



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۳ | شماره ۱ | فروردین ۱۴۰۱ (ص ۸۴-۷۱)

<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2022.335453.669157>

(مقاله علمی - پژوهشی)

Evaluation of Multivariate Regression Models in Estimation of Evaporation and Transpiration Components of Maize, under Salinity Stress Conditions

REZA SAEIDI^{1*}

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

(Received: Dec. 11, 2021- Revised: Jan. 25, 2022- Accepted: Feb. 2, 2022)

ABSTRACT

Estimation of evaporation and transpiration components of maize using by experimental models, is useful for management the water consumption in irrigation. In this research, the amounts of evaporation and transpiration components of maize were modeled for growth stages and salinity stress conditions. Salinity treatments were applied by water with EC of 0.5(S_0), 2.1(S_1), 3.5(S_2), and 5.7(S_3) $dS.m^{-1}$, in the mini-lysimeter. Modeling of maize evapotranspiration components was performed by regression functions of linear, exponential, logarithmic, polynomial and power. Parameters of evapotranspiration (ET_c), coefficients of evapotranspiration stress (K_s) and crop growth stage sensitivity (K_{pi}) were considered as the independent variables and transpiration (T) and evaporation (E) parameters (in separate models) were considered as the dependent variables. The equations coefficients were estimated by SPSS software and the multivariate regression models were generated. From S_0 to S_3 treatments, the values of evapotranspiration, transpiration and evaporation parameters (in the all of growth period) were measured in the range of 420-307.5, 289-150 and 131-157.5 mm, respectively. Under salinity stress conditions, the maize transpiration was decreased to a more value relative to evapotranspiration. But the evaporation was increased to the same extent. In modeling evaluation, exponential and polynomial models were selected as the optimal models for estimation the transpiration and evaporation rates, respectively. The sensitivity coefficient values (K_p) in four growth stages were equal to 0.556, 0.972, 1.315 and 0.432 (in exponential model) and 1.485, 1.238, 0.447 and 0.816 (in polynomial model). The result of this research was that regression models had an acceptable performance for simulation the evaporation and transpiration components of maize, under salinity stress conditions. Therefore, by estimation the transpiration amount, the crop net water requirement is estimated actually and the water use efficiency increases. Also, by estimation the amount of evaporation losses, the water application efficiency is calculated accurately.

Keywords: Evaporation, Experimental model, Growth stages, Transpiration.

* Corresponding Author's Email: saeidi@org.ikiu.ac.ir

ارزیابی مدل‌های رگرسیونی چند متغیره در تخمین اجزای تبخیر و تعرق ذرت علوفه‌ای، در شرایط تنش شوری

رضا سعیدی^{۱*}

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ع)، قزوین، ایران.
(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۹/۲۰ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۵ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۱/۱۳)

چکیده

تخمین اجزای تبخیر و تعرق گیاه ذرت با استفاده از مدل‌های تجربی، برای مدیریت مصرف آب در آبیاری سودمند است. در این پژوهش، مقدار اجزای تبخیر و تعرق ذرت در مراحل رشد و برای شرایط تنش شوری، مدل‌سازی شد. در سال ۱۳۹۹ و در دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ع)، تیمارهای شوری از طریق آب با هدایت الکتریکی (S₀)، (S₁)، (S₂) و (S₃) دسی‌زیمنس بر متر، در بستر کشت مینی‌لایسمتر اعمال شد. مدل‌سازی اجزای تبخیر-تعرق ذرت، با توابع رگرسیونی شامل فرم‌های خطی، نمایی، لگاریتمی، درجه دوم و توانی انجام شد. پارامترهای تبخیر - تعرق (ET_c)، ضرایب تنش تبخیر-تعرق (K_s) و حساسیت مرحله رشد گیاه (K_{pi}) به عنوان متغیرهای مستقل و پارامترهای تعرق (T) و تبخیر (E) به عنوان متغیر وابسته (در مدل‌های مجزا) در نظر گرفته شد. ضرایب مجهول در معادلات توسط نرم‌افزار SPSS برآورد شد و مدل‌های رگرسیونی چند متغیره تولید شد. از تیمار S₀ تا S₃، مقادیر پارامترهای تبخیر - تعرق، تعرق و تبخیر (در کل دوره رشد) به ترتیب در بازه ۳۰۷/۵-۴۲۰، ۲۸۹-۱۵۰ و ۱۳۱-۱۵۷/۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد در شرایط تنش شوری، تعرق ذرت به میزان بیشتری نسبت به تبخیر - تعرق کاهش یافت. اما به همان اندازه، به مقدار تبخیر از سطح خاک افزوده شد. در ارزیابی مدل‌سازی، مدل‌های نمایی و درجه دوم به ترتیب به عنوان مدل‌های بهینه برای تخمین مقادیر تعرق و تبخیر انتخاب شدند. مقدار ضریب حساسیت در چهار مرحله رشد (K_p) به ترتیب برابر با ۰/۵۵۶، ۰/۹۷۲، ۱/۳۱۵ و ۰/۴۳۲ (در مدل نمایی) و ۱/۴۸۵، ۱/۲۳۸، ۰/۴۴۷ و ۰/۸۱۶ (در مدل درجه دوم) بود. دستاورد پژوهش این بود که مدل‌های رگرسیونی عملکرد قابل قبولی برای شبیه‌سازی اجزای تبخیر و تعرق ذرت در شرایط تنش شوری داشتند. از این رو با تخمین مقدار تعرق، نیاز خالص آبی گیاه به طور واقعی برآورد شده و راندمان مصرف آب افزایش می‌یابد. همچنین با تخمین مقدار تلفات تبخیر، راندمان کاربرد آب در آبیاری دقیق‌تر محاسبه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تبخیر، تعرق، مدل تجربی، مراحل رشد.

مقدمه

تبخیر - تعرق گیاه نسبت داده می‌شود. گیاه ذرت از جمله گیاهان زراعی است که به صورت آبی تحت کشت می‌رود و به لحاظ نقش استراتژیک آن در تولید غذای انسان و دام، در پژوهش‌های مرتبط با برنامه‌ریزی آبیاری می‌تواند مورد مطالعه قرار بگیرد (Saeidi, 2021 a). در بین تنش‌های محیطی، وجود تنش شوری در محیط رشد گیاه از جمله عوامل مؤثر بر کاهش جذب آب و تبخیر تعرق گیاه نسبت به شرایط استاندارد (بدون تنش) هر منطقه به‌شمار می‌رود. در این باره گزارش شد که تنش شوری در آب خاک، جذب نیتروژن، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و آهن توسط گیاه ذرت را کاهش داده و باعث افزایش مقاومت روزنه‌ها و کاهش تعرق گیاه می‌شود (Farooq et al., 2015). در منطقه قزوین، افزایش شوری آب آبیاری (EC^۴) از ۰/۵ به ۵/۷ دسی‌زیمنس بر متر و کاهش

تعیین دقیق نیاز آبی گیاهان، مستلزم شناخت کافی از مقادیر تبخیر - تعرق^۱ (ET) گیاه و اجزای آن در شرایط محیط تحت کشت می‌باشد. اجزای تشکیل دهنده پارامتر تبخیر - تعرق گیاه شامل دو جزء تبخیر از سطح خاک^۲ (E) و تعرق گیاه^۳ (T) است که تعرق به عنوان جزء مطلوب و تبخیر به عنوان جزء نامطلوب محسوب می‌شود (Allen et al., 1998). به طور معمول، اجزای تبخیر - تعرق گیاه در محیط مزرعه قابل تفکیک نبوده و مجموع دو جزء تعرق گیاه و تبخیر از سطح خاک به عنوان نیاز خالص آبی گیاه در نظر گرفته می‌شود. به این صورت که کاهش مقدار رطوبت خاک در ناحیه ریشه گیاه (با صرف نظر از اثرات حاشیه‌ای) به

* نویسنده مسئول: saeidi@org.ikiu.ac.ir

1- Evapotranspiration
2- Evaporation
3- Transpiration
4- Electrical Conductivity, EC

نمونه، در تحقیقی تحت تیمارهای شوری آب آبیاری شامل ۰/۵، ۲/۵، ۵ و ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر، تبخیر - تعرق گیاه ذرت (در واحد لیتر بر گیاه) محاسبه شد و رابطه خطی $ET = -0.717 EC + 15.07$ بین مقدار تبخیر - تعرق و سطح شوری آب ارائه شد (Lacerda et al., 2016). در تحقیق مشابه دیگر، عملکرد گندم تحت سه سطح آبیاری ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ میلی‌متر و چهار سطح شوری ۰/۸، ۲، ۴ و ۶ دسی‌زیمنس بر متر بررسی شد. مدل‌سازی عملکرد گندم با توابع خطی، لگاریتمی، درجه دوم و نمایی انجام شد و نتایج نشان داد که تابع درجه دوم بهترین مدل تولید برای عملکرد محصول بوده است (Mohammadi et al., 2013). در منطقه قزوین، تیمارهای شوری آب آبیاری (EC_w) شامل مقادیر ۰/۵، ۲/۱، ۳/۵ و ۵/۷ دسی‌زیمنس بر متر و حاصلخیزی خاک (F) شامل مصرف ۷۵، ۱۰۰، ۱۷۵ و ۲۵ درصد کود نیتروژن (بر اساس نیاز کودی گیاه)، بر روی گیاه ذرت مطالعه شد. نتایج نشان داد مدل رگرسیونی درجه دوم با معادله $ET = 326.7 + 16.3F^2 - 3.53EC_w^2 + 5.37F \cdot EC_w$ و ضریب تبیین ۰/۹۷۸، بهترین مدل برای تخمین مقدار تبخیر - تعرق ذرت (بر واحد میلی‌متر) در شرایط وجود تنش‌های شوری و حاصلخیزی بود (Saeidi et al., 2018). از سوی دیگر، در پژوهشی بر روی ذرت در کشور چین، اجزای تبخیر از سطح خاک و تعرق گیاه، با استفاده از روش میکروولایسیمیتری در سیستم آبیاری جویچه‌ای برآورد شد. نتایج نشان داد در کل دوره رشد، ۳۰ تا ۴۰ درصد از مقدار کل تبخیر - تعرق گیاه ذرت به جزء تبخیر از سطح خاک و مابقی به جزء تعرق گیاه اختصاص یافت (Ferreira et al., 2012). در پژوهشی دیگر در فلات چین گزارش شد که با جداسازی اجزای تبخیر - تعرق ذرت به دو جزء تبخیر از خاک و تعرق گیاه، این امکان وجود دارد که تحلیل بهتری از بهره‌وری آب داشته و با این کار، مدیریت مصرف آب را می‌توان بهینه‌سازی نمود (Zhou et al., 2017). به‌طورکلی در پژوهش‌های گذشته، تأثیر زیان‌بار تنش شوری بر مقدار تجمعی تبخیر - تعرق ذرت در کل دوره رشد تأیید شده است. اما گزارش‌های چندانی در خصوص واکنش اجزای تبخیر و تعرق ذرت در شرایط تنش شوری و امکان تخمین آن‌ها با مدل‌های رگرسیونی وجود ندارد. از این‌رو هدف از پژوهش حاضر، مدل‌سازی مقدار اجزای تبخیر و تعرق ذرت در شرایط تنش شوری و برای مراحل مختلف رشد می‌باشد. در صورت حصول نتایج منطقی و کاربردی در پژوهش حاضر، می‌توان با استفاده از مدل‌های ساده تجربی، مقادیر جداگانه اجزای تبخیر و تعرق ذرت را برای شرایط استاندارد و غیر استاندارد (تنش شوری) در منطقه مورد مطالعه (قزوین) برآورد نمود. امکان تخمین جزء تعرق گیاه در شرایط تنش‌زای محیطی، دستاورد مطلوبی برای تعیین نیاز

مصرف کود نیتروژن از ۱۰۰ به ۲۵ درصد، باعث کاهش تبخیر - تعرق ذرت به میزان ۳۷ درصد شد (Saeidi et al., 2020). در پژوهشی در آمریکا اعلام شد که با افزایش شوری آب آبیاری از ۰/۵ به ۲/۵، ۵ و ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب ۷، ۱۵ و ۳۰ درصد از مقدار تبخیر - تعرق ذرت کاسته شد (Lacerda et al., 2016). در پژوهشی در اهواز گزارش شد که افزایش شوری آب آبیاری از ۲ به ۷ دسی‌زیمنس بر متر، باعث کاهش تبخیر - تعرق ذرت از ۵۱۵/۲ به ۳۸۷/۵ میلی‌متر شد (Heidarinia et al., 2016). در تحقیق دیگر بر روی ذرت گزارش شد که افزایش شوری آب آبیاری از ۰/۵ به ۵/۷ دسی‌زیمنس بر متر، باعث کاهش پتانسیل آب خاک و کاهش جذب آب توسط گیاه شد. در نتیجه مقدار مقاومت روزنه‌ای برگ‌های گیاه افزایش یافت و مقدار تبخیر - تعرق ذرت، از ۳۵۳ به ۲۷۴ میلی‌متر کاهش یافت (Saeidi et al., 2021). علاوه بر آن، لازم به ذکر است که تنش‌های محیطی دارای یک اثر ثابت در طول دوره رشد گیاه نیستند. بلکه حساسیت متفاوت مرحله رشد گیاه به تنش، باعث اثرگذاری متفاوت تنش بر مقدار تبخیر - تعرق گیاه می‌شود. در این‌باره گزارش شد که دوره رشد گیاه ذرت، شامل مراحل استقرار گیاهچه، رشد سریع، گرده افشانی و پُر شدن دانه است که از لحاظ فرایندهای فیزیولوژیکی و حساسیت گیاه، متفاوت از یکدیگر هستند (Nielsen, 2002). در تحقیق دیگر اعلام شد که در مرحله گل‌دهی ذرت به دلیل توقف رشد رویشی و ورود گیاه به مرحله زایشی، حساسیت گیاه ذرت به تنش آبی بیشتر از سایر مراحل رشد بود (Moohamadi Behmadi & Armin, 2017). همچنین اعمال یک حد ثابت از تنش آبی در مراحل رشد ۴ برگی، ۱۲ برگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه‌های گیاه ذرت، تأثیر متفاوتی بر مقدار تبخیر - تعرق گیاه داشت. نتایج پژوهش نشان داد که کم‌ترین مقدار تبخیر - تعرق ذرت مربوط به مرحله گل‌دهی بود و علت آن حساسیت بیشتر گیاه به تنش آبی در این مرحله رشد بود (Saeidi and Sotoodehnia, 2021). نتایج پژوهش دیگر نشان داد به‌علت افزایش حساسیت در مرحله گل‌دهی ذرت، اعمال تنش آبی در قبل از این مرحله، باعث کاهش ۳۰ درصدی مقدار تبخیر - تعرق شد (Akbari Nodehi, 2018). برای حصول نتایج دقیق‌تر در پژوهش‌های مربوط به تبخیر - تعرق گیاه، بهتر است که اثر تنش‌های محیطی بر گیاه، به‌صورت جداگانه در مراحل مختلف رشد بررسی شود. تاکنون در پژوهش‌های متعددی، ارتباط رگرسیونی بین تنش شوری و مقدار تبخیر - تعرق یا عملکرد گیاه در کل دوره رشد بررسی شده است. به‌طوری که بر اساس میزان تنش شوری اعمال شده بر گیاه، مقدار تبخیر - تعرق یا عملکرد گیاه (برای شرایط آن منطقه) قابل تخمین بوده است. به‌عنوان

آبی واقعی گیاه، افزایش راندمان مصرف آب توسط گیاه و جلوگیری از تلفات آبیاری به حساب می‌آید.

مواد و روش‌ها

کلیات پژوهش

در سال ۱۳۹۹ پژوهشی بر روی گیاه ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴، در گروه مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) انجام شد. محل پژوهش در موقعیت جغرافیایی با عرض شمالی $33^{\circ} 19' 36''$ و طول شرقی $50^{\circ} 00' 38''$ (واقع در شهر قزوین) قرار داشت. برای بستر کشت، از مینی‌لایسیمت‌های استوانه‌ای شکل با قطر ۴۰ و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر استفاده شد تا کار جداسازی اجزای تبخیر و تعرق ذرت امکان‌پذیر شود. در پژوهش‌های گذشته نیز از مینی‌لایسی‌مترهایی با ابعاد مذکور برای کشت ذرت استفاده شده است (Dehghanisanij et al., 2018). مشخصات خاک بستر کشت در جدول (۱) ارائه شد. برای کنترل مقدار آب داده شده به خاک (در فرآیند آبیاری) و هدایت زه‌آب احتمالی به بیرون، در کف هر مینی‌لایسی‌مترها از لوله‌های سوراخ دار (به‌عنوان زهکش) استفاده شد. با اندازه‌گیری چگالی ظاهری خاک آماده کشت در شرایط طبیعی مزرعه، مقدار چگالی $1/36$ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای خاک داخل مینی‌لایسی‌متر مناسب دیده شد. از این رو باتوجه به حجم هر مینی‌لایسی‌متر، وزن مشخصی از خاک برای رسیدن به تراکم مذکور، در آن‌ها ریخته شد و از طریق غرقاب نمودن آن‌ها، از هرگونه نشست احتمالی خاک در دوره رشد گیاه جلوگیری شد. بذرها در تاریخ اول خرداد ماه کاشته شد و برداشت علوفه‌ای محصول ذرت در تاریخ ۱۶ مهرماه انجام شد. در داخل هر مینی‌لایسی‌متر تعداد سه بذر به صورت دستی و با فواصل یکسان از هم کاشته شد (Saeidi, 2021) (Dehghanisanij et al., 2018). در دوره رشد گیاه آمار بارندگی ثبت شده‌ای وجود نداشت و نیاز آبی گیاه صرفاً از طریق انجام آبیاری تأمین شد. آبیاری مینی‌لایسی‌مترها به‌صورت سطحی و با استفاده از آب چاه با هدایت الکتریکی $0/5$ دسی‌زیمنس بر متر و اسیدیته $7/1$ انجام شد. تیمارها نیز شامل چهار سطح شوری آب آبیاری با هدایت الکتریکی (S_0) $0/5$ ، (S_1) $2/1$ ، (S_2) $3/5$ و

۵/۷ (S_3) دسی‌زیمنس بر متر در نظر گرفته شد. علت انتخاب مقادیر مذکور برای تیمارهای شوری، پتانسیل 100 ، 90 ، 75 و 50 درصدی عملکرد محصول ذرت در سطوح شوری S_0 ، S_1 ، S_2 و S_3 (برای آب آبیاری) بود (Ayers and Westcot, 1985). در نشریه فائو-۲۹ آستانه تحمل گیاه ذرت علوفه‌ای به مقدار شوری آب آبیاری، عدد $1/2$ دسی‌زیمنس بر متر گزارش شده است. از این رو ضریب حساسیت ذرت در شرایط کاربرد آب شور مقدار 11 درصد کاهش عملکرد محصول به‌ازای افزایش هر یک دسی‌زیمنس بر متر شوری آب آبیاری بوده است (Ayers and Westcot, 1985). برای تهیه تیمارهای آب شور، از زه‌آب شور تجمع یافته در زهکش حائل شوره‌زار مرکزی دشت قزوین واقع در منطقه آبیگ استفاده شد (جدول ۲). به این صورت که آب مورد نیاز برای آبیاری تیمارهای S_1 ، S_2 و S_3 از طریق اختلاط زه‌آب شور و آب باکیفیت چاه تهیه شد. لازم به ذکر است که برای جلوگیری از اثر زیان‌بار شوری آب بر جوانه‌زنی بذور و رشد اولیه گیاهان، تنش شوری پس از پنج برگی شدن گیاهان اعمال شد. از سوی دیگر در نشریه فائو-۵۶، در یک دوره رشد 140 روزه برای ذرت، چهار مرحله رشد اولیه، توسعه، میانی و پایانی به ترتیب برابر با 25 ، 40 ، 45 و 30 روز در نظر گرفته شده است (Allen et al., 1998). از این رو در پژوهش حاضر که فاصله زمانی بین کاشت تا برداشت محصول 140 روز بود، بازه زمانی مراحل رشد ذرت بر گزارش نشریه فائو-۵۶ منطبق شد. به‌طور کلی، آزمایش به‌صورت طرح پایه کاملاً تصادفی اجرا شد و داده‌های اصلی در این پژوهش شامل مقادیر تبخیر - تعرق، تعرق گیاه و تبخیر از سطح خاک بود که به‌صورت روزانه اندازه‌گیری شد.

جدول ۱- مشخصات خاک مینی‌لایسی‌متر

پارامتر	واحد	مقدار
هدایت الکتریکی عصاره اشباع	$dS.m^{-1}$	$0/46$
اسیدیته (pH)	-	$7/2$
بافت خاک	-	لوم شنی
رطوبت وزنی حد ظرفیت مزرعه	%	24
رطوبت وزنی حد پژمردگی	%	$10/3$
چگالی ظاهری	$g.cm^{-3}$	$1/36$

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی زه‌آب شور داخل زهکش

پارامتر	هدایت الکتریکی	سدیم	منیزیم	کلسیم	پتاسیم	سولفات	بی‌کربنات	کربنات	کلر
واحد	$dS.m^{-1}$	$meq.L^{-1}$	$meq.L^{-1}$	$meq.L^{-1}$	$meq.L^{-1}$	$meq.L^{-1}$	$meq.L^{-1}$	$meq.L^{-1}$	$meq.L^{-1}$
مقدار	204	$1141/8$	$321/84$	$484/3$	$11/9$	$636/6$	451	$51/62$	$781/64$

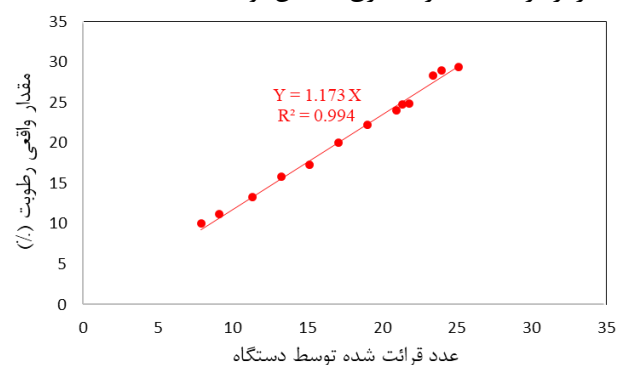
با هدف جداسازی مقادیر اجزاء تبخیر و تعرق ذرت، همه تیمارها در دو سری مینی لایسیمتر و دارای شرایط کاملاً یکسان اجرا شد. در سری اول، سطح خاک مینی لایسیمتر بدون پوشش و در حالت طبیعی قرار داشت. از این رو تغییرات روزانه رطوبت خاک در بین دو آبیاری، نشان دهنده مجموع مقادیر تبخیر و تعرق گیاهان بود. اما در سری دوم و پس از جوانه زنی بذور، برای حذف اثر تبخیر و برآورد جزء تعرق گیاه، از مالچ پلاستیکی با رنگ روشن و به صورت ورقه های نازک بر روی سطح خاک استفاده شد. از سوی دیگر برای جلوگیری از جذب گرمای تابشی خورشید توسط مالچ و انتقال آن به خاک، مالچ پلاستیکی با فاصله ۵ سانتی متری از سطح خاک قرار داده شد؛ لذا تهویه مناسب در سطح خاک امکان پذیر شد و از تشکیل قطره های آب در زیر مالچ و تأثیر آن بر مقدار رطوبت خاک جلوگیری شد (Saeidi, 2021 a)؛ بنابراین تغییرات روزانه رطوبت خاک در سری دوم مینی لایسیمترها فقط مربوط به تعرق گیاه بود و اختلاف آن با داده های سری اول، نشان دهنده مقدار تبخیر روزانه از سطح خاک بود. به طور کلی تعداد ۲۴ مینی لایسیمتر (برای اجرای چهار تیمار در سه تکرار و دو سری مینی لایسیمتر) در نظر گرفته شد.

تعیین زمان و حجم آب آبیاری

به منظور این که هیچ گونه تنش آبی بر گیاهان اعمال نشود، زمان انجام آبیاری به گونه ای انتخاب شد که حتی در مراحل حساس رشد، آب به صورت سهل الوصول در اختیار گیاه باشد. در این باره در پژوهشی در منطقه قزوین، حد آب سهل الوصول خاک (RAW^۲) در مراحل مختلف رشد گیاه ذرت بین ۴۰ تا ۸۰ درصد در نظر گرفته شد (Saeidi, 2021 b). از این رو در زمانی که ۴۰ درصد از رطوبت خاک بین دو حد ظرفیت مزرعه (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP^۳) توسط گیاه مصرف شد، عملیات آبیاری انجام شد. درصد رطوبت وزنی خاک در حد FC و PWP با استفاده از دستگاه صفحات فشاری (به ترتیب تحت فشارهای مکشی یک سوم و ۱۵ اتمسفر) و خشک کردن خاک در گرم خانه، محاسبه و در جدول (۱) ارائه شد. هدف از انجام آبیاری، جبران کمبود رطوبت خاک تا حد ظرفیت مزرعه بود. از این رو باتوجه به مقدار کمبود رطوبت خاک (θ_{FC} - θ_i)، چگالی، عمق و مساحت سطح خاک در مینی لایسیمتر، حجم آب آبیاری بر اساس رابطه (۲) تعیین شد. در این شرایط آب اضافی برای تبدیل به زه آب و خروج از انتهای مینی لایسیمترها وجود نداشت و راندمان آبیاری ۱۰۰ درصد بود. باتوجه به تفاوت مقدار شوری آب آبیاری در تیمارها و کاهش جذب آب توسط گیاه در شرایط تنش شوری، میزان جذب

نحوه اندازه گیری تبخیر - تعرق و اجزاء آن

در فاصله بین دو آبیاری، مقدار رطوبت روزانه خاک توسط دستگاه رطوبت سنج مدل HH2 ساخت شرکت دلتاتی (ΔT)، در مرکز هر مینی لایسیمتر اندازه گیری شد. قبل از شروع آزمایش، اعداد ثبت شده توسط دستگاه مذکور نسبت به مقادیر واقعی رطوبت خاک واسنجی شد. به این صورت که در یک نمودار، داده های واقعی رطوبت خاک در محور عمودی و داده های ثبت شده توسط دستگاه در محور افقی قرار داده شد و منحنی ایشل (با معادله مشخص) برای تبدیل داده های دستگاه به داده های واقعی رطوبت تهیه شد (شکل ۱). در این شرایط از طریق پایش روزانه رطوبت خاک و محاسبه بیلان آب در فاصله بین دو آبیاری، امکان برآورد مقدار روزانه تبخیر - تعرق گیاه توسط رابطه (۱) فراهم شد. لازم به ذکر است که مقدار رطوبت خاک در عمق هر مینی لایسیمتر، به صورت جداگانه در چهار لایه ۰-۱۵، ۱۵-۳۰، ۳۰-۴۵ و ۴۵-۶۰ سانتی متر اندازه گیری شد. از این رو در طی دوره حیات گیاه، مجموع کاهش رطوبت خاک در چهار لایه خاک به عنوان تبخیر - تعرق گیاه در نظر گرفته شد. در خاک مینی لایسیمترها هیچ گونه درز و ترک و وجود نداشت و به دلیل انجام آبیاری تا حد ظرفیت مزرعه (FC^۱)، زه آب خروجی از مینی لایسیمترها نیز وجود نداشت؛ بنابراین اطمینان حاصل شد که روند کاهش مقدار رطوبت خاک (در منطقه ریشه) در روزهای پس از آبیاری، صرفاً متأثر از فرایند تبخیر - تعرق گیاهان بوده است.



شکل ۱- منحنی واسنجی مقادیر واقعی رطوبت خاک، بر اساس اعداد قرائت شده توسط دستگاه

$$(ET_c)_i = \frac{(\theta_{i-1} - \theta_i)}{100} \times \rho_b \times D \quad (\text{رابطه ۱})$$

(ET_c)_i: تبخیر- تعرق روزانه گیاه (سانتی متر)، θ: مقدار رطوبت وزنی خاک (درصد)، i: شمارنده روزهای بین دو آبیاری، (θ_{i-1} - θ_i): اختلاف رطوبت روزانه خاک (درصد)، ρ_b: چگالی ظاهری خاک (گرم بر سانتی متر مکعب)، D: عمق مینی لایسیمتر (سانتی متر).

اکسل به‌عنوان توابع تولید پارامترهای تعرق و تبخیر استفاده شد. توابع مذکور شامل فرم‌های خطی، نمایی، لگاریتمی، درجه دوم و توانی است که بین متغیرهای مستقل و وابسته برازش داده شد. برای این کار نرم‌افزار SPSS به کار گرفته شد و مقادیر واقعی تبخیر - تعرق، تعرق و تبخیر در نرم‌افزار مذکور وارد شد. به‌منظور در نظر گرفتن اثر سطوح مختلف تنش شوری در فرایند مدل‌سازی، از رابطه (۴) برای محاسبه ضریب K_s استفاده شد. ضریب K_s از تقسیم مقدار تبخیر - تعرق گیاه در شرایط تنش شوری (ET_{c-adj}) بر تبخیر - تعرق گیاه در شرایط استاندارد منطقه (ET_c) محاسبه شد (Allen et al., 1998). به‌طوری که مقدار ضریب K_s در سراسر دوره رشد برای سطوح شوری S_1, S_2, S_3 به ترتیب برابر با ۰/۹۶، ۰/۸۶ و ۰/۷۲ برآورد شد. سپس برای شبیه‌سازی مقدار تعرق، روابط (۵) الی (۹) و برای شبیه‌سازی مقدار تبخیر، روابط (۱۰) الی (۱۴) که به ترتیب نشان‌دهنده توابع خطی، نمایی، لگاریتمی، درجه دوم و توانی بود، استفاده شد (جدول ۳). در نرم‌افزار SPSS، ضرایب مجهول A_0, A_1, A_2 و K_{pi} برای توابع مذکور برآورد شد. به این صورت که مقادیر ضرایب A_0, A_1, A_2 در کل دوره رشد به طور ثابت و مقدار K_p برای هر کدام از مراحل رشد (چهار مرحله رشد) به طور جداگانه برآورد شد. در نتیجه اثر حساسیت مرحله رشد گیاه در قالب ضریب K_p در نظر گرفته شد. به این ترتیب با استفاده از مدل‌های تجربی تولید شده و داشتن مقادیر واقعی تبخیر - تعرق (در شرایط استاندارد) و ضریب K_s (برای شرایط تنش شوری)، امکان تخمین مقادیر تعرق گیاه و تبخیر از سطح خاک فراهم شد.

آب در همه مینی‌لایسیمترها یکسان نبود. از این رو کل عمق آب آبیاری منطبق بر مجموع جذب آب و نیاز آبی گیاهان در کل دوره رشد بود و در تیمارهای S_0, S_1, S_2, S_3 به ترتیب برابر با ۴۲۰، ۴۰۴، ۳۶۳ و ۳۰۷/۵ میلی‌متر برآورد شد.

$$V = \frac{(\theta_{FC} - \theta_i)}{100} \times \rho_b \times D \times A \quad (\text{رابطه ۲})$$

V : حجم آب آبیاری (مترمکعب)، θ_{FC} : رطوبت وزنی خاک در نقطه ظرفیت مزرعه (درصد)، θ_i : رطوبت وزنی خاک در زمان اتمام آب سهل‌الوصول خاک و قبل از انجام آبیاری (درصد)، ρ_b : چگالی ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، D : عمق مینی‌لایسیمتر (سانتی‌متر) و A : مساحت سطح خاک (متر مربع).

معادلات کاربردی

در این پژوهش و مطابق رابطه (۳) برای مدل‌سازی اجزاء تبخیر - تعرق ذرت، پارامترهای تعرق (T) و تبخیر (E) به‌عنوان متغیر وابسته و پارامترهای تبخیر - تعرق در شرایط استاندارد منطقه یا تیمار شاهد (ET_c)، ضریب تنش تبخیر - تعرق در شرایط تنش شوری (K_s) و ضریب حساسیت مرحله رشد گیاه (K_{pi}) به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شد. به بیان دیگر پارامترهای تبخیر و تعرق گیاه به‌صورت مجزا، وابسته به مقدار تبخیر - تعرق، ضرایب تنش و حساسیت مرحله رشد گیاه بوده است. پارامتر A_0 نیز نشان‌دهنده اثر سایر عوامل مؤثر بر مقادیر مدل‌سازی شده تعرق و تبخیر است، که به‌عنوان بردار ثابت در نظر گرفته شد. برای انجام مدل‌سازی، از توابع رگرسیونی ارائه شده در نرم‌افزار

جدول ۳- معادلات مدل‌های رگرسیونی چند متغیره

شماره رابطه	نام رابطه	معادله مربوطه
۳	تخمین تعرق و تبخیر	$E \text{ و } T = f(ET_c, K_s, K_{pi}, A_0)$
۴	ضریب تنش تبخیر - تعرق	$K_s = \left(\frac{ET_{c-adj}}{ET_c} \right)$, (Allen et al., 1998)
۵	مدل خطی تخمین تعرق	$T = K_{pi} \cdot (A_0 + A_1 \cdot (K_s, ET_c))$
۶	مدل نمایی تخمین تعرق	$T = K_{pi} \cdot A_0 \cdot e^{A_1 \cdot (K_s, ET_c)}$
۷	مدل لگاریتمی تخمین تعرق	$T = K_{pi} \cdot (A_0 + A_1 \cdot \ln(K_s, ET_c))$
۸	مدل درجه دوم تخمین تعرق	$T = K_{pi} \cdot (A_0 + A_1 \cdot (K_s, ET_c) + A_2 \cdot (K_s, ET_c)^2)$
۹	مدل توانی تخمین تعرق	$T = K_{pi} \cdot A_0 \cdot (K_s, ET_c)^{A_1}$
۱۰	مدل خطی تخمین تبخیر	$E = K_{pi} \cdot (A_0 + A_1 \cdot (K_s, ET_c))$
۱۱	مدل نمایی تخمین تبخیر	$E = K_{pi} \cdot A_0 \cdot e^{A_1 \cdot (K_s, ET_c)}$
۱۲	مدل لگاریتمی تخمین تبخیر	$E = K_{pi} \cdot (A_0 + A_1 \cdot \ln(K_s, ET_c))$
۱۳	مدل درجه دوم تخمین تبخیر	$E = K_{pi} \cdot (A_0 + A_1 \cdot (K_s, ET_c) + A_2 \cdot (K_s, ET_c)^2)$
۱۴	مدل توانی تخمین تبخیر	$E = K_{pi} \cdot A_0 \cdot (K_s, ET_c)^{A_1}$

تعرق و تبخیر در طول دوره رشد گیاه ذرت شد. سپس داده‌های مشاهده‌ای (واقعی) در مقیاس مینی‌لایسیمتر و پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها، با یکدیگر مقایسه شد و اعتبار مدل‌های مختلف

ارزیابی مدل‌ها

در این مرحله با استفاده از مدل‌های تجربی تولید شده در پژوهش و مقادیر واقعی متغیرهای مستقل، اقدام به شبیه‌سازی مقادیر

البته، روند تغییرات آن در همه مراحل رشد به صورت یکنواخت نبود. به طوری که بیشترین تا کمترین مقدار تبخیر - تعرق و ترق گیاه به ترتیب متعلق به مراحل توسعه، میانی، اولیه و پایانی رشد بود و بیشترین تا کمترین مقدار جزء تبخیر مربوط به مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد بود. به منظور تحلیل بهتر، مقادیر تجمعی (۱۰ روزه) پارامترهای تبخیر - تعرق، تبخیر و تعرق ذرت در تیمارهای تنش شوری (S_1 ، S_2 و S_3)، نسبت به تیمار S_0 مقایسه شد (شکل ۲). در این مقایسه، حساسیت مرحله رشد گیاه نسبت به تنش شوری در نظر گرفته نشد و صرفاً روند تغییرات پارامترهای موردنظر در کل دوره رشد، از کم به زیاد بررسی شد. شکل (۲) نشان داد که مقدار تبخیر - تعرق در تیمارهای S_1 ، S_2 و S_3 نسبت به تیمار S_0 به ترتیب با ضرایب ۰/۹۶، ۰/۸۶ و ۰/۷۲ کاهش یافت. در این شرایط ضرایب کاهش مقدار تبخیر به ترتیب برابر با ۰/۹۳، ۰/۷۶ و ۰/۵۲ بود و مقدار تبخیر به ترتیب با ضرایب ۱/۰۱، ۱/۰۵ و ۱/۰۹ افزایش پیدا کرد. به بیان دیگر بدون در نظر گرفتن حساسیت مرحله رشد گیاه و به ازاء هر یک دسی زمینس بر متر افزایش شوری آب، مقدار تبخیر - تعرق و ترق گیاه به ترتیب ۵/۶ و ۹/۵ درصد کاهش و مقدار تبخیر از سطح خاک ۲ درصد افزایش داشته است. در پژوهشی مشابه در اقلیم نیمه خشک منطقه باجگاه (شیراز)، سه تیمار شوری آب برابر با S_1 (۰/۶)، S_2 (۲) و S_3 (۴) دسی زمینس بر متر بر روی ذرت اعمال شد. نتایج نشان داد در تیمارهای S_1 ، S_2 و S_3 مقدار تبخیر - تعرق به ترتیب ۷۶۱، ۷۶۰ و ۷۵۴ میلی متر، مقدار تبخیر به ترتیب ۵۴۷ و ۵۱۰ میلی متر و مقدار تبخیر از سطح خاک به ترتیب ۱۸۳، ۲۱۳ و ۲۴۴ میلی متر اندازه گیری شد (Azizian & Sepaskhah, 2014). نتایج پژوهش مذکور با پژوهش حاضر مطابقت داشت و نشان داد که در شرایط تنش شوری، مقدار تبخیر - تعرق و ترق ذرت، کاهش و مقدار تبخیر افزایش می یابد. در پژوهش دیگر که در قالب کشت مزرعه ای ذرت در منطقه قزوین انجام شد، گزارش شد که افزایش شوری آب آبیاری از ۰/۵ به ۵/۷ دسی زمینس بر متر، باعث کاهش تبخیر - تعرق گیاه به میزان ۲۲ درصد شد (Saeidi et al., 2018). در پژوهشی دیگر در آمریکا گزارش شد که با کاهش کیفیت آب آبیاری از طریق افزایش شوری از ۰/۵ به ۷/۵ دسی زمینس بر متر، مقدار ضریب تنش تبخیر - تعرق ذرت از عدد یک به ۰/۷ کاهش یافت (Lacerda et al., 2016). نتایج دو پژوهش اخیر نیز، از نظر تأثیر تنش شوری بر کاهش مقدار تبخیر - تعرق ذرت با پژوهش حاضر

ارزیابی شد. برای این کار از آماره های ارزیابی شامل حداکثر خطا ME^1 ، ریشه میانگین مربع خطا $(RMSE)^2$ ، ضریب تبیین $(R^2)^3$ ، کارایی مدل سازی $(EF)^4$ ، ضریب باقیمانده $(CRM)^5$ و ریشه میانگین مربع خطای نرمال شده $(NRMSE)^6$ استفاده شد. معادلات مربوط به آماره های مذکور در روابط (۱۵) الی (۲۰) ارائه شد. وجود حداقل مقدار (نزدیک به صفر) برای آماره های $RMSE$ ، $NRMSE$ ، ME و CRM و نزدیک به یک بودن آماره های R^2 و EF در یک مدل، نشان دهنده بهینه بودن آن مدل برای تخمین مقادیر تعرق و تبخیر بوده است. در روابط (۱۵) الی (۲۰)، حروف n ، O^y و P^x به ترتیب بیان گر تعداد تیمارها، داده های مشاهده ای در مقیاس مینی لایسیمتر و پیش بینی شده توسط مدل ها بود.

$$ME = \max |P_i - O_i|_{i=1}^n \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}))^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (\text{رابطه ۱۹})$$

$$NRMSE = \frac{\left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}}}{\bar{O}} \quad (\text{رابطه ۲۰})$$

نتایج و بحث

مقادیر تجمعی تبخیر - تعرق، تعرق و تبخیر برای فاصله زمانی هر ۱۰ روز، مورد بررسی قرار گرفت. در تیمارهای S_0 ، S_1 ، S_2 و S_3 مقدار تبخیر - تعرق به ترتیب در بازه ۲/۷-۵۷، ۲/۶-۵۴/۶، ۲/۵-۴۸ و ۲/۴-۴۱ میلی متر بر ۱۰ روز، مقدار تبخیر به ترتیب در بازه ۱/۷-۵۱، ۱/۵-۴۸، ۱/۳-۳۹ و ۱-۲۹ میلی متر بر ۱۰ روز و مقدار تبخیر به ترتیب در بازه ۱-۲۵/۸، ۱/۱-۲۶، ۱/۲-۲۶/۱ و ۱/۴-۲۶/۳ میلی متر بر ۱۰ روز قرار داشت. تجزیه واریانس صفات در جدول (۴) نشان داد که در مراحل رشد ذرت، اثر تنش شوری بر مقادیر تبخیر - تعرق، تعرق و تبخیر، در سطح احتمال یک درصد معنی دار بوده است. تنش شوری باعث کاهش مقادیر تبخیر - تعرق و ترق گیاه و افزایش مقدار تبخیر از سطح خاک نسبت به شرایط استاندارد منطقه (تیمار S_0) شد. به این صورت که در شرایط تنش شوری، مقدار تبخیر نسبت به تبخیر - تعرق با شیب بیشتری کاهش یافت و در عوض، سهم آن به پارامتر تبخیر افزوده شد. این اتفاق با بررسی اجزاء تبخیر - تعرق گیاه آشکار شد و

5 - Coefficient of residual mass, CRM

6- Normalized root mean square error

7 - Observed

8 - Predicted

1- Maximum error, ME

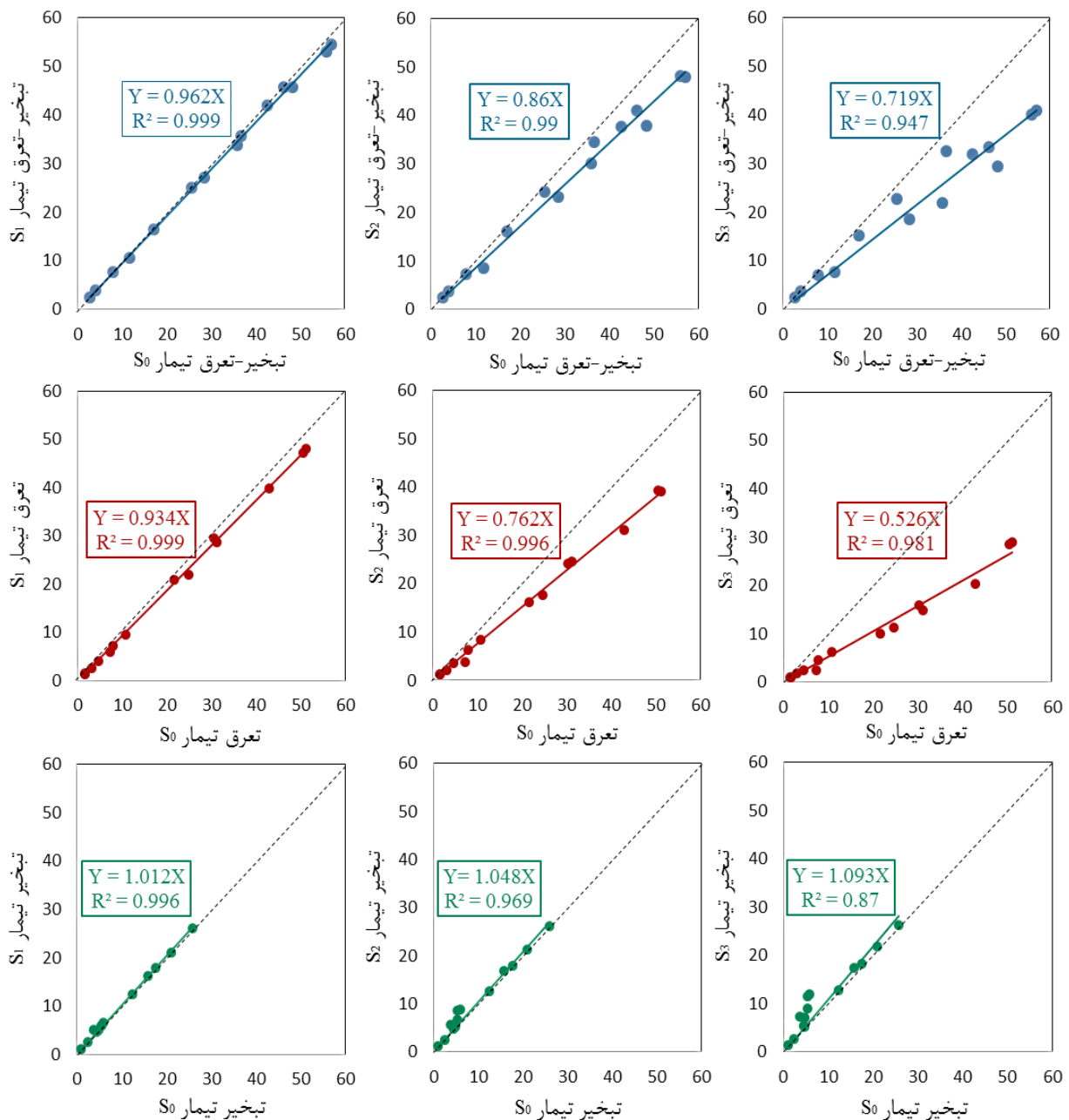
2 - Root mean square error, RMSE

3 - Coefficient of determination

4 - Efficiency of modeling, EF

ترتیب ۱۱، ۲۷، ۳۷ و ۸/۵ درصد و مقدار تعرق در مراحل رشد مذکور به ترتیب ۴۱، ۴۸، ۵۶ و ۳۸ درصد کاهش یافت. نتایج فوق نشان داد که در فرایند مدل سازی اجزاء تبخیر و تعرق گیاه، علاوه بر اثر تنش وارده بر گیاه، اثر حساسیت مرحله رشد نیز باید در نظر گرفته شود. در پژوهشی مشابه نیز گزارش شد که در مرحله میانی رشد ذرت به دلیل آغاز گل دهی و تشکیل میوه (بلال)، حساسیت تعرق گیاه به تنش بیشتر بوده و در مرحله پایانی رشد، به دلیل رسیدگی محصول و آغاز پلاسیدگی (خشک شدن) گیاه، حساسیت تعرق گیاه به تنش کمتر می باشد (Saeidi, 2021 b).

مطابقت داشت. به طور کلی نتایج نشان داد که در شرایط تنش شوری، راندمان مصرف آب و تعرق گیاه نسبت به تبخیر - تعرق، با شیب بیشتری کاهش یافته و سهم تعرق گیاه به سمت جزء تبخیر انتقال می یابد. از این رو در شرایط تنش شوری، تعیین نیاز آبی گیاه بر اساس جزء تعرق و لزوم مدیریت پوشش سطح خاک برای کاهش جزء تبخیر اهمیت می یابد. البته حساسیت مرحله رشد گیاه ذرت نیز بر تغییرات مقادیر پارامترهای مذکور مؤثر می باشد. به طوری که با تغییر شوری از سطح S_0 به S_3 مقدار تبخیر - تعرق در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد به



شکل ۲- روند تغییرات مقادیر تبخیر - تعرق، تعرق و تبخیر در تیمارهای تنش شوری، نسبت به تیمار تحت کنترل (S_0)

جدول ۴- تجزیه واریانس صفات مورد بررسی در طرح

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		تبخیر - تعرق	تبخیر
تکرار	۲	۴/۲۵ ^{ns}	۵/۸۴ ^{ns}
تنش شوری	۳	۱۳۱۵ ^{**}	۳۵۱۲ ^{**}
مرحله رشد	۳	۴۵۸۲۹ ^{**}	۹۳۵۲ ^{**}
تنش شوری × مرحله رشد	۹	۳۹۳ ^{**}	۱۸۷/۵ ^{**}
خطا	۳۰	۰/۹۲	۰/۶۴

ns و **: به ترتیب عدم تفاوت معنی دار و تفاوت معنی دار در سطح احتمال یک درصد

مدل سازی مقدار تعرق گیاه و ارزیابی مدل ها

باتوجه به معادلات مدل های رگرسیونی در روابط (۵) الی (۹)، ضرایب توابع مربوطه برای تخمین مقدار تعرق گیاه توسط نرم افزار SPSS برآورد شد و در جدول (۵) ارائه شد. آزمون F نشان داد مدلهایی که بین متغیرهای وابسته و مستقل برازش داده شده اند، در سطح احتمال یک درصد معنی دار بوده اند. در اغلب مدل ها، ضریب K_{pi} در مراحل توسعه و میانی رشد دارای بیشترین مقدار و در مراحل اولیه و پایانی رشد دارای کمترین مقدار بود. علت آن می تواند به مقدار سهمی که تعرق گیاه در پارامتر تبخیر - تعرق و در مراحل مختلف رشد داشته است، مربوط باشد. از این رو می توان نتیجه گرفت که در این قبیل مدل سازی ها باید حساسیت مراحل رشد گیاه نیز در نظر گرفته شود و نمی توان شرایط یکسانی را برای کل دوره رشد لحاظ نمود. البته در پژوهش هایی که برای مدل سازی مقدار عملکرد محصول ذرت بر اساس مقدار تبخیر - تعرق گیاه صورت گرفته است، بر حساسیت مراحل مختلف رشد ذرت تأکید شده و ضرایب متفاوتی برای آن ارائه شده است. به طوری که مقدار ضرایب حساسیت در مراحل حساس رشد، بیشتر از بقیه مراحل گزارش شده است (Kipkorir and Raes, 2002; She, 2020; Saeidi, 2021b). در پژوهشی دیگر در کشور چین، نسبت تعرق به تبخیر - تعرق (T/ET) ذرت در کل دوره رشد مقدار ۵۳ درصد و در دوره گل دهی تا بلوغ گیاه، مقدار ۶۳/۳ درصد بود و در دوره پایانی رشد از مقدار T/ET کاسته شد (Zhou et al., 2017). در پژوهش مذکور نیز نشان داده شد که حساسیت مقدار تعرق ذرت در مرحله گل دهی، زیاد بوده است. برای صحت سنجی عملکرد مدل های تجربی در همه تیمارهای شوری و مراحل مختلف رشد، مقادیر مدل سازی شده تعرق نسبت به مقادیر واقعی آن در شکل (۳) مقایسه شد. به صورت ظاهری مشاهده شد که مدل لگاریتمی دارای بیشترین پراکندگی نقاط نسبت به خط ۱:۱ بود و از این رو بدترین عملکرد را در تخمین مقدار تعرق داشته است. اما برای ارزیابی دقیق تر مدل ها، پارامترهای آماری ارائه شده در جدول (۶) بررسی شد. از نظر آماره های ارزیابی، مدل نمایی بهترین مدل

برای شبیه سازی مقدار تعرق در شرایط پژوهش حاضر بوده است. در مورد سایر مدل ها نیز، به ترتیب مدل های درجه دوم، توانی، خطی و لگاریتمی در اولویت های دوم تا پنجم قرار گرفته اند. آماره های R^2 و EF نشان داد که همبستگی خوبی بین نقاط در مدل های اول تا چهارم وجود داشت. آماره CRM نشان داد که مدل لگاریتمی یک مدل بیش برآورد و سایر مدل ها، مدلهایی کم برآورد نسبت به شرایط واقعی بوده اند. مقدار پارامترهای ME، RMSE و NRMSE نیز نشان داد که مدل لگاریتمی خطای زیادی در تخمین مقدار تعرق گیاه داشت. به طور مشابه از مدل های ساده رگرسیونی برای تخمین مقدار تبخیر - تعرق واقعی گندم در مناطق خشک مصر استفاده شد. دو تیمار شامل سطوح آبیاری بر اساس مقدار تبخیر - تعرق محاسباتی گیاه (A) و آبیاری بر اساس کمبود رطوبت خاک نسبت به حد ظرفیت مزرعه (B) در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد در تیمارهای A و B به ترتیب دو رابطه نمایی با معادله $ET_a = 0.131(GDD)^{1.1405}$ و $ET_a = 0.1201(GDD)^{1.1203}$ بین مقادیر تجمعی تبخیر - تعرق واقعی (ET_a) و درجه - روز - رشد (GDD) برازش داده شد (Salama et al., 2015). در سال های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸، پژوهشی بر روی ذرت در قالب اعمال چهار سطح شوری آب شامل ۰/۵، ۰/۱، ۳/۵ و ۵/۷ دسی زیمنس بر متر و چهار تیمار کاربرد نیتروژن در خاک شامل ۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد مصرف کود نیتروژن انجام شد. نتایج نشان داد مدل رگرسیونی درجه دوم با ضریب تبیین (R^2) به ترتیب ۰/۹۸۱ و ۰/۹۷۷ به عنوان تابع بهینه برای تخمین مقدار ضریب تنش تبخیر-تعرق (K_s) ذرت در قزوین انتخاب شد. در این پژوهش محدودیت مدل های رگرسیونی، وابستگی آن ها به شرایط خاص مکانی و اقلیمی منطقه مورد مطالعه اعلام شد. اما کاربرد آن ها نسبت به سایر روش های تئوری و ریاضی که بر پایه فرضیات متعددی هستند، ترجیح داده شد (Saeidi et al., 2021). در پژوهشی در شمال شرقی گرینلند واقع در آمریکا، تأثیر شش رژیم آبیاری بر ذرت علوفه ای بررسی شد و رابطه ای خطی بین مقدار تعرق نرمال شده (T/ET_0) و عملکرد زیست توده گیاهی (Y) به صورت $Y = 27.64 \times (T/ET_0) - 0.312$ برازش داده شد (Trout

(al., 2015). در پژوهش حاضر نیز توان مدل نمایی برابر با ۰/۰۵ بود که از این جهت به توان مدل همایی و فدس (Homae and Feddes, 1999) نزدیک بود. پژوهش‌های گذشته نشان داد که امکان استفاده گسترده از مدل‌های رگرسیونی، برای مدل‌سازی مقدار پارامترهای مهمی مانند تبخیر - تعرق و عملکرد گیاه بر اساس متغیرهای مختلف محیطی و مدیریتی وجود داشت. از این رو مدل‌های ارائه شده در پژوهش حاضر می‌تواند برای تخمین مقدار تعرق گیاه ذرت مورد استفاده قرار بگیرد. به‌طور کلی دستاورد پژوهش این بود که با کاربرد مدل نمایی و بر اساس مقادیر تبخیر - تعرق گیاه (در شرایط استاندارد و یا تحت تنش شوری)، مقدار تعرق ذرت در مراحل مختلف رشد قابل برآورد بوده است. به این ترتیب می‌توان در شرایط کاربرد خاک‌پوش و حذف اثر تبخیر از سطح خاک، مقدار نیاز آبی ذرت را بر اساس مقدار واقعی تعرق گیاه تعیین نمود. در نتیجه از مصرف بیش از حد نیاز آب در آبیاری و شور شدن خاک جلوگیری به عمل خواهد آمد.

and Dejonge, 2017). در تحقیق دیگر مدل شبیه‌سازی تلفیقی آب - نیتروژن ذرت (MSM) برای شرایط تنش شوری در ایران اصلاح شد. تیمارهای شوری از طریق آب آبیاری با هدایت الکتریکی ۰/۶، ۲ و ۴ دسی‌زیمنس بر متر اعمال شد. نتایج نشان داد که تابع جذب آب (Homae and Feddes (1999) منجر به تخمین بهتر همه پارامترها نسبت به سایر توابع جذب آب شد. بر این اساس بین مقادیر تعرق واقعی و پیش‌بینی شده در کل دوره رشد ذرت، رابطه خطی $Y=0.927X+23.325$ با ضریب تبیین ۰/۸۳۶ برآزش داده شد (Azizian et al., 2015). در مورد سایر گیاهان، پاسخ عملکرد گیاه ریحان به تنش‌های توأمان شوری و کمبود نیتروژن مدل‌سازی شد. تیمارهای شوری شامل آب آبیاری با هدایت الکتریکی برابر با ۱/۱۷۵، ۳، ۵ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر بود. نتایج پژوهش نشان داد که تابع نمایی در مدل همایی و فدس (Homae and Feddes, 1999) با توان ۰/۰۴۴ بهترین مدل برای تخمین عملکرد نسبی گیاه ریحان بوده است (Sarai-Tabrizi et

جدول ۵- ضرایب فرم‌های مختلف مدل‌های تجربی برای تخمین مقدار تعرق گیاه

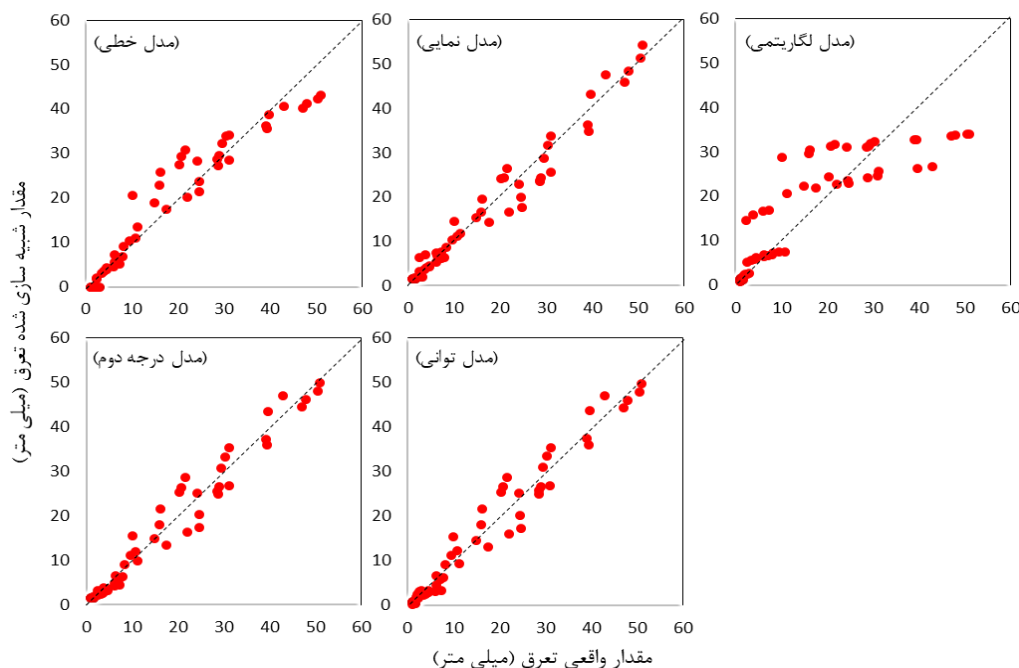
ضرایب	فرم خطی	فرم نمایی	لگاریتمی	درجه دوم	توانی
A_0	-۵/۴۲۲	۳/۲۲۴	۰/۰۰۰۱	۱/۴۳	۰/۰۲۵
A_1	۰/۸۲۸	۰/۰۵	۶/۳۴	۰/۰۰۰۱	۱/۸۸۹
A_2	-	-	-	۰/۰۱۵	-
K_{P1}	۰/۴۳۸	۰/۵۵۶	۰/۳۳۵	۰/۵۵۵	۰/۵۴
K_{P2}	۱/۰۳۲	۰/۹۷۲	۱/۳۵	۰/۹۹۴	۰/۹۵۷
K_{P3}	۱/۱۷۶	۱/۳۱۵	۱/۰۹۸	۱/۲۸۸	۱/۲۴
K_{P4}	۰/۰۰۰۱	۰/۴۳۲	۰/۲	۰/۹۸۵	۲/۷۱۷
آماره F	۳۳۴**	۵۳۳/۸**	۷۹/۷**	۳۸۶/۵**	۵۷۱**

** نشان‌دهنده معنی‌داری کلی تابع در تخمین پارامتر مدنظر، در سطح احتمال یک درصد است.

جدول ۶- مقدار پارامترهای آماری برای ارزیابی اعتبار مدل‌های تجربی در تخمین مقدار تعرق

نام مدل	CRM	EF	R^2	RMSE	ME	NRMSE
خطی	۰/۰۰۶ ^(۲) *	۰/۹۳۲ ^(۳)	۰/۹۳۲ ^(۳)	۳/۹۵۵ ^(۳)	۱۰/۵۷۸ ^(۳)	۰/۲۳۹ ^(۳)
نمایی	۰/۰۰۵۸ ^(۱)	۰/۹۶۷ ^(۱)	۰/۹۶۷ ^(۱)	۲/۷۶۶ ^(۱)	۷/۱۸۵ ^(۱)	۰/۱۶۷ ^(۱)
لگاریتمی	-۰/۰۳۳ ^(۵)	۰/۷۳۸ ^(۵)	۰/۷۴۲ ^(۵)	۷/۷۷ ^(۵)	۱۸/۷۸۶ ^(۵)	۰/۴۶۹ ^(۵)
درجه دوم	۰/۰۱۳ ^(۲)	۰/۹۶۴ ^(۲)	۰/۹۶۴ ^(۲)	۲/۸۸۴ ^(۲)	۷/۲۸۸ ^(۲)	۰/۱۷۴ ^(۲)
توانی	۰/۰۲۸ ^(۳)	۰/۹۶۳ ^(۳)	۰/۹۶۳ ^(۳)	۳/۰۳۱ ^(۳)	۷/۴۶۸ ^(۳)	۰/۱۸۳ ^(۳)

*: اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده اولویت انتخاب مدل، بر اساس شاخص‌های آماری است.



شکل ۳- صحت سنجی مدل های تجربی، به منظور تخمین مقدار تعرق گیاه

مدل سازی مقدار تبخیر و ارزیابی مدل ها

برای مدل سازی مقدار تبخیر از سطح خاک نیز همه مراحل مربوط به مدل سازی تعرق طی شد. ضرایب روابط (۱۰) الی (۱۴) که برای تخمین مقدار تبخیر از سطح خاک ارائه شده بود، توسط نرم افزار SPSS برآورد شد و در جدول (۷) آورده شد. در این بخش نیز معنی داری کلی توابع توسط آماره F در سطح احتمال یک درصد نشان داده شد. مقدار ضرایب K_p در مدل های تخمین تبخیر نشان داد که حساسیت مرحله رشد گیاه نسبت به شرایط مدل سازی تعرق، متفاوت بود. به طوری که بیشترین مقدار ضریب K_p مربوط به مراحل اولیه رشد (K_{PI}) بود و با توسعه گیاه و نزدیک شدن به مراحل پایانی رشد از مقدار آن کاسته شده است. دلیل این امر، بیشتر بودن سهم تبخیر از سطح خاک در مراحل اولیه رشد (به علت لخت بودن سطح خاک) و کاهش سهم تبخیر با توسعه پوشش گیاهی و سایه اندازی آن بر روی خاک می باشد. براین اساس می توان مراحل رشد گیاه را برای اختصاص خاک پوش به آن، اولویت بندی نمود. در این باره، در تحقیقی بر روی ذرت در غرب اروگوئه گزارش شد در زمانی که سطح خاک پوششی نداشت و گیاه تحت تأثیر تنش آبی بود، نسبت تبخیر به تبخیر - تعرق ذرت (E/ET) حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد افزایش یافت (Gimenez et al., 2016). در پژوهش مشابه دیگر، مقدار تبخیر از سطح خاک و تعرق ذرت علوفه ای در استان جیانگ سو کشور چین شبیه سازی شد. نتایج نشان داد بیشترین مقدار تبخیر برابر با ۳/۹۱ میلی متر بر روز در مرحله اولیه رشد و کمترین مقدار آن برابر با ۰/۱ میلی متر بر روز بود که در مرحله پایانی رشد اتفاق افتاد (Guo

et al., 2021). برای صحت سنجی عملکرد مدل های تجربی در همه تیمارهای شوری و مراحل مختلف رشد، مقادیر مدل سازی شده تبخیر نسبت به مقادیر واقعی آن در شکل (۴) مقایسه شد. شکل (۴) نشان داد که در بین مدل های مختلف، فقط مدل درجه دوم دارای بیشترین همبستگی بین نقاط نسبت به خط ۱:۱ بود و در سایر مدل ها، یک پراکندگی تقریباً یکنواخت بین نقاط مشاهده شد. البته برای ارزیابی دقیق تر مدل ها، آماره های ارزیابی در جدول (۸) بررسی شد. از نظر آماره های ارزیابی، به ترتیب مدل های درجه دوم، لگاریتمی، توانی، خطی و نمایی برای شبیه سازی مقدار جزء تبخیر، اولویت بندی شدند. بیشتر بودن مقدار R^2 از عدد ۰/۶ (در جدول ۸) نشان داد که در همه مدل ها، متغیرهای مستقل تا حد زیادی توانسته اند تغییرات متغیر وابسته را تبیین کنند. اما با توجه به شکل (۴)، فقط میزان همبستگی بین نقاط در مدل درجه دوم پذیرفتنی بود. آماره CRM نشان داد که مدل درجه دوم یک مدل بیش برآورد و سایر مدل ها، مدل هایی کم برآورد نسبت به شرایط واقعی بوده اند. مقدار پارامترهای ME، RMSE و NRMSE نیز نشان داد که مدل درجه دوم، کمترین میزان خطا را در تخمین مقدار جزء تبخیر داشته است. در پژوهشی مشابه در آمریکا، سطوح آبیاری شامل ۷۵، ۸۵، ۱۰۰، ۷۰، ۵۵ و ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه، بر روی ذرت بررسی شد. این پژوهش رابطه درجه دوم با معادله $Y = -2.91E^2 + 5.98E - 2.06$ بین عملکرد نسبی محصول (Y) و تبخیر نسبی از سطح خاک (E) برآزش داده شد (Trout and Dejonge, 2017). در پژوهشی با تیمارهای شوری آب آبیاری شامل ۰/۶، ۲ و ۴ دسی زیمنس بر

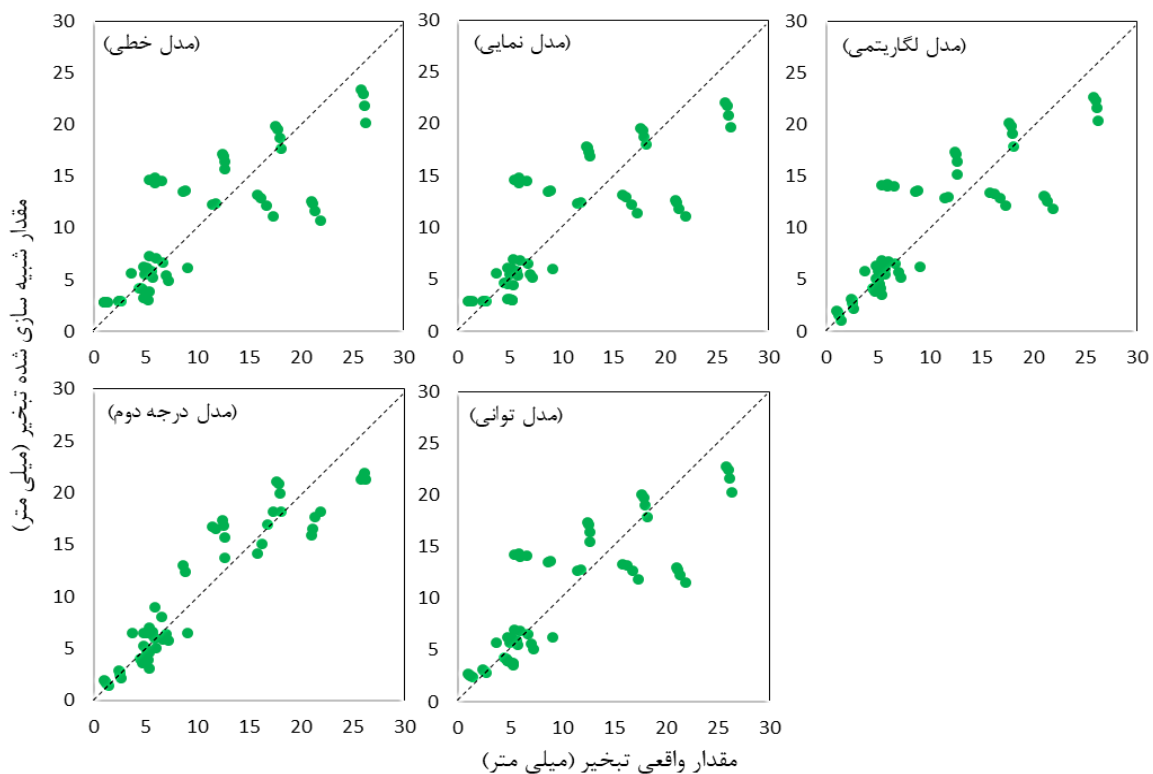
گزارش شد. نتایج پژوهش‌های گذشته نشان داد که محدوده کاربرد مدل‌های تجربی بسیار گسترده بوده و از این رو کاربرد مدل رگرسیونی درجه دوم برای تخمین مقدار تبخیر در طول دوره رشد گیاه ذرت، دارای پشتوانه علمی است. در نتیجه با استفاده از نتایج پژوهش حاضر، امکان تخمین تلفات تبخیر از سطح خاک در سطوح مختلف تنش شوری و برنامه‌ریزی برای کاهش تلفات و مدیریت مصرف آب فراهم شد.

متر، مدل شبیه‌سازی تلفیقی آب - نیتروژن ذرت (MSM) اصلاح شد و رابطه خطی $Y=0.7X+61.453$ با ضریب تبیین 0.76 ، بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده تبخیر برآزش داده شد (Azizian et al., 2015). در پژوهش‌های دیگر و در شرایط توأمان شوری و خشکی، برای تخمین مقدار عملکرد گوجه‌فرنگی در کرج، تابع درجه دوم به‌عنوان تابع بهینه معرفی شد (Mohammadi et al., 2010). همچنین تابع درجه دوم به‌عنوان تابع بهینه برای انتخاب بذر یونجه با بهترین عملکرد در آمریکا (Shock et al., 2007)

جدول ۷- ضرایب فرم‌های مختلف مدل‌های تجربی برای تخمین مقدار تبخیر از سطح خاک

ضرایب	فرم خطی	فرم نمایی	لگاریتمی	درجه دوم	توانی
A ₀	۵/۹۳۳	۷/۴۳۸	-۱/۱۱۱	۰/۰۰۰۱	۳/۴۵۵
A ₁	۰/۱۵۹	۰/۰۱۱	۳/۸۲۵	۰/۹۴	۰/۳۵۳
A ₂	-	-	-	-۰/۰۱۵	-
K _{P1}	۱/۹۸۹	۱/۹۸۴	۱/۷۸۸	۱/۴۸۵	۱/۸۴۹
K _{P2}	۰/۹۹۲	۱/۰۶۵	۰/۹۹	۱/۲۳۸	۰/۹۹۹
K _{P3}	۰/۵۳۶	۰/۵۵۱	۰/۵	۰/۴۴۷	۰/۵۱۲
K _{P4}	۰/۴۵۲	۰/۳۷۹	۰/۷۴۶	۰/۸۱۶	۰/۵۴۹
آماره F	۶۲/۷۷**	۵۹/۳**	۷۷/۷**	۷۱/۲**	۷۲/۰۳**

** نشان‌دهنده معنی‌داری کلی تابع در تخمین پارامتر مدنظر، در سطح احتمال یک درصد است.



شکل ۴- صحت سنجی مدل‌های تجربی، به‌منظور تخمین مقدار تبخیر از سطح خاک

جدول ۸- مقدار پارامترهای آماری برای ارزیابی اعتبار مدل های تجربی در تخمین مقدار تبخیر از سطح خاک

نام مدل	CRM	EF	R ²	RMSE	ME	NRMSE
خطی	۰/۰۱۲ ^(۵) *	۰/۶۷ ^(۴)	۰/۶۷ ^(۴)	۴/۲۶۴ ^(۴)	۱۱/۲۱۲ ^(۵)	۰/۴۲ ^(۴)
نمایی	۰/۰۰۹ ^(۳)	۰/۶۵۹ ^(۵)	۰/۶۶ ^(۵)	۴/۳۳۳ ^(۵)	۱۰/۸۳۶ ^(۴)	۰/۴۲۷ ^(۵)
لگاریتمی	۰/۰۰۲۸ ^(۱)	۰/۷۱۱ ^(۳)	۰/۷۱۲ ^(۳)	۳/۹۸۷ ^(۳)	۱۰/۰۷۳ ^(۳)	۰/۳۹۳ ^(۳)
درجه دوم	-۰/۰۱۱ ^(۴)	۰/۸۷۵ ^(۱)	۰/۸۷۶ ^(۱)	۲/۶۱۷ ^(۱)	۵/۲۵۱ ^(۱)	۰/۲۵۸ ^(۱)
توانی	۰/۰۰۳ ^(۳)	۰/۶۹۸ ^(۳)	۰/۶۹۸ ^(۳)	۴/۰۷۸ ^(۳)	۱۰/۳۷۹ ^(۳)	۰/۴۰۲ ^(۳)

*: اعداد داخل پرانتز نشان دهنده اولویت انتخاب مدل، بر اساس شاخص های آماری است.

نتیجه گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تنش شوری باعث کاهش مقادیر تبخیر - تعرق و تعرق گیاه و افزایش مقدار تبخیر از سطح خاک نسبت به شرایط استاندارد منطقه (تیمار S₀) شد. بیشترین تا کمترین مقدار تبخیر - تعرق و تعرق گیاه به ترتیب متعلق به مراحل توسعه، میانی، اولیه و پایانی رشد بود و بیشترین تا کمترین مقدار جزء تبخیر مربوط به مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد بود. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که در شرایط تنش شوری، راندمان تعرق گیاه نسبت به تبخیر - تعرق با شیب بیشتری کاهش یافته و سهم کاهش تعرق گیاه به سمت جزء تبخیر انتقال می یابد. از این رو در شرایط تنش شوری، تعیین نیاز آبی گیاه بر اساس جزء تعرق و لزوم مدیریت پوشش سطح خاک برای کاهش جزء تبخیر حائز اهمیت است. حساسیت مرحله رشد گیاه ذرت نیز بر تغییرات مقادیر پارامترهای تبخیر - تعرق و اجزاء آن مؤثر بود. به این دلیل، در فرایند مدل سازی اجزاء تبخیر و تعرق گیاه، علاوه بر اثر تنش وارده بر گیاه، اثر حساسیت مرحله رشد نیز در نظر گرفته شد. نتایج مدل سازی نشان داد که توابع رگرسیونی در انجام شبیه سازی مقادیر اجزاء تبخیر - تعرق ذرت،

در سطح احتمال یک درصد معنی دار بوده اند. به طوری که در اکثر مدل ها و از نظر مقدار ضریب تبیین (R²)، متغیرهای مستقل توانسته اند تغییرات متغیر وابسته را تبیین کنند. از سوی دیگر، حساسیت مراحل رشد ذرت در فرایند تخمین مقادیر تعرق و تبخیر، به خوبی توسط مقدار ضریب K_p نشان داده شد. بهترین مدل رگرسیونی (بر اساس مقدار NRMSE و سایر آماره ها) برای تخمین مقادیر تعرق گیاه و تبخیر از سطح خاک به ترتیب توابع نمایی و درجه دوم تشخیص داده شد. بر اساس مقدار RMSE، به طور متوسط میزان خطای مدل های نمایی و درجه دوم به ترتیب ۲/۷ و ۲/۶ میلی متر بر ده روز بود. در صورت پذیرش خطای مذکور، می توان از مدل های پیشنهادی برای تخمین مقادیر تعرق گیاه و تبخیر از سطح خاک استفاده نمود. نتیجه کلی این که با تخمین مقدار تعرق گیاه ذرت در شرایط استاندارد و تنش زای محیطی، می توان مقدار نیاز آبی واقعی گیاه را برآورد نموده و از مصرف بیش از اندازه آب و شور کردن خاک، جلوگیری کرد. همچنین با تخمین مقدار تبخیر از سطح خاک و آگاهی از سهم تلفات تبخیر، تلاش های جدی تری در جهت برنامه ریزی مناسب آبیاری و افزایش راندمان مصرف آب انجام خواهد شد.

REFERENCES

- Akbari Nodehi, D. (2018). Effect of water stress on different growth stages of yield and water use efficiency of maize. *Journal of Water and Irrigation Management*. 7(2), 305-318. (In Farsi)
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation Drainage Paper No.56, 1-326.
- Ayers, R. S. and Westcot, D. W. (1985). Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper No.29, Pp:32.
- Azizian, A. and Sepaskhah, A. R. (2014). Maize response to water, salinity and nitrogen levels: yield-water relation, water-use efficiency and water uptake reduction function. *Journal of Plant Production*. 8(2), 183- 214.
- Azizian, A., Sepaskhah, A. R. and Zand-Parsa, Sh. (2015). Modification of a maize simulation model under different water, nitrogen and salinity levels. *International Journal of Plant Production*. 9(4), 609-632.
- Dehghanisani, H., Kanani, E. and Akhavan, S. (2018). Evaluation of corn evapotranspiration and its components and relationship between leaf area index and components in surface and subsurface drip irrigation systems. *Journal of water and soil*. 31(6), 1549-1560. (In Farsi)
- Farooq, M., Hussain, M., Wakeel, A. and Kadambot, H. M. (2015). Salt stress in maize: effects, resistance mechanisms, and management. *Institute national de la recherche agronomiques (INRA)*. 35, 461-481.
- Ferreira, M. I., Silvestre, J., Conceic, N. and Malheiro, A. C. (2012). Crop and stress coefficients in rain fed and deficit irrigation vineyards using sap flow techniques. *Journal of irrigation science*. 30, 433-447

- Gimenez, L., Petillo, M. G., Paredes, P. and Pereira, L. S. (2016). Predicting maize transpiration, water use and productivity for developing improved supplemental irrigation schedules in western Uruguay to cope with climate variability. *Journal of water*. 8(309), 1-22.
- Guo, T., Liu, C., Xiang, Y., Zhang, P. and Wang, R. (2021). Simulations of the soil evaporation and crop transpiration beneath a maize crop canopy in a humid area. *Journal of water*. 13(14), 1-13.
- Heidarinia, M., Naseri, A. A., Boroomand-nasab, S. and Albaji, M. (2016). The effect of irrigation with saline water on evapotranspiration and water use efficiency of maize under different crop management. *Journal of Irrigation Science and Engineering*. 40(1.1), 99-110. (In Farsi)
- Homaei, M. and Feddes, R.A. (1999). Water uptake under non uniform transient salinity and water stress. In: *Modeling of transport processes in soil at various scales in time and space*. Pp, 416-427
- Kipkorir, E. D. and Raes, D. (2002). Transformation of yield response factor into Jensen's sensitivity index. *Journal of Irrigation and Drainage Systems*. 16, 47-52.
- Lacerda, C. F., Ferreira, J. F. S., Liu, X. and Suarez, D. L. (2016). Evapotranspiration as a criterion to estimate nitrogen requirement of maize under salt stress. *Journal of agronomy and crop science*. 202 (2016), 192-202.
- Mohammadi, M., Liaghat, A. M. and Molavi, H. (2010). Optimization of water use and determination of tomato sensitivity coefficients under combined salinity and drought stress in Karaj. *Journal of water and soil*. 24(3), 583-592. (In Farsi)
- Mohammadi, M., Ghahraman, B., Davari, K., Vazifedoost, M. and Noori, H. (2013). Optimization of water use and yield of winter wheat under salinity and water stresses condition with using of SWAP model. *Journal of water research in agriculture*. 27(3), 299-314. (In Farsi)
- Moohamadi Behmadi, M. and Armin, M. (2017). Effect of drought stress on yield and yield components of different corn cultivars in delayed planting conditions. *Journal of applied research of plant ecophysiology*. 4(1), 17-37. (In Farsi)
- Nielsen, R. L. (2002). Drought and heat stress effects on corn pollination. *Journal of Agronomy (Purdue)*. 196, 19-25.
- Saeidi, R., Sotoodeenia, A., Ramezani Etedali, H., Kaviani, A. and Nazari, B. (2018). Study of effect of water salinity and soil fertility stresses on evapotranspiration of maize. *Iranian journal of soil and water research*. 49(4), 945-954. (In Farsi)
- Saeidi, R., Ramezani Etedali, H., Sotoodeenia, A., Nazari, B. and Kaviani, A. (2020). Management of saline water and nitrogen fertilizer in maize cultivation. *journal of water and soil*. 34(4), 861-877. (In Farsi)
- Saeidi, R. (2021 a). Separation the evaporation and transpiration in maize cultivation and investigation of their response to different irrigation levels. *Iranian journal of soil and water research*. 52(5), 1263-1273. (In Farsi)
- Saeidi, R. (2021 b). Effect of drought and salinity stress in estimation of forage maize yield through of periodic evapotranspiration, with using of different models. *Journal of Water Research in Agriculture*. 35(2), 107-121. (In Farsi)
- Saeidi, R. and Sotoodehnia, A. (2021). Yield reaction to evapotranspiration of maize, under the effect of water stress at different growth stages (in Qazvin plain). *Iranian journal of soil and water research*. 52(3), 611-620. (In Farsi)
- Saeidi, R., Ramezani Etedali, H., Sotoodeenia, A., Kaviani, A. and Nazari, B. (2021). Salinity and fertility stresses modifies K_s and readily available water coefficients in maize (Case study: Qazvin region). *Journal of irrigation science*. 39, 299-313.
- Salama, M. A., Yousef, Kh. M. and Mostafa, A. Z. (2015). Simple equation for estimating actual evapotranspiration using heat units for wheat in arid regions. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 8(2015), 418-427.
- Sarai-Tabrizi, M., Homaei, M., Babazadeh, H., Kaveh, F. and Parsinejad, M. (2015). Modeling basil (*Ocimum basilicum* L.) response to simultaneous salinity and nitrogen deficit stresses. *Journal of Water and Soil Science (JWSS)*. 19(73), 45-57.
- She, R., Tong, L., Du, T. and Shukla, M. (2020). Response and modeling of hybrid maize seed vigor to water deficit at different growth stages. *Journal of water*. 12(11), 1-20.
- Shock, C. C., Feibert, E. B. G., Saunders, L. D. and Klauzer, J. (2007). Deficit Irrigation for Optimum Alfalfa Seed Yield and Quality. *Journal of Agronomy*. 99, 992-998
- Trout, T. J. and Dejonge, K. C. (2017). Water productivity of maize in the US high plains. *Journal of Irrigation Science*. 35, 251-266.
- Zhou, S., Liu, W. and Lin, W. (2017). The ratio of transpiration to evapotranspiration in a rain fed maize field on the Loess Plateau of China. *Journal of water science and technology*. 17(1), 221-228.