

مدلی برای برنامه‌ریزی آبیاری با استفاده از اختلاف دمای هوا و سطح برگ گیاه ذرت

خدیجه فتاحی دولت آبادی، حسین بابازاده^{۱*}، پیام نجفی و حسین صدقی

دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی و صنایع غذایی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات. تهران. ایران.

khadijefattahi@yahoo.com

استاد گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی و صنایع غذایی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران.

h_babazadeh@srbiau.ac.ir

استاد گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان اصفهان.

payam.najafi@gmail.com

استاد گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی و صنایع غذایی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران.

sedghi@srbiau.ac.ir

چکیده

تعیین سریع و دقیق زمان آبیاری به منظور جلوگیری از تنش آبی گیاه، از مهم‌ترین مسائل مدیریت پایدار آب در مزرعه است. اندازه‌گیری رطوبت خاک و درجه حرارت سطح برگ، دو روش تعیین زمان آبیاری است. در این تحقیق با ترکیب این دو روش مدلی برای برنامه‌ریزی و مدیریت آبیاری ذرت علوفه‌ای (SC-701) ارائه شده است. رطوبت نسبی (RH)، دمای هوا (T_a)، دمای سطح برگ (TL) و رطوبت خاک (SM) در سال ۱۳۹۲ اندازه‌گیری شد و با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چندگانه آزمون (stepwise Method)، مدلی ارائه شد. در سال ۱۳۹۳ پنج تیمار شامل ۰.۳۵٪، ۰.۶۵٪، ۰.۷۵٪، ۰.۸۵٪ و ۱.۰۰٪ کل آب قابل دسترس با چهار تکرار تعریف شد، زمانی که رطوبت خاک به رطوبت‌های مزبور می‌رسید آبیاری صورت می‌گرفت. اندازه‌گیری‌های سال قبل تکرار و مدل واسنجی شد. نتایج سال اول، همبستگی بین پارامترهای T_a ، T_L ، T_a -TL، به‌عنوان متغیر مستقل و SM به‌عنوان متغیر وابسته $R^2=0.87$ را نشان داد. ضریب تبیین مدل رطوبت خاک با سه پارامتر ورودی دمای هوا، دمای سطح برگ و رطوبت نسبی، $R^2=0.92$ به دست آمد. در این مدل، رطوبت خاک رابطه معکوس با متغیرهای (Ta) و (TL-Ta) و رابطه مستقیم با RH دارد. رطوبت خاک با استفاده از مدل برای تیمارهای سال دوم به کار رفت و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شد. اختلاف میانگین رطوبت خاک اندازه‌گیری و برآورد شده با مدل در زمان اوج تشعشع خورشید (هنگام ظهر) کمتر از $\pm 10\%$ درصد بود. مدل مزبور داده‌های تیمار ۰.۷۵٪ کل آب قابل دسترس را به‌خوبی و با اختلاف بسیار کم تخمین زد.

واژه‌های کلیدی: رطوبت خاک، تنش آبی، رطوبت نسبی، شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چندگانه

۱ - آدرس نویسنده مسئول: تهران، گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی و صنایع غذایی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.

* - دریافت: آبان ۱۳۹۶ و پذیرش: اردیبهشت ۱۳۹۷

مقدمه

برنامه‌ریزی دقیق آبیاری به منظور جلوگیری از تنش آبی گیاه و عملکرد بهینه آن ضروری است. یکی از مهم‌ترین تنش‌های گیاهی، تنش آبی است که از رایج‌ترین و مؤثرترین عامل محدودکننده عملکرد محصول است (اسکر و همکاران، ۲۰۱۱) (زیا و همکاران، ۲۰۱۳). شدت تنش آب بستگی به زمان و مدت‌زمان آن دارد؛ بنابراین، روش‌هایی موردنیاز است تا نیاز آبی گیاه را به‌درستی از نظر مکانی و زمانی طبقه‌بندی کرده و مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی را در نظر داشته باشد (هرویتز و همکاران، ۲۰۰۴) (تقویان و همکاران، ۲۰۱۴). از سال ۱۹۷۰، دمای پوشش سبز محصول به‌عنوان یک شاخص تنش آبی پذیرفته‌شده، زیرا گیاهان در شرایط تنش، روزنه‌های برگ خود را، به‌منظور حفظ آب می‌بندند، در نتیجه باعث کاهش هدایت روزنه، کاهش تعرق و افزایش دمای سطح برگ خود می‌شوند (بالستر و همکاران، ۲۰۱۳).

هدایت روزنه به تغییرات کوچک درجه حرارت برگ و هوا حساس بوده و نسبت به سرعت باد و ارتفاع گیاه حساسیت کمتری دارد. هدایت روزنه ارتباط مستقیم با بازمان روزنه، وضعیت آب گیاه و در نتیجه رشد بوته و عملکرد محصول دارد (بلانکوئست و همکاران، ۲۰۰۹) (سدودی و کوئوکونگ، ۲۰۰۶). نتایج زنگ و همکاران (۲۰۱۶)، ارتباط نزدیک بین درجه حرارت کنوپی و ویژگی‌های مصرف آب به‌وسیله گیاه را نشان داد. مطالعات محققین نشان داد تنش آبی محصول در بالاترین دوره ظهر خورشیدی اتفاق می‌افتد، اندازه‌گیری درجه حرارت پوشش گیاهی در بالاترین دمای کنوپی در ساعات ۱۲ تا ۱۷ انجام می‌شود (کوهن و همکاران، ۲۰۱۴) (گونزالوز و همکاران، ۲۰۱۳) (ایدسو و همکاران، ۱۹۷۷). برای محاسبه لحظه‌ای تنش آب محصول رطوبت نسبی، دمای هوا، تشعشع خورشیدی و درجه حرارت محصول با تصاویر دوربین‌های حرارتی ترکیب شدند (مانگو و همکاران، ۲۰۱۶). در تمام اندازه‌گیری‌ها، کمبود فشار بخار اشباع (VPD) با استفاده از رابطه بین درجه حرارت هوا و رطوبت نسبی محاسبه می‌شد

(مانیت و انسورس، ۲۰۱۳). کنوپی از برگ‌ها تشکیل شده و اختلاف درجه حرارت بین سطح کنوپی انتخابی و برگ‌های آن کنوپی، بسیار کم است (کیم و همکاران، ۲۰۱۶). اندازه‌گیری دمای سطح برگ و کنوپی در مطالعات دانشمندان با دوربین‌های حرارتی (مولر و همکاران، ۲۰۰۷) و حس‌گرهای حرارتی (لو و همکاران، ۱۹۹۴) انجام شده که دمای خنک‌تر در برگ‌ها نسبت به کنوپی را نشان داده و با تغییرات در هدایت روزنه و تعرق همراه است. اورتا و همکاران (۲۰۰۴) زمان آبیاری را از طریق میزان آب در خاک و همچنین اختلاف درجه حرارت برگ و محیط مورد مطالعه قرار دادند. آنها رابطه مستقیم بین میزان آب در گیاه و اختلاف درجه حرارت برگ و محیط را به دست آوردند. هنگامی که گیاهان با کوچک‌ترین تنش آبی روبرو می‌شوند بلافاصله روزنه‌ها بسته‌شده، تعرق کاهش یافته و درجه حرارت برگ افزایش می‌یابد.

مدل‌سازی رطوبت خاک و تعیین عوامل مؤثر بر آن، اهمیت ویژه در تشخیص زمان مناسب آبیاری دارد. یکی از روش‌های مدل‌سازی، روش شبکه عصبی مصنوعی است. پژوهشگران از شبکه عصبی مصنوعی در شبیه‌سازی پارامترهایی همچون میزان تبخیر تعرق هفتگی (لاندراس و همکاران، ۲۰۰۹) پیش‌بینی دمای هوا (اسمیت و همکاران، ۲۰۰۹) و پیش‌بینی عملکرد گندم دیم (نوروزی و همکاران، ۲۰۱۰) استفاده کرده‌اند. در این پژوهش به‌منظور شناسایی حداقل پارامتر ورودی موردنیاز برای شبیه‌سازی رطوبت خاک از شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده است. تاکنون مطالعه‌ای در زمینه مدل‌سازی رطوبت خاک با در نظر گرفتن پارامترهای اقلیمی و گیاهی (بدون در نظر گرفتن پارامترهای خاک) انجام نشده است. اندازه‌گیری پتانسیل آب در محیط کاشت با غیریکنواختی زیادی همراه است و زمان‌بر است و معمولاً اعداد متفاوتی به دست می‌آید؛ و به دلیل تأثیر عواملی چون شرایط ریشه‌ها و کمبود فشار بخار، وجود آب در هر پتانسیل نمی‌تواند تضمین‌کننده جذب آب به‌وسیله گیاه باشد. ارائه مدل ساده بین متغیرهای محیطی و گیاهی به‌منظور پیش‌بینی میزان رطوبت خاک و

طول جغرافیایی ۳۲ درجه و ۴۷ دقیقه و عرض ۵۱ درجه و ۴۵ دقیقه واقع شد و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۹۵۰ متر است. آب و هوای این منطقه گرم و خشک بوده و مقدار رطوبت موجود در هوا به طور میانگین ۳۵ درصد و حداکثر تبخیر و تعرق ۷ میلی متر در روز است. شرایط آب و هوایی منطقه در طول فصل رشد ذرت در جدول (۱) ارائه شده است. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد آزمایش نیز در جدول (۲) ارائه شده است. بافت خاک به روش USDA، اسیدیته خاک با pH سنج، هدایت الکتریکی خاک با هدایت الکتریکی سنج اندازه گیری شد (وردی نژاد، ۱۳۹۰).

برنامه ریزی آبیاری مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته و اندازه گیری میزان آب در گیاه، به عنوان یک راه کار مطمئن تر پیشنهاد می شود. لذا هدف از این تحقیق ارائه مدل برای تخمین رطوبت خاک و مقایسه آنها با رطوبت واقعی خاک همچنین تعیین زمان آبیاری با استفاده از اختلاف دمای هوا و سطح برگ و رطوبت واقعی خاک (کم آبیاری) است.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

این مطالعه در منطقه برخوار، شمال اصفهان و سال های زراعی ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ انجام شد. این منطقه در

جدول ۱- شرایط آب و هوایی در زمان رشد ذرت، در سال زراعی ۹۲ و ۹۳

سال	ماه	بارندگی (میلی متر)	دما (سانتی گراد)		رطوبت نسبی (درصد)	
			حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل
۱۳۹۲	تیر	۰	۴۰	۱۲	۳۴	۳
	مرداد	۰	۴۱	۱۲	۴۳	۳
	شهریور	۰	۳۷	۹	۴۱	۳
۱۳۹۳	مهر	۰	۳۳	۳	۸۱	۵
	تیر	۱۰	۴۰	۱۵	۹۴	۳
	مرداد	۰	۳۸	۱۲	۸۸	۲
	شهریور	۳/۲	۳۵	۴	۸۸	۲

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

عمق خاک (سانتی متر)	درصد ذرات خاک (درصد)			بافت خاک	K mg/kg a.v.a	P mg/kg a.v.a	N %	هدایت الکتریکی (dS/m)	pH
	رس	سیلت	شن						
۳۰-۰	۳۶	۳۵	۲۹	رسی لومی	۴۲۳	۴۰	۰/۱	۳/۵	۸/۲
۶۰-۳۰	۳۸	۴۶	۱۶	سیلتی رسی لومی	۲۹۸	۶/۷	۰/۰۳	۲/۶	۸/۴

عملیات زراعی ذرت

ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۱ (SC-701) به عنوان گیاه مناسب انتخاب شد. دوره بلوغ ۱۲۵ روز که در تاریخ شش تیر سال ۱۳۹۲ کاشته شد و در هفت آبان ماه برداشت شد. سال زراعی ۱۳۹۳ در تاریخ ۱۰ تیر کاشته و در ۱۱ آبان برداشت شد. با توجه به آزمایش خاک نیاز به ۸ تا ۱۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفات تریپل (۶۶ درصد فسفر) به صورت دستی در هر کرت در زمان کاشت بود. ۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن از منبع نترات آمونیوم همراه با

آب آبیاری به زمین داده شد. نترات آمونیوم به صورت مخلوط با آب آبیاری در اول شهریور به مزرعه داده شد. علف کش کروز ۴ لیتر در هکتار در ۲۹ تیر و علف کش لاسو به میزان ۲۰ لیتر در هکتار در ۲۶ مرداد استفاده شد. اجرای طرح آزمایشی و اندازه گیری پارامترها در سال ۱۳۹۲ در زمینی با مساحت ۵۰۰ مترمربع انجام شد. ذرت علوفه ای با فاصله ۰/۷۵ متر بین ردیف ها و ۱۲ سانتی متر بین بوته ها کشت شد. از ۲۰ مردادماه هنگامی که برگ گیاهان به حدی رسید که بتوان اندازه گیری انجام داد

انجام شد. آزمایش در قالب بلوک کامل تصادفی با پنج تیمار آبیاری (T1-T5) و با چهار تکرار انجام شد. مساحت هر بلوک آزمایشی ۲۵ مترمربع و در هر بلوک شش ردیف ذرت بافاصله ۰/۷۵ متر بین ردیف‌ها کاشته شده بود. بلوک‌های آزمایشی به شیوه آبیاری جوی پشته‌ای آبیاری شدند. بلوک‌ها پس از برداشت گندم و قبل از کاشت در سال ۱۳۹۳، قطعه‌بندی شد. لوله‌کشی در سطح مزرعه به صورتی بود که هر قطعه جداگانه و با یک شیر مجزا به قطر ۳۲ میلی‌متر آبیاری شد و لوله اصلی به یک کنترل متصل و سپس به لوله اصلی مزرعه وصل شد. آبیاری در هر دو سال به صورت کنترل دستی بود. تیمارها و ارتفاع آب آبیاری در جدول (۳) ارائه شده است.

برای تدوین تقویم آبیاری و تعیین زمان و مقدار آبیاری با معیار قرار دادن تیمار بدون تنش آبی از روش ویلان رطوبت آب در خاک استفاده شد. نخست باید مقدار رطوبت قابل جذب گیاه (θ_{CEC}) محاسبه شود (رابطه ۲) و سپس هر وقت رطوبت به حدود آن رسیده آبیاری انجام شود. به عبارت دیگر، هرگاه رطوبت روزانه (θ_i) برابر رطوبت قابل جذب گیاه (θ_{CEC}) شد، عملیات آبیاری انجام می‌شود. برای تعیین مقدار عمق آب آبیاری از رابطه ۳ استفاده شد. بر اساس نتایج تجزیه فیزیکی خاک در آزمایشگاه و منحنی مشخصه خاک، رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی (مکش ۱/۳ اتمسفر) برابر با ۴۲ درصد و در نقطه پژمردگی دائم (مکش ۱۵ اتمسفر) برابر با ۲۰ درصد به دست آمد.

$$\theta_{CEC} = \theta_{FC} - (\theta_{FC} - \theta_{PWP}) \times MAD \quad (2)$$

که در آن:

θ_{CEC} : رطوبت حجمی قابل جذب گیاه، θ_{FC} رطوبت حجمی خاک در حد ظرفیت زراعی و θ_{PWP} رطوبت حجمی خاک در حد نقطه پژمردگی دائم و MAD ضریب حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی است.

$$d_n = (\theta_{FC} - \theta_{PWP}) \times MAD \times D_{rz} \quad (3)$$

که در آن:

برداشت داده‌ها شروع شد. اندازه‌گیری‌ها در فاصله بین دو آبیاری (در روزهای آفتابی) (جدول ۳) هر یک ساعت یک‌بار، از هشت صبح تا شش بعدازظهر انجام شد. رطوبت نسبی (RH)، دمای هوا (T_a) و دمای سطح برگ (T_L) در نزدیکی سطح برگ و رطوبت خاک (SM) در سطح سایه‌انداز همان گیاه اندازه‌گیری شد. بدین صورت که گیاهی به صورت تصادفی انتخاب شده و درجه حرارت سطح برگ با دماسنج مادون قرمز از چهار جهت اندازه‌گیری و میانگین آن ثبت شد. دستگاه دماسنج مادون قرمز استفاده شده در این تحقیق مدل testo 625 ساخت آلمان با ± 0.1 درجه سانتی‌گراد دقت (نسبت فاصله به قطرشی اندازه‌گیری) ۱:۸ و اندازه‌گیری‌ها از فاصله نیم متری هدف (قطر حدود شش سانتی‌متر) و زاویه ۱۰ تا ۲۰ درجه نسبت به افق انجام شد (جون و دیمر، ۱۹۹۹) (وردی نژاد و همکاران، ۱۳۹۰). رطوبت نسبی (RH) با رطوبت‌سنج و در فاصله یک تا دو سانتی‌متری از سطح برگ، جایی که دمای آن اندازه‌گیری شده بود قرار داده و رطوبت نسبی ثبت شد. رطوبت خاک (SM) با استفاده از دستگاه انعکاس سنج زمانی TDR (ساخت شرکت FIELDSCOUT آمریکا) در سطح سایه‌انداز گیاه، عمق ۳۰ سانتی‌متری از ریشه اندازه‌گیری شد. کمبود فشار بخار (VPD) در معادله (۱) و با استفاده از درجه حرارت هوا و رطوبت نسبی تعیین شد (مانتیث و آنسورس، ۲۰۱۳).

$$VPD = \left(1 - \left(\frac{RH}{100}\right)\right) \times \left(0.6108 \times 10^{\left(\frac{7.5 \times T_a}{237 + T_a}\right)}\right) \quad (1)$$

که در آن:

T_a دمای هوا (درجه سانتی‌گراد)، RH : رطوبت نسبی (درصد)، VPD : کمبود فشار بخار (کیلو پاسکال) است. همبستگی بین پارامترهای اقلیمی (RH)، (T_a)، (T_L) و ($T_a - T_L$) به عنوان متغیر مستقل و (SM) به عنوان متغیر وابسته به صورت هم‌زمان، با Matlab (شبکه عصبی مصنوعی) بررسی و با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه در SPSS آزمون (Stepwise Method) مدل تعریف شد. سال دوم ۱۳۹۳، آزمایش در مزرعه و در قطعه سال اول

می‌گیرد به همین دلیل در این مطالعه پتانسیل آب برگ و یا دمای سطح برگ به‌عنوان شاخص تنش آبی، مورد مقایسه با روش بیلان آبی قرار گرفت. تیمارهای T1 و T5 از حداقل و حداکثر آب آبیاری مصرفی برخوردار بود. تیمارهای آبیاری، با توجه به زمان و شدت تنش که هر دو بر عملکرد محصول مؤثر هستند، انتخاب شدند زمانی که TDR رطوبت معادل رطوبت خاک تیمار مورد نظر را نشان می‌داد آبیاری انجام می‌شد. نشریه فائو ۵۶، ضریب تخلیه مجاز رطوبتی خاک (MAD) را برای ذرت علوفه‌ای در طی مراحل رشد ثابت و برابر ۵۵ درصد گزارش کرده است؛ اما در این پژوهش که هدف مدل‌سازی است مقادیر مختلفی شامل ۱۰۰، ۸۵، ۷۵، ۶۵، ۳۵ درصد را برای ضریب مجاز تخلیه رطوبتی خاک، پنج تیمار با چهار تکرار در نظر گرفته شد.

جدول ۳- عمق آب آبیاری (میلی‌متر) برای تیمارهای آبیاری در سال زراعی ۹۳

ماه	T5	T4	T3	T2	T1
تیر	۱۶۵	۱۶۵	۱۶۵	۱۶۵	۱۶۵
مرداد	۴۳۵	۳۶۵	۳۶۵	۳۶۵	۳۶۵
شهریور	۲۱۰	۲۱۰	۱۴۰	۱۴۰	۷۰
مهر	۱۴۰	۱۴۰	۱۴۰	۷۰	۷۰
مجموع	۹۵۰	۸۸۰	۸۱۰	۷۴۰	۶۷۰

اشباع، (α و n و m) پارامترهای شکل که به ترتیب برابر با ۰/۰۸۷۳، ۰/۴۶۱۳، ۰/۰۰۹۴، ۰/۳۱۶۸/۴۶۳۶، ۰/۰ است. پارامترهای اقلیمی و رطوبت خاک (SM) در سال ۱۳۹۳ شبیه به سال ۱۳۹۲ اندازه‌گیری به‌نحوی که برای هر تیمار، جداگانه انجام شد. در پایان فصل، رطوبت خاک پیش‌بینی شده با مدل، با رطوبت خاک به‌دست‌آمده از آزمایش مقایسه و واسنجی شد و بهترین زمان آبیاری با در نظر گرفتن دو پارامتر عملکرد و مقدار رطوبت حجمی خاک معرفی شد.

بررسی همبستگی بین پارامترها از شبکه عصبی مصنوعی، تدوین مدل از رگرسیون خطی چندگانه در SPSS، روش گام‌به‌گام (Stepwise Method) و برای آنالیز آماری نتایج از مدل SPSS استفاده شد.

d_n عمق آب آبیاری (mm) و D_{fz} عمق منطقه توسعه ریشه‌ها (mm) است. مقدار مصرف آب توسط گیاه از طریق اندازه‌گیری اجزای بیلان آب بر اساس رابطه ۴ محاسبه گردید.

$$I = (ET_C + D_d + R_0) \pm \Delta S \quad (4)$$

که در آن:

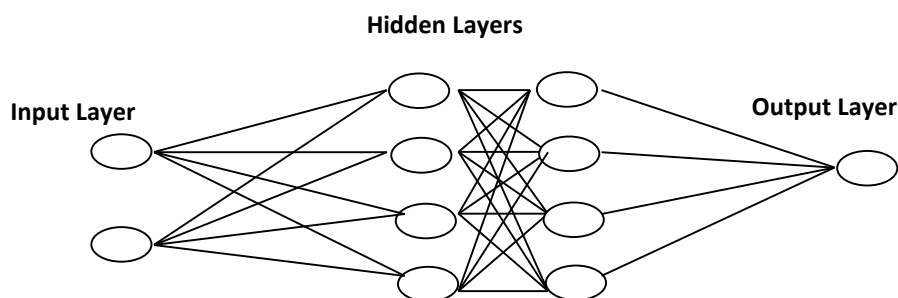
I عمق آب آبیاری (mm)، ET_C تبخیر تعرق گیاه (mm)، D_d عمق آب زهکشی (mm)، R_0 عمق رواناب (mm) و ΔS تغییرات ذخیره رطوبتی خاک (mm) است.

آبیاری در روش‌های متداول، زمانی انجام می‌شود که آب سهل‌الوصول توسط گیاه مصرف‌شده باشد. در روش بیلان آبی معیار سنجش تنش آبی، موجودیت آب در محیط کاشت است، در صورتی که در روش مستقیم، وضعیت رطوبتی اندام‌های گیاهی مستقیماً مورد اندازه‌گیری قرار

برای کالیبراسیون (TDR) از سه تانسومتر که در مکان‌های مختلف مزرعه بود، استفاده شد. پتانسیل آب در محیط کاشت با استفاده از تانسومترها تعیین شد. ضرایب معادله و نگونختن به روش حل معکوس با استفاده از نرم‌افزار RETC (از روش تقریب غیرخطی با استفاده از حداقل مربعات و بهره‌گیری از متد Marquardt (۱۹۶۳)) تخمین زده شد. سپس با استفاده از معادله و نگونختن، رطوبت خاک معادل مکش‌های قرائت‌شده از تانسومترها محاسبه شد و با استفاده از این روش و داده‌های حاصله از قرائت‌های تانسومتر، TDR واسنجی شد. هنگامی که (TDR) در بلوک‌های مختلف درصد رطوبت یکسان و برابر درصد تیمار موردنظر را نشان داد آبیاری انجام می‌شد. ضرایب معادله و نگونختن با استفاده از نرم‌افزار RETC عبارت است از θ_r : رطوبت باقی‌مانده، θ_s : رطوبت

است و به صورت پرسپترون تک لایه و چندلایه موجود است. پرسپترون تک لایه تنها می‌تواند مسائل مجزای خطی را دسته‌بندی کند و برای مسائل پیچیده‌تر لازم است که از تعداد بیشتری لایه استفاده گردد. شکل (۱) یک شبکه پرسپترون چندلایه (MLP) را نشان می‌دهد. این شبکه، یک شبکه کاملاً به هم مرتبط است چراکه هر نرون در یک لایه به تمامی نرون‌های لایه بعدی مرتبط است. اگر بعضی از این ارتباطات وجود نداشته باشد شبکه، یک شبکه مرتبط ناقص است. زمانی که گفته می‌شود شبکه از n لایه تشکیل شده است، تنها لایه‌های میانی و خارجی به شمار می‌آید و لایه ورودی شمارش نمی‌شود چراکه نرون‌های این لایه محاسبه‌ای را انجام نمی‌دهند؛ بنابراین شبکه تک لایه شبکه‌ای با تنها یک لایه خارجی است.

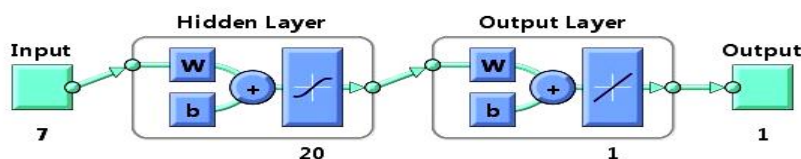
شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) الهام گرفته از عملکرد و نحوه کار شبکه‌های عصبی بیولوژیکی است. با پردازش متغیرهای تجربی، دانش یا قانون نهفته در ورای متغیرها به ساختار شبکه منتقل می‌شود که به آن یادگیری می‌گویند. اصولاً توانایی یادگیری مهم‌ترین ویژگی یک سیستم هوشمند است. سامانه‌ای که بتواند یاد بگیرد منعطف‌تر است و ساده‌تر برنامه‌ریزی می‌شود. شبکه‌های عصبی از یک سری لایه‌ها، شامل اجزای ساده پردازشگر به نام نرون تشکیل شده‌اند که به صورت موازی باهم عمل می‌کنند. هر لایه ورودی به یک یا تعداد بیشتری لایه میانی مرتبط است و لایه‌های میانی نیز به لایه خروجی مرتبط می‌شوند، جایی که جواب شبکه نقش خروجی یک سیستم را ایفا می‌کند. یکی از انواع شبکه‌های عصبی، پرسپترون



شکل ۱- شبکه پرسپترون چندلایه

تحقیق از الگوریتم آموزشی Levenberg-Marquardt (LM) برای آموزش شبکه استفاده شد. الگوریتم (LM) Levenberg-Marquardt یک روش استاندارد برای مسائل حداقل مربعات غیرخطی بوده (شکل ۲) و به عنوان ترکیبی از روش نیوتن گوس و بیشترین شیب نزول بیان شد به دلیل همگرایی سریع‌تر در آموزش شبکه استفاده شد. تابع لایه اول از نوع سیگموئیدی، لایه دوم از نوع خطی و تعداد نرون‌های لایه پنهان ۲۰ نرون انتخاب شده است.

الگوریتم یادگیری پس انتشار خطا (BP) از نوع یادگیری با ناظر است. در یادگیری با ناظر، هنگامی که ورودی به شبکه اعمال می‌شود جواب شبکه با جواب هدفی که برای شبکه تعیین شده است مقایسه می‌شود و سپس خطای یادگیری محاسبه شده و از آن برای تنظیم پارامترهای شبکه استفاده می‌شود، به گونه‌ای که اگر دفعه بعد به شبکه همان ورودی اعمال شود خروجی شبکه به جواب هدف نزدیک‌تر گردد. روش مدل‌سازی برای ANN بر اساس اصول الگوریتم انتشار به عقب است. در این



شکل ۲- توابع و لایه‌های الگوریتم (LM)

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 2}} \quad (7)$$

در آن‌ها:

Yi داده‌های واقعی و \hat{y}_i داده‌های برآورد شده، MSE ریشه میانگین مربعات خطا R^2 : ضریب تبیین SE: خطای استاندارد

نتایج و بحث

همبستگی متغیرها به صورت هم‌زمان در مدل

شبکه عصبی: طبق جدول (۴) و با در نظر گرفتن ۴۷۱ داده از هر متغیر، میزان همبستگی متغیرها با مقدار رطوبت خاک در مزرعه ذرت مورد بررسی قرار گرفت و میانگین مربعات خطای آنها به دست آمد. طبق نتایج به دست آمده و با در نظر گرفتن هم‌زمان متغیرهای رطوبت نسبی (RH)، درجه حرارت هوا (Ta)، درجه حرارت سطح برگ (TL)، اختلاف درجه حرارت سطح برگ و هوا (TL-Ta) و کمبود فشار بخار (VPD)، ضریب همبستگی بالایی ($R=0.87$) بین متغیرهای مورد بررسی در شکل (۳)، با رطوبت خاک (SM) در محیط کاشت به دست آمد. همبستگی بین متغیرهای موجود در پارامترهای آموزش، اعتبارسنجی و آزمون خطای آن در شکل (۳) نشان‌دهنده ارتباط معنی‌دار بین متغیرهای وابسته و متغیر مستقل است.

همبستگی متغیرها در مدل SPSS: همبستگی بین

شاخص‌های (RH)، (Ta)، (TL-Ta)، (VPD) به صورت تک‌به‌تک با (SM) در سال اول در سطح احتمال پنج درصد، (شکل ۴) مورد بررسی قرار گرفت. (SM) به ترتیب با (RH) همبستگی بیشتر و با اختلاف (TL-Ta)، (VPD) و (Ta) همبستگی کمتری نشان داد.

بررسی همبستگی متغیرهای اقلیمی به صورت هم‌زمان در شبکه عصبی مصنوعی انجام شد. در این تحقیق، ۴۷۱ داده از هر متغیر در نظر گرفته شد. میزان همبستگی بین متغیرهای ((RH)، (Ta)، (TL)، (TL-Ta) و (VPD) با میزان رطوبت خاک (SM) در مزرعه ذرت مورد بررسی قرار گرفت.

تدوین مدل با استفاده از رگرسیون خطی چند متغیره در SPSS آزمون گام‌به‌گام انجام شد. این روش مشارکت دو یا چند متغیر مستقل در تغییرات یک متغیر وابسته است تا از یک یا چند متغیر مستقل، به یک معادله رگرسیونی دست‌یافته و از آن برای پیش‌بینی مقادیر متغیر وابسته استفاده نماید. در این روش متغیرها یک‌به‌یک وارد مدل می‌شوند. ابتدا متغیری که بیشترین همبستگی را با متغیر وابسته دارد انتخاب می‌شود. دومین متغیری که وارد تحلیل می‌شود متغیری است که پس از تفکیک متغیر مقدم بر آن موجب بیشترین افزایش در مقدار ضریب تبیین (R^2) می‌شود. ورود متغیرها به مدل یک‌به‌یک است و تا زمانی ادامه داده می‌شود که معنی‌داری متغیر به ۰/۹۵ برسد؛ یعنی سطح خطا ۰/۰۵ شود. در این روش با ورود متغیر جدید، متغیرهایی که قبلاً وارد معادله شده‌اند از نو آزموده شد تا مشخص گردد آیا هنوز هم حضور آن‌ها در مدل به موفقیت آن کمک می‌کند؛ بنابراین احتمال دارد برخی از متغیرهایی که در مرحله اول قدرت تبیین بالایی داشته‌اند در مرحله بعدی حذف شوند.

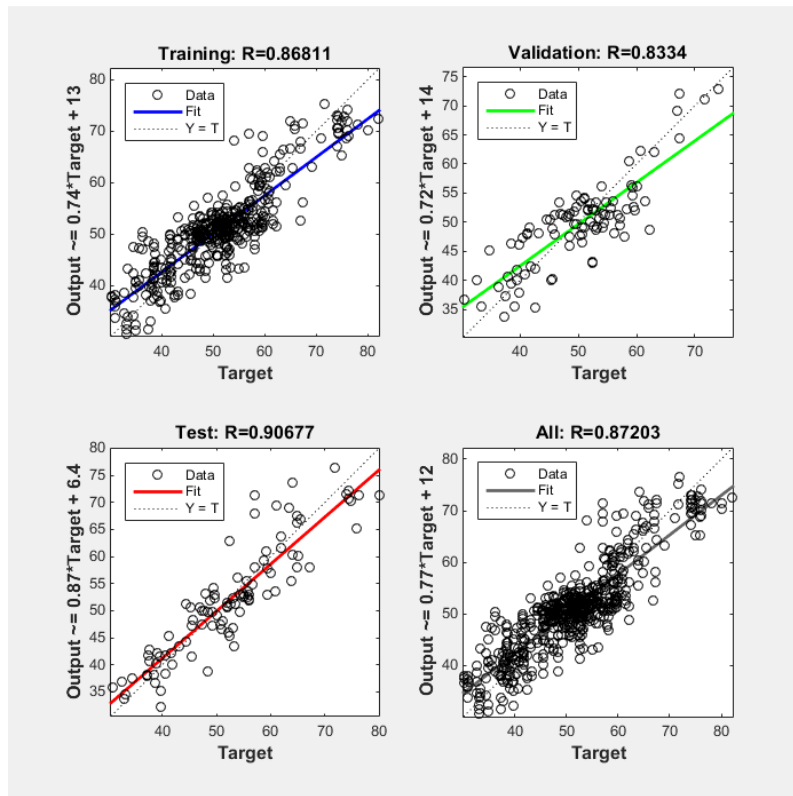
برای مقایسه مدل‌ها از آماره‌های ارزیابی (روابط ۵ تا ۷) استفاده شد:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{y_i}^y (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5)$$

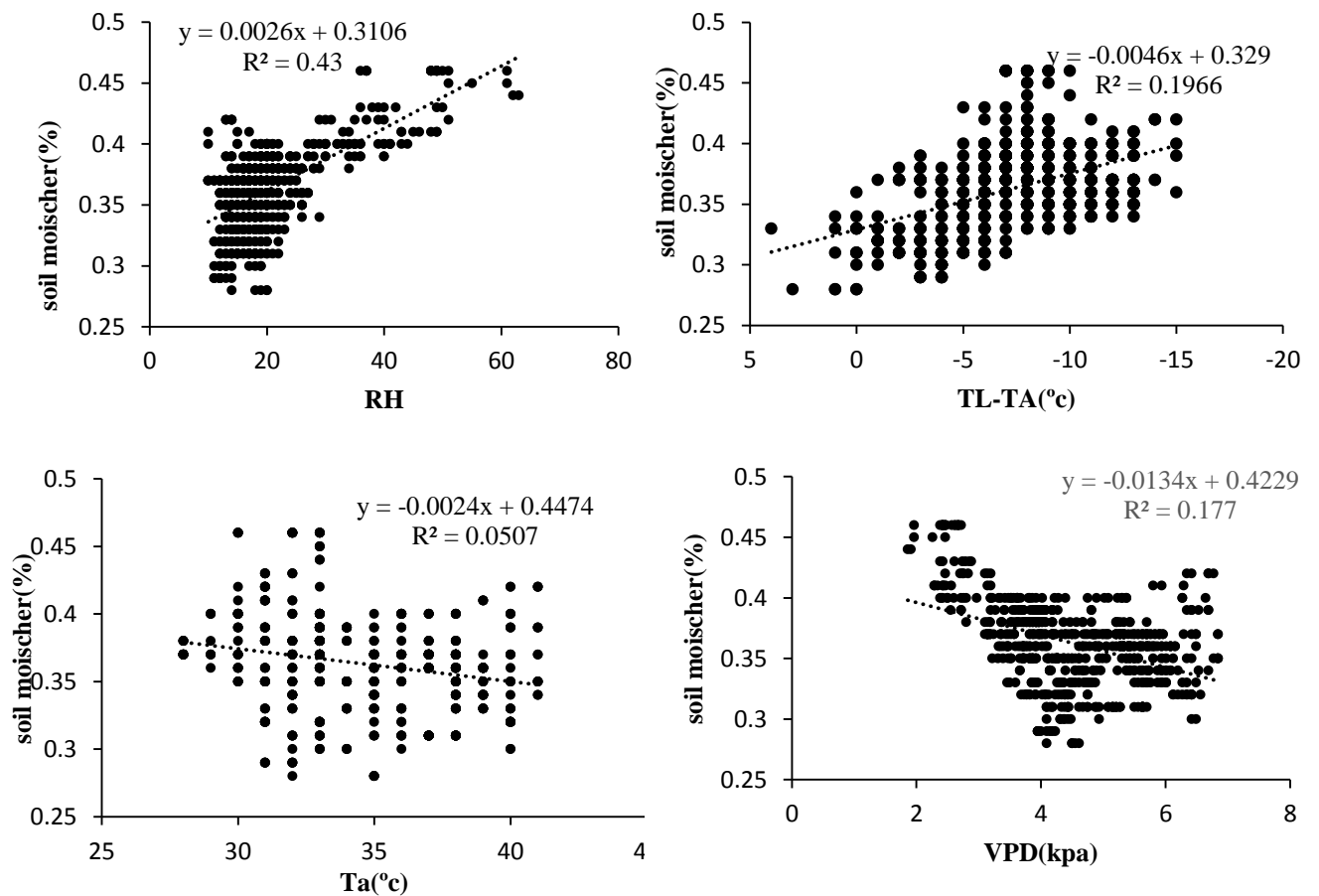
$$R^2 = \frac{E_{SS}}{T_{SS}} = \frac{\sum \hat{y}_i^2}{\sum y_i^2} \quad (6)$$

جدول ۴- همبستگی و میانگین مربعات خطا در مدل شبکه عصبی در مراحل آموزش، اعتبارسنجی، آزمون و خطا

		samples	MSE	R
	Training	۴۷۱	۲۱/۴۵	۰/۸۶
Neroul net work	Validation	۱۰۱	۲۲/۴۴	۰/۸۳
	Testing	۱۰۱	۲۱/۶۳	۰/۹۰



شکل ۳- همبستگی بین متغیرهای موجود در سه مرحله آموزش، اعتبار سنجی و آزمون خطا



شکل ۴- همبستگی بین رطوبت خاک و پارامترهای (VPD)، (TL-Ta)، (Ta)، (RH)

بالایی با یکدیگر دارند و نباید به طور هم‌زمان به‌عنوان متغیر ورودی در نظر گرفته شوند.

تعیین مدل مناسب رطوبتی خاک: پس از بررسی

همبستگی بین پارامترها، آزمون گام‌به‌گام بر روی داده‌ها انجام شد و مدلی برای تعیین رطوبت خاک برآورد شد (رابطه ۸). شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2) برابر با ۰/۹۲، ریشه میانگین مربعات خطا (MSE) برابر با ۰/۰۱۴ و با اطمینان ۹۹ درصد برازش شد. ضرایب رگرسیون مدل برآورد شده در جدول (۵) ارائه شد.

روابط آب، خاک، گیاه و هوا جزء مسائل کاملاً پیچیده است و مدل شبکه عصبی در نشان دادن همبستگی بین متغیرها و اثر هم‌زمان بین آنها توانایی زیادی نشان داد ولی مدل خطی خوبی برازش نکرد. نرم‌افزار SPSS تأثیر پارامترها را به‌صورت تک‌به‌تک و هم به‌صورت هم‌زمان در مدل گام‌به‌گام (step wise) بررسی کرد. این نرم‌افزار مدل رگرسیون خطی بین پارامترها را به‌خوبی برآورد کرد یکی دیگر از توانایی‌های روش گام‌به‌گام، تفسیر ضرایب رگرسیونی برای هر متغیر در حضور سایر متغیرها بود و ترتیب اثرگذاری متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته نیز مشخص شد. متغیر دمای هوا و دمای سطح برگ همبستگی

جدول ۵- ضرایب رگرسیون مدل برآورد شده

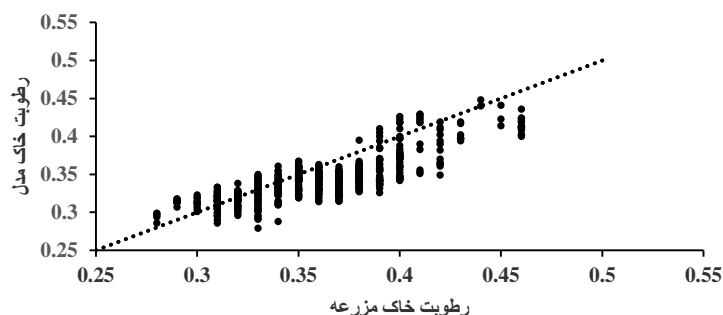
مدل	ضرایب رگرسیون (B)	خطای استاندارد	ضریب رگرسیون استاندارد شده	تورم واریانس (VIF)
(cofition)	۰/۴۲۲	۰/۰۰۶		
RH	۰/۰۰۳	۰/۰۰۰	۰/۵۳۸	۱/۹۳۵
TL-Ta	-۰/۰۰۵	۰/۰۰۰	-۰/۴۳۱	۱/۱۲۵
Ta	-۰/۰۰۵	۰/۰۰۰	-۰/۵۰۴	۲/۱۰۶

$$SM = 0.422 + 0.003RH - 0.005(T_L - T_a) - 0.005T_a \quad R^2 = 0.92 \quad (8)$$

اندازه‌گیری شده به‌صورت مستقیم از مزرعه با رطوبت شده توسط مدل در سال اول آزمایش را نشان می‌دهد. سال دوم آزمایش، شاخص‌های رطوبت نسبی (RH)، درجه حرارت هوا (T_a) و اختلاف درجه حرارت سطح برگ و هوا ($T_L - T_a$) رطوبت خاک (SM) برای هر یک از تیمارها (T_1 تا T_5)، در طول دوره آزمایش اندازه‌گیری شد و در پایان فصل زراعی رطوبت خاک برای هر یک از تیمارها، با استفاده از رابطه (۵) برآورد شد. شکل (۶) مقایسه رطوبت برآورد شده و رطوبت اندازه‌گیری شده در مزرعه در تیمارهای (T_1 تا T_5) را نشان می‌دهد. داده‌ها مربوط به روزهای قبل و بعد از آبیاری است. داده‌های مربوط به مدل در برخی از روزها به‌خوبی برآورد نشده است و با داده‌های مزرعه اختلاف زیاد دارند ولی در برخی از روزها داده‌ها بسیار نزدیک برآورد شده است. تیمارهای T_1 و T_2 گیاهان در بسیاری از روزها تحت تنش بوده‌اند. تیمارهای T_4 و T_5 گیاهان تحت تنش آبی نبودند. مدل

در این مدل رطوبت خاک رابطه معکوس با متغیرهای درجه حرارت هوا (T_a) و اختلاف درجه حرارت هوا - سطح برگ ($T_L - T_a$) دارد و رابطه مستقیم با رطوبت نسبی، کمبود فشار بخار هوا دارد. همبستگی بین متغیرهای مستقل بررسی شد. فشار بخار اشباع به‌صورت غیرخطی با دمای هوا و رطوبت نسبی وابسته است. معادله برآورد شده رطوبت خاک به‌صورت خطی با فشار بخار اشباع و دمای هوا و رطوبت نسبی وابستگی دارد. تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که تعرق گیاه و هدایت روزنه‌ای گیاه رابطه مستقیم با رطوبت خاک دارد و هدایت روزنه‌ای گیاه به اختلاف درجه حرارت کنوپی و هوا و رطوبت نسبی بستگی دارد (بلانکوئست و همکاران، ۲۰۰۹). با داشتن سه پارامتر دمای هوا، دمای سطح برگ و رطوبت نسبی می‌توان رطوبت خاک را با مدل برآورد نمود. صحت مدل با استفاده از داده‌های سال اول بررسی شد. شکل (۵) رطوبت خاک

داده‌های تیمار T3 را به‌خوبی و با اختلاف بسیار کم تخمین کرده است. تغییرات میانگین رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در مزرعه و رطوبت خاک برآورد شده توسط مدل برای سال دوم در تیمارهای آبیاری در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۵- رطوبت خاک مزرعه نسبت به رطوبت خاک برآورد شده با مدل در سال ۱۳۹۲ آزمایش

جدول ۶- میانگین مربعات و سطوح معنی‌داری در ANOVA در دو سال برای گیاه ذرت

۱۳۹۳		۱۳۹۲		درجه آزادی	منبع تغییرات
بیولوژیک ماده خشک	بیولوژیک تر	بیولوژیک ماده خشک	بیولوژیک تر		
۳/۸۹	۲۹/۰۸	۱۶/۶۸	۱۶۱/۸۲	۳	بلوک
۴۱/۸۸**	۸۶۸/۴۹ ^{ns}	۲۳/۰۵**	۳۱۵/۰۰ ^{ns}	۴	تیمار
۸/۹۴	۴۰/۷۷	۶/۱۳	۵۰/۱۵	۱۲	خطا
۱۱/۷۴	۷/۵۸	۹/۵۸	۸/۰۰		cv(coeff var)

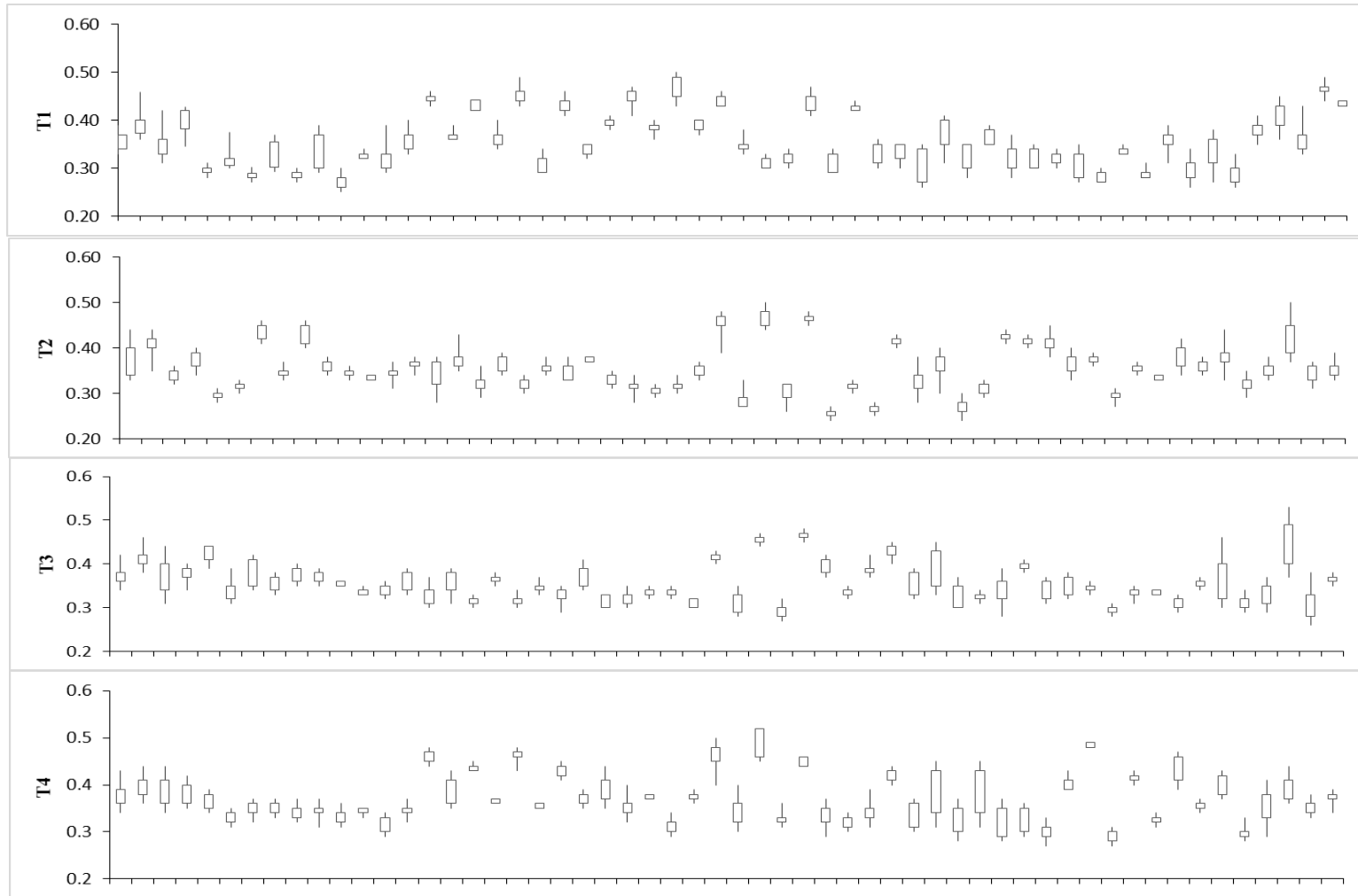
* و ** اختلاف معنی‌داری در سطح یک و پنج درصد، (ns) اختلاف معنی‌داری در سطح پنج درصد ندارد

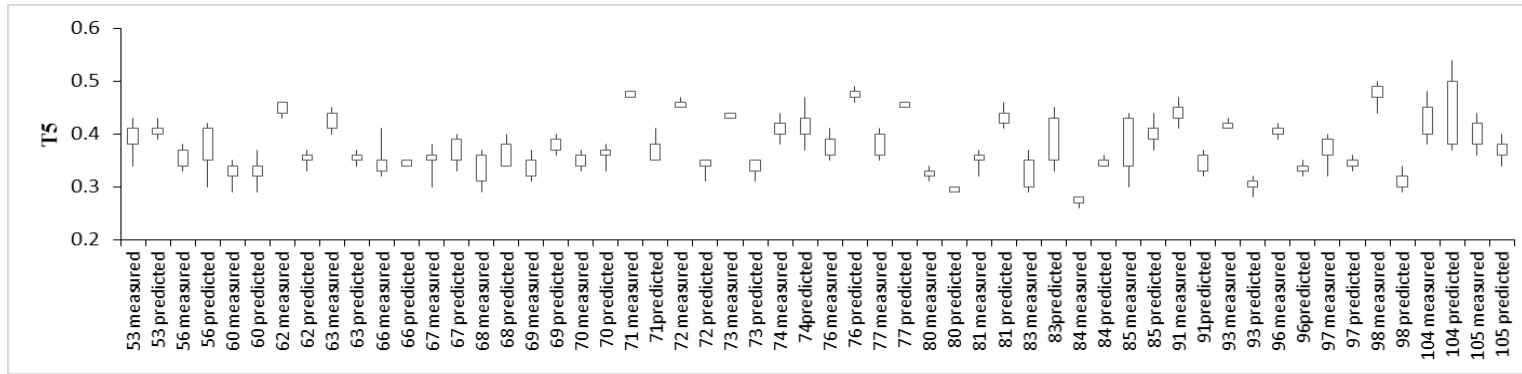
جدول ۷- مقایسه میانگین صفات مورد مطالعه در آزمون دانکن گیاه ذرت

۱۳۹۳		۱۳۹۲		تیمار
بیولوژیک ماده خشک	بیولوژیک تر	بیولوژیک ماده خشک	بیولوژیک تر	
(ton/ha)				
c۲۱/۴	b۶۴/۸	c۲۲/۰	c۷۷/۸	T1
ab۲۲/۵	b۷۳/۱	ab۲۵/۲	ab۸۰/۳	T2
ab۲۶/۹	a۸۸/۵	a۲۶/۸	ab۹۱/۰	T3
a۲۸/۶	a۹۸/۲	a۲۸/۰	a۹۷/۲	T4
a۲۷/۶	a۹۸/۲	a۲۷/۴	a۹۵/۸	T5
۳۱/۲	۸۴/۲	۲۵/۹	۸۸/۴	Avg

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر جزء تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارد

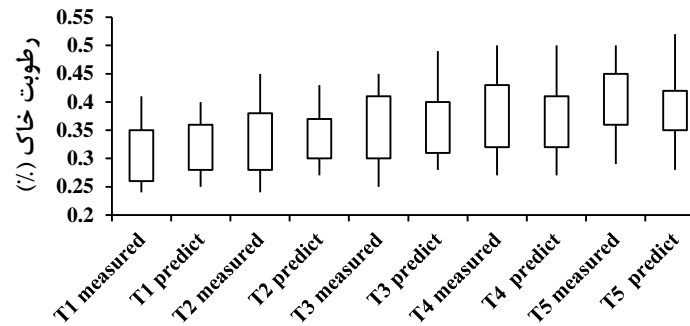
رطوبت خاک (%)





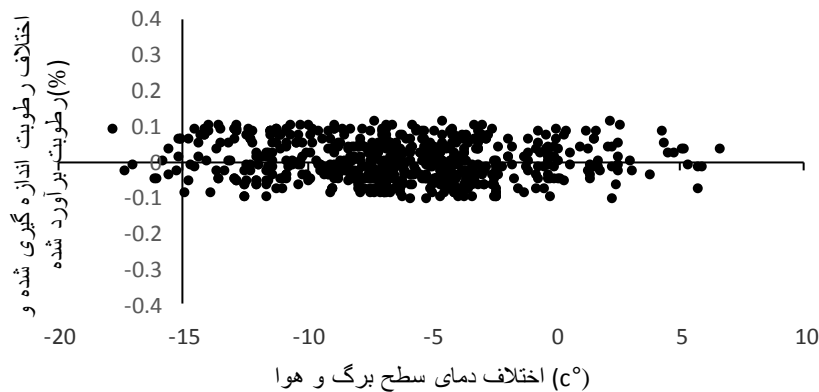
روز پس از کاشت (اندازه‌گیری و برآورد شده)

شکل ۶- رطوبت برآورد شده نسبت به رطوبت اندازه‌گیری شده در هر یک از تیمارهای (T1-T5)



تیمارهای اندازه‌گیری و برآورد شده

شکل ۷- تغییرات میانگین رطوبت خاک اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط مدل در تیمارهای آبیاری



شکل ۸- اختلاف رطوبت خاک برآورد شده توسط مدل و داده‌های مزرعه سال ۱۳۹۳ نسبت به اختلاف دمای سطح برگ و هوا در ساعات ۱۲ تا ۱۵ ظهر

۳- درجه سانتی‌گراد به دست آمد. نتایج مطالعات مانگو و همکاران (۲۰۱۶) در گلخانه نیز نشان داد که اوج تنش روزانه در گیاه ذرت در ساعات بین ۱۳:۳۰ تا ۱۵ اتفاق می‌افتد. بیشترین دمای کنوپی در گیاه ذرت، دو ساعت بعد از ظهر اتفاق می‌افتد (ایرماک و همکاران، ۲۰۰۰، تقواییان و همکاران، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۲).

عملکرد

عملکرد بیولوژیکی، وزن تر کل اندام هوایی گیاه (برگ، ساقه، چوب و غلاف بلال، دانه و...) است. تأثیر تیمارهای آبیاری، برای دو سال ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ بر عملکرد بیولوژیک (وزن تر) ذرت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد، اثر تیمارهای آبیاری در سطح پنج درصد دارای اختلاف معنی‌داری نیست (جدول ۶). متوسط عملکرد بیولوژیکی (وزن تر) در T4 بر اساس آزمون دانکن دارای بیشترین مقدار است (جدول ۷). نتایج تأثیر تیمارهای آبیاری، بر عملکرد بیولوژیکی وزن ماده خشک برای دو سال نشان می‌دهد، بیشترین عملکرد در سال ۱۳۹۲ مربوط به تیمار T5 با ۲۷/۴ تن در هکتار و در سال ۱۳۹۳ تیمار T5 با ۲۷/۶ تن در هکتار بود و اختلاف معنی‌داری با تیمارهای T4 و T3 نداشت (جدول ۶ و ۷). بهترین زمان آبیاری براساس تیمار T3 است. نوری اظهار و احسان زاده (۲۰۰۷) با بررسی تغییرات شاخص‌های رشد پنج هیبرید

اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های برآورد شده کمتر از ۱۰ درصد است (شکل ۸) نشان می‌دهد مدل به‌خوبی توانسته رطوبت خاک را برآورد کند. اختلاف رطوبت خاک برآورد شده با مدل و داده‌های واقعی سال دوم نسبت به اختلاف دمای سطح برگ و هوا در (شکل ۶) نشان داده شده است. محور افقی، اختلاف دمای سطح برگ و هوا را نشان می‌دهد. بیشترین تعداد داده‌ها در فاصله ۰ تا ۳- درجه سانتی‌گراد است. محدودیت‌هایی نیز برای مدل تعیین شد از جمله اینکه اگر زمان برداشت داده‌ها در مزرعه، زمان اوج تشعشع خورشید هنگام ظهر باشد مدل با کمترین خطا دمای سطح برگ و رطوبت خاک را برآورد کرده و زمان آبیاری تعیین می‌شود

روزهای پس از آبیاری با افزایش دمای هوا از صبح تا عصر به همراه افزایش کمبود فشار بخار هوا و افزایش تبخیر و تعرق، جریان آب از ریشه به برگ، همواره برقرار بوده و گیاه خنک نگه‌داشته می‌شود. تا زمانی که گیاه بتواند آب از خاک جذب کند این روند ادامه می‌یابد. ولی هنگامی که گیاه نتواند رطوبت خاک را جذب کند و دچار تنش آبی شود و زمان آبیاری فرارسیده باشد بخصوص در ساعات ظهر با افزایش کمبود فشار بخار هوا و افزایش دمای هوا، اختلاف درجه حرارت سطح برگ و هوا کاهش می‌یابد و دمای برگ افزایش می‌یابد. روز پس از آبیاری، هنگام ظهر، اختلاف دمای سطح برگ و هوا ۱۰ درجه سانتی‌گراد و اختلاف دمای سطح برگ و هوا در روزهای قبل از آبیاری

مقدار رطوبت خاک (SM) در محیط کاشت به دست آمد و مدل رطوبت خاک ($R^2=0.92$) تعیین شد. نتایج حاصل از بررسی مدل نشان داد که اختلاف تغییرات میانگین رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در مزرعه و رطوبت خاک برآورد شده با مدل برای سال دوم در تیمارهای آبیاری کمتر از $\pm 10\%$ درصد در زمان اوج تشعشع خورشید (هنگام ظهر) است و مدل به خوبی توانسته رطوبت خاک را پیش‌بینی کند. از این مدل می‌توان برای مزارع با شرایط آب و هوایی مشابه استفاده کرد. هنگام ظهر در روز پس از آبیاری، اختلاف دمای سطح برگ و هوا 10° درجه سانتی‌گراد و در روزهای قبل از آبیاری سه درجه سانتی‌گراد به دست آمد به عبارتی زمانی که دمای سطح برگ سه درجه بیشتر از دمای هوا در هنگام ظهر شود همچنین هنگامی که مدل رطوبت 30% درصد حجمی معادل 75% درصد کل آب قابل دسترس را نشان دهد بدون کاهش عملکرد، زمان آبیاری فرارسیده است.

ذرت در تیمارهای آبیاری گزارش دادند که تنش آبی اثر معنی‌داری بر شاخص سطح برگ و در نتیجه بر عملکرد ماده خشک دارد. تنش آبی در مراحل مختلف رشد ذرت منجر به کاهش سطح برگ و رشد گیاه و همچنین کاهش ماده خشک گیاه می‌شود و در اوایل رشد رویشی، تولید ماده خشک را به میزان کمی کاهش می‌دهد اما در اواخر رشد و در مرحله رشد زایشی، شاخص رشد را به شدت کاهش می‌دهد (پاندی و همکاران، ۲۰۰۰).

نتیجه‌گیری

طبق نتایج به دست آمده و با در نظر گرفتن متغیرهای رطوبت نسبی (RH)، درجه حرارت هوا (Ta)، درجه حرارت سطح برگ (TL)، اختلاف درجه حرارت سطح برگ و هوا (TL-Ta) و کمبود فشار بخار (VPD)، همبستگی بالایی ($R=0.86$) بین متغیرهای مورد بررسی، با

فهرست منابع

۱. وردی نژاد و. ر. بشارت، س. عبقری، ه. و احمدی، ح. ۱۳۹۰. برآورد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی ذرت علوفه‌ای در مراحل مختلف رشد با استفاده از اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و هوا. نشریه آب‌و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۵ (۶): ۱۳۵۲-۱۳۴۴.
۲. Ballester, C. Jimenez-Bello, M.A. Castel, J.R. and Intrigliolo, D.S. 2013. Usefulness of thermography for plant water stress detection in citrus and persimmon trees. *Agricultural and forest Meteorology*. 168:120-129.
۳. Blonquist Jr, J.M. Norman, J.M. and Bugbee, B. 2009. Automated measurement of canopy stomata conductance based on infrared temperature. *Agricultural and forest Meteorology*. 149:2183-2197.
۴. Cohen, Y. Alchanatis, V. Sela, E. Saranga, Y. Cohen, S. Meron, M. Bosak, A. Tsipris, J. Ostrovsky, V. Orolov, V. Levi, A. and Brikman, R. 2014. Crop water status estimation using thermography: multi-year model development using ground base thermal images. *Precision Agriculture*. <http://dx.doi.org/10.1007/s11119-014-9378-1>.
۵. Gonzalez-Dugo, V. Zarco-Tejada, P. Nicolas, E. Nortes, P.A. Alarcon, J.J. Intrigliolo, D.S. and Fereres, E. 2013. Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species within a commercial orchard. *Precision Agriculture*. 14:660-678. <http://dx.doi.org/10.1007/s11119-013-9322-9>.
۶. Herwitz, S.R. Johnson, L.F. Dunagan, S.E. Higgins, R.G. Sullivan, D.V. Zheng, J. Lobitz, B.M. Leung, J.G. Gall Meyer, B.A. Aoyagi, M. Slye, R.E. Brass, J. A. 2004. Imaging from an unmanned aerial vehicle: agricultural surveillance and decision support. *Computers and Electronics in Agriculture*. 44: 49-61.
۷. Idso, S.B. Jackson, R.D. and Reginato, R.J. 1977. Remote sensing of crop yields. *Science*. 196: 19-25.
۸. Irmak, S. Haman, D.Z. and Bastug, R. 2000. Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn. *Agronomy Journal*. 92: 1221-1227.

9. Jones, H.G. and Demmers, D. 1999. Use of thermograph for quantitative studies of spatial and temporal variation of stomatal conductance over leaf surfaces. *Plant Cell and Environment*. 22: 1043–1055.
10. Kim, Y. Still, Ch. J. Hanson, Ch. V. Kwon, H. Greer, B.T. and Law, B.E. 2016. Canopy skin temperature variations in relation to climate, soil temperature, and carbon flux at a ponderosa pine forest in central Oregon. *Agricultural and Forest Meteorology*. 226–227:161–173
11. Landeras, G. Ortiz-Barredo, A. and López, J.J. 2009. Forecasting weekly evapotranspiration with ARIMA and artificial neural network models. *Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*.135: 323-334.
12. Lu, Z. Radin, J.W. Turcotte, E.L. Percy, R. and Zeiger, E. 1994. High yields in advanced lines of Pima cotton are associated with higher stomata conductance, reduced leaf area and lower leaf temperature. *Physiologia Plantarum*. 92: 266–272.
13. Mangus, D.L. Sharda, A. and Zhang, N. 2016. Development and evaluation of thermal infrared imaging system for high spatial and temporal resolution crop water stress monitoring of corn within a greenhouse. *Computers and Electronics in Agriculture*. 121:149–159.
14. Marquardt, D.W. 1963. An algorithm for least- squares estimation of nonlinear parameters. *J. Sco. Ind Appl. Math*. 11:431-441.
15. Möller, M. Alchanatis, V. Cohen, Y. Meron, M. Tsipris, J. Naor, A. Ostrovsky, V. Sprintsin, M. Cohen, S. 2007. Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *Experimental Botany*. 58:827–838.
16. Monteith, J.L. and Unsworth, M.H. 2013. *Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere*, fourth ed. Elsevier Ltd, Oxford, UK
17. Norouzi, M. Ayoubi, S. Jalalian, A. Khademi, H. and Dehghani, A.A. 2010. Predicting rainfed wheat quality and quantity by artificial neural network using terrain and soil characteristics. *Acta Agriculture Scandinavica, Section B- Soil Plant Science*. 60: 341-352.
18. Nouri azhar, J. and Ehsanzedeh, P. 2007. Study of relationship of some growth indices and yield of five corn hybrids at two irrigation regime in Esfahan region. *Science and Technology*. 41: 261-272
19. Orta, A. H. I. Baser, S. Sehirali, T. and Erdem, Y. 2004. Use of infrared thermometry for developing baseline equation and scheduling irrigation in wheat, *Cereal Research Communications*. 32(3):363-370.
20. Pandey, R.K. Maranville, J.W. and Chetima, M.M. 2000. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment. II. Shoot growth. *Agricultural Water Management*. 46: 15–27.
21. Scherrer, D. Karl-Friedrich Bader, M. and, Korner, Ch. 2011. Drought-sensitivity ranking of deciduous tree species based on thermal imaging of forest canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*. 151: 1632–1640.
22. Sdoodee, S. and Kaewkong, P. 2006. Use of an infrared thermometer for assessment of plant water stress in neck orange (*Citrus reticulata* Blanco), Songklanakarin J. *Science and Technology*. 28(6):1161-1167.
23. Smith, B.A. Hoogenboom, G. and McClendon, R.W. 2009. Artificial neural networks for automated year round temperature prediction. *Computers and Electronics in Agriculture*. 68: 52-61.
24. Taghvaeian, S. Chávez, J. and Hansen, N. 2012. Infrared thermometry to estimate crop water stress index and water use of irrigated maize in northeastern Colorado. *Remote Sensing*. 4: 3619–3637.
25. Taghvaeian, S. Chávez, J. L. 2013. Remote sensing for evaluating crop water stress at field scale using infrared thermography: potential and limitations. *Hydrology Days*. 73–83.
26. Taghvaeian, S. Chávez, J. L. Bausch, W.C. DeJonge, K.C. and Trout, T.J. 2014a. Minimizing instrumentation requirement for estimating crop water stress index and transpiration of maize. *Irrigation Science*. 32: 53–65.
27. Mangus, D.L. Sharda, A. and Zhang, N. 2016. Development and evaluation of thermal infrared imaging system for high spatial and temporal resolution crop water stress

- monitoring of corn within a greenhouse. *Computers and Electronics in Agriculture*. 121: 149–159
28. Zia, S. Romano, G. Spreer, W. Sanchez, C. Cairns, J. Araus, J.L. Muller, J. 2013. Infrared thermal imaging as a rapid tool for identifying water stress tolerant maize genotypes of different phenology. *Agronomy and Crop Science*. 75–84.

A Model for Irrigation Scheduling Using the Difference between Air and Leaf Temperature of Corn

K. Fattahi, H. Babazadeh¹*, P. Najafi and H. Sedghi

PhD student, Department of Water Science and Research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

khadijefattahi@yahoo.com

Professor, Department of Water Science and Research branch, Islamic Azad University, Tehran.

h_babazadeh@srbiau.ac.ir

Professor, Department of Water Engineering, Khorasgan Branch, Islamic Azad University, Isfahan.

payam.najafi@gmail.com

Professor, Department of Water Science and Research branch, Islamic Azad University, Tehran.

sedghi@srbiau.ac.ir

Abstract

To prevent water stress in plants and have sustainable water management in the field, fast and accurate determination of irrigation time is one of the most important issues. Measuring soil moisture and leaf surface temperature are two methods of determining time of irrigation. In this research, by combination of these two methods, a model for planning and management of forage maize irrigation (cultivar SC-701) is presented. The air relative humidity (RH) and temperature (Ta), leaf surface temperature (TL), and soil moisture content (SM) were measured in 2013 and, by using artificial neural network model and multiple stepwise method, a regression model was developed. Experiments were carried out in 2014 with five treatments including 100%, 85%, 75%, 65%, and 35% total available water (TAW), with four replications, Irrigation was carried out when soil moisture content reached the treatments moisture level. Measurements of the previous year were repeated and the model was calibrated. The results of the first year showed a correlation ($R^2=0.87$) between the parameters RH, Ta, TL, Ta-TL as independent variable and SM as the dependent variable. Then, using three input parameters of air temperature, leaf surface temperature, and relative humidity, Determination Coefficient of soil moisture content model was calculated as $R^2=0.92$. In this model, soil moisture has an inverse relation with (Ta) and (TL-Ta) variables, but a direct relation with RH. Soil moisture content was compared using the model for the second year treatments and compared with the measured values. The difference in soil moisture content measured and estimated by the model at the peak solar radiation time (at noon) was less than $\pm 10\%$. The model estimated 75% TAW treatment data well, with very small difference compared to the measured value.

Keywords: Soil moisture, water stress, Relative humidity, Artificial neural network, Multiple linear regression

1 - Corresponding author: Professor, Department of Water Science and Research branch, Islamic Azad University, Tehran.

*- Received :November 2017and Accepted: May 2018