

Investigation of the Relationship between Maize Biological Yield and Applied Water at Different Growth Stages under Simultaneous Water-Fertilizer Stress Conditions

F. Zargar Yaghoubi, M. Sarai Tabrizi,  A. Mohammadi Torkashvand, M. Esfandiari, and H. Ramezani Etedali

Ph.D. Student, Soil Engineering and Sciences, Department of Soil Engineering and Sciences, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran., Islamic Azad University, Tehran, Iran. faramarz.zargaryaghoubi@iau.ac.ir

Assistant Prof., Department of Water Engineering and Sciences, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran. m.sarai@iau.ac.ir

Professor, Department of Soil Engineering and Sciences, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

ali.mohammaditorkashvand@iau.ac.ir

Assistant Prof., Department of Soil Engineering and Sciences, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

doddesfandiari@gmail.com

Professor, Department of Water Engineering and Sciences, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

ramezani@eng.ikiu.ac.ir

Received: October 2023 and Accepted: March 2025

Abstract

This research investigated the wet yield and periodic evapotranspiration of maize (*Zea mays* L. Var. Sc. 704), under the influence of different amounts of water and fertilizer. A two-factor factorial experiment was conducted in the form of randomized complete block design in two crop years, 2020 and 2021, in Aliabad Fashapuyeh District, Hasanabad Division, Ray County (Tehran Province). Water treatments included three levels of W0, W1, and W2 and three levels of fertilizer, F0, F1 and F2, which were carried out by supplying 100%, 75% and 50% of water requirement based on soil moisture deficiency and fertilizer was based on soil test for macro-nutrients of fodder corn, respectively. The results showed that, along with the increase in water and fertilizer stress, the two-year average amount of yield and applied water (total evapo-transpiration) decreased by 27.6% and 46.8%, respectively, so that the yield decreased from 50.4 to 36.5 t/ha and applied water decreased from 694 to 369 mm. The simple and interactive effects of treatments on yield and periodic applied water were significant at the 95% probability level. The results of modeling the relative yield of the crop based on periodic relative ET values indicate the suitability of Singh's sum-able and Rao's multiplicative model in the conditions of water and fertilizer stress. In total, the results showed that the production of fodder corn was firstly dependent on the volume of irrigation water and then on the supply of nutrients. The highest biological yield after the control treatment (W0F0) was related to the application of the W0F1 treatment. Also, a positive and significant correlation between the total evapotranspiration with the yield ($R=0.94$) was proved. On the other hand, no significant yield difference was observed between the three treatments W1F0, W1F1 and W1F2. Therefore, in the condition of irrigation water shortage, the W1F2 treatment is more economical than the other treatments. W1 and the square root production function with RMSE, R^2 and NS statistics of 0.42, 0.98 and 0.97, respectively, is a more suitable function for estimating yield with water and fertilizer consumption compared to the functions of Logistics and Cobb Douglas. It was found that, in the conditions of inadequate water and macro nutrients, not only ET of different stages of growth can be increased by management of fertilizer consumption, but also plant performance was completely dependent on the correct management of water and fertilizer consumption.

Keywords: Periodic evapotranspiration, Empirical production functions Simultaneous water and fertilizer stress, Time domain reflectometry, *Zea mays* L. Var. SC. 704

* - Corresponding author Email: m.sarai@iau.ac.ir
<https://doi.org/10.22092/jwra.2025.363823.1013>

بررسی رابطه عملکرد زیست توده ذرت با آب کاربردی در مراحل مختلف رشد در تنش همزمان آبی - کودی

فرامرز زرگریعقوبی، مهدی سرائی تبریزی*^{ID}، علی محمدی ترکشوند، مهرداد اسفندیاری و هادی رضانی اعتدالی

دانشجوی دکتری علوم و مهندسی خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

faramarz.zargaryaghoubi@iau.ac.ir

استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

m.sarai@iau.ac.ir

استاد گروه علوم و مهندسی خاک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

ali.mohammaditorkashvand@iau.ac.ir

استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

doddesfandiari@gmail.com

استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

ramezani@eng.ikiu.ac.ir

دریافت: آبان ۱۴۰۲ پذیرش: اسفند ۱۴۰۳

چکیده

در این پژوهش عملکرد تر و تبخیر و تعرق دوره‌ای ذرت علوفه‌ای Sc. 704، زیر تأثیر مقادیر مختلف آب و کود بررسی شد. آزمایش به صورت فاکتوریل دو عاملی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در دو سال زراعی ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ در منطقه علی‌آباد فشافویه، بخش حسن‌آباد، شهرستان ری (استان تهران) انجام و تیمارهای آبی شامل سه سطح W_0 ، W_1 و W_2 و سه سطح کودی F_0 ، F_1 و F_2 که به ترتیب با تأمین ۱۰۰٪، ۷۵٪ و ۵۰٪ نیاز آبی بر اساس کمبود رطوبت خاک و کود بر اساس آزمون خاک برای عناصر غذایی پرمصرف ذرت علوفه‌ای، اجرا شد. نتایج نشان داد که هم‌زمان با افزایش تنش‌های آبی و کودی، میزان متوسط دو ساله عملکرد و آب کاربردی (تبخیر و تعرق کل) به ترتیب ۲۷/۶٪ و ۴۶/۸٪ کاهش داشت به طوری که عملکرد از ۵۰/۴ تن بر هکتار و آب کاربردی (ET) کل از ۶۹۴ به ۳۶۹ میلی‌متر کاهش پیدا کرد. همچنین، اثرات ساده و متقابل تیمارها بر عملکرد و آب کاربردی دوره‌ای با احتمال ۹۵٪ معنی‌دار بود. نتایج مدل‌سازی عملکرد نسبی محصول بر اساس مقادیر ET نسبی دوره‌ای حاکی از مناسب بودن مدل جمع‌پذیر سینک و ضرب‌پذیر راثو در شرایط تنش آبی و کودی بود. در مجموع نتایج نشان داد که تولید ذرت علوفه‌ای در درجه نخست وابسته به حجم آب آبیاری و سپس تأمین عناصر غذایی است. بالاترین میزان عملکرد زیست توده پس از تیمار شاهد (W_0F_0) مربوط به اعمال تیمار W_0F_1 بود. همچنین، وجود یک همبستگی مثبت قوی بین تبخیر و تعرق کل با عملکرد به اثبات رسید ($R^2=0.94$, $p<0.05$) از سوی دیگر، تفاوت معنی‌داری از نظر عملکرد بین سه تیمار W_1F_0 ، W_1F_1 و W_1F_2 مشاهده نشد. بنابراین در شرایط کمبود آب آبیاری، تیمار W_1F_2 صرفه اقتصادی بهتری نسبت به سایر تیمارها دارا بود. نیز، تابع تولید ریشه دوم با آماره‌های NS ، R^2 ، $RMSE$ و به ترتیب ۰/۴۲، ۰/۹۸ و ۰/۹۷، تابع مناسب‌تری برای برآورد میزان عملکرد با آب مصرفی و کود در مقایسه با تابع‌های لجستیک و کاب داگلاس داشت و مشخص شد که در شرایط کمبود آب و عناصر غذایی اصلی، نه تنها ET مراحل مختلف رشد با مدیریت مصرف کود قابل افزایش هست، بلکه عملکرد گیاه نیز بستگی کامل به مدیریت صحیح مصرف آب و کود دارد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق دوره‌ای، توابع تولید تجربی، دستگاه بازتاب زمانی امواج، ذرت علوفه‌ای Sc. 704

مقدمه

عواملی که باعث کاهش رشد کمی و یا کیفی محصولات گیاهی در اثر تغییرات خارج از دامنه مطلوب عوامل محیطی ایجاد می شود به عنوان تنش شناخته شده (زرگریعقوبی و همکاران، ۱۴۰۱) و تنش های آبی، شوری و کودی، مهم ترین تنش های غیرزنده محیطی در مناطق خشک و نیمه خشک است، لذا وجود یک برنامه ریزی صحیح در راستای استفاده بهینه از منابع کمی و کیفی آب آبیاری و کودی کشور به منظور افزایش بهره وری به خصوص در بخش کشاورزی با توجه به افزایش سریع جمعیت و کاهش منابع امری لازم و ضروری به نظر می رسد. این مهم جزء با اعمال مدیریت صحیح در سامانه آب، خاک و گیاه محقق نخواهد شد. با این کار می توان ضمن ایجاد افزایش محصول، به یک کشاورزی پایدار نیز دست یافت. از سویی، شناخت و آگاهی از حساسیت مرحله ای تبخیر و تعرق گیاهان (ET دوره ای) به تنش های محیطی، امکان مدل سازی دقیق عملکرد را با توابع تولید تجربی فراهم می کند و در این میان ذرت علوفه ای به دلیل نقش تغذیه ای آن برای دام در تولید پروتئین از اهمیت بسیاری برخوردار است، لذا مدل سازی تولید با این توابع می تواند نقش مهمی در برآورد میزان تولید سالیانه کشور به این محصول استراتژیک با توجه به منابع قابل دسترس آبی و کودی کشور داشته باشد (زرگریعقوبی و همکاران، ۲۰۲۴).

مقاومت گیاهان به تنش ها یک صفت پیچیده است که تحت تأثیر عواملی چون ژنتیک، فیزیولوژی گیاه و عوامل محیطی از جمله نور، دما، CO₂ و رطوبت قرار دارد (مولز و همکاران، ۲۰۱۶). از آنجایی که آب مهم ترین نقش را در رشد و نمو و انتقال مواد معدنی جذب شده از خاک به گیاه و حرکت آن در سرتاسر اندام های گیاهی از ریشه تا برگ را دارد، از میزان فاکتور آب قابل دسترس به همراه مقدار مصرف سه کود ماکرو (نیتروژن) N، (فسفر) P و (پتاسیم) K به عنوان مهم ترین عوامل تنش تولید یاد می

شود. در ارتباط با نوع عملیات کشت، پژوهشی بر روی پنبه انجام شده و نتیجه آن بود که در شرایط بدون خاک ورزی، گیاه به کاربرد کود ازته پاسخ معنی داری نمی دهد بر خلاف زمانی که عملیات خاک ورزی انجام می شود (روبرتز و همکاران، ۱۹۹۹). در تأیید این نتیجه پژوهشی در سال ۱۹۹۵ انجام شده بود که نشان داد، تلفات نیتروژن چه از طریق آبشویی، دنتریفیکاسیون، فرار آمونیاک (تصعید گازی) و غیر متحرک شدن^۱ آن در عملیات بدون خاک ورزی بیش تر از کشت نرمال (کشت پس از عملیات خاک ورزی) است (ایزورالدو و همکاران، ۱۹۹۵).

سون و ارشد (۲۰۰۵) معتقدند که نیتروژن اضافی برای خنثی نمودن اثرات آلی شدن نیتروژن به وسیله ریزجانداران مصرف می شود که این مسئله منجر به عدم تعادل در C/N خاک می شود. نتایج پژوهش های متعددی نشان داد که بهبود خواص فیزیکی خاک و شرایط تهویه ای بهتر آن در اثر عملیات مناسب خاک ورزی می تواند، موجب بهبود جذب عناصر غذایی و عملکرد بالاتر گیاه شود (آریف و همکاران، ۲۰۰۷- زوریتا، ۲۰۰۰- هالو و همکاران، ۲۰۰۱- پاتیل و شلوانتار، ۲۰۰۶). بیشتر تحقیقاتی که در ایران در زمینه های کودی صورت گرفته در شرایط مطلوب آب آبیاری و عملیات مناسب خاک ورزی بوده است، لیکن در شرایطی که محدودیت منابع آبی وجود داشته باشد، توسعه سامانه های کم خاک ورزی به همراه مدیریت مصرف صحیح کود می تواند راه حلی چاره ساز در زمینه رفع برخی محدودیت های تولید در کشاورزی باشد. این امر به خصوص در خشکسالی های اخیر از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در پژوهشی تأثیر تنش آبی و مقادیر مختلف نیتروژن بر گیاه ذرت مطالعه شد و نتایج نشان دهنده به تأخیر افتادن مراحل فنولوژیکی رشد و نمو گیاه در طول دوره رشد بود، به طوری که با کاهش رطوبت خاک و نیتروژن قابل دسترس گیاه، شاخص سطح برگ به شدت افت چشم گیری پیدا کرد (سپهری و همکاران،

^۱ - پدیده ای موقتی که طی فرآیند معدنی شدن دوباره به فرم قابل دسترس گیاه تبدیل می شود.

متری از سطح دریا قرار گرفته و حداکثر دما در فصل تابستان ۴۲ درجه و حداقل آن در زمستان ۴- درجه سانتی‌گراد گزارش شده است.

الگوی کشت مرسوم در منطقه گندم و جو پائیزه، یونجه، آفتابگردان، ذرت علوفه‌ای و کلزا است که به‌تازگی و با توجه به اقلیم سازگار منطقه با گیاه کینوا، برخی از کشاورزان سطوحی را به کشت این گیاه جدید اختصاص داده‌اند. همچنین، سطح زیر کشت در منطقه مطالعاتی در سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ برای کشت ذرت علوفه‌ای به‌ترتیب حدود ۱۴ و ۱۷ هکتار بوده است. رقم مورد استفاده بذر هیبرید سینگل کراس ۷۰۴ در فاصله ردیف‌های کاشت ۷۵ سانتی‌متری و عمق پنج سانتی‌متری با تراکم بوته ۸۵ هزار در هکتار بنا به توصیه موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر انجام شد.

روش اجرای طرح

این پژوهش، در چارچوب مطالعات دوساله مزرعه‌ای، به بررسی اثرات تنش آبی و محدودیت‌های مصرف کودهای N، P و K بر روی ذرت علوفه‌ای پرداخته است که در آن، سطوح تنش آبی و کودی به‌عنوان اصلی‌ترین متغیرهای تصادفی مستقل در نظر گرفته شده‌اند. داده‌های پژوهش برای هر سال مطالعاتی شامل عملکرد زیست‌توده گیاه (بیوماس تر) و تبخیر و تعرق کل و دوره‌ای تحت شرایط تنش آبی ($W_1 = 75\% \times FC$) و $W_2 = 50\%$ و غیرتنش آبی ($W_0 = 100\% \times FC$) و اثرات متقابل تنش آبی و کودی N، P و K بر روی این صفات، مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین داده‌ها به روش توکی با احتمال ۹۵ درصد با استفاده از نرم‌افزارهای SAS و SPSS انجام و سپس داده‌های آنالیز شده به‌صورت شکل و جدول تدوین و مورد تفسیر قرار گرفت. در نهایت با تعیین توابع تجربی ضرب‌پذیر و جمع‌پذیر، عملکرد با مقادیر تبخیر و تعرق دوره‌ای و همچنین با انجام سه مدل رگرسیونی دو متغیر که شامل میزان درصد کاهشی از رطوبت FC خاک و درصد کاهشی

(۱۳۸۱). در پژوهش دیگری اثرات متقابل دو سطح تنش آبی (بدون تنش خشکی و تنش خشکی قبل از گرده‌افشانی) و سه سطح نیتروژن خالص (صفر، ۸۰ و ۱۶۰ kg/ha) بر روی چهار وارسته ذرت بررسی شد و نتایج حاکی از کاهش عملکرد زیست‌توده در اثر تنش رطوبتی بود (موسه و همکاران، ۲۰۰۶). همچنین با انجام آزمایش گلخانه‌ای (Indoor) سه‌ساله بر روی گوجه‌فرنگی در ایالت فلوریدا آمریکا، زورتاوی و همکاران (۲۰۰۹)، پی به اثرات متقابل تنش آبی و کودی نیتروژن بر کارایی ازت شدند و بدین نتیجه رسیدند که کاربرد نیتروژن زیاد در شرایط تنش آبی تأثیر معکوسی بر عملکرد دارد. از آنجایی‌که در این سوابق مطالعاتی گفته‌شده فقط به مصرف کود ازته اشاره داشته و کمبودی از نظر کود P و K نداشته‌ایم در این مطالعات به نقش تنش کودی N، P و K نیز پرداخته شد؛ بنابراین با توجه به بحران کنونی کمیت و کیفیت منابع آب و خاک در شرایط منطقه نیمه‌خشک و حفظ امنیت غذایی در تأمین و تولید محصولات کشاورزی با کیفیت و در سطح کمتر، پیش‌بینی عملکرد محصولات با توجه به سطوح تأمین نهاده‌های آبی و خاکی (کود) بسیار با اهمیت است و در این راستا در این پژوهش از دو طریق به بررسی توابع تولید در این امر مهم و حساس پرداخته شده است. نتایج به‌دست آمده از دو سال کشت می‌تواند به توصیه کودی مناسب برای کشت این محصول در وضعیت‌های محدودیت رطوبتی خاک و همچنین اقتصادی‌تر بودن کاشت این محصول منجر شود.

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در تابستان سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ در مزرعه کشاورزی و دامپروری علی‌آباد فشافویه واقع در بخش حسن‌آباد شهرستان ری، استان تهران با مشخصات طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۱۷ دقیقه شمالی انجام شد. منطقه مورد مطالعه دارای آب‌وهوای خشک و نیمه‌خشک و اصولاً کم‌باران در کویری نسبتاً هموار و مسطح و در ارتفاع ۱۱۹۱

از مقدار مطلوب کودهای پرمصرف NPK به روش گام به گام، به برآورد عملکرد ذرت علوفه‌ای انجام گردید. ذرت در کرت‌هایی به ابعاد سه در سه متر با فاصله سه متر از هم از هر چهار طرف در اواسط تیرماه هرسال کشت شد (شکل ۱). با توجه به اثر باقی‌مانده کود کشت سال قبل به سال بعد، برای یکنواختی ماده آزمایشی (خاک) چه از نظر شکل، اندازه و ماهیت کرت‌ها، در سال دوم کاشت، زمین مجاور کشت سال نخست با آرایشی متفاوت برای تیمارها با استفاده از اصول جداول اعداد تصادفی، چیدمان تیمارها به‌طور تصادفی قرار داده شد که با انجام این کار می‌توان دقت آزمایش را تا حد بسیار زیادی مشابه سال قبل فرض کرد و فقط تفاوت تیمارها از نظر نوع تنش‌های اعمال‌شده از نظر آبی و کودی بود و بقیه مدیریت‌های زراعی کاملاً یکسان در دو سال اعمال شد.

قبل از اجرای طرح از اعماق ۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و ۴۰-۶۰ سانتی‌متری، نمونه‌های مرکبی بر اساس اصول صحیح نمونه‌برداری خاک تهیه و آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی لازم برای نوع و مقدار کودهای مورد نیاز انجام شد و به جزء نیتروژن بقیه کودها قبل از کشت و هم‌زمان با عملیات کشت مصرف شد. ذرت بیشترین نیاز را از میان این سه عنصر (NPK) به نیتروژن دارد و با توجه به آبشویی زیاد ازت، این عنصر نمی‌تواند مدت زمان زیادی در دسترس گیاه باشد. لذا با تقسیم آن در سه مرحله نیاز گیاه به این عنصر حیاتی تأمین شد. در جداول ۱ و ۲ به ترتیب میانگین نتایج تجزیه شیمیایی و فیزیکی خاک مزرعه بر حسب عمق‌های یادشده در دو سال زراعی ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ و در جدول ۳ داده‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه در ایام تحت کشت ارائه شده است.

جدول ۱- میانگین برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک منطقه مورد آزمایش (۱۳۹۹)

عمق (سانتی‌متر)	رطوبت حجمی PWP (cm ³ .cm ⁻³)	رطوبت حجمی FC (cm ³ .cm ⁻³)	پتاسیم K (mg.kg ⁻¹)	فسفر P (mg.kg ⁻¹)	ازت کل Total N (mg.kg ⁻¹)	کربن آلی OC (%)	آهک TNV (%)	اسیدیته pH	شوری EC (dS.m ⁻¹)	بافت خاک Texture
0-20	14.7	29.8	197.30	5.65	627.8	0.61	14.18	7.86	8.67	لوم
20-40	15.1	28.5	187.37	5.38	582.0	0.58	12.35	7.88	7.96	لوم
40-60	18.4	35.6	168.02	4.93	561.2	0.53	13.11	7.94	8.42	لوم رسی

*: به دلیل وجود شوری در خاک، در ابتدای شروع کشت، یک آبیاری سنگین اولیه در کلیه کرت‌ها انجام شد که هدف آن شستشوی نمک‌های موجود در ناحیه توسعه ریشه است. این آبیاری سنگین باعث کاهش قابل توجه شوری خاک در عمق توسعه ریشه خواهد شد و شرایط مناسب برای رشد گیاه را فراهم می‌گردد بنابراین در مراحل بعدی آبیاری، نیازی به لحاظ نمودن جزء آبشویی در محاسبات حجم آب آبیاری نیست و حجم آب داده شده را می‌توان معادل تبخیر و تعرق گیاه در نظر گرفت

جدول ۲- متوسط برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک منطقه (۱۴۰۰)

عمق (سانتی‌متر)	رطوبت حجمی PWP (cm ³ .cm ⁻³)	رطوبت حجمی FC (cm ³ .cm ⁻³)	پتاسیم K (mg.kg ⁻¹)	فسفر P (mg.kg ⁻¹)	ازت کل Total N (mg.kg ⁻¹)	کربن آلی OC (%)	آهک TNV (%)	اسیدیته pH	شوری EC (dS.m ⁻¹)	بافت خاک Texture
0-20	14.6	30.0	200.70	5.95	630.8	0.65	14.79	7.76	8.53	لوم
20-40	15.3	28.5	182.40	5.37	587.0	0.61	12.15	7.85	7.86	لوم
40-60	18.1	35.9	168.09	4.99	562.8	0.73	13.01	7.91	8.52	لوم رسی

جدول ۳- داده‌های هواشناسی در ماه‌های زیر کشت ذرت علوفه‌ای در منطقه مورد مطالعه

ماه	دما (°C)			رطوبت نسبی (%)			بیشترین سرعت باد (m/s)	بارندگی (mm)
	حداقل	حداکثر	متوسط	حداقل	حداکثر	متوسط		
تیر	18.4	44.0	32.6	12.8	42.2	27.3	14.1	0.0
مرداد	17.1	43.1	31.8	12.1	47.5	30.7	13.2	0.0
شهریور	13.6	40.3	27.8	16.2	59.6	37.1	13.5	0.0
مهر	7.5	34.8	21.0	17.2	64.9	40.1	13.6	0.0
آبان	1.2	28.3	13.4	45.7	94.1	70.2	11.3	0.0

فاکتورهای اصلی آزمایش، سه سطح آبیاری با هدایت الکتریکی $1/8$ دسی‌زیمنس بر متر (با نماد W) و سه سطح حاصلخیزی از نظر کودی (با نماد F) را شامل می‌شد. در هر بلوک، سطوح آبیاری شامل W_0 (تأمین 100 درصد نیاز آبی گیاه تا حد FC)، W_1 (تأمین 75 درصد نیاز آبی گیاه تا حد FC) و W_2 (تأمین 50 درصد نیاز آبی گیاه تا حد FC) بود. کنترل سطوح آبیاری با ± 5 درصد خطای رطوبت حجمی قابل قبول با دستگاه TDR مدل 150 به‌طور روزانه صورت می‌گرفت؛ بنابراین زمان‌بندی آبیاری همه تیمارها پس از گذشتن از مرحله رشد اولیه گیاه، یکسان و هم‌زمان نبوده و انجام آبیاری با توجه به پایش روزانه‌ای که انجام می‌گرفت، به‌گونه‌ای بود که برای تیمارهای W_0F_0 ، W_0F_1 و W_0F_2 همواره بخشی از خاک ناحیه ریشه گیاه در حد رطوبت FC نگه داشته می‌شد و برای تیمارهای W_1F_0 ، W_1F_1 و W_1F_2 این بخش از خاک، با مصرف 25 درصد رطوبت FC و یا با ثابت نگه‌داشتن رطوبت در حد 75 درصد ظرفیت زارعی، آبیاری مجدد صورت می‌گرفت و به همین طریق برای تیمارهای W_2F_0 ، W_2F_1 و W_2F_2 رطوبت در حد 50 درصد FC ثابت نگه‌داشته می‌شد. حجم آب مورد استفاده برای کرت‌های تنشی با استفاده از معادله ۱ برآورد می‌شد.

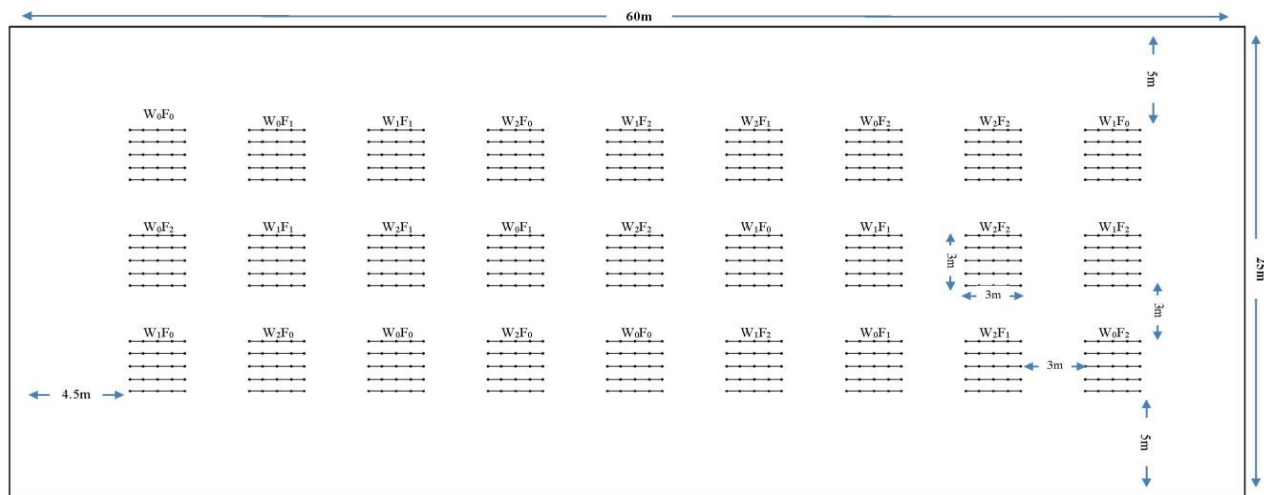
$$V = 0.01 \times (\theta_s - \theta_{TDR}) \times \Delta Z \times A \quad (1)$$

که در آن: V حجم آب مورد نیاز (m^3)، θ_s رطوبت حجمی خاک در سطح تنش مورد نظر (cm^3/cm^3)، θ_{TDR} رطوبت

حجمی قرائت دستگاه TDR (cm^3/cm^3)، ΔZ (cm) متوسط عمق توسعه ریشه گیاه (با توجه به رشد و نمو گیاه در دوره‌های مختلف این عمق افزایش و رطوبت در آن ناحیه اندازه‌گیری می‌شد) و A (m^2) مساحت سطح کرت است. از آنجایی که در طول فصل رشد گیاه (تابستان‌های 1399 و 1400) هیچ‌گونه بارندگی در منطقه نازل نشد و از سویی با فرض کوچک بودن کرت‌ها ($9 m^2$) و عدم وقوع رواناب در کرت‌ها، امکان برآورد راندمان آبیاری صددرصدی برای کرت‌ها محتمل بود. همچنین، با نبود درز و ترک، جریان در اعماق خاک و یا جریان‌های ترجیحی در آن و دستگاه اندازه‌گیری نسبتاً دقیق رطوبت خاک با TDR و اعمال کم آبیاری در بیشتر تیمارها میزان آب داده شده در ناحیه توسعه ریشه ذخیره‌شده و تمام این رطوبت به‌صورت تبخیر و تعرق از سطح خاک و روزنه‌های گیاه مصرف شده است. در نتیجه این اطمینان حاصل شد که روند کاهش مقدار رطوبت خاک در روزهای پس از آبیاری، صرفاً متأثر از فرآیند تبخیر و تعرق بوده است بنابراین امکان برآورد مقدار تبخیر و تعرق گیاه، با رابطه زیر وجود داشت:

$$ET = \frac{V}{A} \quad (2)$$

که در آن: ET مقدار تبخیر و تعرق گیاه (mm)، V و A نیز قبلاً معرفی شده بود. در پایان دوره رشد گیاه و برداشت محصول، با حفر گودال در خاک کرت‌ها، بقایای ریشه ذرت در اعماق بیش‌تر از 60 سانتی‌متری مشاهده نشد.



شکل ۱- چیدمان تیمارها در سال زراعی ۱۳۹۹

کودهای فسفره و پتاسه تنها در یک مرحله همان طور که در بالا مطرح شد، اعمال شد.

$$X = \frac{R \times (100 - S) \times A}{E \times 10000} \quad (3)$$

که در آن: X میزان کود مورد نیاز هر کرت (kg)، R میزان عنصر غذایی (N، P₂O₅ و K₂O) توصیه شده (kg/ha)، S مقدار تنش کودی وارد شده در هر کرت (%، A مساحت کرت (m²) و E میزان درصد عنصر غذایی در کود مورد نظر است. در تمامی تیمارها از W₀F₀ تا W₂F₂ هیچ گونه تنشی از بابت آبی در طول دوره رشد اولیه یا ابتدایی گیاه که حدود ۲۰ تا ۲۵ روز ابتدای کشت است اعمال نشد و سطوح تنشی (آبی و کودی) فقط در طول مراحل توسعه، میانی و پایانی اجرا شد. منبع آب در این پژوهش، چاه عمیق بود. متوسط عمق آب زیرزمینی منطقه در ۱۱۲ متری موجود است. در جدول (۴) مشخصات فیزیکوشیمیایی آب چاه ارائه شده است.

سطوح حاصلخیزی کودی بر اساس توصیه آزمایشگاهی بر پایه آزمون خاک محل اجرای پروژه به سه سطح F₀ (تأمین ۱۰۰ درصد نیاز کودی N، P و K)، F₁ (تأمین ۷۵ درصد نیاز کودی N، P و K یا تنش ۲۵ درصدی کودی) و F₂ (تأمین ۵۰ درصد نیاز کودی N، P و K) اعمال تیمار گشته و این درصدها بر پایه ۳۵۰ کیلوگرم کود اوره، ۱۸۰ کیلوگرم کود سوپرفسفات تریپل و ۲۰۰ کیلوگرم کود سولفات پتاسیم در هکتار انجام شد. کود ازته از منبع اوره در سه مرحله به ترتیب، نخست همزمان با کاشت در مرحله جوانه زنی به صورت نواری در پنج سانتی متری زیر و کنار بذر و بقیه آن در دو مرحله در زمان های تُنک کردن بوته ها همراه با ساقه رفتن گیاه و در نهایت در زمان بروز گل های تاجی همراه با تشکیل و شیری شدن دانه به طور کامل در سطح کرت ها پخش و با خاک مخلوط شد. مقدار تنش حاصلخیزی از نوع کودی آن بر اساس رابطه ۳ برای تمامی کرت ها محاسبه و فقط کود ازته در سه مرحله و

جدول ۴ - آنالیز فیزیکوشیمیایی آب چاه شور در منطقه مورد مطالعه

Class	TDS mg/l	SAR	SSP %	Cations	Na ⁺ meq/l	Mg ⁺² meq/l	Ca ⁺² meq/l	Anions	SO ₄ ⁻² meq/l	Cl ⁻ meq/l	HCO ₃ ⁻³ meq/l	CO ₃ ⁻² meq/l	pH	EC dS/m
C ₅ S ₄	6425.6	13.09	59.97	104.11	60.86	13.68	29.57	104.08	36.6	61.75	5.73	0	7.06	10.42

روش پژوهش و نحو محاسبه شاخص‌های آماری

تنش آبی و حاصلخیزی خاک از نوع کودی آن هر دو منجر به کاهش تبخیر و تعرق کل و دوره‌ای گیاه و همچنین عملکرد تولید ذرت علوفه‌ای نسبت به شرایط ایده‌آل (تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی و بدون محدودیت عناصر غذای گیاه) می‌شود (بابازاده و سرائی‌تبریزی، ۱۳۹۶). در این پژوهش به دو نوع تابع تخمین تولید (عملکرد) پرداخته شد که نوع نخست آن به ارتباط عملکرد با تبخیر و تعرق دوره‌ای گیاه و نوع دوم آن به ارتباط تولید با میزان شدت تنش‌های آبی و کودی اعمال شده بر گیاه ذرت پرداخته است که در ادامه به شرح هر کدام از این نوع توابع اشاره شده است. از آنجایی که صدمات وارده در اثر عوامل تنش‌زا در برخی از مراحل رشد بیش از مراحل دیگر است (به عنوان مثال زمان گل‌دهی، گرده‌افشانی، تلقیح و یا تشکیل دانه) در نوع نخست تابع، رابطه بین عملکرد و تبخیر و تعرق دوره‌ای گیاه در شرایط تنش دوگانه آبی و کودی مدل‌سازی شد. طول دوره رشد مربوط به زمان کاشت، داشت و برداشت محصول بر اساس گزارش فائو ۵۶ که مراحل رشدی گیاه را به چهار دوره اولیه (حدود ۲۵ روز)، توسعه (حدود ۴۰ روز)، میانی (حدود ۴۵ روز) و پایانی (حدود ۳۰ روز) تقسیم می‌کند، تطبیق داده شد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸).

متغیر وابسته، عملکرد نسبی (Y_s/Y_m) و متغیر مستقل، تبخیر و تعرق نسبی هر دوره (ET_{Si}/ET_{mi}) در نظر گرفته شد. برای این منظور از مدل‌های تجربی تابع تولید جمع‌پذیر بلنک^۱، استوارت^۲، سینگ^۳ و مدل‌های ضرب‌پذیر جنسن^۴ و رائو^۵ استفاده شد. مدل‌های یادشده به ترتیب در روابط ۴ تا ۸ ارائه شده است. با استفاده از مقادیر تبخیر و تعرق نسبی دوره‌ای و عملکرد ذرت علوفه‌ای، ضرایب مربوط به هر دوره رشدی در شرایط تنشی طرح با استفاده از نرم‌افزار SPSS برای مدل‌های پنج‌گانه مختلف برآورد شد (زرگر یعقوبی و همکاران، ۱۴۰۱ و آلن و

همکاران، ۱۹۹۸). همچنین، با استفاده از معیارهای آماری خطا شامل آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و شاخص نش-ساتکلیف (NS) نسبت به مقایسه مدل‌های مختلف با یکدیگر شد. روابط آماره‌های ارزیابی مدل‌های تجربی و نظری یادشده به ترتیب با شماره‌های ۹ تا ۱۴ ارائه شده است.

$$\frac{Y_s}{Y_m} = \sum_{i=1}^n a_i \left(\frac{ET_{Si}}{ET_{mi}} \right) \quad (4)$$

$$\frac{Y_s}{Y_m} = 1 - \sum_{i=1}^n a_i \left(1 - \frac{ET_{Si}}{ET_{mi}} \right) \quad (5)$$

$$\frac{Y_s}{Y_m} = \sum_{i=1}^n a_i \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{Si}}{ET_{mi}} \right)^2 \right) \quad (6)$$

$$\frac{Y_s}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{ET_{Si}}{ET_{mi}} \right)^{a_i} \quad (7)$$

$$\frac{Y_s}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(1 - a_i \left(1 - \frac{ET_{Si}}{ET_{mi}} \right) \right) \quad (8)$$

$$ME = \max |P_i - O_i| \quad (9)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (11)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \cdot (P_i - \bar{P})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (12)$$

$$NRMSE = \frac{1}{O_{ave}} \times \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (14)$$

که در آن‌ها: $\sum$ و $\prod$ به ترتیب عملگر جمع و ضرب توابع، Y_s عملکرد در شرایط تنش (ton/ha)، Y_m بیشینه عملکرد (ton/ha)، ET_{Si} تبخیر و تعرق در شرایط تنش مرحله iam

⁴ - Jensen

⁵ - Rao

¹ - Blank

² - Stewart

³ - Sing

استوارت، سینگ، جنسن و رائو که عملکرد نسبی را بر اساس مراحل چهارگانه رشدی برآورد می نمودند. برای این سه نوع توابع تولید نیز با داشتن داده های مشاهده ای و برآورد شده از مدل ها، اعتبار توابع با شاخص های آماری مطرح شده ارزیابی و تابع بهینه تولید معرفی شد.

ضریب تبیین یکی از مهم ترین معیارهای ارزیابی ارتباط میان دو متغیر مستقل و وابسته است و ارتباط مستقیمی با ضریب همبستگی پیرسون دارد. هرچه مقدار ضریب R^2 به عدد یک نزدیک تر باشد، ارتباط قوی تری میان دو متغیر X و Y وجود دارد. در واقع این ضریب نشان می دهد که چند درصد از تغییرات متغیر وابسته با متغیر مستقل تبیین می شود. شاخص NRMSE سطوح تخمین برآورد محاسباتی مدل ها را نشان می دهد (جمیسن و همکاران، ۱۹۹۱). ضریب نش-ساتکلیف (۱۹۷۰) از جمله شاخص های است که صحت برازش داده های اندازه گیری شده و برآورد شده را بررسی کرده و در واقع حالت استاندارد تابع حداقل مربعات خطاها است. دامنه تغییرات این شاخص از منهای بی نهایت تا مثبت یک بوده و هرچه این شاخص به یک نزدیک تر باشد صحت برازش داده های برآورد شده با اندازه گیری شده آن بیش تر است و بر اساس مطالعات گاسمن و همکاران (۲۰۰۷)، چنانچه این ضریب بالاتر از ۰/۵ باشد، مدل ارائه شده دارای شبیه سازی قابل قبول و خوبی با واقعیت است.

نتایج و بحث

تأثیر تیمارها بر عملکرد زیست توده و عملکرد نسبی

در هر دو سال در پایان فصل رشد با توجه به هدف برداشت ذرت علوفه ای (بیوماس تر)، بوته های ذرت کف بر شده و وزن بوته های قرار گرفته شده در هر پرتاب تصادفی قاب چوبی ۱/۵×۱/۵ متری ملاک سنجش عملکرد هر کرت شد. همچنین به منظور رفع اثر حاشیه ای و رقابت بین گیاهان سعی شد که نمونه های قرار گرفته در قاب از اطراف مرکز کرت ها صورت گیرد (خطوط کاشت در مرکز کرت ها).

دوره رشد گیاه ET_{mi} (mm)، تبخیر و تعرق حداکثر ذرت در مرحله نام تیمار بیشیه عملکرد i اندیس شمارنده دوره رشد ذرت، a_i ضریب حساسیت هر مدل در دوره رشد نام همان مدل، n تعداد مراحل رشد گیاه، O_i مقادیر اندازه گیری شده عملکرد، P_i مقادیر عملکرد برآورد شده، $\bar{O}$ میانگین مقادیر اندازه گیری شده و $\bar{P}$ میانگین مقادیر برآورد شده است. همچنین، در این پژوهش می توان با به کارگیری داده های عملکرد در شرایط وجود مقادیر متفاوتی از تنش های آبی و کودی، توابع تولید عملکرد ذرت را برآورد نمود.

$$Yield = f\left(\frac{ET_s}{ET_0}, \frac{F_s}{F_0}, a_0\right) \quad (15)$$

که در آن، عملکرد ذرت صرفاً تحت تأثیر تنش های آبی و کودی قرار گرفته و سایر عوامل مؤثر، ثابت در نظر نگه داشته شده است. نسبت $\frac{ET_s}{ET_0}$ تبخیر و تعرق در شرایط تنش دوگانه آبی و کودی به تبخیر و تعرق پتانسیل یا حداکثر یا در شرایط بدون تنش، نسبت $\frac{F_s}{F_0}$ مقدار کود ماکرو داده شده به زمین به شرایط حاصلخیزی کامل کود ماکرو و a_0 مقدار ثابت تابع سایر عوامل مؤثر بر عملکرد است. در این راستا، مدل سازی عملکرد ذرت با توابع تولید ریشه دوم، لجستیک و کاب داگلاس انجام شد. فرم کلی هر سه نوع تابع به ترتیب به شرح زیر است:

$$Y = a_0 + a_1 X_1^{0.5} + a_2 X_2^{0.5} + a_{11} X_1 + a_{22} X_2 \quad (16)$$

$$Y = \frac{a_0}{1 + e^{-(a_1 X_1 + a_2 X_2)}} \quad (17)$$

$$Y = a_0 X_1^{a_1} a_2 X_2^{a_2} \quad (18)$$

که در آن ها: X_1 و X_2 متغیرهای مستقل بی بعد هستند که به ترتیب شامل $\frac{ET_s}{ET_0}$ و $\frac{F_s}{F_0}$ است. با استفاده از رگرسیون گام به گام در SPSS ضرایب تابع تولید هر معادله برآورد و برای تعیین اثر معنی داری آن ها از آماره F (فیشر) استفاده شد. چنانچه Sig. هر ضریب کوچک تر از ۰/۰۵ ($P < 0.05$ value) باشد، آن ضریب در معادله وارد خواهد شد و اثر معنی داری بر متغیر وابسته یا پاسخ (عملکرد ذرت) دارد، مانند توابع تولید تجربی جمع پذیر و ضرب پذیر بلنک،

تجزیه واریانس (ANOVA) و مقایسه میانگین عملکرد تیمارها به تفکیک سال‌های مورد پژوهش در جداول ۵ و ۶ ارائه شده است. در این جداول، تحلیل واریانس و مقایسه میانگین‌های عملکرد ذرت بر حسب تنش آبی (W_s)، تنش کودی (F_s) و همچنین اثر متقابل W_s و F_s نشان داده شده است. بر اساس مقدار آماره F (فیشر) برای تنش آبی و مقدار احتمال مربوط به بررسی معنی‌داری آنکه کم‌تر از ۰/۰۵ است، می‌توان مطرح نمود که با احتمال ۹۵ درصد فرض صفر آماری (H_0) مبنی بر برابر بودن میانگین عملکرد ذرت علوفه‌ای بر حسب سه سطح تنش آبی (W_0 ، $W_1 = 0.75 \times W_0$ و $W_2 = 0.50 \times W_0$) رد می‌شود. بنابراین، می‌توان انتظار داشت که میان میانگین سه سطح تنش آبی اختلاف معنی‌داری وجود دارد و در نتیجه تنش آبی بر عملکرد ذرت اثر معنی‌داری دارد.

همچنین، با توجه به مقدار احتمال مربوط به بررسی مقدار آماره فیشر برای تنش کودی (F_s) که باز هم کم‌تر از ۰/۰۵ است می‌توان مطرح نمود که با $\alpha = 0.05$ (خطای آماری پنج درصد) فرض صفر آماری مبنی بر برابر بودن میانگین عملکرد ذرت بر حسب سه سطح تنش کودی (F_0 ، $F_1 = 0.75 \times F_0$ و $F_2 = 0.50 \times F_0$) رد می‌شود؛ بنابراین، میان میانگین سه سطح تنش کودی اختلاف معنی‌داری وجود دارد و تنش کودی اعمال‌شده بر تیمارها بر عملکرد ذرت اثر معنی‌داری دارد و در نهایت با توجه به آماره فیشر برای اثر متقابل $W_s \times F_s$ و مقدار احتمال مربوط به بررسی معنی‌داری آنکه کم‌تر از ۰/۰۵ است، با احتمال ۹۵ درصد فرض صفر آماری مبنی بر عدم وجود اثر متقابل ما بین تنش آبی و کودی رد می‌شود و در نتیجه اثر متقابل

تنش‌های آبی و کودی بر عملکرد گیاه تأثیر معنی‌داری دارد. به همین ترتیب در تحلیل واریانس و مقایسه میانگین‌های ET کل ذرت بر حسب تنش آبی و کودی و اثر متقابل این دو عامل می‌توان به تأثیرپذیری سطوح تنش آبی، کودی و اثر متقابل این تنش‌ها اشاره کرد که از ارائه مجدد آن خودداری می‌شود.

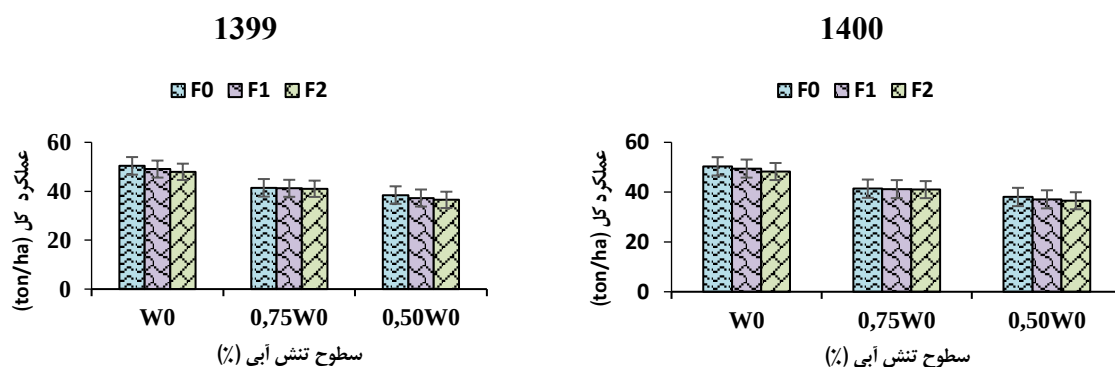
نتایج نشان‌دهنده کاهش عملکرد محصول نسبت به تیمار حداکثر تولید (شاهد) در اثر تنش‌های توأمان دوگانه آبی و کودی است به‌طوری‌که بیش‌ترین عملکرد در سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ به‌ترتیب ۵۰/۳۹ و ۵۰/۳۶ تن در هکتار بوده و کم‌ترین عملکرد در تیمار (W_2F_2) با کاهش ۲۷/۶ و ۲۷/۴ درصد نسبت به شاهد به ۳۶/۴۸ و ۳۶/۵۵ تن در هکتار رسیده است (شکل ۲). برای اطمینان از یکسان بودن نتایج عملکرد دو سال آزمون میانگین به روش T-Test انجام شد. در نخست برای هر گروه تیماری از W_0F_0 تا W_2F_2 آزمون کلموگراف اسمیروف استفاده شد و نتایج حاکی از نرمال بودن توزیع عملکرد در هر دو سال زراعی داشت. نتایج آزمون تی استیودنت برای مقایسه میان هر تیمار در هر دو سال حاکی از برابر بودن میانگین عملکرد آن تیمار در سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ بود؛ بنابراین، با احتمال ۹۵ درصد فرض صفر آماری مبنی بر برابر بودن میانگین عملکرد هر تیمار ذرت در سال ۱۳۹۹ و سال ۱۴۰۰ تأیید می‌شود، در نتیجه میانگین‌های هر تیمار در هر دو سال اختلاف معنی‌داری وجود ندارد در صورتی‌که بین هر تیمار با تیمار بعدی اختلاف معنی‌داری وجود دارد. در جدول ۶ حدود تغییرات عملکرد طی دو سال زراعی و متوسط آن در هر سال برای تیمارهای مختلف مورد پژوهش ارائه شده است.

جدول ۵- تجزیه واریانس تنش آبی و حاصلخیزی از نوع کودی و توأمان آن‌ها بر صفات مورد بررسی پژوهش طی دو سال متوالی کشت

میانگین مربعات				درجه آزادی	منابع تغییرات
تبخیر و تعرق کل		عملکرد زیست توده			
1400	1399	1400	1399		
22.9**	16.5**	0.2*	0.8**	2	بلوک
224345.2**	223152.7**	344.2**	323.3**	2	تنش آبی
284.2**	255.0**	3.9**	5.7**	2	تنش کودی
4.2**	4.5**	0.6*	0.9**	4	Ws×Fs
0.2	0.3	0.2	0.08	16	خطا
0.1	0.1	0.9	0.7	-	C.V.

جدول ۶- حدود تغییرات عملکرد زیست توده طی دو سال کشت در منطقه مطالعاتی

میانگین دوساله عملکرد	عملکرد (هکتار/تن)			تیمار
	1400	1399	حدود تغییرات عملکرد	
50.4	50.4	50.4	(50.1-50.7)	W ₀ F ₀
49.3	49.3	49.1	(48.3-49.7)	W ₀ F ₁
48.1	48.1	48.0	(47.5-48.7)	W ₀ F ₂
41.4	41.4	41.4	(41.3-41.5)	W ₁ F ₀
41.2	41.2	41.2	(41.1-41.3)	W ₁ F ₁
41.0	41.0	41.0	(40.9-41.2)	W ₁ F ₂
38.3	38.3	38.4	(37.5-38.7)	W ₂ F ₀
37.2	37.2	37.2	(36.6-37.9)	W ₂ F ₁
36.5	36.5	36.5	(36.1-37.4)	W ₂ F ₂



شکل ۲- عملکرد زیست توده تیمارهای مورد بررسی در دو سال زراعی ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰

عملکرد زیست توده و متغیرهای مستقل سطوح تنش آبی و کودی به قرار زیر است:

$$\text{Yield (ton/ha)} = 91.3 - 16.43 \times \left(\frac{W_s}{W_0}\right)^{0.5} + 1.2 \times \left(\frac{W_s}{W_0}\right) + 0.032 \times \left(\frac{F_s}{F_0}\right) \quad (19)$$

که در آن، W_s و F_s به ترتیب میزان درصد رطوبت FC و مقدار درصد بهینه مصرف کودهای ماکرو نسبت به شرایط ایده آل (W_0 و F_0) در منطقه مطالعاتی است^۱. به طور مثال اگر تنش ۵۰ درصدی آبی با تأمین نیمی از کودهای ماکرو توصیه شده مد نظر باشد رابطه فوق، عملکرد ۳۶/۷ تن بر هکتار را برآورد می کند که در واقعیت عملکرد ۳۶/۵ تن بر هکتار دیده شده است. در ادامه به بررسی دو تابع تخمین گر دیگر (لجستیک و توانی) اشاره خواهد شد و مقایسه بین این سه تابع برآورد کننده عملکرد با هم با شاخص های آماری بررسی خواهد گشت.

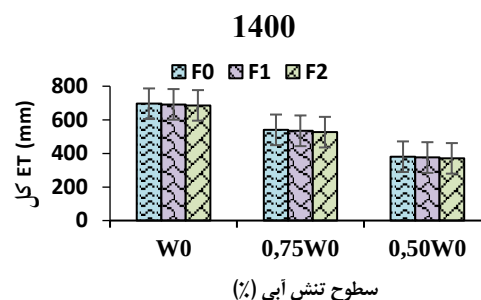
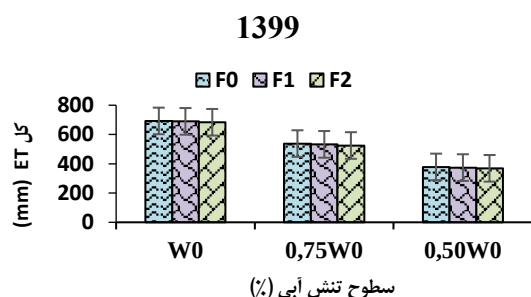
برای برآورد یک رابطه رگرسیونی دو متغیره بین سطوح تنش آبی تا FC خاک منطقه مطالعاتی با ± 5 درصد تغییرات رطوبت و کاهش مصرف کودهای ماکرو NPK از سطوح بهینه مصرف، اقدام به انجام محاسبات رگرسیونی گام به گام با نرم افزار SPSS شد و نتایج نشان دهنده ضریب R^2 بین متغیر عملکرد زیست توده و متغیرهای مستقل تنش آبی و کودی به مقدار ۹۸ درصد (تابع ریشه دوم) بود که نشان دهنده تأثیرپذیری متغیر وابسته (عملکرد زیست توده) از مستقل (F_s و W_s) است و متغیرهای مستقل ۹۸ درصد تغییرات ایجاد شده در متغیر وابسته را پیش بینی برآورد می کند. تحلیل واریانس رگرسیون نشان داد که با احتمال ۹۵ درصد فرض H_0 که مبنی بر عدم وجود رابطه بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل است، رد می شود، زیرا سطح معنی داری آن کم تر از ۰/۰۵ است. رابطه میان متغیر پاسخ

^۱ - پیش تر اشاره گردید که با توجه به فرضیات مطرح شده، مقدار آب آبیاری داده شده با میزان تبخیر و تعرق کل گیاه برابر می باشد.

تأثیر تیمارها بر تبخیر و تعرق کل و دوره‌ای

ET از مهم‌ترین اجزاء چرخه هیدرولوژیکی است که برآورد صحیح آن در طراحی و مدیریت سامانه‌های آبیاری و همچنین مطالعات منابع آب از اهمیت بسیاری

برخوردار است. تخمین نادرست و بیش از حد آن موجب اتلاف منابع آب و ماندابی شدن اراضی، شستشوی عناصر غذایی از خاک و در نهایت باعث آلوده نمودن منابع آب زیرزمینی می‌شود. همچنین، تخمین غلط و کم آن نیز باعث اعمال تنش آبی و کاهش تولید محصول می‌شود.



شکل ۳- تبخیر و تعرق کل تیمارهای مورد بررسی در دو سال زراعی ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰

این‌که این موضوع مورد تحقیق این پژوهش نبود لیکن این مسئله همان‌طور که بیان شد قابل‌رؤیت در مزرعه بود. متفاوت بودن تعداد دفعات آبیاری از آنجایی ناشی می‌شود که در طول رشد گیاه پارامتر ΔZ ریشه (عمق مؤثر ریشه که پیش‌تر در رابطه ۱ معرفی شده بود) و میزان سطوح تنش آبی در تیمارهای مختلف متفاوت بوده است. جدول ۷ دفعات آبیاری، میانگین ET هر ساله (میزان آب آبیاری) و حدود تغییرات آن را در طی دو سال متوالی کشت به تفکیک تیمارهای مورد پژوهش نشان می‌دهد.

نتایج پژوهش‌های دوساله نشان داد که اثر تنش‌های آبی و کودی باعث کاهش تبخیر و تعرق کل نسبت به ET شاهد شده به‌طوری‌که میانگین تبخیر و تعرق از ۶۹۴/۲ میلی‌متر با یک کاهش ۴۶/۸ درصدی به ۳۶۹/۶ میلی‌متر در شرایط اعمال تیمار W_2F_2 رسیده است (جدول ۵). کاهش ET مؤید کاهش جذب آب به‌وسیله گیاه در اثر افزایش تنش آبی و کودی است، به‌طوری‌که در کرت‌های که تنش حاصلخیزی و آبی به‌طور شدید اعمال شده بود اندازه و ظاهر بوته‌های ذرت به‌طور نسبی کوچک‌تر و کوتاه‌تر از بوته‌های W_0F_0 (کرت شاهد) بود. علی‌رغم

جدول ۷- تعداد دفعات آبیاری کرت‌های و حدود تغییرات تبخیر و تعرق کل طی دو سال و میانگین ET کل به تفکیک سال‌های کشت

تیمار	دفعات آبیاری	حدود تغییرات	1399	1400	میانگین
W_0F_0	19	(691.9-697.0)	692.7	695.7	694.2
W_0F_1	19	(688.7-692.9)	689.6	691.7	690.6
W_0F_2	19	(682.9-687.2)	683.7	685.8	684.8
W_1F_0	23	(536.2-542.0)	538.1	540.2	539.2
W_1F_1	23	(530.6-536.0)	532.4	534.6	533.5
W_1F_2	23	(523.2-527.8)	524.8	526.4	525.6
W_2F_0	24	(376.6-382.1)	378.4	380.2	379.3
W_2F_1	24	(372.9-377.1)	373.9	375.4	374.7
W_2F_2	24	(367.9-372.3)	368.9	370.3	369.6

اطمینان ۹۵ درصد در تمامی مراحل مؤثر بوده و همچنین تأثیر تنش آبی و کودی در هر سه مرحله بر تبخیر و تعرق

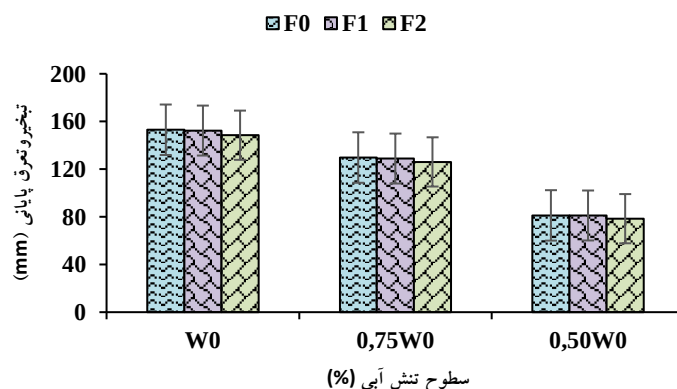
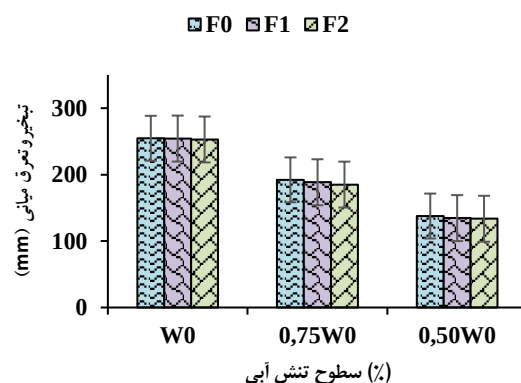
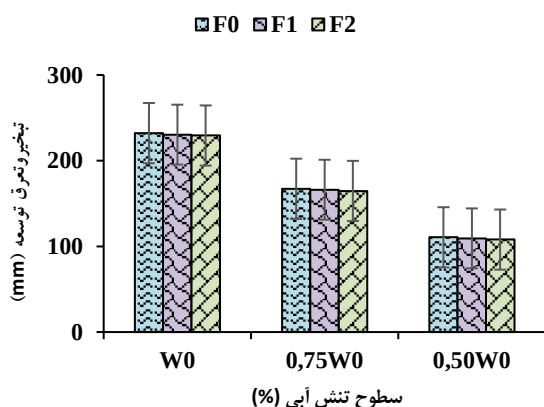
نتایج تجزیه واریانس مقادیر تبخیر و تعرق دوره‌ای (جدول ۸) نشان داد که بلوک‌بندی طرح حداقل با سطح

دوره‌ای با احتمال ۹۹ درصد مؤثر بوده است. معنی دار نشدن اثر تنش‌های توأمان آبی و کودی به این معنی است که هر کدام از عوامل تنش آبی و کودی به تنهایی در ET مرحله‌ای مؤثر است و وجود هم‌زمان این دو تنش با هم اثر معنی‌داری بر ET ندارد در صورتی‌که در تنش‌های آبی و شوری اثر توأمان این دو تنش بر ET مرحله‌ای مؤثر واقع می‌شد که این نتایج با پژوهش‌های فرحبخش و همکاران (۲۰۲۳)، فرحبخش و همکاران (۱۳۹۸) و سپهری و همکاران (۱۳۸۱) کاملاً مطابقت دارد.

نتایج مشخص نمود که با افزایش تنش حاصلخیزی از سطح F_0 تا F_2 میزان متوسط ET دوساله در سطح تیمار بدون تنش آبی (W_0) از ۰/۵ تا ۱/۴ درصد و در سطح W_1 از ۱/۱ تا ۲/۵ درصد و در سطح W_2 از ۱/۲ تا ۲/۶ درصد کاهش می‌یابد در صورتی‌که با کاهش سطوح آبیاری از W_0 تا W_2 ، متوسط دوساله تبخیر و تعرق در سطح تنش کودی F_0 از ۲۲/۳ تا ۴۵/۴ درصد و در سطح F_1 از

دوره‌ای با احتمال ۹۹ درصد مؤثر بوده است. معنی دار نشدن اثر تنش‌های توأمان آبی و کودی به این معنی است که هر کدام از عوامل تنش آبی و کودی به تنهایی در ET مرحله‌ای مؤثر است و وجود هم‌زمان این دو تنش با هم اثر معنی‌داری بر ET ندارد در صورتی‌که در تنش‌های آبی و شوری اثر توأمان این دو تنش بر ET مرحله‌ای مؤثر واقع می‌شد که این نتایج با پژوهش‌های فرحبخش و همکاران (۲۰۲۳)، فرحبخش و همکاران (۱۳۹۸) و سپهری و همکاران (۱۳۸۱) کاملاً مطابقت دارد.

نتایج مشخص نمود که با افزایش تنش حاصلخیزی از سطح F_0 تا F_2 میزان متوسط ET دوساله در سطح تیمار بدون تنش آبی (W_0) از ۰/۵ تا ۱/۴ درصد و در سطح W_1 از ۱/۱ تا ۲/۵ درصد و در سطح W_2 از ۱/۲ تا ۲/۶ درصد کاهش می‌یابد در صورتی‌که با کاهش سطوح آبیاری از W_0 تا W_2 ، متوسط دوساله تبخیر و تعرق در سطح تنش کودی F_0 از ۲۲/۳ تا ۴۵/۴ درصد و در سطح F_1 از



شکل ۴- تأثیر سطوح تنش آبی و کودی بر متوسط تبخیر و تعرق دوره‌ای دوساله ذرت در مراحل مختلف رشد

مدل سازی توابع تجربی عملکرد بر اساس ET مراحل

مختلف رشد در شرایط تنشی آبی و کودی

تخمین عملکرد نسبی تولید و مقادیر ضرایب رشدی چهارگانه بر پایه داده‌های تبخیر و تعرق دوره‌ای دو سال زراعی برای گیاه مورد مطالعه بر اساس مدل‌های جمع‌پذیر و ضرب‌پذیر توابع تولید در نرم‌افزار SPSS به صورت غیرخطی (Nonlinear) محاسبه شد و مشخص شد که در کلیه تیمارها مقادیر میانگین ضرایب رشدی در مراحل مختلف رشد ذرت متفاوت بوده و از این نظر در مدل‌های بلنک، استوارت، سینگ، جنسن و راثو به ترتیب در بازه‌های کمینه و بیشینه در جدول ۱۰ آورده شده است. انواع معادلات تولیدشده در این روش تحت شرایط تنش‌های آبی و کودی وارد شده برای گیاه ذرت در جدول ۱۱ گردآوری شده است. با توجه به معادلات مدل‌های مختلف برآوردی، مشخص شد که در تمامی مدل‌ها، مرحله توسعه نسبت به سایر مراحل رشدی حساس‌تر بوده و از متوسط ضریب حساسیت رشدی بیش‌تری برخوردار است. علت آن را می‌توان به دلیل تأثیر دو نوع تنش آبی و کودی وارده بر کاهش مقدار ET واقعی گیاه و عملکرد محصول در مرحله حساس رشد دانست.

برای اعتبارسنجی توان مدل‌ها در تخمین عملکرد نسبی از آماره‌های ارزیابی ME ، $NRMSE$ ، R^2 ، NS و CRM استفاده شد و بر این اساس، انواع مدل‌ها در جدول ۱۲ رتبه‌بندی شده است. نتایج نشان‌دهنده مدل بهینه سینگ با آماره‌های ارزیابی یادشده به ترتیب ۰/۰۷۵، ۰/۰۵۲، ۰/۸۰۵، ۰/۷۷۳ و ۰/۰۱۹ در مدل‌های جمع‌پذیر بود و در مدل‌های ضرب‌پذیر مدل راثو با آماره‌های به ترتیب ۰/۲۶۱، ۰/۲۰۶، ۰/۹۸۲، ۲/۵۶۸- و ۰/۱۶۴ به عنوان مدل برتر انتخاب شد و در شکل ۵ صحت اولویت‌بندی مدل‌های یادشده به صورت شهودی قابل مشاهده است. از این رو با استفاده از مدل بهینه می‌توان عملکرد نسبی گیاه مورد مطالعه را در شرایط تنش‌های آبی و کودی تخمین زد.

در جداول ۸ و ۹ نتایج تجزیه واریانس و متوسط تبخیر و تعرق سه مرحله رشدی توسعه، میانی و پایانی به تفکیک سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ ارائه شده است. نتایج میانگین دوساله تبخیر و تعرق دوره‌ای مشخص نمود که در مرحله توسعه، ET از تیمار شاهد تا W_2F_2 به میزان ۱۲۴/۲ میلی‌متر کاهش و ترکیبات تیماری (W_0F_1 و W_0F_2)، (W_1F_1 و W_1F_2) و (W_2F_1 و W_2F_2) تفاوتی از نظر آماری با یکدیگر نداشته و سایر ترکیبات تیماری در گروه‌های متفاوتی از این جهت قرار گرفته‌اند و تنش‌های آبی و کودی هر کدام به تنهای بر مقادیر ET این مرحله مؤثر بوده لیکن اثر متقابل این دو تنش غیرمعنی‌دار شده است. در مرحله میانی رشد تبخیر و تعرق با کاهش ۴۷/۵ درصدی به ۱۳۳/۶ میلی‌متر در تیمار W_2F_2 رسیده و تمام ترکیبات تیماری در گروه‌های مختلفی از a تا h قرار گرفته‌اند و اثر متقابل تنش‌های دوگانه آبی و کودی نیز همانند مرحله قبل معنی‌دار نشده است. این مسئله برخلاف پژوهش انجام‌شده در اثر تنش‌های دوگانه آبی و شوری بوده است (زرگر یعقوبی، ۱۴۰۱). این موضوع مشخص می‌سازد که عامل کودی (تغذیه‌ای) با توجه به اینکه ماهیتی شبیه نمک (املاح) دارد، لیکن اثر کاهش پتانسیل اسمزی آن کمتر از عامل EC (شوری) است که باعث عدم معنی‌داری آن در این مرحله مهم و حساس رشدی شده است. در نهایت بیش‌ترین کاهش ET در مرحله آخر رشدی (مرحله پایانی) به مقدار ۴۸/۸ درصد نسبت به تیمار شاهد اتفاق افتاده است که نشان‌دهنده اثر تنش‌های هم‌زمان آبی و کودی در مراحل قبلی رشد است که اثر خود را در این مرحله نشان می‌دهد.

جدول ۸- تجزیه واریانس تنش آبی و کودی و توأمان آن‌ها برای مراحل مختلف تبخیر و تعرق دوره‌ای به تفکیک دو سال کشت

میانگین مربعات						درجه آزادی	منابع تغییرات
مرحله پایانی		مرحله میانی		مرحله توسعه			
1400	1399	1400	1399	1400	1399		
90.9**	19.0*	12.9 ^{ns}	21.3*	3.3*	2.6**	2	بلوک
11797.3**	11840.6**	31958.0**	31658.0**	33320.3**	33045.9**	2	تنش آبی
21.3 ^{ns}	53.0**	60.8**	28.3**	20.3*	12.0**	2	تنش کودی
2.7 ^{ns}	2.1 ^{ns}	13.5 ^{ns}	2.2 ^{ns}	0.5 ^{ns}	0.04 ^{ns}	4	W _S ×F _S
7.5	4.7	8.6	4.1	6.7	0.4	16	خطا
2.3	1.8	1.5	1.1	1.5	0.4	–	C.V.

جدول ۹- مقایسه میانگین اثرات متقابل تنش‌های آبی و کودی بر تبخیر و تعرق مراحل مختلف رشدی (به روش HSD)

تبخیر و تعرق دوره‌ای (میلی متر)											
توسعه			میانی			پایانی			میانگین دو ساله		
ت	تغییرات	1399	1400	تغییرات	1399	1400	توسعه	میانی	پایانی	تیمار	
(231.3-234.0)	231.5 ^a	232.8 ^a	(253.0-257.4)	254.1 ^a	255.4 ^a	(150.7-156.5)	152.8 ^a	153.3 ^a	232.2	254.7	153.0
(224.3-234.1)	230.5 ^b	230.3 ^b	(251.3-259.4)	253.6 ^b	254.9 ^b	(147.2-161.9)	151.9 ^b	152.8 ^b	230.4	254.3	152.3
(225.8-232.4)	229.3 ^b	229.6 ^b	(249.1-258.3)	252.2 ^c	253.6 ^c	(145.1-154.7)	148.2 ^c	148.7 ^c	229.4	252.9	148.5
(165.9-168.6)	166.6 ^c	167.8 ^c	(189.6-195.7)	190.9 ^d	193.3 ^d	(127.7-131.0)	130.4 ^d	129.0 ^d	167.2	192.1	129.7
(164.4-168.8)	165.6 ^d	166.6 ^d	(187.5-189.7)	188.0 ^e	189.0 ^e	(126.2-133.3)	128.9 ^e	128.9 ^d	166.1	188.5	128.9
(162.2-168.5)	164.3 ^d	165.1 ^e	(178.2-191.2)	186.5 ^f	183.6 ^f	(121.0-134.3)	124.2 ^f	127.8 ^e	164.7	185.0	126.0
(111.0-111.4)	110.5 ^e	110.7 ^f	(135.2-140.6)	137.3 ^g	138.1 ^g	(79.9-82.5)	80.8 ^g	81.6 ^f	110.6	137.7	81.2
(107.6-110.4)	109.1 ^e	109.5 ^f	(132.5-136.9)	134.2 ^h	134.9 ^h	(77.9-86.2)	80.9 ^h	81.3 ^g	109.3	134.5	81.1
(107.1-108.7)	108.3 ^f	107.5 ^g	(131.0-135.9)	133.1 ⁱ	134.1 ⁱ	(75.6-81.4)	77.9 ⁱ	78.9 ^h	107.9	133.6	78.4

در هر صفت مقایسه شده، تیمارهایی که با حروف یکسان نشان داده شده‌اند بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن ($P \leq 0.05$)، دارای اختلاف معنی‌دار نیستند

جدول ۱۰- ضرایب کمینه و بیشینه در انواع مدل‌های توابع تجربی عملکرد نسبی محصول بر اساس تبخیر و تعرق دوره‌ای در شرایط تنش‌های آبی و کودی

مدل	مراحل رشد	ابتدایی		توسعه		میانی		پایانی	
		کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه
	بلنک	0.117	0.127	0.472	0.520	0.279	0.307	0.068	0.074
	استوارت	0.236	0.259	0.599	0.660	0.421	0.466	0.151	0.168
	سینگ	0.117	0.130	0.404	0.449	0.265	0.291	0.071	0.079
	جنسن	0.298	0.330	0.783	0.862	0.345	0.385	0.122	0.134
	رائو	0.338	0.370	0.561	0.621	0.397	0.440	0.172	0.188

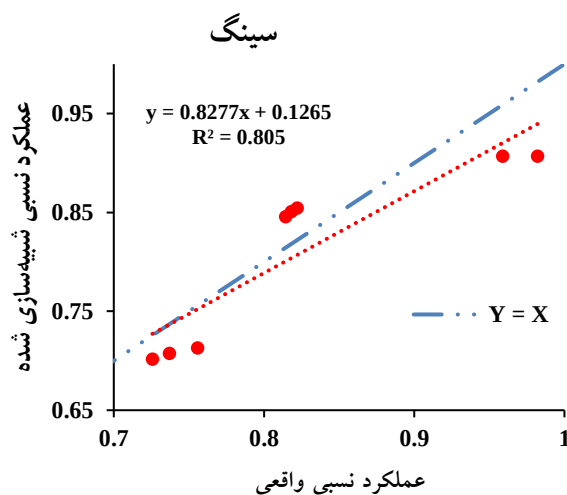
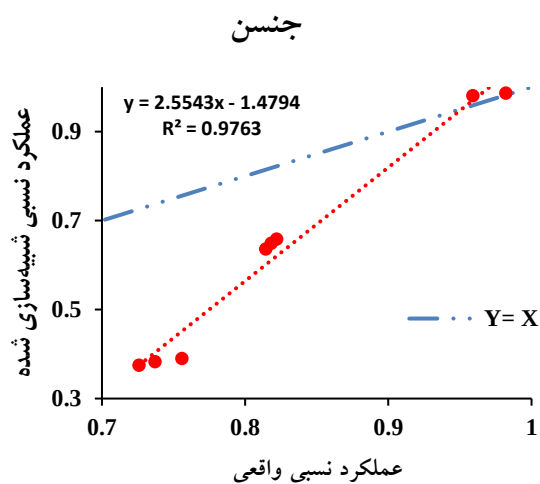
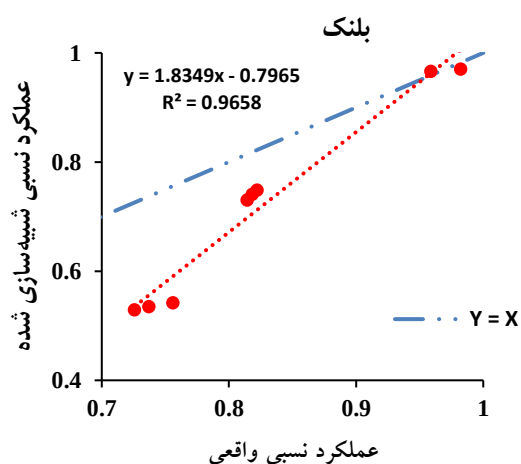
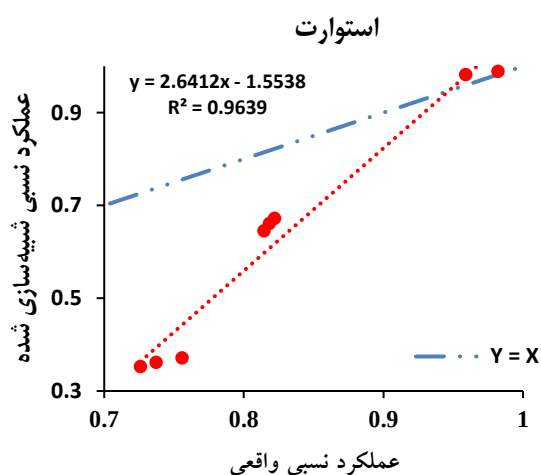
جدول ۱۱- معادلات تولیدشده برای انواع مدل‌های توابع تجربی بر اساس تبخیر و تعرق دوره‌ای در شرایط تنش آبی و کودی

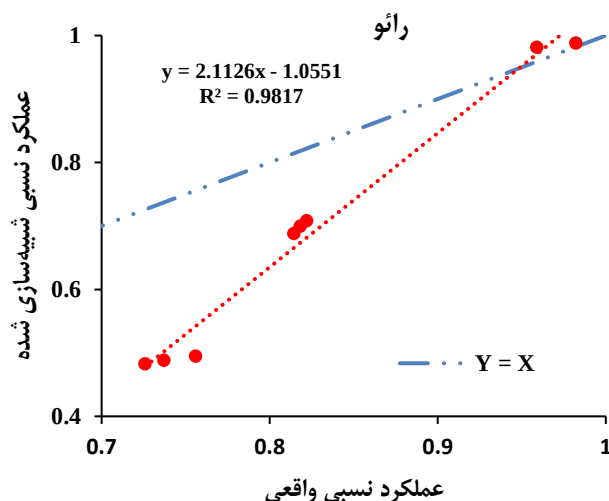
نام مدل	معادله مدل
بلنک	$\frac{y_s}{y_m} = 0.122 \left(\frac{ET_{s1}}{ET_{m1}} \right) + 0.494 \left(\frac{ET_{s2}}{ET_{m2}} \right) + 0.292 \left(\frac{ET_{s3}}{ET_{m3}} \right) + 0.070 \left(\frac{ET_{s4}}{ET_{m4}} \right)$
استوارت	$\frac{y_s}{y_m} = 1 - \left[0.248 \left(1 - \frac{ET_{s1}}{ET_{m1}} \right) + 0.632 \left(1 - \frac{ET_{s2}}{ET_{m2}} \right) + 0.440 \left(1 - \frac{ET_{s3}}{ET_{m3}} \right) + 0.159 \left(1 - \frac{ET_{s4}}{ET_{m4}} \right) \right]$
سینگ	$\frac{y_s}{y_m} = 0.125 \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{s1}}{ET_{m1}} \right)^2 \right) + 0.430 \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{s2}}{ET_{m2}} \right)^2 \right) + 0.277 \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{s3}}{ET_{m3}} \right)^2 \right) + 0.075 \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{s4}}{ET_{m4}} \right)^2 \right)$
جنسن	$\frac{y_s}{y_m} = \left(\frac{ET_{s1}}{ET_{m1}} \right)^{0.314} \times \left(\frac{ET_{s2}}{ET_{m2}} \right)^{0.822} \times \left(\frac{ET_{s3}}{ET_{m3}} \right)^{0.364} \times \left(\frac{ET_{s4}}{ET_{m4}} \right)^{0.127}$
رائو	$\frac{y_s}{y_m} = \left(1 - 0.353 \left(1 - \frac{ET_{s1}}{ET_{m1}} \right) \right) \times \left(1 - 0.594 \left(1 - \frac{ET_{s2}}{ET_{m2}} \right) \right) \times \left(1 - 0.419 \left(1 - \frac{ET_{s3}}{ET_{m3}} \right) \right) \times \left(1 - 0.179 \left(1 - \frac{ET_{s4}}{ET_{m4}} \right) \right)$

جدول ۱۲- نتایج ارزیابی اعتبار مدل‌های جمع‌پذیر و ضرب‌پذیر توابع تجربی

مدل	بیشینه خطای نسبی (ME)	ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)	ضریب تبیین (R^2)	شاخص نش- ساتکلیف (NS)	ضریب جرم باقی‌مانده (CRM)
بلنک	0.214*	0.162	0.966	-1.203	0.128
استوارت	0.384	0.303	0.964	-6.725	0.238
سینگ	0.075	0.052	0.805	0.773	0.019
چنسن	0.366	0.293	0.976	-6.217	0.235
رائو	0.261	0.206	0.982	-2.568	0.164

*: اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده اولویت انتخاب مدل‌ها بر اساس شاخص‌های آماری است





شکل ۵- مقایسه انواع مدل‌های جمع‌پذیر و ضرب‌پذیر در تخمین عملکرد نسبی ذرت در شرایط تنش آبی و کودی با خط $Y = X$

$$Yield \left(\frac{ton}{ha} \right) = 6.53 \times \left(\frac{ETs}{ETo} \right)^{0.384} \times \left(\frac{Fs}{Fo} \right)^{0.053} \quad (22)$$

همانند توابع جمع‌پذیر و ضرب‌پذیر تولید که با استفاده از مقادیر تبخیر و تعرق دوره‌ای به برآورد عملکرد می‌پرداختند، برای این سه نوع تابع تولید نیز آماره‌های صحت‌سنجی شامل حداکثر خطا، میانگین ریشه دوم خطا، ضریب تبیین، ضریب NS و ضریب باقی‌مانده محاسبه و سپس اعتبار توابع، ارزیابی و تابع بهینه معرفی شد. نتایج تحلیل آماری هر سه مدل نشان داد که ضریب رگرسیونی آب و کود معنی‌دار هستند. همچنین با توجه به فزونی ضریب رگرسیونی و آماره تی آب نسبت به ضریب کود، می‌توان نتیجه گرفت که عامل آب اثر بیشتری بر عملکرد نسبت به کود دارد. برای تأیید صحت این موضوع، یکبار دیگر میزان همبستگی اسپیرمن عملکرد با آب و کود مجدداً مورد آزمون قرار گرفت و نتایج نشان داد که عامل آب همبستگی بیشتری با عملکرد دارد و در نتیجه تأثیر آب بر عملکرد بیش‌تر از تنش کودی است و با توجه به جدول ۱۳ مدل ریشه دوم، مدل مناسب‌تری برای تخمین عملکرد در شرایط تنش آبی و کودی است و این موضوع با توجه به مقایسه شهودی این توابع با هم (شکل ۶) قابل‌پذیرش است.

مدل‌سازی توابع تجربی عملکرد ذرت بر اساس شدت تنش‌های آبی و کودی

کمبود مقادیر آب مورد نیاز گیاه (تنش آبی) و مقادیر سه کود ماکرو اولیه گیاه (NPK- تنش حاصلخیزی) هر دو از عوامل مؤثر بر کاهش عملکرد گیاهان هست. در این پژوهش اثرات دو فاکتور تنش آبی در سه سطح و همچنین تنش کودی در سه سطح با توابع تولید ریشه دوم، لگجستیک و توانی کاب- داگلاس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله منجر به خلق توابع تولید در شرایط مقادیر متفاوتی از تنش‌های آبی و کودی شد که با استفاده از آن‌ها می‌توان به برآورد عملکرد ذرت رسید. در رابطه‌های ۲۰، ۲۱ و ۲۲ این توابع به همراه ضرایب مربوط به هر فاکتور آن ارائه شده است.

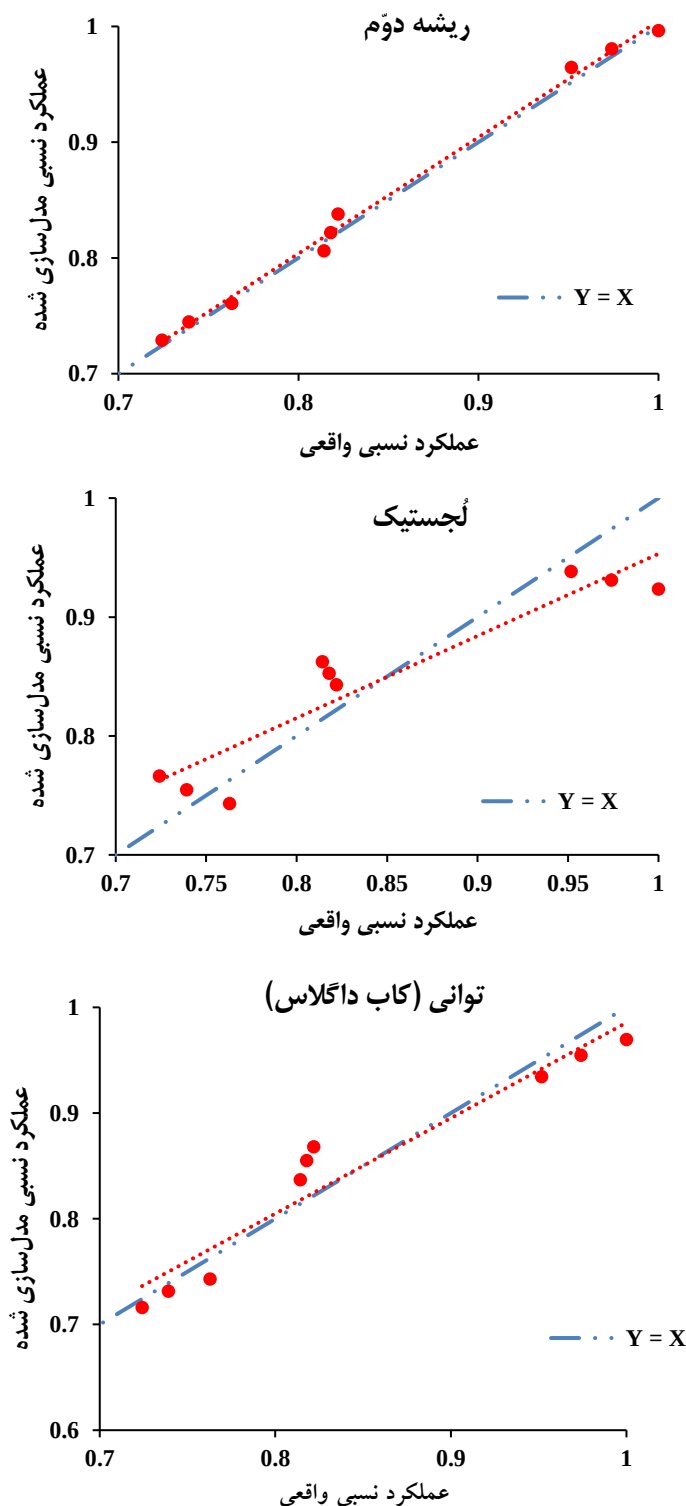
$$Yield \left(\frac{ton}{ha} \right) = 91.3 - 16.43 \times \left(\frac{ETs}{ETo} \right)^{0.5} + 1.2 \times \left(\frac{ETs}{ETo} \right) + 0.032 \times \left(\frac{Fs}{Fo} \right) \quad (20)$$

$$Yield \left(\frac{ton}{ha} \right) = \frac{56.41}{1 + 2.7182^{0.0019 \times \frac{Fs}{Fo} - 0.0174 \times \frac{ETs}{ETo}}} \quad (21)$$

جدول ۱۳- نتایج ارزیابی مدل‌های توابع تولید ذرت Sc.704 در منطقه مطالعاتی

مدل	بیشینه خطای نسبی (ME)	ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)	ضریب تبیین (R^2)	شاخص نش- ساتکلیف (NS)	ضریب جرم باقی مانده (CRM)
ریشه دوم	0.90 ⁽¹⁾	0.42 ⁽¹⁾	0.98 ⁽¹⁾	0.97 ⁽¹⁾	-0.0047 ⁽³⁾
لجستیک	3.85 ⁽³⁾	2.01 ⁽³⁾	0.87 ⁽³⁾	0.84 ⁽³⁾	-0.0013 ⁽²⁾
کاب داگلاس	2.33 ⁽²⁾	1.32 ⁽²⁾	0.93 ⁽²⁾	0.93 ⁽²⁾	-0.0006 ⁽¹⁾

*: اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده اولویت انتخاب مدل‌ها بر اساس شاخص‌های آماری است



شکل ۶- مقایسه توان تخمین سه مدل در عملکرد نسبی ذرت، تحت شرایط تنش همزمان آبی و کودی

نتیجه گیری

برآورد صحیح تبخیر و تعرق و نیاز کودی ذرت علوفه‌ای برای حصول به عملکرد بهینه و بر اساس منابع آب و کود موجود از اهمیت بسیاری برخوردار است. طبق نتایج این بررسی ET نسبی دوره‌ای ذرت در شرایط تنش‌های دوگانه آبی و کودی از تیمار W_0F_1 تا W_2F_2 از ۹۹/۲ تا ۴۶/۵ درصد در مرحله توسعه، ۹۹/۸ تا ۵۲/۹ درصد در مرحله میانی و ۹۹/۵ تا ۵۱/۲ درصد در مرحله پایانی را به خود اختصاص می‌دهد. این موضوع اهمیت مرحله توسعه را در کشت ذرت نشان می‌دهد. از سویی، مقدار عملکرد نسبی آن در تیمارهای یادشده در بازه ۹۷/۸ تا ۷۲/۵ درصد قرار گرفته است. همچنین مشخص شد که تفاوت معنی‌داری از نظر عملکرد بین سه تیمار W_1F_1 ، W_1F_0 و W_1F_2 مشاهده نشد؛ بنابراین در شرایط کمبود آب آبیاری تیمار W_1F_2 صرفه اقتصادی بهتری نسبت به سایر تیمارهای مورد پژوهش در این سطح تنش آبی (W_1) دارد. اما قابل ذکر است که اتخاذ این مدیریت تنشی دوگانه در سال‌های بعد می‌تواند منجر به کاهش عملکرد، با توجه به چالش‌های که در حاصلخیزی خاک ممکن است پیش بیاید، بشود.

تنش‌های آبی و کودی هر کدام اثرات خود را به تنهایی در تولید محصول نشان می‌دهند. تنش آبی باعث کاهش مقدار پتانسیل آب موجود در خاک و به تبع آن، موجب کاهش جذب آب و تبخیر و تعرق گیاه می‌شود و برآیند تمامی این اثرات در کاهش تولید بیوماس و عملکرد محصول منعکس می‌شود و تنش حاصلخیزی از نوع کودی آن نیز باعث اختلال در فرآیند رشد و نمو گیاه می‌شود. در این میان، با توجه به تحلیل آماری انجام‌شده تنش آبی نسبت به تنش کودی تأثیر بیشتری بر عملکرد تر دارد؛ بنابراین، آبیاری و مصرف کودهای شیمیایی دو عامل کلیدی در تولید محصول هستند که تأثیر مستقیمی بر عملکرد گیاه دارند و برقراری تعادل میان آبیاری و مصرف کودهای شیمیایی به معنای استفاده بهینه و مؤثر از منابع آب و مواد مغذی برای رشد و توسعه گیاه است.

از سوی دیگر با در نظر گرفتن مدل‌سازی عملکرد نسبی بر اساس تبخیر و تعرق نسبی در مراحل رشد می‌توان مطرح نمود که در هر مرحله از رشد گیاه که نسبت به تیمارهای تنش حساس‌تر باشد، مقدار ضریب حساسیت آن مرحله در مدل بیش‌تر می‌شود. به‌طوری‌که در مرحله حساس توسعه رشد، تأثیر تنش‌ها بر کاهش مقدار ET گیاه و عملکرد محصول بیش‌تر بود.

در این پژوهش نتایج اعتبارسنجی مدل‌ها نشان داد که از میان مدل‌های جمع‌پذیر، مدل سینگ و از میان مدل‌های ضرب‌پذیر، مدل راثو تخمین بهتری برای عملکرد نسبی ذرت در شرایط تنش آبی و کودی ارائه می‌کند و در نهایت با تعیین سه رابطه رگرسیونی دو متغیر که شامل میزان درصد کاهشی از رطوبت FC خاک و میزان بهینه عناصر ماکرو NPK است، منجر به تعیین برآورد عملکرد ذرت علوفه‌ای شد و نتیجه آن، منجر به مناسب بودن عملکرد تابع ریشه دوم با عملکرد واقعی در منطقه مورد مطالعه بود. در ارتباط با نکات کاربردی در مدیریت تنش‌های توأمان آبی و کودی می‌توان به موارد زیر اشاره داشت:

- ۱- برنامه‌ریزی مناسب آبیاری: بر اساس نیاز آبی گیاه ذرت و شرایط خاک، برنامه‌ریزی منظم برای آبیاری صحیح و به‌موقع، انجام گیرد.
- ۲- استفاده بهینه از کودها: بر اساس آزمون حاصلخیزی خاک و نیازهای تغذیه‌ای ذرت، از کودهای شیمیایی یا ارگانیک مناسب استفاده شود و اطمینان حاصل شود که مقدار و زمان استفاده از کودها به‌موقع باشد تا از هدررفت مواد مغذی جلوگیری شود و عملکرد گیاه به حداکثر برسد.
- ۳- تنظیم چرخه کشت: استفاده از روش تناوب زراعی با گیاهانی که نیاز مشابهی به مواد تغذیه‌ای ذرت دارند می‌تواند از تخریب ساختمان خاک جلوگیری کرده و کیفیت خاک را حفظ کند. همچنین انتخاب گیاهان کمک‌کننده به تثبیت نیتروژن باعث بهبود عملکرد فیزیکی خاک و کاهش نیاز به کودهای شیمیایی به‌خصوص از نوع ازته می‌شود.

تشکر و قدردانی

با نهایت احترام و قدردانی، از جناب آقای کامران زرگریعقوبی، مدیر محترم مجموعه کشاورزی و دامداری علی آباد فشافویه، به دلیل حمایت‌های بی دریغ، در اختیار گذاشتن امکانات اجرایی و فراهم سازی بستر مناسب برای انجام این پژوهش، صمیمانه سپاسگزاری می‌کنم. بی تردید، همراهی دلسوزانه و نگاه علمی ایشان، نقش بسیار مهمی در پیشبرد این پژوهش داشته است. همچنین وظیفه خود می‌دانم از دوستان گرامی‌ام، جناب آقایان نصرت خانزاده و اکبر صدقی‌پور، به خاطر همکاری ارزشمندشان در بهره‌گیری از ماشین‌آلات کشاورزی و ارائه توصیه‌های عملی و فنی در جریان اجرای طرح، صمیمانه تشکر کنم. همراهی دقیق و صمیمی این دو بزرگوار در مراحل میدانی، سهم بسزایی در اجرای منظم و موفق این پژوهش داشته است.

۴- مدیریت علف‌های هرز: کنترل و مدیریت علف‌های هرز باعث کاهش رقابت با گیاه ذرت برای مواد مغذی و آب می‌شود و عملکرد آن را بهبود می‌بخشد.

۵- پایش و کنترل بیماری‌ها و آفات: انجام پایش دقیق و منظم در مزرعه به منظور تشخیص زودهنگام بیماری‌ها و آفت‌ها و اعمال اقدامات احتیاطی برای جلوگیری از گسترش آن‌ها و همچنین استفاده از روش‌های مدیریت تلفیقی مانند کنترل بیولوژیکی، کنترل مکانیکی و استفاده از کودهای ارگانیک برای کاهش آسیب‌های ناشی از بیماری‌ها و آفت‌ها بسیار مؤثر هستند.

با رعایت این نکات کاربردی، می‌توان مدیریت بهینه‌ای برای تنش‌های هم‌زمان آبی و کودی در مزرعه ذرت ایجاد کرد و عملکرد و کیفیت محصول را بهبود بخشیده و به حفظ محیط زیست و منابع طبیعی کمک کرد.

فهرست منابع

۱. زرگریعقوبی، فرامرز، سرائی تبریزی، مهدی، محمدی ترکشوند، علی، اسفندیاری، مهرداد و رضوانی‌اعتدالی، هادی، ۱۴۰۱. ارزیابی اثر تنش‌های توأمان آبی و شوری در برآورد عملکرد بیولوژیکی ذرت علوفه‌ای از طریق تبخیر و تعرق دوره‌ای. نشریه آب و خاک، ۳۶ (۶). صص. ۶۹۳-۶۷۷.
۲. سپهری، علی، مدرس‌ثانوی، علی محمد، قره‌یاضی، بهزاد، ویمینی، یدالله، ۱۳۸۱. تأثیر تنش آب و مقادیر مختلف نیتروژن بر مراحل رشد و نمو، عملکرد و اجزاء عملکرد ذرت. نشریه علوم زراعی ایران. ۴ (۳). صص. ۲۰۱-۱۸۴.
۳. سرائی تبریزی، مهدی، بابازاده، حسین، همائی، مهدی، کاوه، فریدون، و پارس‌نژاد، مسعود، ۱۳۹۵. توسعه و ارزیابی چند مدل اشتقاقی برای مدل‌سازی تنش توأم کمبود و نیتروژن. نشریه دانش آب و خاک، ۲۶ (۳). صص. ۲۸۷-۲۹۹.
۴. فرحبخش، مهشاد، سرائی تبریزی، مهدی، و بابازاده، حسین، ۱۳۹۸. برآورد نیاز آبی گیاه ریحان برای مدیریت آب در مزرعه. پژوهش آب در کشاورزی، ۳۳ (۱). صص. ۵۳-۶۶.
۵. بابازاده، حسین، و سرائی تبریزی، مهدی، ۱۳۹۶. مدل‌سازی واکنش گیاهان به تنش‌های محیطی (تئوری و عملی). انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ۱۸۷ صفحه.
6. Arif, M., Marwat, K.B. and Khan, M.A., 2007. Effect of tillage and zinc application methods on weeds and yield of maize. *Pakistan Journal of Botany*, 39(5), pp.1583-1591.
7. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, pp.1-326.
8. Babazadeh, H., Sarai Tabrizi, M. and Homaei, M., 2017. Basil root water uptake derived models under combined water and nitrogen deficit conditions. *Irrigation and Drainage*, 66(3), pp.377-386. <https://doi.org/10.1002/ird.2104>

9. Farahbakhsh, M., Sarai Tabrizi, M. and Babazadeh, H., 2023. Determining basil production functions under simultaneous water, salinity, and nitrogen stresses. *Applied Water Science*, 13(68), pp.1–12. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01849-3>
10. Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H. and Arnold, J.G., 2007. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4), pp.1211–1250. doi: 10.13031/2013.23637
11. Hao, X., Chang, C. and Lindwall, C.W., 2001. Tillage and crop sequence effects on organic carbon and total nitrogen content in an irrigated Alberta soil. *Soil and Tillage Research*, 62(3–4), pp.167–169. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00222-7](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00222-7)
12. Izaurrealde, R.C., Feng, Y., Robertson, J.A., McGill, W.B., Juma, N.G. and Olson, B.M., 1995. Long-term influence of cropping systems, tillage methods, and N sources on nitrate leaching. *Canadian Journal of Soil Science*, 75(4), pp.497–505. <https://doi.org/10.4141/cjss95-071>
13. Jamieson, P.D., Porter, J.R. and Wilson, D.R., 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research*, 27(4), pp.337–350. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(91\)90040-3](https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90040-3)
14. Moser, S.B., Feil, B., Jampatong, S. and Stamp, P., 2006. Effects of pre-anthesis drought, nitrogen fertilizer rate, and variety on grain yield, yield components, and harvest index of tropical maize. *Agricultural Water Management*, 81(1–2), pp.41–58. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.04.005>
15. Moles, T.M., Pompeiano, A., Reyes, T.H., Scartazza, A. and Guglielminetti, L., 2016. The efficient physiological strategy of tomato landrace in response to short-term salinity stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 109, pp.262–272. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.10.008>
16. Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models, part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), pp.282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
17. Patil, S.L. and Sheelavantar, M.N., 2006. Soil water conservation and yield of winter sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) as influenced by tillage, organic materials, and nitrogen fertilizer in semi-arid tropical India. *Soil and Tillage Research*, 89(2), pp.246–257. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.07.013>
18. Roberts, R.K., Howard, D.D., Gwathmey, C.O. and Sleigh, D.E., 1999. Economics of broadcast and injected nitrogen on no-till cotton produced at three locations in Tennessee. *Journal of Cotton Science*.
19. Zargar Yaghoubi, F., Sarai Tabrizi, M., Mohammadi Torkashvand, A., Esfandiari, M. and Ramezani Etedali, H., 2024. The effects of drought, and salinity on KS and RAW managerial coefficients in the efficient water management in maize farms. *Applied Water Science*, 14(8), p.177. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02229-9>
20. Zorita, M.D., 2000. Effect of deep-tillage and nitrogen fertilization interactions on dryland corn (*Zea mays* L.) productivity. *Soil and Tillage Research*, 54(1–2), pp.11–19. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00100-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00100-2)
21. Zotarelli, L., Dukes, M.D., Scholberg, J.M.S., Muñoz-Carpena, R. and Icerman, J., 2009. Tomato nitrogen accumulation and fertilizer use efficiency on sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling. *Agricultural Water Management*, 96(8), pp.1247–1258. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.019>