در شکل 4 مؤید این نکته است که عملکرد شبکه عصبی در قیاس با رگرسیون چندگانه، حتی زمانیکه دوره رشد تفکیک شده باشد، نیز بهتر بوده است. ضریب همبستگی میان مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده تبخیر- تعرق در شکل 4 در حدود 0/96 به دست آمد. ذکر این نکته ضروری است که نتایج ارائه شده از تکنیک شبکه عصبی بهترین نتایج به دست آمده هستند که از میان تعداد اجزای بی‌شمار الگوهای مختلف این تکنیک حاصل شده‌اند. عبارت دیگر مبحث آموزش در تکنیک شبکه عصبی که شامل انتخاب بهترین قانون آموزش، تعداد لایه‌های مخفی و تابع انتقال می‌باشند، نقش بسیار مهمی در دستیابی به بهترین نتیجه ممکن خواهند داشت.

عصبی پرسپترون چند لایه، دارای یک لایه مخفی بترتیب با مشخصات تابع انتقال تانژانت آکسون و الگوریتم آموزش مومنتوم و همین مشخصات برای لایه خروجی، به دست آمد. شکل‌های 3 و 4 بیانگر آن است که شبکه عصبی در قیاس با تکنیک رگرسیون عملکرد بهتری در برآورد تبخیر- تعرق داشته است. شکل 3 نشان دهنده تغییرات تبخیر- تعرق واقعی اندازه‌گیری و برآورد شده بوسیله شبکه عصبی در طول دوره رشد می‌باشد. همانگونه که در شکل نشان داده شده تقریباً تمامی مقادیر برآورد شده تبخیر- تعرق تطابق قابل قبولی با مقادیر اندازه‌گیری شده متناظرشان دارند. مقدار تبخیر- تعرق کل برآورد شده در طول دوره رشد به کمک شبکه عصبی در حدود 272/44 میلیمتر است درحالی‌که مقدار اندازه‌گیری شده آن 273/45



شکل 3- مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده تبخیر- تعرق به کمک تکنیک شبکه عصبی برای کل مراحل رشد
Figure 3- Measured and predicted values of ET using ANN for whole growth stages



شکل 4- مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده تبخیر- تعرق به کمک تکنیک شبکه عصبی در کل مراحل رشد
Figure 4- Measured and predicted values of ET using ANN for whole growth stages

نشان می‌دهد تکنیک شبکه عصبی توانایی بیشتری در برآورد تبخیر- تعرق داشته زیرا که مقادیر بهینه شاخص‌های مذکور به این تکنیک

جدول 1 بیانگر شاخص‌های آماری محاسبه شده برای هر دو تکنیک رگرسیون و شبکه عصبی است. همانطور که نتایج جدول

آماري به این مرحله اختصاص یافته است (جدول 1). نکته مهمی که در ارتباط با شکل 2 و جدول 1 باید بدان اشاره کرد آن است که اگرچه مقدار بدست آمده برای شاخص PBIAS زمانی که از یک معادله رگرسیونی برای تمام مراحل رشد استفاده می‌شود، بسیار به مقدار بهینه آن نزدیک است، با اینحال مقدار شاخص RMSE حکایت از عملکرد ضعیف معادله مذکور در این مرحله دارد. فتحعلیان و همکاران (1) در تحقیقی مشابه متوسط درصد ریشه میانگین مربعات خطا در برآورد تبخیر - تعرق خیار گلخانه‌ای به کمک رگرسیون را در حدود 47 درصد گزارش کرده‌اند که با مقدار بدست آمده در مرحله سوم رشد این تحقیق تطابق دارد. نتایج حاصل از مقایسه معنی‌داری میان برآوردهای تکنیک شبکه عصبی و رگرسیون در جدول 2 نشان داده شده است. همانگونه که نتایج این جدول نشان می‌دهد تفاوت معنی‌داری میان برآوردهای شبکه عصبی و رگرسیون زمانیکه کل مراحل رشد بصورت یکجا لحاظ شود وجود داشته است. اما زمانیکه مراحل رشد در تکنیک رگرسیون تفکیک شده و نتایج هر مرحله در کنار یکدیگر قرار داده شده تفاوت معنی‌داری میان مقادیر برآوردی وجود نداشته است. این نتیجه در قالب همین ماهیت ولی بصورت کمی (حسن استفاده از شاخص‌های آماری) از نتایج جدول 1 نیز قابل استنباط می‌باشد که نمودی از بهبود عملکرد تکنیک رگرسیون بواسطه تفکیک مراحل رشد می‌باشد. در رابطه با جدول 2 ذکر این نکته مهم است که بدلیل آنکه قبل از اجرای تی‌تست آزمون همگنی واریانس‌ها توسط خود نرم افزار صورت می‌پذیرد و نتیجه آن در مورد مقایسه شبکه عصبی با رگرسیون منفی بوده است، به جای آزمون t از آزمون t' استفاده شده که از نظر ماهیتی یکسان بوده و معنی‌داری یا عدم معنی‌داری را نشان می‌دهند.

اختصاص یافته‌اند. نتایج این جدول نیز مجدداً بر این نکته تأکید دارد که اگرچه تفکیک مراحل رشد خیار تأثیر مثبتی بر روی عملکرد برآورد تبخیر - تعرق در تکنیک رگرسیون داشته، با اینحال تکنیک شبکه عصبی نتایج بهتری داشته است. باید توجه داشت که نتایج تکنیک شبکه عصبی (ستون آخر جدول 1) تنها بایستی با نتایج حاصل از تکنیک رگرسیون و آن هم قبل از تفکیک مراحل رشد (ستون اول جدول 1) مقایسه گردد. بر اساس نتایج جدول 1 و در تایید نتایج پیشین (شکل 1)، قدر مطلق بیشترین اختلاف میان مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده تبخیر - تعرق در حدود 0/44، 0/59، 1/33 و 0/29 میلیمتر در روز به ترتیب برای چهار مرحله تفکیک شده رشد، در تکنیک رگرسیون، به دست آمدند. روند تغییر این مقادیر مشابه روند تغییرات شاخص RMSE در جدول 1 است که کمترین و بیشترین مقدار آن به ترتیب در مرحله آخر و سوم رشد حاصل شده‌اند. همین مقادیر (قدر مطلق بیشترین اختلاف میان مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده تبخیر - تعرق) برای تکنیک رگرسیون زمانیکه تمام مراحل رشد یکجا لحاظ شود و تکنیک شبکه عصبی به ترتیب 2/86 و 0/81 میلیمتر به دست آمده‌اند. بیشترین اختلاف میان مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده در سه مرحله ابتدایی رشد (شکل 1- ب تا 1- د) و مرحله انتهایی رشد (شکل 1- و) در تکنیک رگرسیون به ترتیب مثبت و منفی هستند که مبین کم برآورد و بیش برآوردهای موضعی در روزهای خاصی از طول دوره رشد می‌باشند، درحالیکه نتایج جدول 1 (مقادیر شاخص PBIAS) بیانگر وقوع حالت‌های بیش برآورد کلی تبخیر - تعرق در مراحل اول و سوم رشد و کم برآورد کلی در مراحل دوم و چهارم رشد دارد. مقایسه نتایج چهار مرحله تفکیک شده رشد در تکنیک رگرسیون نشان داد که بهترین عملکرد در برآورد تبخیر - تعرق متعلق به آخرین مرحله رشد است زیرا که بهترین شاخص‌های

جدول 1- شاخص‌های آماری محاسبه شده بمنظور ارزیابی نتایج رگرسیون و شبکه عصبی در برآورد تبخیر - تعرق خیار
Table 1- Estimated statistical indices to evaluate regression and ANN results in predicting cucumber ET

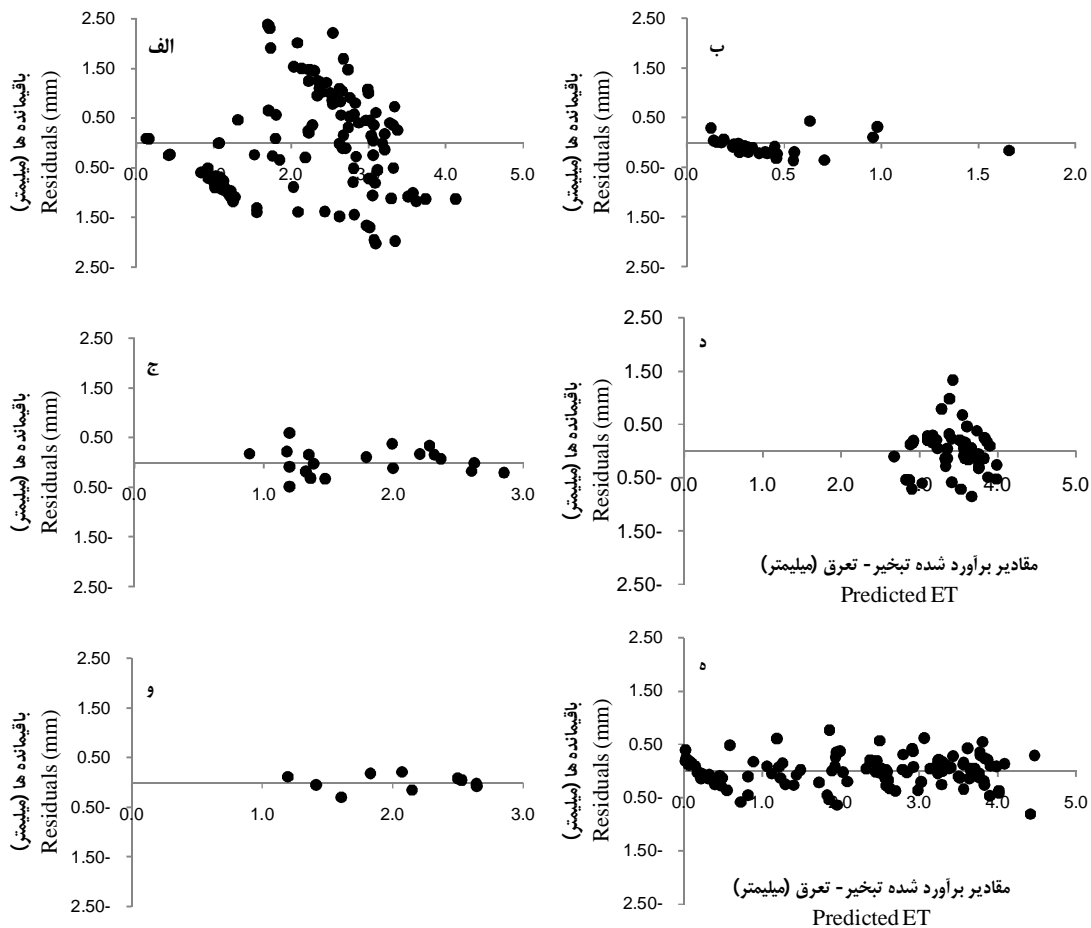
شاخص ارزیابی Evaluated indices	رگرسیون Regression					شبکه عصبی ANN
	کل دوره رشد Whole growth stage	مرحله اول First stage	مرحله دوم Second stage	مرحله سوم Third stage	مرحله آخر Last stage	کل دوره رشد Whole growth stage
	RMSE (mm/day)	1.06	0.198	0.26	0.4	0.146
Ens	-0.59	-0.046	-0.044	-0.536	0.288	-0.033
PBIAS	-0.008	-0.21	0.011	-0.0018	0.0023	0.003
PSR	0.77	0.552	0.41	0.774	0.28	0.194

جدول 2- نتایج آزمون تی تست بمنظور ارزیابی نتایج رگرسیون و شبکه عصبی در برآورد تبخیر - تعرق خیار
Table 2- T-test results to evaluate regression and ANN results in predicting cucumber ET

مقدار آماره t (t-value) یا t'	احتمال آماره t (p-value) یا t'	شبکه عصبی با رگرسیون ANN with Regression
t' = 20.71	0.001	شبکه عصبی با رگرسیون
t = 0.89	0.37	شبکه عصبی با رگرسیون تفکیک شده ANN with divided Regression

که در جدول 1 فهرست شده‌اند تکمیل شده و می‌توان درباره میزان بهبود نتایج نیز اظهار نظر نمود. شکل 5 نشان دهنده مقادیر باقیمانده تبخیر - تعرق (اختلاف میان مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده تبخیر - تعرق) در هر دو تکنیک رگرسیون و شبکه عصبی است.

به بیان دیگر نتایج جدول 1 و 2 مکمل یکدیگر هستند. نتایج جدول 2 نشان دهنده آن است که تفکیک مراحل رشد در تکنیک رگرسیون توانسته مقادیر برآوردی را به مقادیر برآوردی از طریق شبکه عصبی نزدیک نماید ولی با اینحال از جزئیات این بهبود آگاهی نمی‌دهد. این کمبود تحلیل نتایج، بواسطه کاربرد شاخص‌های آماری



شکل 5- مقادیر باقیمانده و برآورد شده تبخیر - تعرق در رگرسیون؛ الف) تمام دوره رشد، ب) مرحله ابتدایی رشد، ج) دوره دوم، د) دوره سوم، و) دوره انتهایی رشد و ه) شبکه عصبی

Figure 5- residual and predicted ET values by regression: a) whole growth stage, b) first stage, c) second stage, d) third stage, e) last stage of growth and f) by ANN

جدول 3- نتایج آماره t بمنظور ارزیابی تکنیک رگرسیون و شبکه عصبی در برآورد تبخیر - تعرق خیار گلخانه‌ای
Table 3- T-test results to evaluate regression and ANN results in predicting greenhouse cucumber ET

نوع تکنیک و مرحله رشد Type of technique and growth stage	a	b	R ²
رگرسیون (کل دوره رشد بصورت یکجا) Regression (whole growth stages together)	1.37*	0.405*	0.64
رگرسیون (مرحله اول رشد) Regression (first stage of growth)	0.167*	0.744*	0.85
رگرسیون (مرحله دوم رشد) Regression (second stage of growth)	0.281	0.832	0.91
رگرسیون (مرحله سوم رشد) Regression (third stage of growth)	2.06*	0.401*	0.63
رگرسیون (مرحله آخر رشد) Regression (last stage of growth)	0.156	0.922	0.9
شبکه عصبی مصنوعی ANN	0.085	0.96	0.94

*: در سطح 95 درصد، اختلاف معنی‌داری میان a با صفر و b با یک وجود دارد.

*: There is significant (p<0.05) difference between a with 0 and b with 1

بیانگر آن است که معادلات رگرسیونی ارائه شده در مراحل اول و سوم رشد نتوانسته‌اند به شکل مطلوبی برآورد کننده مقادیر تبخیر - تعرق واقعی باشند. عبارت دیگر نتایج جدول 3 تکمیل کننده نتایج شکل‌های 3، 4 و 5- ه در تایید این نکته است که عملکرد تکنیک شبکه عصبی در برآورد تبخیر - تعرق خیار گلخانه‌ای قابل اعتمادتر از عملکرد تکنیک رگرسیون است، ضمن آنکه نیاز به تفکیک مراحل رشد نیز ندارد.

نتیجه‌گیری کلی

از آنجا که در دو دهه اخیر کشت‌های گلخانه‌ای مورد توجه و استقبال کشاورزان ایرانی قرار گرفته و با توجه به وضعیت بحرانی سطوح آب زیرزمینی در اکثر دشت‌های ایران، و با لحاظ این نکته که قسمت عمده آب برداشت شده از سفره‌های آب زیرزمینی در بخش کشاورزی به‌مصرف می‌رسد، هدف اصلی این تحقیق اندازه‌گیری و مدل‌سازی تبخیر - تعرق خیار گلخانه‌ای بود. بمنظور اندازه‌گیری از شش میکرو لایسیمتر و بمنظور مدل‌سازی از تکنیک‌های رگرسیون چندگانه خطی و شبکه عصبی مصنوعی استفاده گردید. در تکنیک رگرسیون ابتدا سعی شد تا تبخیر - تعرق خیار در کل دوره رشد بصورت یکجا مدل‌سازی گردد. نتایج نشان داد که ارائه یک تک معادله رگرسیونی برای برآورد تبخیر - تعرق خیار در کل دوره رشد نتایج مناسبی به همراه نخواهد داشت زیرا که این معادله با بیش برآورد در مراحل اول و آخر رشد و کم برآورد تبخیر - تعرق در مراحل دوم و سوم رشد همراه خواهد بود که اولی منجر به تلفات آب و دومی منجر به کاهش کمیت و کیفیت محصول خواهد شد. برای حل این مشکل کل دوره رشد محصول به چهار دوره تقسیم و مدل‌سازی رشد

بهترین عملکرد مربوط به حالتی است که کمترین دامنه تغییرات را داشته باشد. همانطور که در شکل نیز مشخص است زمانیکه طول دوره رشد بصورت یکجا لحاظ گردیده (شکل 5- الف)، مقادیر باقیمانده‌ها پراکنش بسیار زیادی داشته و دامنه تغییرات آنها به حدود 2- تا 2/5+ میلی‌متر رسیده است. با تفکیک مراحل رشد در تکنیک رگرسیون، دامنه تغییرات مقادیر باقیمانده به میزان قابل توجهی کاهش یافت (شکل 5- ب تا 5- و) که حکایت از تاثیر مثبت تکنیک تفکیک مراحل رشد در برآورد تبخیر - تعرق دارد. در شکل 5- ه نیز توزیع پراکنش مقادیر باقیمانده در تکنیک شبکه عصبی برای کل دوره رشد نشان داده شده که دامنه تغییرات آن بطور قابل توجهی در قیاس با شکل 5- الف کاهش داشته است. بر اساس نتایج قبل، بعنوان مثال شکل 2- د و جدول 1، نتایج شکل 5- د نیز مؤید این مطلب است که عملکرد رگرسیون در برآورد مقادیر تبخیر - تعرق در مرحله سوم رشد، به خوبی سایر مراحل نبوده است. در این راستا و بمنظور اطمینان از دقت نتایج از آماره t نیز برای ارزیابی دقیق‌تر استفاده شد. در آماره t فرض بر آن است که یک رابطه خطی به شکل $ET_{pre} = a + bET_{mea}$ میان مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده تبخیر - تعرق برقرار است. فرض H_0 بدنبال تایید این گزینه است که اختلاف معنی‌داری (درصد اعتماد 95 درصد) میان ضریب a با مقدار صفر و ضریب b با مقدار یک وجود ندارد، حال آنکه فرض H_1 دقیقاً خلاف آن را دنبال می‌کند. نتایج حاصل از آماره t در جدول 3 لیست شده‌اند. نتایج جدول 3 جزئیات بیشتری را در ارتباط با شکل‌های 2 و 4 بازگو می‌کند. اگرچه پراکنش مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده تبخیر - تعرق در شکل 2 و در حالت‌های b و d در قیاس با حالت الف از خود بهبود نشان داده است، با اینحال نتایج جدول 3

رگرسیون در مراحل اول و سوم رشد هنوز هم جای شک و تردید داشت. بدین منظور قابلیت و توانایی تکنیک شبکه عصبی نیز در برآورد تبخیر - تعرق مورد بررسی قرار گرفت. شاخص‌های آماری نظیر RMSE، Ens، PBIAS، PSR و آماره t که کاربرد همزمان آنها برای تحلیل دقیق نتایج الزامی ارزیابی شد، نشان داد که تکنیک شبکه عصبی مصنوعی به شرط انتخاب صحیح نوع شبکه، قوانین آموزش، تابع عضویت و تعداد نرون در لایه مخفی نه تنها نتایج معتبرتری در مدل‌سازی رشد و برآورد تبخیر - تعرق به همراه خواهد داشت، بلکه نیازمند تفکیک مراحل رشد نیز نخواهد بود.

و برآورد تبخیر - تعرق بصورت جداگانه در هر مرحله انجام شد. نتایج نشان داد که این تکنیک (تفکیک مراحل رشد بمنظور مدل‌سازی)، عملکرد برآورد تبخیر - تعرق را به خصوص در مراحل دوم و آخر رشد، بصورت قابل توجهی بهبود بخشیده است. از آنجا که تفکیک مراحل رشد بر اساس روند تغییرات مقادیر تبخیر - تعرق اندازه‌گیری شده بنا نهاده شده بود، شاید بتوان بهبود نتایج را اینگونه توجیه نمود که در هر مرحله موثرترین متغیرهای مستقل در برآورد تبخیر - تعرق همان مرحله خاص انتخاب و از کاربرد متغیرهایی که در برآورد مقادیر تبخیر - تعرق در آن مرحله نقش کمتری داشته ولی بطور کل بر این مولفه موثر هستند، جلوگیری شود. با اینحال عملکرد تکنیک

منابع

- 1- Ayas S., and Demirtas C. 2009. Deficit irrigation effects on cucumber (*Cucumis sativus* L. Maraton) yield in unheated greenhouse condition, *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 7: 645-649.
- 2- 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.
- 3- Boulard T., and Wang S. 2000. Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions, *Agricultural and Forest Meteorology*, 100: 25-34.
- 4- Carmassi G., Bacci L., Bronzini M., Incrocci L., Maggini R., Bellocchi G., Massa D., and Pardossi A. 2013. Modelling transpiration of greenhouse gerbera grown in substrate with saline water in a Mediterranean climate, *Scientia Horticulturae*, 156: 9-18.
- 5- Casanova P.M., Messing I., Joel A., and Canete M.A. 2009. Methods to estimate lettuce evapotranspiration in greenhouse conditions in the central zone of Chile, *Chilean journal of agricultural research*, 69 (1): 60-70.
- 6- Cho Y.Y., Oh S., Oh M.M., and Sun J.E. 2007. Estimation of individual leaf area, fresh weight, and dry weight of hydroponically grown cucumbers (*Cucumis sativus* L.) using leaf length, width, and SPAD value, *Scientia horticulture*, 111: 330-334.
- 7- Fathalian F., and Nouri-Emamzadei M.R. 2013. Determination of evapotranspiration and crop coefficient of cucumber using microlysimeter in greenhouse conditions, *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, 3(12): 125-134. (in Persian with English abstract)
- 8- Fathalian F., Moazenzadeh R., and Nouri-Emamzadei M.R. 2009. Evaluation and Prediction of Greenhouse Cucumber Evapotranspiration at Different Growth Stages, *Journal of Water and Soil*, 23(4): 16-27. (in Persian with English abstract)
- 9- Ghaemi A.A., and Razmi Z. 2011. Crop and soil-water stress coefficients of tomato in the glass-greenhouse conditions, *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, 2(7): 75-86. (in Persian with English abstract)
- 10- Grewal H.S., Maheshwari B., and Parks S.E. 2011. Water and nutrient use efficiency of a low-cost hydroponic greenhouse for a cucumber crop: An Australian case study, *Agricultural Water Management*, 98: 841-846.
- 11- Guerrero F.V., Kacira M., Rodriguez E.F., Kubota C., Giacomelli G.A., Linker R., and Arbel A. 2012. Comparison of three evapotranspiration models for a greenhouse cooling strategy with natural ventilation and variable high pressure fogging, *Scientia Horticulturae*, 134: 210-221.
- 12- 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.
- 13- Joliet O. 1994. HORTITRANS, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 57: 23-37.
- 14- Lorenzo P., Garcia M.L., Sanchez-Guerrero M.C., Medrano E., Caparros I., and Gimenez M. 2006. Influence of mobile shading on yield, crop transpiration and water use efficiency, *Acta Horticulturae*, 719: 471-478.
- 15- Lovelli S., Piza S., Caponio T., Rivelli A.R., and Perniola M. 2004. Lysimetric determination of muskmelon crop coefficients cultivated under plastic mulches, *Agricultural water management*, 72: 147-159.
- 16- Mao X., Liu M., Wang X., Liu C., Hou Z., and Shi J. 2003. Effect of deficit irrigation on yield and water use of greenhouse grown cucumber in the north China plain, *Agricultural water management*, 61: 219-228.
- 17- Medrano E., Lorenzo P., Sanchez-Guerrero M.C., and Montero J.I. 2005. Evaluation and modelling of greenhouse cucumber-crop transpiration under high and low radiation conditions, *Scientia horticulture*, 105: 163-175.
- 18- Moller 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.
- 19- Orgaz F., Fernandez M.D., Bonachela S., Gallardo M., and Fereres E. 2005. Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse, *Agricultural water management*, 72: 81-96.
- 20- 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.
- 21- 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.
- 22- Qiu R., Song J., Du T., Kang S., Tong L., Chen R., and Wu L. 2013. Response of evapotranspiration and yield to planting density of solar greenhouse grown tomato in northwest China, *Agricultural Water Management*, 130: 44-51.
- 23- Senyigit U., Kadayifci A., Ozdemir O.F., Oz H., and Atilgan A. 2011. Effects of different irrigation programs on yield and quality parameters of eggplant (*Solanum melongena L.*) under greenhouse conditions, *African Journal of Biotechnology*, 10: 6497-6503.
- 24- Wang Z., Liu Z., Zhang Z., and Liu X. 2009. Subsurface drip irrigation scheduling for cucumber (*Cucumis sativus L.*) grown in solar greenhouse based on 20 cm standard pan evaporation in Northeast China, *Scientia Horticulturae*, 123: 51-57.
- 25- Yaghi T., Arslan A., and Naoum F. 2013. Cucumber (*Cucumis sativus, L.*) water use efficiency (WUE) under plastic mulch and drip irrigation, *Agricultural Water Management*, 128: 149-157.
- 26- Zhang L., Gao L., Zhang L., Wang S., Sui X., and Zhang Z. 2012. Alternate furrow irrigation and nitrogen level effects on migration of water and nitrate-nitrogen in soil and root growth of cucumber in solar-greenhouse, *Scientia Horticulturae*, 138: 43-49.

Measurement and Modeling of Cucumber Evapotranspiration Under Greenhouse Condition

R. Moazenzadeh¹

Received: 05-08-2014

Accepted: 24-01-2015

Introduction: In two last decades, greenhouse cultivation of different plants has developed among Iranian farmers, approximately 45 percent of national greenhouse cultures consisting of cucumber, tomato and pepper. As huge amounts of agricultural water in Iran are extracted from groundwater resources and a large number of Iranian plains are in critical conditions, and because irrigation is the major consumer of water (95 percent), it must be performed in a scientific manner. One approach to this is to obtain the knowledge of the consumptive use of major crops which is named evapotranspiration (ETc).

Materials and Methods: This research was carried out in a north-south greenhouse belonging to Plant Protection Research Institute, located on northern Tehran, Iran, for estimating greenhouse cucumber evapotranspiration. Trickle irrigation method was used, and meteorological data such as temperature, humidity and solar radiation were measured daily. Physical and chemical measurements were conducted and electric conductivity (EC) and pH values of 3.42 dsm^{-1} and 7.19, respectively, were recorded. Soil texture and bulk density were measured as to be sandy loam and 1.4 gr cm^{-3} , respectively. In order to measure the actual evapotranspiration, cucumber seeds were also cultured in six similar microlysimeters and irrigation of each microlysimeter was based on FC moisture. If any drained water was available, it was measured. Finally, with measured meteorological characteristics in greenhouse which are suggested to have an effect on ET and were measurable, the best multiple linear regression and artificial neural network were established. The average data from three microlysimeters were used for calibration and that from three other microlysimeters were used for validation set.

Results and Discussion: In the former case, when we used one multiple linear regression with measurable meteorological variables inside the greenhouse to predict cucumber ET for the entire growth period, high and considerable amounts of error occurred, as the difference between measured and predicted values of ET is approximately 2.86 mm day^{-1} which is noticeable. Overestimation of the cucumber ET in the first and last stages which will result in decreasing water use efficiency and underestimation in blooming and yielding fruit stages, when cucumber is more susceptible to water stress, are the other disadvantages of using one equation for the entire growth period to describe and predict cucumber ET. In contrast, when we divided growth period into four steps, the MLR method's performance in prediction of ET was improved and the difference mentioned above between measured and predicted values of ET (2.86 mm day^{-1}) decreased to about 1.32 mm day^{-1} . The results showed that measured and predicted values of ET ranged from (0.08 to 4.75) and (0.13 to 4.25) when the whole growth period is considered as one step, respectively. These mentioned values were obtained (0.08 to 1.5) and (0.13 to 1.75); (0.71 to 2.64) and (1.31 to 4.25); (2.18 to 4.75) and (1.69 to 4.13); (1.32 to 2.61) and (2.66 to 3.74) for each of growth period stages, respectively. Also the value of total ET for the entire growth period is measured 273.45 mm and predicted 275.7 and 275.59 mm, when the whole growth period is considered as one step or divided into four stages, respectively. Although dividing the growth period improved ET prediction, the results in the first and especially the third stage are still discussable. Therefore, as with MLR method, the capability of ANN technique was investigated in prediction of cucumber ET. Comparison of measured and predicted values of ET confirms that ANN has better performance than MLR, even when growth period is divided.

Conclusion: Determining cucumber evapotranspiration in the greenhouse was the main objective of this study. For this purpose we used Multiple Linear Regression (MLR) and Artificial Neural Network (ANN) techniques. In MLR, first we used one equation for the entire growth period. The results showed that this single equation is not able to simulate actual ET of cucumber. To overcome this problem, we divided the growth period into four stages and derived a separate equation for each stage. The results showed that this procedure improves

1- Assistant Professor, Department of Soil and Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Iran
Email: romo_sci@shahroodut.ac.ir

prediction of cucumber ET, especially in the second and last stages of growth period. Statistical indices such as RMSE, Ens, PBIAS and PSR, t-statistical results, measured versus predicted ET values, and predicted values of ET in the growth period indicate that ANN technique is not only reliable, but also easier than the MLR technique.

Keywords: Artificial neural network, Growth stage, Regression, Weighing microlysimeter