University of Birjand

Environmental Stresses in Crop Sciences

Journal homepage: https://escs.birjand.ac.ir

19(2), 357-372 (2026)

https://doi.org/10.22077/escs.2025.8840.2338

Original article

Effects of different irrigation levels on biochemical traits, yield and yield components of maize (*Zea mays* L.) under conservation and conventional tillage systems

Nezam Karzani[1], Ehsan Zeidali[2], Yaser Alizadeh[2*], Hamzeh Ali Alizadeh[3], Ekhlas Amini[4]

1. *Ph.D. student of Crop Ecology, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran*
2. *Assistant Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran*
3. *Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, Iran*
4. *PhD in Crop Ecology, Ilam Agricultural Jihad Organization, Ilam, Iran*

Received 27 January 2025; Revised 14 March 2025; Accepted 21 March 2025

Extended abstract

Introduction

Water stress is a primary limiting factor for plant growth and crop productivity. Given the scarcity of water resources in Iran and the need to enhance water use efficiency (WUE), various deficit irrigation strategies have become essential for sustainable agricultural water management. Regulated deficit irrigation (RDI) and partial root-zone drying (PRD) are two important management approaches under water-limited conditions. Conservation tillage is a fundamental practice in conservation agriculture that can effectively mitigate the adverse impacts of water stress on plant growth and yield. In agroecosystems, conservation tillage enhances crop productivity and promotes sustainability while conserving water resources and improving environmental quality. Therefore, this study aimed to evaluate the responses of maize yield, yield components, and biochemical traits to different tillage systems and irrigation regimes in Ilam.

Materials and methods

The field experiment was conducted as a split-plot arrangement within a randomized complete block design with three replications at the research farm of the Faculty of Agriculture, Ilam University, during the 2022–2023 growing season. The main plots consisted of three tillage levels (no-tillage, minimum tillage, and conventional tillage), while the subplots included five irrigation regimes (irrigation at 100, 75, and 50% of soil field capacity, and variable PRD at 75 and 50% of soil field capacity).

Results and discussion

Significant interaction effects of the studied factors were observed on grain yield, biological yield, total phenols, and ear height. Increasing the irrigation level from 50% to 100% field capacity significantly improved the number of rows per ear, 100-grain weight, and both grain and biological yields. The highest grain and biological yields were obtained under irrigation at 100% of soil field capacity combined with conventional tillage (11,479 and 24,623 kg ha^{-1}, respectively), likely due to improved soil structure, enhanced root development, and reduced competition for water uptake. Also, the highest 100-grain weight (30.24 g) was recorded under full irrigation conditions. The maximum number of rows per ear (15.62), harvest index (46.62%), and chlorophyll content (a, b, and total: 13.1, 9.25, and 22.36 mg g^{-1}

* Corresponding author: Yaser Alizadehi; E-Mail: y.alizadeh@ilam.ac.ir

© 2026, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

FW, respectively) were recorded under 100% irrigation. Chlorophyll a, b, and total contents were higher under 50% PRD irrigation compared to 50% deficit irrigation. The highest carotenoid content was recorded under 50% deficit irrigation (3.56 mg g^{-1} FW) and under conventional tillage (3.34 mg g^{-1} FW). Water deficit decreased chlorophyll content and increased carotenoids, indicating a physiological response of the plant to water stress. Total phenol content also increased under drought stress, indicating plant adaptation to adverse environmental conditions. The highest total phenol content (6.88 mg gallic acid g^{-1} FW) was observed under conventional tillage combined with 75% PRD irrigation. Furthermore, cob height reached its maximum under no-tillage conditions at both 75% and 100% irrigation levels (105.8 and 105.67 cm, respectively), with no significant difference between these two treatments. The no-tillage system outperformed other tillage treatments under deficit irrigation by enhancing soil moisture retention, thereby promoting higher dry matter accumulation.

Conclusion

The findings indicate that irrigation levels and tillage systems significantly affect maize agronomic and biochemical traits. Under deficit irrigation conditions, the best performance was achieved with PRD. Integrating PRD with a no-tillage system can enhance water use efficiency and promote dry matter accumulation. Furthermore, preserving natural soil structure and crop residues improves soil moisture retention, thereby mitigating the adverse impacts of drought stress.

Keywords: Conservation agriculture, Drought stress, Phenolic compounds, Photosynthetic pigments, Root zone irrigation

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد نوزدهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۵

https://doi.org/10.22077/escs.2025.8840.2338

مقاله پژوهشی

اثر سطوح مختلف آبیاری بر صفات بیوشیمیایی، عملکرد و اجزای عملکرد ذرت (*Zea mays* L.) در سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی و متداول

نظام کارزانی[۱]، احسان‌اله زیدعلی[۲]، یاسر علیزاده[۲*]، حمزه‌علی علیزاده[۳]، اخلاص امینی[۴]

۱. دانشجوی دکتری اکولوژی گیاهان زراعی، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام
۲. استادیار گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام
۳. استادیار گروه آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام ، ایلام
۴. دکتری اکولوژی گیاهان زراعی، سازمان جهاد کشاورزی ایلام، ایلام

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
آبیاری ناحیه‌ای ریشه
ترکیبات فنولی
تنش خشکی
رنگیزه‌های فتوسنتزی
کشاورزی حفاظتی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱

تاریخ انتشار:
تابستان ۱۴۰۵
۱۹(۲): ۳۵۷-۳۷۲

چکیده

به‌منظور بررسی اثر سطوح مختلف آبیاری بر عملکرد و خصوصیات بیوشیمیایی گیاه ذرت تحت شرایط خاک‌ورزی حفاظتی و متداول آزمایشی به‌صورت کرت‌های خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال ۱۴۰۲ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه ایلام انجام شد. کرت‌های اصلی شامل: سه سطح خاک‌ورزی (بی‌خاک‌ورزی، کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی متداول) و کرت‌های فرعی شامل: پنج رژیم آبیاری ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی خاک به‌صورت کامل و ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی خاک به‌صورت PRD متغیر بود. روش آبیاری مورد استفاده از نوع سیستم آبیاری قطره‌ای–نوار تیپ استفاده گردید. نتایج نشان داد که بیشترین عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک تحت شرایط خاک‌ورزی متداول (به‌ترتیب ۱۱۴۷۹ و ۲۴۶۲۳ کیلوگرم در هکتار) به‌دست آمد؛ همچنین بیشترین تعداد ردیف در بلال (۱۵/۶۲)، بالاترین شاخص برداشت (۴۴/۶۲ درصد) و بیشترین میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل (به‌ترتیب ۱۳/۱، ۹/۲۵ و ۲۲/۳۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد به‌دست آمد. سطوح آبیاری ۷۵ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی تحت شرایط بدون خاک‌ورزی دارای بیشترین ارتفاع استقرار بلال (به‌ترتیب ۱۰۵/۸ و ۱۰۵/۶۷ سانتیمتر) بودند. بیشترین میزان کاروتنوئید در سطح آبیاری ۵۰ درصد کم آبیاری (۳/۵۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) و در خاک‌ورزی متداول نیز (۳/۳۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) حاصل شد. نتایج کلی این پژوهش نشان داد علاوه بر آبیاری ۱۰۰ درصد، آبیاری در سطح ۷۵ درصد ظرفیت زراعی هم می‌تواند عملکرد بالا و قابل‌توجهی داشته باشد و هم در مصرف آب صرفه‌جویی شود؛ همچنین از میزان عملکرد دانه، کلروفیل، کاروتنوئید و فنول کل برای بررسی واکنش‌های ذرت به روش خاک‌ورزی و تنش آبی بهره برد.

مقدمه

در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، تولید محصولات زراعی با چالش کمبود آب و تأثیر آن بر گیاهان به شکل تنش خشکی مواجه است (Bazrgar et al., 2023). تنش کم‌آبی یکی از عوامل محدودکننده رشد و عملکرد گیاهان است. این تنش، فرایندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی را مختل کرده و مانع از توسعه و بهره‌وری گیاه می‌شود (Gheysari et al 2009; Seleiman et al., 2021).

همچنین عملکرد گیاهان زراعی را به میزان قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهد و به طور متوسط، باعث کاهش ۵۰ درصدی عملکرد آن‌ها می‌شود (Wang et al., 2003). با توجه به وضعیت منابع آبی کشور و تلاش برای تولید محصولات بیشتر در واحد حجم آب، روش‌های مختلف مدیریت کم آبیاری از مهمترین رویکردهای مدیریت آب در این بخش است. کم

* نگارنده پاسخگو: یاسر علیزاده. پست الکترونیک: y.alizadeh@ilam.ac.ir

آبیاری کنترل شده RDI[1] و خشک کردن موضعی ریشه PRD[2]دو رویکرد مدیریتی مهم در شرایط کم آبی هستند (Saeedinia et al., 2018). در شرایط تنش خشکی به دلیل کاهش تنفس و کاهش تولید انرژی در سلول، ساخت رنگیزه‌های فتوسنتزی کاهش می‌یابد و این امر همراه با تخریب رنگیزه‌ها (ناشی از تنش اکسیداتیو ایجاد شده) سبب کاهش شدید مقادیر رنگیزه‌های فتوسنتزی می‌شود (La lor and Cornic, 2012). نصر اله زاده اصل و همکاران (Nasrollehzadeh Asl, et al., 2017) گزارش کردند تنش خشکی باعث کاهش کلروفیل (a+b) تا ۱۵/۷۱ درصد می‌گردد. گیاهان قادرند با تولید ترکیبات آنتی‌اکسیدانی نظیر ترکیبات فنولی و کاروتنوئیدها، از ساختار سلولی خود در برابر رادیکال‌های آزاد که در شرایط تنش ایجاد می‌شوند، محافظت کنند (Bettaieb et al., 2011). پلی‌فنول‌ها، به‌عنوان یکی از متابولیت‌های ثانویه گیاهی، ترکیبات فعالی هستند که در شرایط آزمایشگاهی خواص آنتی‌اکسیدانی قابل‌توجهی از خود نشان می‌دهند. این ترکیبات قادرند به‌طور مؤثری فعالیت گونه‌های فعال اکسیژن، رادیکال‌های هیدروکسیل و نیتروژن را مهار کنند. از جمله مهم‌ترین انواع پلی‌فنول‌ها می‌توان به فلاونوئیدها و اسیدهای فنولی اشاره کرد (Di Domenico et al., 2012).

خاک‌ورزی حفاظتی، یکی از روش‌های ضروری در کشاورزی حفاظتی است که می‌تواند تأثیر تنش آبی بر رشد و عملکرد گیاهان را کاهش دهد. در اکوسیستم‌های زراعی، این نوع خاک‌ورزی نه‌تنها به حفظ و بهبود منابع آب و محیط‌زیست کمک می‌کند، بلکه باعث افزایش تولید محصولات و پایداری آن نیز می‌شود (FAO, 2014). خاک‌ورزی حفاظتی به روشی اطلاق می‌شود که در پی اجرای آن، پس از پایان دوره کشت، ۳۰ درصد از سطح خاک با بقایای گیاهی پوشانده می‌شود (Jarecki and Lal, 2003). در سیستم خاک‌ورزی حفاظتی میزان ورودی مواد آلی افزایش می‌یابد (Hu and Cao, 2007). بقایای گیاهان می‌توانند با جایگزینی یا تأمین عناصر غذایی در خاک، به حفظ باروری آن کمک کنند. این بقایا موجب افزایش غلظت مواد آلی در خاک، حفظ رطوبت، کاهش تبخیر، تحریک فعالیت‌های میکروبی، بهبود دانه‌بندی، کاهش نوسانات دمایی و ارتقاء ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک می‌شوند. همچنین، آن‌ها می‌توانند قدرت شخم‌پذیری خاک را نیز بهبود بخشند (Salehi et al., 2011). بی‌خاک‌ورزی به‌دلیل تأثیر مستقیمی که بر خاک دارد، قادر است ویژگی‌های فیزیکی و فرآیندهای دینامیکی خاک را در طول زمان و در مکان‌های مختلف تغییر دهد (Strudley et al., 2008). بر اساس مطالعات انجام شده توسط جین و همکاران (Jin et al., 2009) مشخص شده است که سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی نه تنها عملکرد دانه مناسبی را به همراه دارند، بلکه می‌توانند مصرف آب گیاه را تا ۱۵/۸درصد کاهش دهند.

این پژوهش باتوجه‌به محدودیت منابع آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، با بررسی سطوح مختلف آبیاری به دنبال ارائه راهکارهایی برای بهینه‌سازی مصرف آب و انواع خاک‌ورزی به‌منظور شناسایی بهترین روش برای حفظ رطوبت خاک و بهبود خصوصیات بیوشیمیایی و عملکرد ذرت خواهد بود.

مواد و روش‌ها

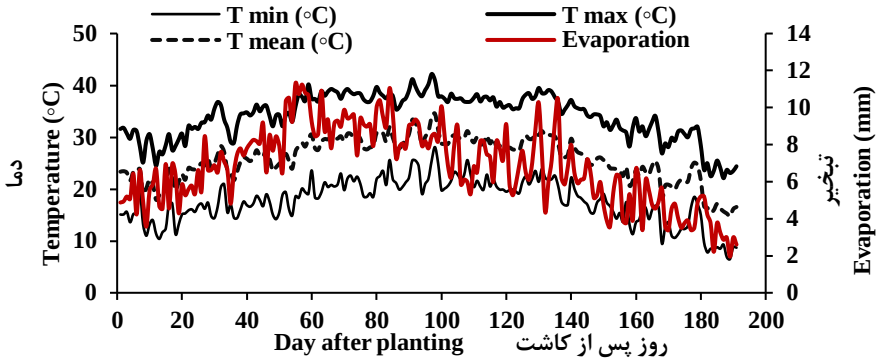
این آزمایش در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ایلام با عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۳۹ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۲۲ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۱۷۴ متر از سطح دریا اجرا شد. آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. کرت‌های اصلی شامل: سه سطح خاک‌ورزی (بدون خاک‌ورزی، خاک‌ورزی حداقل و خاک‌ورزی متداول) و کرت‌های فرعی شامل: پنج رژیم آبیاری ۱۰۰ ، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی خاک به‌صورت کامل و ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی خاک به‌صورت PRD متغیر بود. در طول فصل رشد مجموع تبخیر پتانسیل ۱۳۰۰ میلی‌متر و میانگین دمای حداقل و حداکثر در طول دوره رشد، به‌ترتیب ۱۷/۷ و ۳۴/۱ درجه سانتی‌گراد بود (شکل ۱). در جدول ۱ نیز مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد مطالعه ارائه شده است.

مزرعه سال قبل از اجرای آزمایش زیر کشت گندم بود و در بهار سال ۱۴۰۲ اقدام به آماده‌سازی زمین گردید و بر اساس تیمارهای خاک‌ورزی زمین شخم زده شد. برای خاک‌ورزی متداول با استفاده از گاوآهن برگردان‌دار تا عمق

[1] Regulated deficit irrigation

[2] Partial root zone drying

۳۰ -۲۵ سانتی‌متری زمین (بدون بقایای گیاهی) شخم زده و سپس با استفاده از دیسک، کلوخه‌های سطح مزرعه خرد و زمین را تسطیح نموده و با فاروئر اقدام به تهیه جوی و پشته برای کشت ذرت گردید. در کم‌خاک‌ورزی زمین با استفاده گاوآهن قلمی تا عمق ۳۰- ۲۵ سانتی‌متری شخم زده شد به‌طوری‌که ۵۰ درصد بقایا در سطح خاک باقی ماند. در تیمار بدون خاک‌ورزی زمین بدون اعمال شخم و با پوشش ۱۰۰ درصدی بقایای گیاهی برای کشت مورد استفاده قرار گرفت. اندازه کرت‌های فرعی ۲×۲ مترمربع و چهار ردیف به فاصله ۵۰ سانتی‌متر بودند. فاصله بین بلوک‌ها، کرت‌های اصلی و فرعی به ترتیب ۲، ۲ و ۱ متر در نظر گرفته شد. بذور ذرت (رقم ای‌استار گروه فائو ۶۰۰) در ۱۰ خرداد ماه سال ۱۴۰۲ با فاصله ۲۰ سانتی‌متر از همدیگر و در عمق دو سانتی‌متری در ردیف‌های کاشت با تراکم ۱۰ بوته در مترمربع به‌صورت دستی کشت گردید. به‌منظور اعمال صحیح و یکنواخت آبیاری واحدهای آزمایشی، آبیاری مزرعه با استفاده از نوار تیپ انجام شد و میزان آب مصرفی توسط کنتور اندازه‌گیری شد. تا زمان استقرار کامل گیاهان، همه کرت‌ها به‌میزان یکسان آبیاری شدند و پس از آن اعمال سطوح مختلف آبیاری آغاز شد.



شکل ۱. حداقل، حداکثر و متوسط دمای روزانه و میزان تبخیر در طول دوره رشد ذرت در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱

Fig. 1. Minimum, maximum, and mean daily temperature and evaporation rate during the growing period of maize, the crop year 2021-2022

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش (عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک)

Table 1. Physical and chemical characteristics of experimental field soil (soil depth 0-30 cm)

اسیدیته	هدایت الکتریکی	شن	سیلت	رس	بافت خاک	کربن آلی	نیتروژن	فسفر	پتاسیم
PH	EC ()	Sand	Silt	Clay	Soil Texture	Organic Carbon	N	P	K
	$ds.m^{-1}$	----------%----------				----------%----------		-------ppm-------	
7.41	0.185	27	45.5	27.5	لومی رسی Clay-loam	0.838	0.072	6.33	471.01

در هر مرحله از آبیاری به‌منظور تعیین میزان آب مصرفی، پیش از آبیاری از دستگاه TDR مدل R2V/6 ساخت شرکت Delta –T بر اساس رابطه ۱برای اندازه‌گیری رطوبت خاک استفاده شد.

$$\theta_0=1.087\times\theta_{TDR}-0.03 \qquad [۱]$$

دراین‌رابطه، θ_0 رطوبت اندازه‌گیری شده و θ_{TDR} رطوبت قرائت شده با دستگاه TDR است. سپس حجم آب آبیاری برای سطح ۱۰۰ درصد نیاز آبی هر یک از تیمارها از رابطه ۲ محاسبه شد. برای سایر سطوح حجم آب آبیاری از حاصل‌ضرب ضریب تنش آبی در رابطه ۲ محاسبه شد.

$$V=(\theta_{FC}-\theta)\times\rho_b\times D_r\times A \qquad [۲]$$

دراین‌رابطه، V حجم آب ورودی بر حسب مترمکعب، θ_{FC} درصد رطوبت وزنی در حد ظرفیت مزرعه، θ درصد رطوبت وزنی قبل از آبیاری، ρb وزن مخصوص ظاهری خاک بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب، Dr عمق توسعهٔ ریشه بر حسب متر و A مساحت آبیاری شده بر حسب مترمربع است (θ_{FC}=۲۴، θ =۱۰، ρb =۱/۳ و Dr =۵۵). (میزان آب مصرفی در جدول ۲ ارائه شده است).

جهت اندازه‌گیری غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی شامل کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئید،

نمونه‌گیری در مرحله گلدهی انجام گردید و از روش هیسکوکس و ایسرائیلستام (Hiscox and Israelstam, 1979) استفاده شد. برای سنجش فنول کل، روش فولین – سینگلتون با کمی تغییرات (Singleton and Rossi, 1965) انجام شد ابتدا ۰/۱ گرم اسید گالیک با متانول به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده و به آن محلول ۱۰ درصد فولین و کربنات سدیم ۷/۵ درصد اضافه شد. محلول به‌دست‌آمده به مدت یک ساعت در تاریکی در دمای اتاق نگهداری شد و بعد از آن میزان جذب با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول‌موج ۷۶۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید. در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک، صفات زراعی ذرت شامل ارتفاع استقرار بلال، تعداد ردیف دانه در بلال روی ۵ بوته از هر کرت اندازه‌گیری و میانگین آنها محاسبه شد. برای تعیین عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت و وزن صد دانه در ذرت سطحی معادل یک مترمربع با لحاظ اثر حاشیه، برداشت شد.

برای تجزیه واریانس داده‌ها از نرم‌افزار SAS (ver 9.4) و مقایسه میانگین داده‌ها با آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح ۵٪ انجام شد برای رسم نمودارها از نرم افزار Excel استفاده شد.

جدول ۲. حجم آب مصرفی هر یک از تیمارها طی فصل رشد (متر مکعب در هکتار)

Table 2. Volume of water consumed by treatments during the growing season (Cubic meters per hectare)

سطوح آبیاری			Irrigation levels	
۱۰۰ درصد نیاز آبی 100% of the water requirement	۷۵ درصد نیاز آبی 75% of the water requirement	۵۰ درصد نیاز آبی 50% of the water requirement	۷۵درصد PRD نیاز آبی 75% PRD of the water requirement	۵۰ درصد PRD نیاز آبی 50% PRD of the water requirement
				تیمارهای آبیاری Irrigation treatments
8873	6655	4436.5	6655	4436.5	حجم آب مصرفی Volume of water consumed

نتایج و بحث

تعداد ردیف در بلال

نتایج تجزیه واریانس نشان داد تعداد ردیف در بلال در سطح ۱ درصد تحت‌تأثیر سطوح آبیاری معنی‌دار شد (جدول ۳). باتوجه‌به نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، بیشترین تعداد ردیف در بلال در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک و کمترین تعداد ردیف در بلال در آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی خاک به دست آمد (جدول ۴).

در واقع کاهش سطح آبیاری از ۱۰۰ به ۵۰ درصد ظرفیت زراعی مزرعه موجب کاهش ۱۶/۰۷ درصدی تعداد ردیف در بلال گردید. این کاهش ناشی از اختلال در تقسیم سلولی و رشد سلول‌ها در مریستم انتهایی بلال، کاهش انتقال کربوهیدرات‌ها به دلیل محدودیت فتوسنتز (Gianquinto et al., 2003) و تسریع در پیری برگ‌ها و کوتاه‌شدن دوره پرشدن دانه می‌باشد (Mousavi et al., 2015). آبیاری ۷۵ درصد تنها ۴/۴ درصد کاهش تعداد ردیف در بلال نسبت به آبیاری ۱۰۰ درصد نشان می‌دهد که نشانگر تحمل نسبی ذرت به تنش ملایم خشکی است. آبیاری ۵۰ درصد PRD نسبت به آبیاری ۵۰ درصد معمولی سبب افزایش ۵/۴ درصد در تعداد ردیف‌ها گردید. به نظر می‌رسد بهبود این روند به دلیل القای پاسخ‌های هورمونی مانند افزایش آبسیزیک اسید برای تنظیم بازکردن روزنه‌ها، فعال‌سازی مسیرهای سیگنال دهی تحمل به خشکی در ریشه‌های در معرض تنش خشکی و توزیع بهینه منابع آبی در سیستم ریشه‌ای می باشد. آبسیزیک اسید نقش مهمی در تنظیم تعرق و بهبود کارایی مصرف آب دارد. تیمارهای آبیاری PRD، ۷۵ و ۵۰ درصد نتایج بینابینی داشتند. محققین گزارش نمودند که کاهش آبیاری از ۱۰۰ به ۸۰ درصد نیاز آبی، باعث کاهش ۱۰ درصدی و از ۱۰۰ به ۶۰ درصد نیاز آبی، باعث کاهش ۱۷ درصدی در تعداد ردیف در بلال گردید (Hossein Niya et al., 2017). نتایج پژوهش دیگری نشان داد که با کاهش مقدار آب آبیاری، تعداد ردیف بلال نیز کاهش یافت (Ebrahimi et al., 2022).

جدول ۳. تجزیه واریانس تأثیر سطوح مختلف آبیاری بر صفات زراعی ذرت در شرایط خاک‌ورزی حفاظتی

Table 3. Variance analysis of the effect of different levels of irrigation on the agricultural traits of corn under conservation tillage conditions

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	تعداد ردیف در بلال No.of row per ear	ارتفاع استقرار بلال Ear position	وزن صد دانه 100 Grain weight	عملکرد دانه Grain yield	عملکرد بیولوژیک Biologic yield	شاخص برداشت Harvest index
بلوک Block	2	1.638^{ns}	297.360**	16.726**	14563552.36**	39180534**	94.388**
خاک‌ورزی Tillage	2	3.894^{ns}	1359.403**	8.251^{ns}	2792829.09**	17068541.8*	34.207^{ns}
خطای a Error a	4	0.238	54.126	6.7488	685931.02	9380029.2	27.423
سطوح آبیاری Irrigation Level	4	8.595**	53.583 ^{ns}	22.008*	20614800.81**	76040622.6**	46.291*
خاک‌ورزی×آبیاری Tillage ×Irrigation	8	0.967^{ns}	109.719*	7.606^{ns}	2003335.48**	13589602.2**	6.346^{ns}
خطای کل Total Error	24	1.421	39.831	6.588	448958.4	3454475.8	11.026
ضریب تغییرات C.V. (%)	-	*8.267*	*7.1994*	*9.113*	*8.300*	*9.397*	*8.133*

ns، *، ** به ترتیب عدم وجود اختلاف معنی‌دار، تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ ٪ و تفاوت معنی‌دار در سطح ۱ ٪.

ns: not significant. * and **: significant at the 0.05 and 0.01 probability level, respectively.

جدول ۴. مقایسه میانگین تأثیر سطوح آبیاری بر صفات زراعی و بیوشیمیایی ذرت در شرایط خاک‌ورزی حفاظتی

Table 4. Comparison of the average effect of different levels of irrigation on agronomic and biochemical traits of corn under conservation tillage conditions

تیمار آبیاری Irrigation treatment		تعداد ردیف در بلال No. of row per ear	وزن صد دانه 100 Grain Eight	شاخص برداشت Harvest Index	کلروفیلa Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total Chlorophyll	کاروتنوئید Ccarotenoid
			gr	%	----------mg.g^{-1} FW----------			
I_1	آبیاری ۱۰۰٪	15.62^{a}	30.24^{a}	44.62^{a}	13.10^{a}	9.25^{a}	22.36^{a}	2.70^{d}
I_2	آبیاری ۷۵ ٪	14.93^{ab}	27.60^{bc}	40.97^{b}	11.44^{ab}	7.91^{a}	19.35^{ab}	3.08^{bc}
I_3	آبیاری ۵۰ ٪	13.11^{c}	29.33^{ab}	40.27^{b}	8.32^{c}	5.73^{b}	14.05^{c}	3.56^{a}
I_4	آبیاری٪ 75 PRD	14.62^{ab}	27.11^{bc}	39.12^{b}	10.97^{ab}	7.70^{a}	18.68^{b}	2.95^{cd}
I_5	آبیاری% 50 PRD	13.82^{bc}	26.53^{c}	39.11^{b}	9.68^{bc}	7.47^{ab}	17.16^{bc}	3.37^{ab}

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حرف مشترک هستند دارای تفاوت آماری در سطح پنج درصد نمی‌باشند.

I1 آبیاری ۱۰۰ درصد، I2 آبیاری ۷۵ درصد، I3 آبیاری ۵۰ درصد، I4 آبیاری PRD ۷۵ درصد ، I5 آبیاری PRD ۵۰ درصد

In each column, the averages that have a common letter do not have a statistical difference at the five percent level (LSD=5%).
I1 100% irrigation, I2 75% irrigation, I3 50% irrigation, I4 75% PRD irrigation, I5 50% PRD irrigation

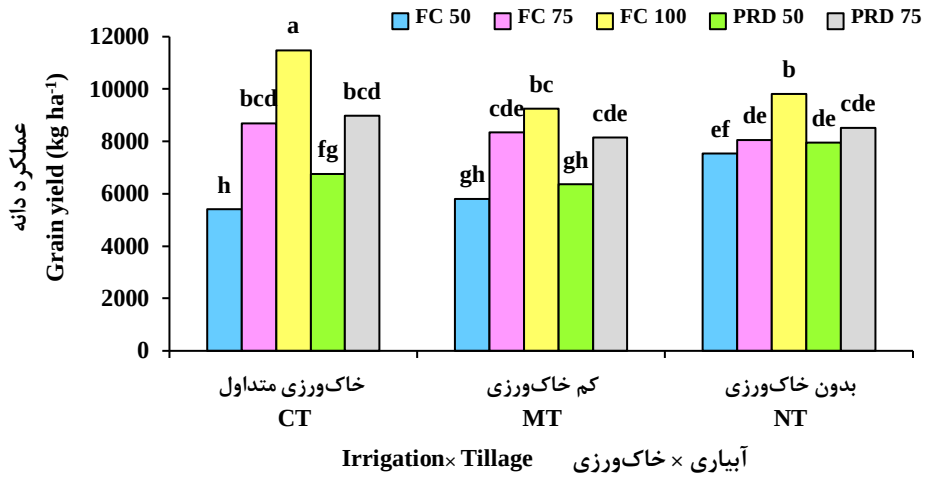
وزن صد دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد وزن صد دانه در سطح ۵ درصد تحت‌تأثیر سطوح آبیاری معنی‌دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها نشان داد در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک بیشترین میزان وزن صد دانه و در سطح آبیاری ۵۰ درصد PRD کمترین میزان آن به دست آمد (جدول ۴). این کاهش سطح آبیاری از ۱۰۰ به ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به روش PRD موجب کاهش ۱۲/۲۷ درصدی وزن صد دانه گردید. در آبیاری ۷۵ درصد معمولی، وزن صد دانه کاهشی معادل ۸/۷ درصد را نشان می‌دهد. نکته قابل توجه آن است

که در آبیاری ۵۰ درصد معمولی، وزن صد دانه تنها ۳ درصد کاهش داشته که تفاوت آماری معنی‌داری با آبیاری کامل نداشته است. این نتیجه نشان می‌دهد برخلاف سایر صفات، برای وزن صد دانه، روش کم‌آبیاری معمولی در سطح ۵۰ درصد عملکرد بهتری نسبت به روش PRD داشته است. وقتی که گیاه در معرض تنش خشکی قرار می‌گیرد برای این که از اثرهای تنش فرار کند اقدام به کوتاه‌کردن چرخه زندگی خود می‌کند، بنابراین به دلیل کوتاه‌تر شدن طول دوره پر شدن دانه و تأثیر منفی تنش کم‌آبی بر فتوسنتز جاری در نهایت مواد منتقل شده به دانه کاهش و وزن هزار دانه کم می‌شود. همچنین کاهش وزن هزار دانه در شرایط تنش کم‌آبی را می‌توان به کمتر بودن کربوهیدرات‌های ذخیره‌ای قبل از مرحله گرده‌افشانی در اندام‌های رویشی و کاهش دوام سطح برگ که در نتیجه دوره پر شدن دانه‌ها را کوتاه می‌نماید، نسبت داد (Mousavi et al., 2015). محققین گزارش دادند با کاهش سطح آبیاری، وزن هزار دانه نیز کاهش یافت که با یافته‌های این پژوهش مطابقت دارد (Nakhjavani Moghadam et al., 2011).

عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل سطوح مختلف آبیاری در خاک‌ورزی بر عملکرد دانه، در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). بیشترین عملکرد دانه در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک و خاک‌ورزی متداول بوده که این میزان عملکرد نسبت به روش کم خاکورزی حدود ۲۴/۲۳ درصد و نسبت به روش بدون خاکورزی حدود ۱۶/۹۸ درصد بیشتر است. این برتری را می‌توان به چندین عامل نسبت داد از جمله خاکورزی متداول با ایجاد ساختار مناسب خاک، شرایط بهتری برای توسعه ریشه و دسترسی به مواد غذایی فراهم می‌کند. همچنین، خاکورزی متداول با کاهش تراکم خاک و بهبود تهویه، امکان رشد بهتر گیاه را در شرایطی که آب کافی وجود دارد، فراهم می‌سازد و کنترل علف‌های هرز نیز به شکل مؤثرتری انجام می‌شود که این امر رقابت برای جذب آب و مواد غذایی را کاهش می‌دهد. همچنین کمترین عملکرد در سطح آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی خاک و خاک‌ورزی متداول به دست آمد (شکل ۲).



شکل ۲. مقایسه میانگین اثر متقابل خاک‌ورزی و سطوح آبیاری بر عملکرد دانه

Fig. 2. Comparison of the average interaction effect of tillage and irrigation levels on grain yield. NT: No Tillage, MT: Minimum Tillage, CT: Conventional Tillage.

در تیمارهای کم آبیاری معمولی و PRD، عملکرد به طور معنی‌داری کاهش یافت. مقایسه میانگین‌ها نشان می‌دهد که با کاهش میزان آبیاری به ۵۰ درصد، افت عملکرد در سیستم بی‌خاک‌ورزی کمتر از دو سیستم دیگر بوده است. عملکرد دانه در تیمار بدون خاک‌ورزی و آبیاری ۵۰ درصد حدود ۳۹/۴ درصد بیشتر از خاک‌ورزی متداول و آبیاری ۵۰ درصد و حدود ۲۹/۶ درصد بیشتر از کم‌خاک‌ورزی و آبیاری ۵۰ درصد بوده است. همچنین در تیمارهای آبیاری با روش PRD الگوهای متفاوتی مشاهده می‌شود. در شرایط PRD با ۷۵٪ آبیاری، خاکورزی متداول ۱۰/۲۱ درصد بیشتر از کم

خاکورزی و ۵/۲۹ درصد بیشتر از بدون خاکورزی عملکرد داشته است. اما در شرایط PRD با ۵۰٪ آبیاری، روش بدون خاکورزی ۱۵/۲۱ درصد بیشتر از خاکورزی متداول و ۲۵/۲۹ درصد بیشتر از کم خاکورزی عملکرد داشته است. این نتایج تأییدکننده کارایی بیشتر روش بدون خاکورزی در شرایط کم آبی است. تکنیک PRD با آبیاری بخشی از منطقه ریشه و خشک نگه داشتن بخش دیگر، موجب بهبود کارایی مصرف آب می‌شود. ترکیب این روش با بدون خاکورزی، که به حفظ رطوبت خاک کمک می‌کند، نتایج قابل توجهی را در شرایط کم آبیاری به همراه داشته است. این موضوع نشان می‌دهد که در شرایط کم‌آبی، سیستم بی‌خاک‌ورزی با حفظ بیشتر رطوبت خاک می‌تواند عملکرد بهتری را نسبت به سیستم‌های دیگر داشته باشد. این نکته از نظر مدیریت پایدار منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک بسیار حائز اهمیت است. محققین معتقدند که دلیل اصلی کاهش عملکرد دانه در شرایط کم آبیاری، کاهش فتوسنتز و بازجذب مواد در طول دوره پر شدن دانه است (Gianquinto, et al., 2003). مقایسه عملکرد دانه در شرایط آبیاری کامل نشان می‌دهد که تیمار بدون خاکورزی و آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی ۵/۸ درصد نسبت به تیمار کم خاکورزی و آبیاری ۱۰۰ درصد برتری داشته است. اگرچه اختلاف بین این دو تیمار از نظر آماری معنی‌دار نبود (شکل ۲)، اما به نظر می‌رسد که در سیستم بدون خاکورزی نسبت به کم خاکورزی، ساختار طبیعی خاک دست نخورده باقی مانده و رشد بیشتر و بهتر ریشه شرایط جذب عناصر غذایی را در گیاه بهبود داد. پژوهشگران در بررسی روش‌های خاکورزی در ذرت به این نتیجه رسیدند که خاکورزی متداول با ۱۰/۶۱ تن در هکتار عملکرد دانه و بی‌خاکورزی با ۶/۸۶ تن در هکتار کمترین عملکرد را داشتند و کم خاکورزی با ۸/۹۹ تن در هکتار بین این دو قرار گرفت (Videnović et al., 2011). نتایج پژوهش عزیزپور و همکاران (Azizpour et al., 2017) نشان داد که بیشترین مقدار عملکرد دانه در بین تیمارهای آبی به میزان ۶۷۵۰ کیلوگرم در هکتار مربوط به تیمار آبیاری کامل و کم‌ترین مقدار عملکرد دانه به میزان ۴۰۵۰ کیلوگرم در هکتار مربوط به تیمار کم آبیاری بود.

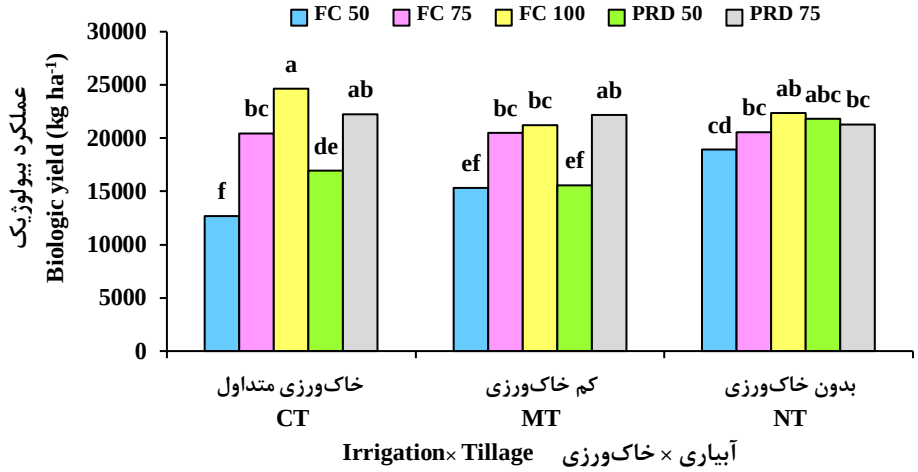
عملکرد بیولوژیک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل سطوح مختلف آبیاری در خاکورزی بر عملکرد بیولوژیک در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). بیشترین عملکرد بیولوژیک در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک و خاکورزی متداول و کمترین عملکرد در سطح آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی خاک و خاکورزی متداول با ۴۸/۶ درصد کاهش به دست آمد (شکل ۳). کاهش عملکرد بیولوژیک در تیمار کم خاکورزی و آبیاری ۵۰ درصد معمولی نسبت به سطح آبیاری ۱۰۰ درصد آن، ۲۸ درصد و در تیمار بدون خاکورزی ۱۵/۴ درصد بود. استفاده از روش آبیاری PRD در سطوح آبیاری ۷۵٪ و ۵۰٪، باعث کاهش کمتر عملکرد بیولوژیک نسبت به آبیاری کامل شده است. به عنوان مثال، در خاکورزی متداول، استفاده از PRD در سطح آبیاری ۷۵٪، عملکرد را فقط ۱۰٪ کاهش می‌دهد، در حالی که بدون PRD، این کاهش ۱۷٪ است. در سطوح پایین‌تر آبیاری، تیمارهای بدون خاکورزی عملکرد بیولوژیک بهتری نسبت به تیمارهای خاکورزی متداول و کم خاکورزی نشان دادند. برای مثال، عملکرد بیولوژیک تیمار بدون خاکورزی PRD ۵۰ درصد قابل مقایسه با تیمارهای با آبیاری بیشتر بود و در گروه آماری abc قرار گرفت. این یافته نشان می‌دهد که در شرایط محدودیت آب، سیستم بدون خاکورزی می‌تواند با حفظ بهتر رطوبت خاک، تولید ماده خشک بیشتری داشته باشد. از آنجا که تنش ناشی از کمبود آب می‌تواند با کاهش سطح برگ‌ها و کاهش تولید کربوهیدرات، عملکرد علوفه در ذرت را تحت‌تأثیر قرار دهد، به نظر می‌رسد کمبود رطوبت می‌تواند با تسریع فرایند پیرشدن برگ‌ها، تولید مواد پرورده را کاهش داده و در نتیجه منجر به کاهش وزن زیست‌توده در گیاه شود (Hossein Niya et al., 2017). مقدار بالای جذب آب در تیمار PRD نسبت به سایر تیمارهای کم آبیاری می‌تواند شرایط لازم را برای افزایش عملکرد بیولوژیک در این تیمار فراهم کند (Karandish et al., 2013). یاسین و همکاران (Yaseen et al., 2014) در پژوهشی روی عملکرد گیاه ذرت گزارش نمودند بیشترین عملکرد بیولوژیک مربوط به تیمار آبیاری کامل و مقدار آن ۳۰ درصد بیشتر از تیمار کم آبیاری بود. پژوهشگران اعلام کردند عملکرد بیولوژیک ذرت در خاکورزی متداول بیشتر از بدون خاکورزی بوده است (Schmer et al. 2014).

ارتفاع استقرار بلال

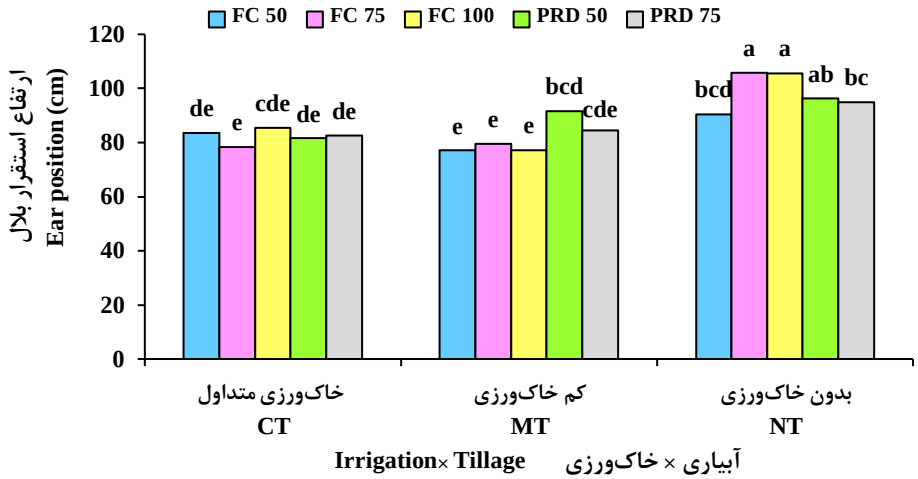
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل سطوح مختلف آبیاری در خاکورزی بر ارتفاع استقرار بلال در سطح ۵ درصد

معنی‌دار شد (جدول ۳). باتوجه‌به نتایج مقایسات میانگین، استقرار بلال در سطوح آبیاری ۷۵ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و در شرایط بدون خاک‌ورزی دارای بیشترین ارتفاع بودند و در یک گروه آماری قرار گرفتند (شکل ۴). در روش‌های کم‌خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی، استفاده از آبیاری PRD به‌ویژه در سطوح آبیاری ۵۰ درصد باعث افزایش ارتفاع استقرار بلال شد. البته کلیه سطوح آبیاری در تیمار بدون خاک‌ورزی نسبت به سایر تیمارهای خاک‌ورزی به‌وضوح برتری دارند. به نظر می‌رسد که در شرایط سطوح آبیاری ۷۵ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، گیاه از آب کافی برخوردار است همچنین استفاده از بقایای گیاهی در سیستم‌های بدون خاک‌ورزی باعث افزایش مواد آلی در خاک می‌شود. این مواد آلی نه‌تنها به بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک کمک می‌کنند، بلکه ظرفیت نگهداری آب را نیز افزایش می‌دهند، بنابراین گیاه به‌دور از تنش‌های محیطی رشد نموده و رشد سریع‌تر موجب استقرار بلال در ارتفاع بالاتری خواهد شد. پژوهشگران اعلام نمودند که بیشترین ارتفاع استقرار بلال در شرایط آبیاری کامل به دست آمد (Naderi et al., 2015).



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر متقابل خاک‌ورزی و سطوح آبیاری بر عملکرد بیولوژیک

Fig. 3. Comparison of the average interaction effect of tillage and irrigation levels on biological yield. NT: No Tillage, MT: Minimum Tillage, CT: Conventional Tillage.



شکل ۴. مقایسه میانگین اثر متقابل خاک‌ورزی و سطوح آبیاری بر ارتفاع استقرار بلال

Fig. 4. Comparison of the average interaction effect of tillage and irrigation levels on Ear position height. NT: No Tillage, MT: Minimum Tillage, CT: Conventional Tillage.

جدول ۵. تجزیه واریانس تأثیر سطوح مختلف آبیاری برصفات بیوشیمیایی ذرت در شرایط خاک‌ورزی حفاظتی

Table 5. Variance analysis of the effect of different levels of irrigation on the biochemical traits of corn under conservation tillage conditions

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total chlorophyll	کاروتنوئید Ccarotenoid	فنول کل Total phenol
بلوک Block	2	9.324^{ns}	1.248^{ns}	14.793^{ns}	0.201^{ns}	2.022*
خاک‌ورزی Tillage	2	1.234^{ns}	4.526^{ns}	2.211^{ns}	0.487*	19.904**
خطای a Error a	4	1.578	7.155	7.195	0.236	0.7555
سطوح آبیاری Irrigation Level	4	29.500*	14.277*	83.419**	1.029**	7.3898**
خاک‌ورزی×آبیاری Tillage ×Irrigation	8	0.882^{ns}	0.990^{ns}	2.310^{ns}	0.038^{ns}	2.884**
خطای کل Total Error	24	7.028	3.593	10.603	0.124	0.5111
ضریب تغییرات C.V. (%)	-	24.760	24.887	17.770	11.265	16.291

ns ، *، ** به ترتیب عدم وجود اختلاف معنی‌دار، تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ ٪ و تفاوت معنی‌دار در سطح ۱ ٪

.ns: not significant. * and **: significant at the 0.05 and 0.01 probability level, respectively

شاخص برداشت

نتایج تجزیه واریانس نشان داد شاخص برداشت در سطح ۵ درصد تحت‌تأثیر سطوح آبیاری معنی‌دار شد (جدول ۳). باتوجه‌به نتایج مقایسه میانگین در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، بالاترین شاخص برداشت و در سطح آبیاری ۵۰ درصد PRD پایین‌ترین شاخص برداشت حاصل شد (جدول ۴). با کاهش آب مصرفی، شاخص برداشت در تمامی تیمارها کاهش یافته است. در روش آبیاری معمولی ۷۵ درصد، شاخص برداشت به ۸/۲ درصد کاهش و در آبیاری ۵۰ درصد به ۹/۷ درصد کاهش رسیده است. در مقابل، روش PRD در سطح ۷۵ درصد و ۵۰ درصد، کاهش بیشتری (حدود ۱۲/۳ درصد) نسبت به آبیاری کامل نشان داده‌اند. این نتایج حاکی از آن است که روش PRD تأثیر منفی بیشتری بر شاخص برداشت در مقایسه با روش کم‌آبیاری معمولی داشته است. باتوجه‌به نتایج، اعمال کم آبیاری موجب پایین آمدن شاخص برداشت در گیاه ذرت گردید. نتایج پژوهشی نیز نشان داد که با اعمال کم آبیاری، شاخص برداشت نسبت به آبیاری کامل کاهش یافت (Marashi and Makvandizade , 2019).

محتوای کلروفیل

نتایج تجزیه واریانس نشان داد کلروفیل کل در سطح ۱ درصد و کلروفیل a و کلروفیل b در سطح ۵ درصد تحت‌تأثیر سطوح آبیاری معنی‌دار شدند (جدول ۵). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیشترین میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل کل در آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی مزرعه به دست آمد و در روش کم‌آبیاری معمولی ۵۰ درصد، کاهش شدیدی در میزان کلروفیل a (۳۶/۵ درصد کاهش)، کلروفیل b (۳۸/۱ درصد کاهش) و کلروفیل کل (۳۷/۲ درصد کاهش) مشاهده شد و کمترین میزان کلروفیل را در بین سطوح آبیاری به خود اختصاص داد (جدول ۴). در مقابل، روش PRD در سطح ۵۰ درصد، محتوای کلروفیل بالاتری نسبت به روش کم‌آبیاری معمولی با همان میزان آب نشان داد. کلروفیل a، ۲۶/۱ درصد ، کلروفیل b، ۱۹/۲ درصد و کلروفیل کل، ۲۳/۳ درصد کاهش را نسبت به آبیاری کامل داشتند. این نتایج نشان‌دهنده برتری قابل توجه روش PRD در حفظ محتوای کلروفیل در شرایط تنش شدید آبی است، که می‌تواند منجر به حفظ بهتر ظرفیت فتوسنتزی گیاه شود. این یافته ها توسط پژوهشگران دیگری نیز گزارش شده است (Rezaei et al., 2024). در طی تنش خشکی، تولید رادیکال‌های فعال اکسیژن، منجر به اکسیداسیون رنگیزه‌های فتوسنتزی می‌شود که در نهایت کاهش آنها در برگ را در پی

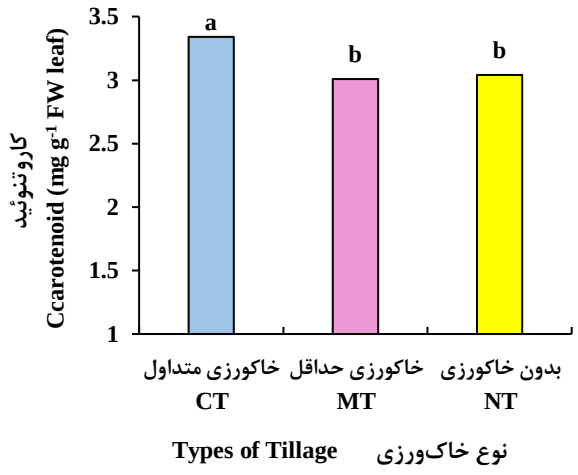
دارد (Santos et al., 2001). کاهش سطح کلروفیل ممکن است ناشی از تغییر مسیر سوخت‌وساز نیتروژن به سمت تولید موادی مانند پرولین باشد که در تنظیم فشار اسمزی گیاهان نقش کلیدی دارند (Lawlor, 2000). بررسی‌های اخیر نقش آبسزیک اسید (ABA) را در گیاهان تحت آبیاری جزئی ناحیه ریشه (PRD) برجسته می‌کند و بر اهمیت آن در سیگنال‌دهی بین ریشه‌ها و اندام‌های هوایی تأکید می‌کند. هنگامی که بخشی از سیستم ریشه خشکی را تجربه می‌کند، آبسزیک اسید تولید می‌شود که منجر به بسته شدن نسبی روزنه می‌شود، که تعرق را کاهش می‌دهد و بازده مصرف آب را افزایش می‌دهد و در عین حال سطح کلروفیل را حفظ می‌کند. این استراتژی دوگانه به گیاهان اجازه می‌دهد تا با فعال کردن مکانیسم‌های دفاعی بدون متحمل شدن آسیب شدید، از تنش خشکی بهره مند شوند (Sonawane and Shrivastava, 2022, Tamrat Alemu, 2020).

کاروتنوئید

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که میزان کاروتنوئید تحت‌تأثیر خاک‌ورزی در سطح ۵ درصد و تحت‌تأثیر سطوح آبیاری در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۵). باتوجه‌به نتایج مقایسات میانگین بیشترین میزان کاروتنوئید در خاک‌ورزی متداول و کمترین میزان آن در کم خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی به دست آمد که در خاک‌ورزی متداول نسبت به کم خاک‌ورزی ۱۰/۹۶ درصد و نسبت به بدون خاک‌ورزی ۹/۸۷ درصد افزایش در پی داشته است (شکل ۵).

میر و همکاران (Mir et al., 2023) گزارش نمودند که بیشترین میزان کاروتنوئید در چای ترش (*Hibiscus sabdariffa L.*) در خاک‌ورزی متداول به دست آمد. همچنین بیشترین میزان کاروتنوئید در سطح آبیاری ۵۰ درصد کم آبیاری و کمترین میزان آن در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد به دست آمد که معادل ۳۱/۸۵ درصد کاهش داشت (جدول ۴).

برخلاف سایر صفات، میزان کاروتنوئید با کاهش آب مصرفی در تمامی تیمارها افزایش یافته است. در کم‌آبیاری معمولی ۷۵ درصد میزان کاروتنوئید معادل ۱۴/۱ درصد افزایش نسبت به آبیاری کامل داشته است. در روش PRD، در سطوح ۷۵ درصد و ۵۰ درصد، میزان کاروتنوئید معادل ۹/۳ و ۲۴/۸ درصد افزایش نسبت به آبیاری کامل داشته است. افزایش کاروتنوئیدها در شرایط تنش آبی یک مکانیسم دفاعی گیاه برای مقابله با گونه‌های فعال اکسیژن است. مقایسه روش‌های آبیاری نشان می‌دهد که در هر دو سطح آبیاری ۷۵ و ۵۰ درصد، روش آبیاری PRD افزایش کمتری در میزان کاروتنوئید نسبت به روش کم‌آبیاری معمولی داشته است، که می‌تواند نشان‌دهنده تنش کمتر در روش آبیاری PRD باشد. این موضوع با نتایج مطالعات رضایی و همکاران (Rezaei et al., 2024) همخوانی دارد. در شرایط تنش خشکی به دلیل بسته‌شدن روزنه‌های گیاه و مختل‌شدن بخش تاریکی فتوسنتز، یکی از مسائل مهم، حل مشکل انرژی مازاد نوری جذب شده توسط رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی است. گیاهان راهکارهای مختلفی برای حل این مشکل دارند، یکی از این راهکارها افزایش میزان کاروتنوئید نسبت به کلروفیل بوده تا از طریق این رنگ‌دانه از کلروفیل‌ها محافظت به عمل آید. بالابودن میزان کاروتنوئید در اندام هوایی گیاهان می‌تواند سیستم فتوسنتزی گیاهان را از احتمال پراکسیده شدن توسط انواع اکسیژن فعال محافظت کند (Lacho icz et al., 2018). به نظر می‌رسد دلیل بالاتر بودن میزان کاروتنوئید در خاک‌ورزی متداول، تنش خشکی بیشتر در این نوع خاک‌ورزی نسبت به روش‌های کم خاک‌ورزی یا بدون خاک‌ورزی باشد.



شکل ۵. مقایسه میانگین نوع خاک‌ورزی بر میزان کاروتنوئید

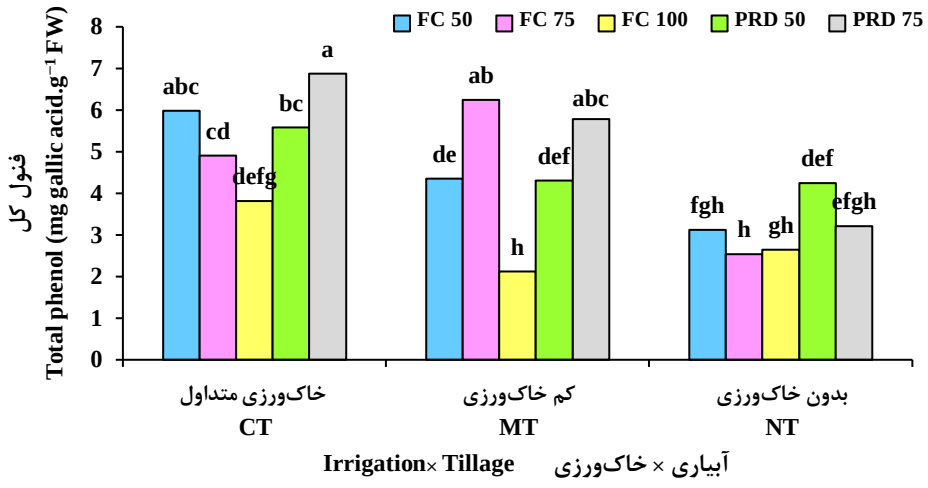
Fig. 5. Comparison of the average type of tillage on the amount Carotenoids. NT: No Tillage, MT: Minimum Tillage, CT: Conventional Tillage.

فنول کل

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل سطوح مختلف آبیاری در خاک‌ورزی بر فنول کل در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۵). نتایج مقایسات میانگین نشان داد بیشترین میزان فنول کل در خاک‌ورزی متداول و آبیاری PRD ۷۵ درصد و کمترین میزان آن در کم خاک‌ورزی و سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی مزرعه به دست آمد (شکل ۶).

در خاک‌ورزی متداول کاهش آبیاری از ۱۰۰ درصد به ۵۰ درصد موجب ۵۶/۸ درصد افزایش فنول و کاهش آبیاری از ۱۰۰ درصد به ۷۵ درصد PRD، ۷۹/۵ درصد افزایش فنول کل شد. در خاک‌ورزی حداقل و آبیاری ۷۵ درصد معمولی موجب ۱۹۴/۸ درصد افزایش فنول کل نسبت به آبیاری کامل گردید. همچنین فنول کل در بدون خاک‌ورزی و آبیاری ۵۰ درصد PRD، ۶۱ درصد بیشتر از آبیاری ۱۰۰ درصد بود.

یافته‌های پژوهشی نشان می‌دهد که تنش خشکی موجب القای بیوسنتز ترکیبات فنولی در گیاهان می‌گردد (Ghorbanli et al., 2012). این پدیده به عنوان یکی از مکانیسم‌های دفاعی گیاه در پاسخ به تنش خشکی تفسیر می‌شود که نقش مهمی در سازگاری گیاه به شرایط کمبود آب ایفا می‌کند (Barchet et al., 2014). آبیاری PRD در مقایسه با کم آبیاری تنش خشکی کمتری به گیاه وارد می‌کند؛ زیرا به‌صورت واقعی تنش وجود ندارد و سطح فتوسنتزی گیاه بالاتر است و از طرف دیگر، تنش را به گیاه القا می‌کند و باعث می‌شود که گیاه انرژی بیشتری را برای تولید فنول صرف کند به همین دلیل در شرایط PRD درصد فنول بالاتری تولید شده است. افزایش تولید ترکیبات فنولی در پاسخ به خشکی متوسط در گونه‌های گیاهی مانند مریم‌گلی گزارش شده است که ظرفیت تولید آنها در شرایط تنش شدید کمتر است (Bettaieb., et al. 2011). به نظر می‌رسد که نوع خاک‌ورزی به طور مستقیم تأثیری بر میزان فنول نداشته باشد و به‌صورت غیرمستقیم با تأثیری که بر میزان آب در دسترس گیاه می‌گذارد بر روی تولید فنول اثرگذار باشد. در خاک‌ورزی متداول به دلیل برگرداندن خاک، و عدم وجود بقایای گیاهی در آن، تبخیر سطحی خاک افزایش پیدا کرده و تنش خشکی برای گیاهان شدیدتر بوده است. به همین دلیل میزان فنول افزایش یافته است و در شرایط خاک‌ورزی حفاظتی که میزان آب در دسترس گیاه بیشتر است میزان فنول کاهش‌یافته است. سیمیک و همکاران (Simic et al., 2020) با بررسی سه روش خاک‌ورزی (بدون خاک‌ورزی، کم خاک‌ورزی و خاک‌ورزی متداول) گزارش نمودند که محتوی فنول در ذرت با تشدید خاک‌ورزی از ۲۷۱ میکروگرم بر گرم در بدون خاک‌ورزی به ۲۴۵ میکروگرم بر گرم در کم خاک‌ورزی کاهش یافت و خاک‌ورزی متداول نیز در بین این دو با ۲۵۳ میکروگرم بر گرم قرار گرفت هر چند با هم اختلاف معنی‌داری نداشتند.



شکل ۶. مقایسه میانگین اثر متقابل خاک‌ورزی و سطوح آبیاری بر میزان فنول کل

Fig. 6. Comparison of the interaction effect of tillage and irrigation level on total phenol content. NT: No Tillage, MT: Minimum Tillage, CT: Conventional Tillage.

نتیجه‌گیری نهایی

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که سطوح مختلف آبیاری و روش‌های خاک‌ورزی تأثیر قابل‌توجهی بر ویژگی‌های زراعی و بیوشیمیایی ذرت دارند. اثرات متقابل این دو عامل بر عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، فنول کل و ارتفاع استقرار بلال در سطوح معنی‌دار مشاهده شد. به طور خاص، افزایش سطح آبیاری از ۵۰ درصد به ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک منجر به بهبود قابل توجهی در تعداد ردیف در بلال، وزن صد دانه، و عملکرد دانه و بیولوژیک گردید. بیشترین تعداد ردیف در بلال در شرایط آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک مشاهده شد، در حالی که کاهش سطح آبیاری به ۵۰ درصد ظرفیت زراعی موجب کاهش ۱۶/۰۷ درصدی تعداد ردیف‌ها گردید. بیشترین وزن صد دانه در شرایط آبیاری کامل مشاهده شد. بیشترین عملکرد دانه در شرایط آبیاری کامل و خاک‌ورزی متداول حاصل شد که این برتری به دلیل ساختار مناسب خاک، توسعه بهتر ریشه‌ها و کاهش رقابت برای جذب آب بود. در شرایط کم آبیاری بهترین عملکرد در PRD بدست آمده است همچنین، روش بدون خاک‌ورزی در شرایط کم‌آبی عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها داشت، زیرا با حفظ بیشتر رطوبت خاک توانست تولید ماده خشک بیشتری داشته باشد. محتوای کلروفیل و کاروتنوئیدها نیز تحت تأثیر سطوح آبیاری قرار داشتند. کمبود آب منجر به کاهش کلروفیل و افزایش کاروتنوئیدها شد که نشان‌دهنده واکنش گیاه به تنش آبی است. در شرایط آبیاری ۵۰ درصد PRD میزان کلروفیل a، b و کل بیشتر از کم آبیاری ۵۰ درصد بود. همچنین، میزان فنول کل در شرایط تنش خشکی افزایش یافت که نشان‌دهنده سازگاری گیاه با شرایط نامساعد محیطی است. استفاده از تکنیک‌هایی مانند PRD همراه با سیستم بدون خاک‌ورزی می‌تواند کارایی مصرف آب را افزایش داده و تولید ماده خشک بیشتری را فراهم کند. علاوه بر آن، حفظ ساختار طبیعی خاک و بقایای گیاهی می‌تواند موجب افزایش رطوبت خاک شده و اثرات منفی تنش خشکی را کاهش دهد..

منابع

Azizpour, S. , Shahnazari, A. , Ziatabar Ahmadi, M., Karandish, F., 2017. Evaluation of simultaneous effect of partial root zone drying and vermicompost on some physiological characteristics of maize (*Zea mays L.*) SC704. Journal of Water and Soil Conservation. 24(5), 195-209. [In Persian with English summary]. https://doi.org/10.22069/jwsc.2017.12981.2761

Barchet, G.L., Dauwe, R., Guy, R.D., Schroeder, W.R., Soolanayakanahally, R.Y., Campbell, M.M., Mansfield, S.D., 2014. Investigating the drought-stress response of hybrid poplar genotypes by metabolite profiling. Tree Physiology. 34(11), 1203–1219. https://doi.org/10.1093/treephys/tpt080

Bazrgar, G., Nabavi Kalat, S. M., Khorasani, S. K., Ghasemi, M., Kelidari, A., 2023. Effect of deficit irrigation on physiological, biochemical, and yield characteristics in three baby corn cultivars (*Zea Mays* L.). Heliyon. 9, e15477. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15477

Bettaieb, I., Hamrouni Sellami, I., Bourgou, S., Limam, F., Marzouk, B., 2011. Drought effects on polyphenol composition and antioxidant activities in aerial parts of *Salvia officinalis* L. Acta Physiologiae Plantarum. 33, 1103–1111. https://doi.org/10.1007/S11738-010-0638-Z

Di Domenico, F., Foppoli, C., Coccia, R., Perluigi, M., 2012. Antioxidants in cervical cancer: chemopreventive and chemotherapeutic effects of polyphenols. Biochimica et Biophysica Acta. 1822, 737-747. https://doi.org/10.1016/j.bbadis.2011.10.005

Ebrahimi, M., Behmanesh, J., Rezaverdinejad, V., Varshavian, V., Azad, N., 2022. Evaluation of different levels of subsurface irrigation on yield and morphological traits of seed corn. Water and Irrigation Management. 12, 603-614. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22059/j im.2022.340282.978

Food and Agriculture Organization, 2014. FAO, https://FAO.org/ag/ca/1a.html

Gheysari, M. S., Mirlatifi, M., Bannayan, M., Homaee, M., Hoogenboom, G., 2009. Interaction of water and nitrogen on Maize for silage. Agricultural Water Management. 96, 809-821.

Ghorbanli, M., Bakhshi Khaniki, Gh., Zakeri, A., 2012. Investigation on the effects of water stress on antioxidant compounds of *Linum usitatissimum* L. Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants, 27(4), 647-658. [In

Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22092/ijmapr.2012.4514

Gianquinto, G., Sambo, P., Bona, S., 2003. The use of SPAD-502 chlorophyll meter for dynamically optimizing the nitrogen supply in potato crop: a methodological approach. Acta Horticulturae. 627, 225-230. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.607.30

Hiscox, J.D., Israelstam, G.F., 1979. A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. Canadian Journal of Botany. 57(12), 1332-1334.

Hossein Niya, A.M., Nizami, A., Kafi, M., Khavari Khorasani, S., Rezaei, J., 2017. The effect of low irrigation on the yield and its components in corn hybrids (*Zea Mays* L.) Environmental Stresses in Crop Sciences, 11(4), 835-846. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22077/escs.2018.647.1136

Hu, Ch., Cao, Z.P., 2007. Size and activity of the soil microbial biomass and soil enzyme activity in long-term field experiments. World Journal of Agricultural Sciences. 3, 63-70.

Jarecki, M. K., Lal, R., 2003. Crop management for soil carbon sequestration. Critical Reviews in Plant Sciences. 22, 471–502. https://doi.org/10.1080/713608318

Jin, H., Qingjie, W., Hongwen, L., Lijin, L., Huanwen, G., 2009. Effect of alternative tillage and residue cover on yield and water use efficiency in annual double cropping system in North China Plain. Soil and Tillage Research. 104, 198-205. https://doi.org/10.1016/j.still.2008.08.015

Karandish, F., Mirlatifi, S. M., Shahnazari, A., Abbasi, F., Gheysari, M., 2013. Effect of partial root-zone drying and deficit irrigation on yield and yield components of maize. Iranian Journal of Soil and Water Research. 44(1), 33-44. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22059/ijs r.2013.36123

Lacho Icz, S., Oszmiański, J., iśnie Ski, R., 2018. Determination of triterpenoids, carotenoids, chlorophylls, and antioxidant capacity in *Allium ursinum* L. at different times of harvesting and anatomical parts. European Food Research and Technology. 244, 1269-1280. https://doi.org/10.1007/s00217-018-3042-3

La lor, D., Cornic, G., 2012. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. Plants, Cell and Environment. 25, 275-294. https://doi.org/10.1046/j.00168025.2001.00814.x

Lawlor, D.W., 2002. Limitation to photosynthesis in water-stressed leaves: stomata vs. metabolism and the role of ATP. Annals of Botany. 89(7), 871–885. https://doi.org/10.1093/aob/mcf110

Marashi, S.K., Makvandi zadeh, Z., 2019. Effect of furrow irrigation patterns on yield and yield components of two corn varieties (*Zea mays* L.). Journal of Plant Ecophysiology. 11(39), 12-20. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20085958.1398.11.39.2.8

Mir, Z., Ghanbari, A., Dahmardeh, M., Ramroudi, M., Asgharipour, M.R., 2023. Effect of tillage systems, plant residue management and potassium fertilizer application on yield and some physiological characteristics of Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). Journal of Agroecology. 14, 633-647. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22067/agry.2022.20185.0

Mousavi, S.G., Thagha Al-Islami, M.J., Ansarinia, A. Javadi, H., 2015. The effect of drought stress and nitrogen fertilizer on the yield and efficiency of water use in calendula (*Calendula officinalis L.*). Scientific-Research Iranian Medicinal and Aromatic Plants. 28(3), 493-508. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22092/ijmapr.2012.2967

Naderi, N., Fazl Oula R., Ahmadi, M. Kh., Shahnazari A., Khavari Khorasani, S., 2015. Evaluating the effect of different methods of deficit irrigation on yield, yield components and irrigation water productivity of forage maize. Iranian Journal of Irrigation and Drainage. 9(3), 522-530. [In Persian with English Summary].

Nakhjavani Moghadam, M.M., Najafi, E., Sadrqaen, S.H., Farhadi, E., 2011. Effect of different levels of irrigation and plant density on grain yield and yield components and water use efficiency in grain maize cv. ksc 302. Seed and Plant Production Journal. 27(1), 73-90. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22092/sppj.2017.110425

Nasrollehzadeh Asl, V., Shiri, M.R., Moharramnejad, S., Yousefi, M., Baghbani, F., 2017. Effect of drought tension on agronomy and biochemical traits of three maize hybrids

(*Zea mays* L.). Crop Plant Physiology. 8(32), 45-60. [In Persian with English Summary]. http://cpj.ahvaz.iau.ir/article-1-769-en.html

Rezaei, N., Alizadeh, Y., Alizadeh, H. A., Zeidali, E., 2024. Effects of deficit irrigation (RDI) and partial root-zone drying (PRD) on yield, yield components and physiological characteristics of mungbean (*Vigna radiate L.*). Plant Production and Genetics. 5(1), 33-46. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22034/plant. 2023.62942

Saeedinia, M., Nasralhi, A., Haider, Sharifipour, M., 2018. Investigating the ability of crop water stress index for irrigation scheduling and estimating corn forage yield. Iranian Journal of Soil and Water Research (Agricultural Sciences of Iran), 50(3), 555-565. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.268113.668038

Salehi, F., Bahrani, M.J., Kazemi, S.A., Pakniyat, H., Karimian, N. A., 2011. Effect of wheat residues and nitrogen fertilizer on some soil properties in common bean cultivation. farming. Water and Soil Science (Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources), 15(55), 209-218. [In Persian with English Summary]. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24763594.1390.15.55.16.4

Santos, C.V., Campos, A., Azevedo, H., Caldeira, G., 2001. In situ and in vitro senescence induced by KCl stress: nutritional imbalance, lipid peroxidation and antioxidant metabolism. Journal of Experimental Botany. 52, 351-360. https://doi.org/10.1093/jexbot/52.355.351

Seleiman, M.F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Battaglia, M.L., 2021. Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. Plants. 10, 259. https://doi.org/10.3390/plants10020259

Simić, M., Dragičević, V., Mladenović Drinić, S., Vukadinović, J., Kresović, B., Tabaković, M., Brankov, M., 2020. The contribution of soil tillage and nitrogen rate to the quality of maize grain. agronomy. 10(7), 976. https://doi.org/10.3390/agronomy10070976

Sonawane, A.V., Shrivastava, P.K., 2022. Partial root zone drying method of irrigation: A review. Irrigation and Drainage. 71, 574–588. https://doi.org/10.1002/ird.2686

Strudley, M.W., Green, T.R., Ascough, J.C., 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time. State of The Science. Soil Tillage Research. 99, 4-48. https://doi.org/10.1016/j.still.2008.01.007

Schmer, M.R., Jin, V.L., Wienhold, B.J., Varvel, G.E., Follett, R.F., 2014. Tillage and residue management effects on soil carbon and nitrogen under irrigated continuous corn. Soil Science Society of America Journal. 78, 1987-1996. https://doi.org/10.2136/sssaj2014.04.0166

Singleton, V. L., Rossi, J. A., 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. American Journal of Enology and Viticulture, 16, 144-158. https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144

Tamrat Alemu, S., 2020. Review: Partial root zone drying an approach to increase water use efficiency of horticultural crops and chlorophyll fluorescence. Cogent Biology. 6. https://doi.org/10.1080/23312025.2020.1767016

Videnović, Ž., Simić, M., Srdić, J., Umanović, Z., 2011. Long term effects of different soil tillage systems on maize (*Zea mays* L.) yields. Plant, Soil and Environment. 57, 186–192. https://doi.org/10.17221/443/2010-PSE

Wang, W., Vinocur, B., Altman, A., 2003. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance. Planta. 218, 1-14. https://doi.org/10.1007/s00425-003-1105-5

Yaseen, R., Shafi, J., Ahmad, Shoaib Rana, M., Salim, M., Ahmad Qaisarani, S., 2014. Effect of deficit irrigation and mulch on soil physical properties, growth and yield of maize. Environment and Ecology Research. 2, 122-137. https://doi.org/10.13189/eer.2014.020302