University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

Cereal Research
Vol. 14, No. 4, Winter 2025 (415-434)
doi: 10.22124/CR.2025.28706.1840
pISSN: 2252-0163 eISSN: 2538-6115

RESEARCH PAPER **OPEN ACCESS**

The effect of nitrogen fertilizer on yield and yield components of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L.) under different irrigation regimes

Ali Asghar Atarian-far[1], Seyed Ali Mohammad Modarres-Sanavy[2]*, Ali Heidarzadeh[3] and Amir Mohammad Abedi[4]

1. M. Sc. Student, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2. Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
(* Corresponding author: modaresa@modares.ac.ir)
3. Ph. D. Graduate, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
4. M. Sc. Graduate, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Comprehensive abstract

Introduction

Drought is one of the primary limiting factors in the production of crops, particularly sweet sorghum. Drought stress negatively impacts various aspects of sweet sorghum growth by causing morphological, physiological, and biochemical changes, preventing the plant from achieving optimal yield. Additionally, in arid and semi-arid regions, sweet sorghum yield declines due to the lack of soil organic matter and nitrogen. Therefore, the application of nitrogen fertilizers is essential to address this issue. The objective of this study was to investigate the interaction of nitrogen and different irrigation regimes and determine the most appropriate nitrogen level and irrigation regime to achieve the highest yield of sweet sorghum.

Materials and methods

To investigate the effect of different irrigation regimes and nitrogen levels on the yield and yield components of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L. cv. 'Pegah'), an experiment was conducted as a split-plot based on randomized complete block design with three replications in Qom, Iran. In this experiment, the irrigation regime and nitrogen fertilizer consisted of four and five levels, which were randomly assigned to the main- and sub-plots, respectively. The irrigation regimes included optimal irrigation, mild water deficit, moderate water deficit, and severe water deficit, applied respectively after the depletion of 30%, 45%, 60%, and 75% of the available soil water in the root zone, followed by irrigation up to field capacity. Nitrogen levels from urea fertilizer also included 0 (control), 50, 100, 150, and 200 $kg.ha^{-1}$. The evaluated traits included plant height, panicle weight, 1000-grain weight, relative water content (RWC), leaf area index (LAI), crop growth rate (CGR), grain yield, dry forage yield, anthocyanin content, total chlorophyll content, and soluble sugar content.

Research findings

The results of this study showed that irrigation regimes and nitrogen levels had a significant effect on all evaluated traits, including leaf RWC, anthocyanin, soluble sugars, and total chlorophyll. The interaction of irrigation regims and nitrogen fertilizer levels was also significant for all traits except for RWC, CGR on the 30th day, and LAI. Reduced water and nitrogen levels led to a decrease in forage and grain yield, as well as yield components in sweet sorghum. Highest grain yield, 1000-grain weight, total chlorophyll content, and RWC were achieved with 150 $kg.ha^{-1}$ of nitrogen and optimal

irrigation, showing a significant difference compared to other nitrogen levels. The highest anthocyanin content was observed with 150 kg.ha^{-1} of nitrogen under moderate water stress, while the maximum soluble sugar content was recorded with 200 kg.ha^{-1} of nitrogen under severe water stress. Severe water stress resulted in an 87.77% reduction in grain yield compared to optimal irrigation. However, the application of 150 kg.ha^{-1} of nitrogen under severe water stress increased grain yield by 80.74%. These changes were also effective under other irrigation regimes, showing a significant improvement in plant yield.

Conclusion

The results of the current study showed that different irrigation regimes had varying effects on the evaluated traits, including yield and yield components of the Pegah variety of sweet sorghum. The results also indicated that the highest grain yield was obtained with the application of 150 kg.ha^{-1} urea under optimal irrigation, mild water stress, moderate water stress, and severe water stress, yielding 7390.93, 5698.40, 3782.94, and 938.23 kg.ha^{-1}, respectively. Based on these findings, for improving the physiological and functional traits of the Pegah variety of sweet sorghum under stress or non-stress conditions, the application of 150 kg.ha^{-1} nitrogen is recommended.

Keywords: Crop growth rate, Field capacity, Relative water content, Soluble sugar

Received: October 17, 2024 Accepted: January 29, 2025

Cite this article:

Atarian-far, A. A., Modarres-Sanavy, S. A. M., Heidarzadeh, A., & Abedi, A. M. (2025). The effect of nitrogen fertilizer on yield and yield components of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L.) under different irrigation regimes. *Cereal Research*, *14*(4), 415-434. doi: 10.22124/CR.2025.28706.1840.

تحقیقات غلات
دوره چهاردهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۳ (۴۳۴-۴۱۵)
doi: 10.22124/CR.2025.28706.1840
دانشگاه گیلان
دانشکده علوم کشاورزی
مقاله پژوهشی
دسترسی آزاد

تأثیر کود نیتروژن بر عملکرد و اجزای عملکرد سورگوم شیرین (*Sorghum bicolor* L.) تحت رژیم‌های مختلف آبیاری

علی‌اصغر عطاریان‌فر[۱]، سید علی محمد مدرس ثانوی[۲*]، علی حیدرزاده[۳] و امیرمحمد عابدی[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲- استاد، گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران (* نویسنده مسئول: modaresa@modares.ac.ir)
۳- دانش‌آموخته دکتری، گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده جامع

مقدمه: خشکی یکی از عوامل اصلی محدود کننده در تولید گیاهان زراعی، به‌ویژه سورگوم شیرین، محسوب می‌شود. تنش خشکی با ایجاد تغییرات مورفولوژیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی، تأثیرات منفی بر جنبه‌های مختلف رشد سورگوم شیرین دارد و از دستیابی به عملکرد بهینه آن جلوگیری می‌کند. از سوی دیگر، عملکرد سورگوم شیرین در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌دلیل کمبود مواد آلی خاک و نیتروژن نیز کاهش می‌یابد. به‌همین دلیل، استفاده از کودهای نیتروژنی برای رفع این مشکل ضروری است. این پژوهش با هدف بررسی برهمکنش نیتروژن با رژیم‌های مختلف آبیاری و تعیین مناسب‌ترین سطح نیتروژن و رژیم آبیاری برای دستیابی به بالاترین عملکرد سورگوم شیرین اجرا شد.

مواد و روش‌ها: به‌منظور بررسی تأثیر رژیم‌های مختلف آبیاری و مقادیر نیتروژن بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه سورگوم شیرین (*Sorghum bicolor* L.) رقم پگاه، آزمایشی در قالب کرت‌های خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در شهرستان قم اجرا شد. در این آزمایش، رژیم آبیاری شامل چهار سطح و کود نیتروژن شامل پنج سطح بود که به‌طور تصادفی به‌ترتیب در کرت‌های اصلی و فرعی آزمایش مورد بررسی قرار گرفتند. رژیم‌های آبیاری شامل آبیاری مطلوب، کم‌آبیاری ملایم، کم‌آبیاری متوسط و کم‌آبیاری شدید بود که به‌ترتیب پس از تخلیه ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درصد از آب قابل استفاده خاک در منطقه توسعه ریشه، تا حد ظرفیت زراعی آبیاری شدند. مقادیر کود نیتروژن نیز از منبع اوره شامل مقادیر صفر (شاهد)، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار بود. صفات ارزیابی شده شامل ارتفاع بوته، وزن خوشه، وزن هزار دانه، محتوای نسبی آب برگ، شاخص سطح برگ، سرعت رشد محصول، عملکرد دانه، عملکرد علوفه خشک، میزان آنتوسیانین، میزان کلروفیل کل و میزان قندهای محلول بود.

یافته‌های تحقیق: نتایج این مطالعه نشان داد که رژیم‌های آبیاری و مقادیر کود نیتروژن تأثیر معنی‌داری بر تمامی صفات مورد بررسی شامل محتوای نسبی آب برگ (RWC)، آنتوسیانین، قند محلول و کلروفیل کل داشتند. برهمکنش رژیم‌های آبیاری×مقادیر کود نیتروژن نیز بر همه صفات، به‌جز RWC، سرعت رشد محصول (CGR) در روز سی‌ام و شاخص سطح برگ (LAI)، معنی‌دار بود. کاهش میزان کود و آب آبیاری موجب کاهش عملکرد علوفه و دانه و افت اجزای آن در گیاه سورگوم

شیرین شد. بالاترین عملکرد دانه، وزن هزار دانه، محتوای کلروفیل کل و RWC با کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم کود نیتروژن و با رژیم آبیاری مطلوب به‌دست آمد که تفاوت آن با سایر سطوح کود نیتروژن معنی‌دار بود. همچنین، بیش‌ترین میزان آنتوسیانین در شرایط کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم کود نیتروژن و رژیم کم‌آبیاری متوسط مشاهده شد، و حداکثر قند محلول با ۲۰۰ کیلوگرم کود نیتروژن در شرایط کم‌آبیاری شدید به‌دست آمد. تنش کم‌آبیاری شدید موجب کاهش ۸۷/۷۷ درصدی عملکرد دانه در مقایسه با آبیاری مطلوب شد. با این‌حال، استفاده از ۱۵۰ کیلوگرم کود نیتروژن در هر هکتار در شرایط تنش کم‌آبی شدید توانست عملکرد دانه را به‌میزان ۸۰/۷۴ درصد افزایش دهد. این تغییرات در سایر رژیم‌های آبیاری نیز مؤثر بود و تأثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد گیاه داشت.

نتیجه‌گیری: نتایج این آزمایش نشان داد که رژیم‌های مختلف آبیاری، تأثیر متفاوتی بر صفات ارزیابی شده از جمله عملکرد و اجزای عملکرد سورگوم شیرین رقم پگاه داشتند. همچنین، نتایج نشان داد که بیش‌ترین عملکرد دانه با مصرف ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره به‌ترتیب در آبیاری مطلوب، کم‌آبیاری ملایم، کم‌آبیاری متوسط و کم‌آبیاری شدید با ۷۳۹۰/۹۳، ۵۶۹۸/۴۰، ۳۷۸۲/۹۴ و ۹۳۸/۲۳ کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، برای بهبود صفات فیزیولوژیک و عملکردی سورگوم شیرین رقم پگاه در هر دو شرایط تنش یا عدم تنش آبی، کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سرعت رشد محصول، ظرفیت زراعی، قند محلول، محتوای نسبی آب برگ

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰

نحوه استناد به این مقاله:

عطاریان‌فر، علی‌اصغر، مدرس ثانوی، سید علی محمد، حیدرزاده، علی، و عابدی، امیرمحمد. (۱۴۰۳). تأثیر کود نیتروژن بر عملکرد و اجزای عملکرد سورگوم شیرین (*Sorghum bicolor* L.) تحت رژیم‌های مختلف آبیاری. *تحقیقات غلات*، ۱۴(۴)، ۴۳۴-۴۱۵.
doi: 10.22124/CR.2025.28706.1840

مقدمه

سورگوم شیرین یک غله چهار کربنه و گیاهی با کارایی فتوسنتزی بالا است. از سورگوم شیرین برای تولید قند، الکل، شربت، شکر زرد، علوفه، سوخت و کاغذ استفاده می‌شود، هر چند بیش‌تر برای تولید قند (ساکارز، گلوکز و فروکتوز) و الکل کشت می‌شود (Almodares *et al*., 2008). سورگوم شیرین نسبت به خشکی و تا حدودی به شوری (در مقایسه با جو و چغندر قند) مقاوم است و در نقاط گرم و خشک دنیا مانند استرالیا، آفریقا و آمریکا کشت می‌شود. طبق آمار وزارت جهاد کشاورزی در سال ۱۳۹۷، سطح زیر کشت سورگوم در ایران به حدود هفت هزار هکتار رسیده است (Ahmadi *et al*., 2020). توده‌های زراعی بومی سورگوم در ایران در مناطق خراسان جنوبی، سیستان، کرمان، اصفهان، یزد، گیلان، مازندران و بنادر جنوبی به‌طور پراکنده وجود دارند. چون نیاز آبی آن کم است، این گیاه را شتر گیاهان زارعی نیز می‌نامند. مدت کاشت تا برداشت آن کوتاه (سه تا چهار ماه) است و ارزش زراعی زیادی به‌عنوان خوراک دام دارد. از شیرابه آن مانند نیشکر و از دانه آن مانند ذرت برای تولید سوخت زیستی اتانول استفاده و پس از تولید اتانول، بقایای گیاه به مصرف خوراک دام می‌رسد (Nandeshwar *et al*., 2018). تحمل به خشکی در ارقام سورگوم، ممکن است به سازوکار اجتناب از خشکی که به سیستم ریشه‌ای عمیق آن‌ها مربوط می‌شود، وابسته باشد (Habyarimana *et al*., 2004). عملکرد سورگوم شیرین در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌دلیل کمبود نیتروژن و مواد آلی خاک، پایین است. این مشکل باید با استفاده از کودهای نیتروژنی برطرف شود. امروزه یکی از دلایل آلودگی محیط زیست به‌دلیل استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی به‌ویژه کود نیتروژن است که این امر ضرورت تجدید نظر در مصرف نیتروژن را مشخص می‌سازد (Zhao *et al*., 2005).

تورگوت و همکاران (Turgut *et al*., 2005) اثر تراکم کاشت و سطوح کود اوره را بر عملکرد علوفه خشک، عملکرد دانه و برخی از اجزای عملکرد سورگوم شیرین ارزیابی و گزارش کردند که عملکرد دانه و علوفه سورگوم شیرین با افزایش فاصله ردیف‌های کاشت، کاهش و با مصرف ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، افزایش یافت. کاربرد درست کود نیتروژنه می‌تواند زیست‌توده و کربوهیدرات‌های سورگوم شیرین را که عوامل مهمی در مصارف صنعتی و غذایی هستند، افزایش دهد. محققین به این نتیجه رسیدند که با افزایش سطوح کود نیتروژن از ۵۰ تا ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار عملکرد سورگوم شیرین به طور معنی‌داری افزایش می‌یابد (Almodares *et al*., 2013). کمبود نیتروژن از طریق کاهش LAI (شاخص سطح برگ) و نیز به‌هم خوردن سنتز و تخریب پروتئین، پیری زودرس برگ‌ها را سبب می‌شود و به‌ویژه با اثر روی آنزیم روبیسکو بر فرایند فتوسنتز گیاه تأثیر منفی می‌گذارد (Scarsbrook & Doss, 1973). گزارش‌ها نشان می‌دهند که مصرف کود نیتروژن در دو نوبت در مراحل کاشت و هشت برگی سورگوم شیرین منجر به افزایش عملکرد می‌شود. همچنین مصرف ۷۸ کیلوگرم در هکتار در دو نوبت بالاترین میزان عملکرد را نشان می‌دهد. کاربرد نیتروژن باعث افزایش عملکرد سورگوم شیرین می‌شود تا زمانی که به یک مقدار بهینه برسد. میزان بهینه نیتروژن بین ۶۰ تا ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار بیان شده است (Olugbemi & Abiola Ababyomi, 2017).

تنش آب مانع از آن می‌شود که عملکرد گیاه حداکثر شود که این به دلیل اثر تنش آبی بر فتوسنتز است. افزایش مقاومت مزوفیلی و روزنه‌ای در شرایط تنش آبی باعث کاهش ورودی دی‌اکسید کربن به گیاه می‌شود و در این حالت فتوسنتز ظاهری کاهش می‌یابد. به‌طور کلی تنش خشکی در سورگوم شیرین سبب کاهش سرعت رشد، سطح برگ و نهایتاً کاهش تولید می‌شود (Zegada-Lizarazu *et al*., 2015). کهن و مظاهری (Kohan & Mazaheri, 2003) در بررسی تاثیر فواصل آبیاری بر عملکرد سورگوم علوفه‌ای به این نتیجه رسیدند که فواصل آبیاری ۷ و ۱۲ روز نسبت به فواصل آبیاری ۱۷ و ۲۲ روز باعث افزایش معنی‌دار عملکرد می‌شود. تنش خشکی به‌واسطه تأثیر منفی بر شاخص سطح برگ، ارتفاع بوته و سایر صفات رویشی موجب افت عملکرد سورگوم می‌شود (Razmi & Ghasemi, 2007). در این پژوهش نیز اثرات سطوح نیتروژن و آبیاری مورد ارزیابی قرار گرفت که هدف از آن، تعیین مناسب‌ترین سطح نیتروژن و رژیم آبیاری و بررسی برهمکنش نیتروژن و رژیم‌های آبیاری به‌منظور دستیابی به بالاترین عملکرد سورگوم شیرین بود.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی تأثیر رژیم‌های آبیاری و کود نیتروژن بر عملکرد و اجزای عملکرد سورگوم شیرین رقم پگاه، آزمایشی در بهار سال ۱۳۹۷ در مزرعه‌ای واقع در جاده

قم-کاشان اجرا شد. طبق تقسیم‌بندی کوپن، این منطقه دارای اقلیم خشک بسیار گرم با تابستان‌های گرم و خشک است. طول جغرافیایی محل آزمایش، ۵۱ درجه و صفر دقیقه و ۱۰/۱۷ ثانیه و عرض جغرافیایی آن ۳۴ درجه و ۳۰ دقیقه و ۳۵/۰۴ ثانیه با ارتفاع حدود ۹۳۳ متر از سطح دریا است. نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش و تجزیه شیمیایی آب آبیاری به‌ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

Table 1. Physical and chemical characteristics of the soil of experimental field

Depth (cm)	EC ($dS.m^{-1}$)	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Texture	Organic carbon (%)	TNV (%)	K (ppm)	P (ppm)	Fe (ppm)
0-30	2.50	15	20	65	Sandy loam	0.6	13	250	12	9.8

جدول ۲- نتایج تجزیه شیمیایی آب آبیاری

Table 2. Results of chemical analysis of water at the test site

PH	EC	CO_3^{-2}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	SAR
7.2	1.7	-	0.7	9.1	7.2	5.1	3.1	8.8	0.18	4.3

آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۲۰ تیمار و سه تکرار اجرا شد. عوامل مورد بررسی شامل چهار رژیم آبیاری و پنج مقدار نیتروژن از منبع کود اوره بودند که به‌طور تصادفی به‌ترتیب در کرت‌های اصلی و فرعی آزمایش مورد بررسی قرار گرفتند. رژیم‌های آبیاری شامل آبیاری مطلوب، کم‌آبیاری ملایم، کم‌آبیاری متوسط و کم‌آبیاری شدید بودند که به‌ترتیب با قطع آبیاری تا زمان تخلیه ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درصد آب قابل استفاده خاک در منطقه ریشه اعمال شدند. مقادیر کود نیتروژن نیز شامل صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن از منبع کود اوره بودند. مقادیر کود نیتروژن به دو بخش تقسیم شد. نیمی از آن همزمان با آبیاری دوم و نیمی‌دیگر در مرحله رشد سریع (۴۰ روز پس از کاشت) و به‌صورت سرک در اختیار بوته‌ها قرار گرفت. اولین آبیاری پس از عملیات کاشت در ۲۵ خرداد ماه صورت گرفت. آبیاری از زمان کاشت تا استقرار کامل بوته‌ها (۴-۶ برگی) هر سه روز یک بار انجام و پس از آن تیمارهای آبیاری اعمال شد. در این آزمایش از رقم پگاه که یک رقم علوفه‌ای نیمه‌دیررس و مناسب کاشت در مناطق معتدل، گرم و خشک است (Fouman *et al*., 2008)، استفاده شد. طول دوره رشد رقم پگاه تا اولین برداشت ۸۰ روز و عملکرد علوفه تر و خشک آن به‌ترتیب ۱۲۸/۳۸ و ۲۳/۵ تن در هکتار است.

ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم به‌وسیله دستگاه صفحه فشاری (Pressure plate) اندازه‌گیری و میزان پتانسیل رطوبتی خاک با توجه درصد رطوبت حجمی در زمان تنش که با دستگاه TDR اندازه‌گیری شد (اعداد به‌دست آمده از TDR)، محاسبه شد. برای کالیبره کردن دستگاه TDR به این ترتیب عمل شد که قبل از کار گذاشتن لوله‌های TDR مزرعه آبیاری شد. درصد آب قابل استفاده (D) بر اساس رابطه (۱) تعیین و سپس با استفاده از رابطه (۲) درصد تخلیه آب قابل استفاده محاسبه شد:

$$D\ (\%) = \frac{1}{n}\sum_{1}^{n}\frac{FCi-\theta i}{FCi-Wp}\times 100 \qquad (۱)$$

در این رابطه، n تعداد نمونه خاک گرفته‌شده از عمق موثر توسعه ریشه، θi رطوبت خاک در نمونه iام، FCi رطوبت خاک در ظرفیت مزرعه در نمونه iام (پتانسیل رطوبتی معادل۱۶ درصد وزنی و ۲۲/۵۶ درصد حجمی قرائت شده توسط دستگاه TDR) و Wp رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم (پتانسیل رطوبتی معادل ۶/۷۸ درصد وزنی و ۹/۵۶ درصد حجمی قرائت شده توسط دستگاه TDR) است.

تخلیه آب قابل استفاده (درصد) = 100-D (۲)

در پایان دوره رشد و در مرحله رسیدگی (قرمز شدن پوشش دانه‌ها و زرد شدن اغلب برگ‌های مسن گیاه)، از خطوط وسط هر کرت ۲۰ بوته در مساحتی معادل حدود دو متر مربع به‌صورت کف‌بر برداشت و وزن کل بوته‌ها یادداشت شد.

صفات ارزیابی شده در این تحقیق شامل عملکرد دانه، وزن هزار دانه، عملکرد علوفه سورگوم شیرین و صفات کیفی شامل محتوای قند محلول (Fales, 1951)، میزان آنتوسیانین (Krizek *et al*., 1993)، میزان کلروفیل کل (Hiscox & Israelstam, 1979) و محتوای نسبی آب برگ (Wright & Rao, 1994) بودند. سرعت رشد محصول (CGR) و شاخص سطح برگ (LAI) با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ (Leaf area meter) مدل DELTA-T DEVICES ساخت کشور انگلستان) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری وزن خشک ساقه و برگ پس از نمونه‌برداری، نمونه‌های هر تیمار به مدت ۴۸ ساعت درون آون الکتریکی در دمای ۷۵ درجه سلسیوس خشک و سپس وزن خشک ساقه و برگ با ترازو اندازه‌گیری شد. داده‌های حاصل به‌وسیله نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ تجزیه و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون حداقل اختلاف معنی دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد استفاده شد.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته

برهمکنش رژیم‌های آبیاری و کود نیتروژن بر ارتفاع بوته سورگوم شیرین در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج نشان داد که در تمامی رژیم‌های آبیاری، با افزایش مقادیر کود نیتروژن تا ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار میزان ارتفاع بوته نیز افزایش یافت. همچنین، با افزایش فواصل آبیاری از میزان ارتفاع بوته کاسته شد. مقایسه برهمکنش رژیم آبیاری×کود نیتروژن نشان داد که بیش‌ترین ارتفاع بوته به آبیاری مطلوب و ۲۰۰ کیلوگرم کود نیتروژن تعلق داشت که اختلاف معنی‌داری با۱۵۰ کیلوگرم کود نیتروژن نداشت و در مقابل، کم‌ترین ارتفاع بوته مربوط به کم‌آبیاری شدید و عدم کاربرد نیتروژن بود (شکل ۱). در کم‌آبیاری ملایم، بیش‌ترین میزان ارتفاع با کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم کود نیتروژن حاصل شد که با سایر سطوح اختلاف معنی‌داری داشت. همچنین، کم‌ترین ارتفاع بوته از عدم کاربرد نیتروژن حاصل شد که با کاربرد ۵۰ کیلوگرم کود نیتروژن اختلاف آماری معنی‌داری نداشت. در کم‌آبیاری متوسط نیز بیشینه ارتفاع با کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم کود نیتروژن حاصل شد که با ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن اختلاف معنی‌داری نداشت. در کم‌آبیاری شدید نیز بیشینه ارتفاع با کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن حاصل شد که با ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن اختلاف معنی‌داری نداشت. عدم کاربرد نیتروژن در کم‌آبیاری شدید، متوسط و ملایم نسبت به آبیاری مطلوب، ارتفاع بوته را به‌ترتیب ۴۳، ۴۰ و ۲۶ درصد کاهش داد. به همین ترتیب، با کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن در کم‌آبیاری شدید، متوسط و ملایم نسبت به آبیاری مطلوب نیز ارتفاع بوته به‌ترتیب ۵۸، ۵۰ و ۲۶ درصد کاهش پیدا کرد.

افزایش ارتفاع بوته سورگوم در اثر افزایش کود نیتروژن توسط محمود و همکاران (Mahmud *et al*., 2003) و ایوب و همکاران (Ayub *et al*., 2012) نیز گزارش شده است. با افزایش مصرف نیتروژن فاصله میانگره‌ها طولانی شده و در نهایت ارتفاع بوته افزایش می‌یابد (Eltelib *et al*., 2006). کاهش ارتفاع بوته سورگوم در شدت تنش متوسط به‌علت کاهش طول میانگره و در تنش شدید به‌علت کاهش تعداد و طول میانگره‌ها اتفاق می‌افتد (Razmi & Ghasemi, 2007). یکی از اثرات کمبود آب کاهش توسعه سلول از طریق نقصان در آماس سلول است که این امر سبب کاهش طویل شدن ساقه می‌شود (Sandhu *et al*., 2021).

وزن خوشه

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، برهمکنش رژیم آبیاری ×کود نیتروژن بر وزن خوشه سورگوم شیرین معنی‌دار شد (جدول ۳). با افزایش میزان کود نیتروژن تا ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار، وزن خوشه نیز افزایش یافت. همچنین با افزایش فواصل آبیاری از وزن خوشه کاسته شد. مقایسه برهمکنش رژیم آبیاری×کود نیتروژن نشان داد که بیشینه وزن خوشه با کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم کود نیتروژن در آبیاری مطلوب حاصل شد و کم‌ترین مقدار آن نیز به کم‌آبیاری شدید و عدم مصرف نیتروژن تعلق داشت (شکل ۲). عدم کاربرد نیتروژن در کم‌آبیاری شدید، متوسط و ملایم نسبت به آبیاری مطلوب، وزن خوشه را به‌ترتیب ۸۱، ۶۴ و ۳۹ درصد کاهش داد. در مقابل، با مصرف ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در کم‌آبیاری شدید، متوسط و ملایم، وزن خوشه‌ها به‌ترتیب ۴۲، ۳۶ و ۱۸ درصد نسبت به آبیاری مطلوب کاهش یافت، در حالی‌که کاربرد ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در آبیاری مطلوب، وزن خوشه‌ها را به‌ترتیب به‌میزان ۱۱، ۲۳، ۳۴ و ۲۰ درصد افزایش داد.

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر رژیم‌های آبیاری و کود نیتروژن بر صفات گیاه سورگوم شیرین تحت

Table 3. Analysis of variance of traits of sweet sorghum under the influence of different irrigation regimes and nitrogen fertilizer

Source of variation	df	Mean square				
		Plant height	Panicle weight	Relative water content (RWC)	Crop growth rate (CGR)	Leaf area index (LAI)
Replication (R)	2	74.09	67.41	288.95	0.36	0.13
Irrigation regime (I)	3	22743.22**	591803.7**	472/95**	471.91**	14.06**
Error 1	6	16.35	260.93	78.48	1.16	0.06
Nitrogen fertilizer (N)	4	4211.50**	182559.49**	1002.80**	335.83**	5.03**
I × N	12	566.62**	3739.58**	34.96	7.00**	0.80
R × N	8	134.66	1268.25	58.65	1.57	0.38
Error 2	24	78.85	833.21	35.74	1.29	0.25
CV (%)	-	9.06	5.24	10.46	7.45	13.95

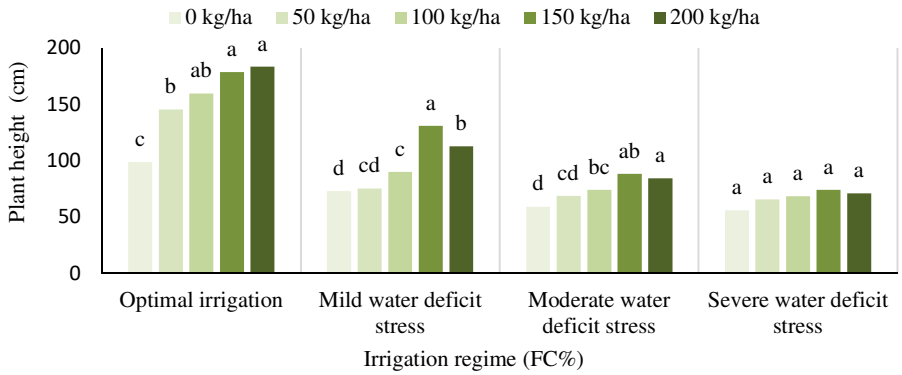
* and ** Significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

Table 3. Continued

جدول ۳- ادامه

Source of variation	df	Mean square					
		1000-grain weight	Dry forage yield	Grain yield	Anthocyanin	Total chlorophyll	Soluble sugar
Replication (R)	2	0.10	3642.28	168890.2	1.43	6.11	0.16
Irrigation regime (I)	3	264.06**	8772349.39**	88215656.0**	75.44**	27.70**	73.06**
Error 1	6	0.59	24748.97	173520.4	0.47	1.20	0.17
Nitrogen fertilizer (N)	4	381.18**	17374934.06**	10248192.2**	103.46**	12.61**	9.37**
I × N	12	16.42**	951829.92**	869769.6**	53.94**	0.68**	6.50**
R × N	8	5.22	12.75*	86752.2	0.37	0.08	1.36*
Error 2	24	3.50	3.98	83918.4	1.92	0.26	0.42
CV (%)	-	7.58	8.06	7.81	8.52	15.89	8.79

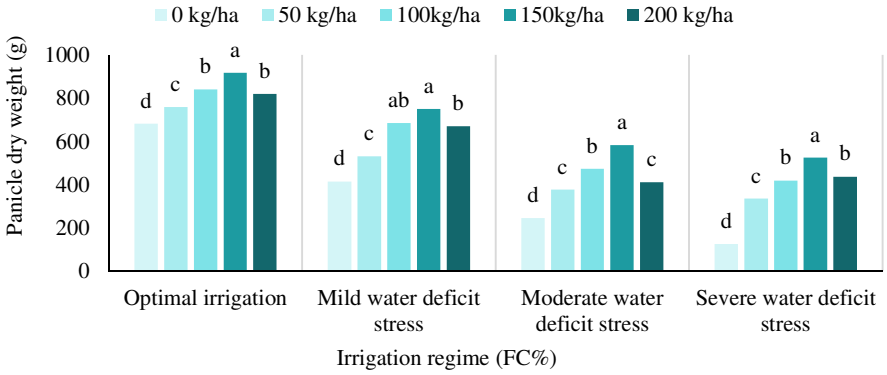
* and ** Significant at 5% and 1% probability levels, respectively.



شکل ۱- برهمکنش رژیم آبیاری × کود نیتروژن بر ارتفاع بوته سورگوم شیرین

Figure 1. Intraction of irrigation regime × nitrogen fertilizer on plant height of sweet sorghum

علت کاهش وزن خوشه‌ها در تنش کم‌آبی، کاهش دوره رشد است که در نتیجه آن تولید مواد غذایی کاهش می‌یابد. کاهش سنتز آسیمیلات‌ها از یک‌سو و افزایش رقابت در اثر تنش کمبود آب از سوی دیگر باعث کاهش وزن خوشه‌ها در شرایط کم‌آبی می‌شود (Abedi *et al.*, 2024). تنش خشکی موجب کوتاه شدن خوشه و کاهش تعداد گلچه‌ها و تعداد شاخه‌های فرعی شده و وزن هزار دانه را نیز کاهش می‌دهد و برآیند آن‌ها منجر به کاهش وزن خوشه می‌شود. قدسی و همکاران (Ghodsi *et al.*, 2013) نیز بیش‌ترین وزن خوشه را با کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن تحت شرایط آبیاری کامل گزارش کردند که با یافته‌های پژوهش حاضر مطابقت داشت. بازگیر و همکاران (Bazgir *et al.*, 2020) نیز بیان داشتند که با کاهش نیتروژن خاک، وزن خوشه‌ها کاهش می‌یابد.



شکل ۲- برهمکنش رژیم آبیاری × کود نیتروژن بر وزن خوشه سورگوم شیرین

Figure 2. Intraction of irrigation regime × nitrogen fertilizer on dry weight of panicle

محتوای نسبی آب برگ (RWC)

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد که رژیم آبیاری و کود نیتروژن تأثیر معنی‌داری بر محتوای نسبی آب برگ سورگوم شیرین در روز سی‌ام داشت ($P<0.01$)، ولی برهمکنش آبیاری × نیتروژن روی این صفت معنی‌دار نبود. با افزایش فواصل آبیاری از RWC کاسته شد، به‌طوری که بیش‌ترین میزان RWC متعلق به آبیاری مطلوب بود که اختلاف معنی‌داری با کم‌آبیاری ملایم و متوسط نداشت (شکل A-۳). همچنین، بیش‌ترین میزان RWC با مصرف ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن حاصل شد که با سایر سطوح کودی تفاوت داشت و کم‌ترین میزان آن مربوط به عدم مصرف کود نیتروژن بود (شکل B-۳). در آفتابگردان نیز کاهش محتوای نسبی آب برگ میانی با افزایش دور آبیاری (تنش خشکی) گزارش شد (Khamari *et al.*, 2007). دانشیان و همکاران (Daneshiyan *et al.*, 2006) نیز کاهش معنی‌دار RWC را در آفتابگردان در اثر افزایش تنش خشکی گزارش کردند. کاهش RWC در ذرت دانه‌ای نیز با افزایش تنش خشکی مشاهده شد (Tariq-Al-Islami *et al.*, 2012). عدم تعادل بین عرضه و تقاضای آب در گیاه محتمل‌ترین دلیل کاهش محتوای نسبی آب برگ تحت شرایط تنش خشکی می‌باشد. به‌عبارت دیگر در شرایط تنش خشکی، ریشه‌ها قادر به تأمین آب از دست‌رفته از طریق تعرق نیستند و در نتیجه پتانسیل آب برگ کاهش می‌یابد.

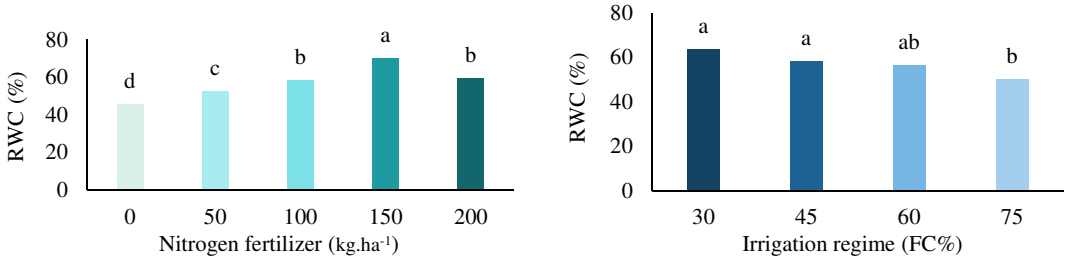
سرعت رشد محصول (CGR)

نتایج نشان داد که برهمکنش کود نیتروژن و رژیم آبیاری بر سرعت رشد سورگوم شیرین در ۹۵ روز پس از کشت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳)، به‌طوری که عدم کاربرد کود نیتروژن در کم آبیاری شدید، متوسط و ملایم نسبت به آبیاری مطلوب، سرعت رشد نسبی را به‌ترتیب ۸۰، ۶۶ و ۲۷ درصد کاهش داد. با کاربرد ۲۰۰ کیلوگرم کود نیتروژن در کم‌آبیاری شدید، متوسط و ملایم، سرعت رشد نسبی به‌ترتیب ۴۵، ۴۰ و ۳۵ درصد نسبت به آبیاری مطلوب کاهش یافت، اما در آبیاری مطلوب، کاربرد ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن سرعت رشد نسبی را به‌ترتیب به‌میزان ۱۷، ۴۳، ۸۳ و ۱۰۶ درصد افزایش داد (شکل ۴). سرعت رشد محصول نمایانگر میزان تجمع ماده خشک در یک فاصله زمانی مشخص در واحد سطح زمین است. از آنجایی که شاخص سطح برگ عامل مهمی در جذب کربن است، از این‌رو تغییر شاخص سطح برگ در شرایط تنش خشکی، سرعت رشد محصول را تغییر می‌دهد (Asghari Lalami *et al.*, 2020). به‌عبارت دیگر، سرعت رشد محصول تابع مستقیمی از شاخص سطح برگ و سرعت فتوسنتز خالص است و کاهش دریافت نور ناشی از کاهش شاخص سطح برگ در اثر تنش کمبود آب موجب کاهش سرعت رشد محصول می‌شود (Castro *et al.*, 2022). نتایج این آزمایش نیز نشان داد که بیش‌ترین میزان LAI (۳/۰۱) و CGR (۱۳/۵۷ گرم بر متر مربع در روز) مربوط به آبیاری روزانه و کم‌ترین LAI (۱/۳۵) و CGR (۴/۷۹ گرم بر متر مربع در روز) مربوط به آبیاری ۱۵ روزه بود.

شاخص سطح برگ (LAI)

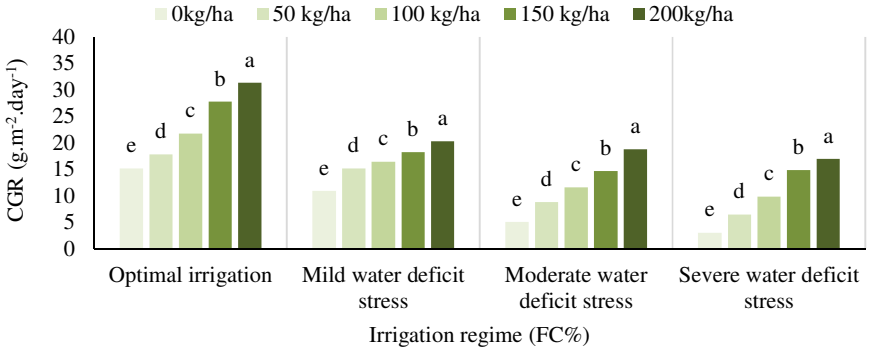
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر رژیم آبیاری و کود نیتروژن بر شاخص سطح برگ معنی‌دار بود، در حالی‌که برهمکنش آبیاری ×نیتروژن تأثیر معنی‌داری روی

شاخص سطح برگ نداشت (جدول ۳). بیش‌ترین مقدار LAI در کم‌آبیاری ملایم و کم‌ترین مقدار آن در کم‌آبیاری شدید مشاهده شد (شکل A-۵). همچنین، با افزایش کود نیتروژن تا ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار، شاخص سطح برگ افزایش یافت (شکل B-۵). آزمایشی در نخود نشان داد که سرعت رشد و مقدار برگ و شاخه در شرایط تنش خشکی کاهش یافت و گیاه زودتر به مرحله گلدهی رسید (Gupta *et al.*, 1995). کاهش سطح برگ در تیمارهای کم‌آبیاری یک واکنش فیزیولوژیک مهم به شرایط تنش رطوبتی در بخش خشک ریشه می‌باشد که به‌دلیل تولید ABA در ریشه و انتقال آن به اندام هوایی به‌وجود می‌آید (Earl & Davis, 2003). کاهش سطح برگ می‌تواند اولین خط دفاعی برای مقابله با خشکی باشد، به‌طوری که در اثر تنش آبی شاخص سطح برگ کاهش می‌یابد (Pagter *et al.*, 2005). در ذرت نیز اعمال تیمار کم‌آبیاری تا ۵۰ درصد سطح آب آبیاری موجب کاهش معنی‌دار شاخص سطح برگ در مقایسه با آبیاری کامل شد (Yazar *et al.*, 2009). در آزمایش دیگری، تیمار کم‌آبیاری موجب کاهش شاخص سطح برگ سورگوم در طول فصل رشد شد (Jaenudin *et al.*, 2023).



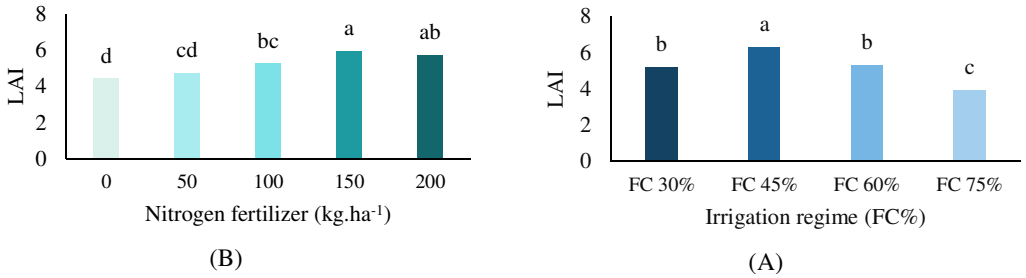
شکل ۳- اثر رژیم آبیاری (A) و کود نیتروژن (B) بر محتوای نسبی آب (RWC)

Figure 3. The effect of irrigation regime (A) and nitrogen fertilizer (B) on relative water content (RWC)



شکل ۴- برهمکنش رژیم آبیاری × کود نیتروژن بر سرعت رشد محصول (CGR) ۹۵ روز پس از کاشت

Figure 4. Intraction of irrigation regime × nitrogen fertilizer on crop growth rate (CGR) 95 days after planting



شکل ۵- اثر رژیم آبیاری (A) و کود نیتروژن (B) بر شاخص سطح برگ (LAI)

Figure 5. The effect of irrigation regime (A) and nitrogen fertilizer (B) on leaf area index (LAI)

وزن هزار دانه

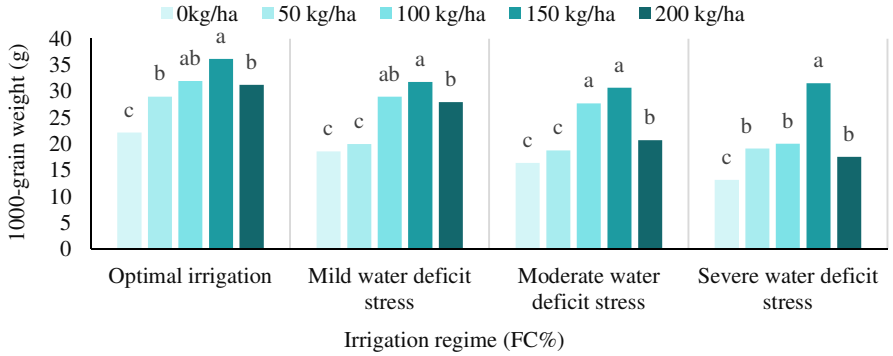
برهمکنش رژیم آبیاری و کود نیتروژن بر وزن هزار دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). در تمامی تیمارهای آبیاری، بیشینه وزن هزار دانه با مصرف ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن و کم‌ترین وزن هزار دانه با عدم مصرف کود نیتروژن به‌دست آمد. همچنین، بیش‌ترین وزن هزار دانه در رژیم آبیاری مطلوب و کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن و کم‌ترین وزن هزار دانه در رژیم کم‌آبیاری شدید و عدم کاربرد نیتروژن مشاهده شد (شکل ۶). عدم کاربرد نیتروژن در کم‌آبیاری شدید، متوسط و ملایم نسبت به آبیاری مطلوب، وزن هزار دانه را به‌ترتیب ۴۰، ۲۶ و ۱۵ درصد کاهش داد، در حالی‌که با کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار در کم‌آبیاری شدید، متوسط و ملایم، وزن هزار دانه به‌ترتیب ۱۲/۷۸، ۱۵ و ۱۲/۱۷ درصد نسبت به آبیاری مطلوب کاهش یافت که بیانگر تأثیر کود نیتروژن در ممانعت از کاهش وزن هزار دانه تحت شرایط تنش خشکی می‌باشد. همچنین در رژیم آبیاری مطلوب، کاربرد ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، وزن هزار دانه را به‌ترتیب به‌میزان ۳۱، ۴۴، ۶۳ و ۴۱ درصد افزایش داد. در رژیم کم‌آبیاری شدید نیز با مصرف این میزان کود نیتروژن، وزن هزار دانه به‌ترتیب ۴۴، ۵۲، ۱۳۹ و ۳۳ درصد افزایش یافت که بیانگر این مطلب است که در شرایطی که فواصل آبیاری افزایش می‌یابد، استفاده از کود نیتروژن تأثیر بیش‌تری در افزایش وزن هزار دانه دارد.

در مطالعه اثر رژیم‌های کم‌آبیاری و کود نیتروژن بر سورگوم دانه‌ای رقم پیام، وزن هزار دانه تحت تأثیر افزایش شدت کم‌آبیاری، کاهش یافت و بیش‌ترین وزن هزار دانه در آبیاری کامل مشاهده شد. این محققین کاهش فعالیت فتوسنتزی و ذخیره گیاه قبل از گلدهی و به‌دنبال آن کاهش تولید مواد غذایی در مرحله پر شدن دانه را از دلایل کاهش وزن دانه‌ها در شرایط تنش خشکی عنوان کردند (Ghodsi *et al*., 2013). وزن هزار دانه با افزایش مصرف کود نیتروژن تا ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار افزایش یافت. به‌نظر می‌رسد افزایش نیتروژن تا ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار موجب بهبود فرایندهای رشدی می‌شود و می‌تواند ذخیره قابل توجهی را برای انباشت در دانه فراهم کند، ولی کاربرد ۲۰۰ کیلوگرم کود نیتروژن با افزایش رشد رویشی و احتمالاً تأخیر در ورود به فاز زایشی مواجه و موجب شد که پر شدن دانه در اواخر فصل دچار مشکل شود و وزن هزار دانه کاهش یابد. کاهش معنی‌دار وزن هزار دانه در شرایط تنش به‌دلیل زودرس شدن گیاه به‌منظور فرار از خشکی است، زیرا زودرسی به‌همراه کاهش دوره پر شدن دانه، باعث کاهش زمان مورد نیاز گیاه برای تولید و یا انتقال مواد غذایی لازم به دانه‌ها شده و باعث کاهش وزن و چروکیدگی دانه می‌شود (Mousavi & Zakarinejad, 2020). در واقع افزایش بیش از حد کود نیتروژن با تمدید رشد رویشی، فاز زایشی گیاه را به‌تأخیر می‌اندازد و به‌دنبال آن طول دوره پر شدن دانه‌ها کاهش می‌یابد و بنابراین دانه‌ها زمان کم‌تری برای تجمع آسیمیلات‌های فتوسنتزی خواهند داشت و در نتیجه باعث کاهش معنی‌دار وزن هزار دانه می‌شود.

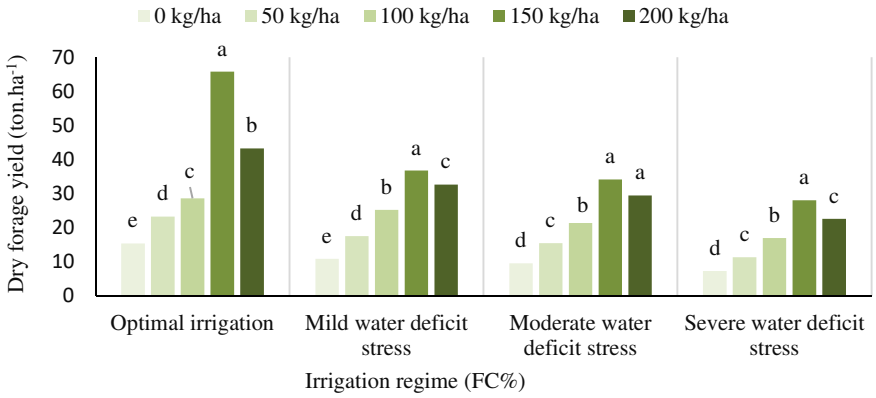
عملکرد علوفه خشک

برهمکنش رژیم آبیاری و کود نیتروژن بر عملکرد علوفه خشک سورگوم شیرین معنی‌دار ($P<0.01$) بود (جدول ۳). در همه تیمارهای آبیاری، با افزایش مقادیر کود نیتروژن تا ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار عملکرد علوفه خشک نیز افزایش یافت. همچنین با افزایش فاصله آبیاری، از میزان علوفه خشک کاسته شد، به‌طوری که بیش‌ترین عملکرد علوفه خشک مربوط به آبیاری مطلوب و مصرف ۱۵۰ کیلوگرم کود نیتروژن و کم‌ترین عملکرد علوفه خشک مربوط به کم‌آبیاری شدید و عدم کاربرد نیتروژن بود (شکل ۷). دو مکانیسم احتمالی ممکن در افزایش عملکرد به‌واسطه مصرف نیتروژن، به نقش تنظیم‌کنندگی نیتروژن در تولید آمینواسیدها و هورمون‌های گیاهی مرتبط با تقسیم سلولی و طولانی شدن دیواره سلولی نسبت داده شده است (Siam *et al*., 2008). از دلایل دیگر افزایش عملکرد سورگوم پس از مصرف کود نیتروژن می‌توان به تأثیر این کود در فراهم کردن شرایط بهتر برای رشد و نمو و بهره‌مندی از عوامل محیطی اشاره کرد (Rahman *et al*., 2001). مطالعات نشان می‌دهند که افزایش کودهای نیتروژن، فسفره و پتاسیم تا حدی منجر به افزایش عملکرد سورگوم شیرین می‌شود، اما پس از آن کاهش عملکرد دیده می‌شود (Wang *et al*., 2017). هنگامی‌که میزان کود نیتروژن از صفر تا ۸۴ کیلوگرم در هکتار افزایش داده شد، عملکرد زیست‌توده نیز به مقدار قابل‌توجهی افزایش یافت، ولی هنگامی که میزان نیتروژن از ۸۴ کیلوگرم بیش‌تر شد، هیچ‌گونه افزایش معنی‌داری در عملکرد زیست‌توده مشاهده نشد. هانکوکو و همکاران

(Haankuku *et al.*, 2014) نیز گزارش کردند که افزایش کود نیتروژن تا ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار، عملکرد علوفه سورگوم را افزایش داد، اما تفاوت معنی‌داری بین ۱۲۰ تا ۲۴۰ کیلوگرم نیتروژن مشاهده نشد. در مطالعه حاضر نیز بالاترین عملکرد علوفه سورگوم شیرین در تمامی رژیم‌های آبیاری مربوط به ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن بود و با افزایش میزان کود به ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار، کاهش عملکرد دیده شد.



شکل ۶- برهمکنش رژیم آبیاری × کود نیتروژن بر وزن هزار دانه سورگوم شیرین
Figure 6. Intraction of irrigation regime × nitrogen fertilizer on 1000-grain weight of sweet sorghum

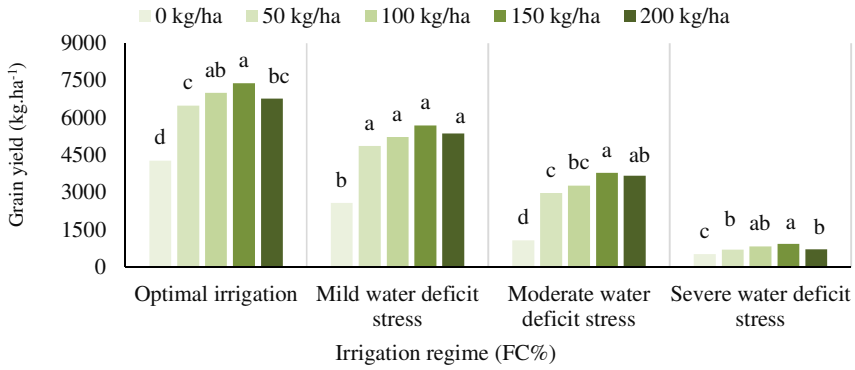


شکل ۷- برهمکنش رژیم آبیاری × کود نیتروژن بر عملکرد علوفه خشک سورگوم شیرین
Figure 7. Intraction of irrigation regime × nitrogen fertilizer on dry forage yield of sweet sorghum

عملکرد دانه

نتایج نشان داد که تأثیر کود نیتروژن، رژیم آبیاری و برهمکنش کود نیتروژن ×رژیم آبیاری بر عملکرد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). در تمامی رژیم‌های آبیاری، بیش‌ترین عملکرد دانه با کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن و کم‌ترین عملکرد دانه با عدم مصرف کود نیتروژن به‌دست آمد (شکل ۸). عدم کاربرد نیتروژن در کم‌آبیاری شدید، متوسط و ملایم نسبت به آبیاری مطلوب، عملکرد دانه را به‌ترتیب ۸۷، ۷۴ و ۳۹ درصد کاهش داد، در حالی‌که با کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در شرایط کم‌آبیاری شدید، متوسط و ملایم، عملکرد دانه به‌ترتیب ۸۷، ۴۸ و ۲۲ درصد نسبت به آبیاری مطلوب کاهش یافت. بیش‌ترین عملکرد دانه با کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن در رژیم آبیاری مطلوب به‌دست آمد که با کاربرد ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن تفاوت معنی‌داری نداشت. همچنین، تحت شرایط آبیاری مطلوب، مصرف ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، عملکرد دانه را به‌ترتیب ۵۱، ۶۳، ۷۲ و ۵۸ درصد افزایش داد، در حالی‌که تحت شرایط کم‌آبیاری شدید، مصرف ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن، عملکرد دانه را به‌ترتیب به‌میزان ۳۴، ۵۸، ۸۰ و ۳۷ درصد افزایش داد.

عملکرد دانه صفت مرکب و پیچیده‌ای است که نتیجه همکاری و مشارکت اجزای عملکرد می‌باشد. اگرچه وراثت‌پذیری صفاتی نظیر عملکرد تحت شرایط تنش خشکی پایین است، اما شناخت صفات فیزیولوژیک مؤثر بر عملکرد در این شرایط و سازگاری این صفات در شرایط خشکی، عامل مؤثر در بهنژادی و پایداری رقم‌ها می‌باشد (Smith *et al*., 1997). در واقع کاهش عملکرد ناشی از کاهش تعداد دانه در سنبله و وزن هزار دانه به‌عنوان اجزای عملکرد دانه است. کاهش عملکرد دانه در اثر تنش خشکی ممکن است بیش‌تر به‌علت تأثیر بر تأمین مواد پرورده برای پر شدن دانه‌ها، کاهش قدرت مخزن برای جذب مواد فتوسنتزی و نیز کاهش دوره رشد دانه باشد و ممکن است وقایع اولیه مربوط به رشد دانه شامل تقسیم سلولی و شکل‌گیری اندازه مخزن کم‌تر تحت تأثیر تنش خشکی قرار گیرند (Saeidi *et al*., 2011). نیتروژن از طریق افزایش تعداد خوشه، تعداد دانه در خوشه و وزن هزار دانه سبب افزایش عملکرد سورگوم می‌شود و به‌طور کلی تمامی اجزای عملکرد در سورگوم تحت تأثیر مستقیم نیتروژن هستند (Zeinvand Lorestani *et al*., 2022). با توجه به قانون بازده نزولی در مورد مصرف عناصر غذایی مبنی بر اینکه واحدهای اولیه کود مصرفی تاثیر بیش‌تری روی عملکرد دارند، هر قدر مصرف نیتروژن افزایش یابد، کارایی استفاده از آن کاهش می‌یابد (Ameri *et al*., 2007). یوری بلارا و همکاران (Uribelarrea *et al*., 2007) نیز با مطالعه هیبریدهای مختلف ذرت در سطوح مختلف کود نیتروژن، همبستگی منفی معنی‌داری بین کارایی مصرف و سطوح نیتروژن مشاهده کردند.



شکل ۸- برهمکنش رژیم آبیاری × کود نیتروژن بر عملکرد دانه سورگوم شیرین
Figure 8. Intraction of irrigation regime × nitrogen fertilizer on grain yield of sweet sorghum

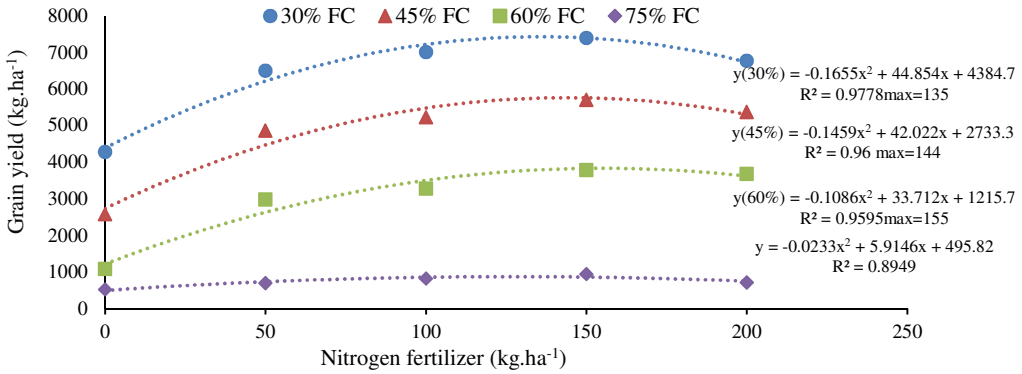
با توجه به تأثیر معنی‌دار برهمکنش نیتروژن×آبیاری بر عملکرد دانه (جدول ۳)، پاسخ عملکرد دانه به سطوح نیتروژن در هر سطح آبیاری ارزیابی شد (شکل ۹). نتایج نشان داد که رابطه رگرسیونی درجه دو بین عملکرد دانه و نیتروژن تحت شرایط آبیاری مطلوب، کم‌آبیاری ملایم و کم‌آبیاری متوسط در سطح احتمال یم درصد معنی‌دار بود، ولی در کم‌آبیاری شدید، ابن رابطه در سطح پنج درصد هم معنی‌دار نشد. بر این اساس، بیش‌ترین عملکرد دانه در رژیم آبیاری مطلوب، کم‌آبیاری ملایم و کم‌آبیاری متوسط به‌ترتیب با کاربرد ۱۳۵، ۱۴۴ و ۱۵۵ کیلوگرم در هکتار نیتروژن به‌دست آمد. همچنین، رابطه رگرسیونی بین هر سطح نیتروژن در رژیم‌های آبیاری برای عملکرد دانه برقرار بود. این رابطه از نظر آماری برای مقادیر ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، درجه یک و برای سایر مقادیر به‌کار رفته نیتروژن درجه دو معنی‌دار بود.

آنتوسیانین

تأثیر کود نیتروژن، رژیم آبیاری و برهمکنش آن‌ها بر میزان آنتوسیانین در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بیش‌ترین میزان آنتوسیانین در کم‌آبیاری متوسط با مصرف ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن و کم‌ترین میزان آنتوسیانین در کم‌آبیاری ملایم و عدم مصرف نیتروژن به‌دست آمد (شکل ۱۰). در آبیاری مطلوب، با کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، میزان آنتوسیانین به بیش‌ترین میزان خود رسید که تفاوت معنی‌داری با مصرف ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن در این رژیم آبیاری نداشت. در

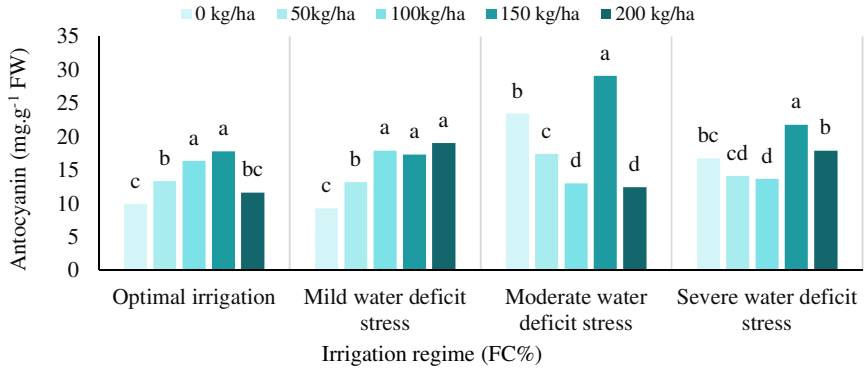
کم‌آبیاری ملایم، بیش‌ترین میزان آنتوسیانین با مصرف ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با مقدار ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن نداشت. در کم‌آبیاری متوسط و شدید نیز بیش‌ترین میزان آنتوسیانین با مصرف ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن حاصل شد که تفاوت آن با سایر سطوح نیتروژن معنی‌دار بود. همچنین، عدم کاربرد نیتروژن در شرایط کم‌آبیاری شدید، میزان آنتوسیانین را به‌میزان ۴۰ درصد نسبت به آبیاری مطلوب افزایش داد.

گیاهان مکانیسم‌های دفاعی مختلف آنزیمی و غیرآنزیمی را برای مقابله با تنش اکسیداتیو به‌کار می‌گیرند (Ozkur *et al.*, 2009). یکی از صدمات اکسیداتیو مهم در شرایط تنش، تخریب مولکول کلروفیل است. به‌دنبال این تخریب، گیاه رنگی به‌نظر می‌رسد که دلیل آن افزایش و قابل‌رؤیت شدن رنگیزه‌های محافظ و آنتوسیانین می‌باشد (Chalker-Scott, 2002). افزایش سنتز آنتوسیانین‌ها در اثر محرک‌های متعدد محیطی نظیر حملات میکروبی، پرتوهای فرابنفش و تنش‌های فیزیکی، شیمیایی و محیطی گزارش شده است که این افزایش به‌علت نقش حفاظت نوری آنتوسیانین به‌وسیله حذف مستقیم ROS در طول تنش اکسیداتیو می‌باشد (Cerqueira *et al.*, 2023). گزارش شده است که با وقوع تنش اکسیداتیو در گیاهان، مسیر بیوسنتز فلاونوییدها افزایش می‌یابد که قادرند از تولید رادیکال‌های آزاد جلوگیری کنند (Agati *et al.*, 2007). به‌نظر می‌رسد افزایش بیوسنتز آنتوسیانین‌ها، موازی با کاهش میزان کلروفیل است (Hazrati *et al.*, 2016). مطالعه گیاه بابونه نیز نشان داده است که با افزایش کمبود آب از میزان کلروفیل کاسته و در مقابل بر مقدار کارتنوئید و آنتوسیانین برگ افزوده شد (Arazmjo *et al.*, 2010).



شکل ۹- رابطه رگرسیونی بین سطوح نیتروژن و عملکرد دانه در رژیم‌های مختلف آبیاری

Figure 9. Regression relationship between nitrogen levels and grain yield under different irrigation regimes



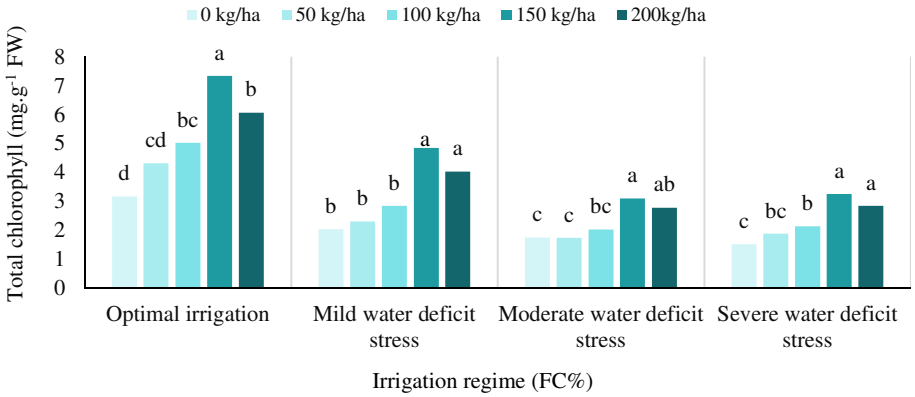
شکل ۱۰- برهمکنش رژیم آبیاری × کود نیتروژن بر میزان آنتوسیانین سورگوم شیرین

Figure 10. Intraction of irrigation regime × nitrogen fertilizer on anthocyanin content of sweet sorghum

کلروفیل کل

نتایج نشان داد که اثر کود نیتروژن، رژیم آبیاری و برهمکنش رژیم آبیاری×کود نیتروژن بر میزان کلروفیل کل معنی‌دار ($P<0.01$) بود (جدول ۳). در آبیاری مطلوب و کم‌آبیاری ملایم، بیشینه کلروفیل کل با کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن به‌دست آمد که اختلاف معنی‌داری با سایر سطوح نیتروژن در همین رژیم‌های آبیاری داشت. در کم‌آبیاری متوسط و شدید نیز حداکثر کلروفیل کل با کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن به‌دست آمد، اما اختلاف آن با مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن معنی‌دار نبود (شکل ۱۱). بیش‌ترین میزان کلروفیل کل در آبیاری مطلوب و کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن و کم‌ترین میزان آن در کم‌آبیاری شدید و عدم مصرف نیتروژن مشاهده شد (شکل ۱۱). عدم کاربرد نیتروژن در کم‌آبیاری شدید، متوسط و ملایم میزان کلروفیل کل را به‌ترتیب ۵۲، ۴۴ و ۳۵ درصد نسبت به آبیاری مطلوب کاهش داد. در مقابل، کاربرد ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن در آبیاری مطلوب، میزان کلروفیل کل را به‌ترتیب ۲۶، ۳۶، ۵۶ و ۴۷ درصد نسبت به عدم کاربرد نیتروژن در همین رژیم آبیاری افزایش داد.

با توجه به اهمیت کلروفیل در تولید و رابطه مستقیمی که این صفت با عملکرد دانه دارد، کاهش کلروفیل می‌تواند باعث کاهش عملکرد دانه شود. کاهش محتوای کلروفیل با افزایش شدت تنش خشکی یا آبیاری محدود توسط بسیاری از پژوهش‌گران گزارش شده است (Taiz & Zeiger, 2006). با کمبود رطوبت، فعالیت ریشه و در نهایت جذب نیتروژن کاهش می‌یابد که به‌نوبه خود می‌تواند منجر به کاهش میزان کلروفیل برگ شود (Hu *et al.*, 2023). کاهش میزان کلروفیل در شرایط تنش خشکی را می‌توان به اکسیداسیون لیپیدهای کلروپلاست، رنگدانه‌ها و پروتئین‌ها نسبت داد. برخی معتقدند با افزایش عناصر غذایی مانند نیتروژن، آهن و منیزیم که در ساخت کلروفیل مؤثر هستند، محتوای کلروفیل برگ افزایش می‌یابد (Maghsudi *et al.*, 2014). در رژیم‌های آبیاری مختلف، بیش‌ترین میزان کلروفیل a در آبیاری مطلوب و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن و کم‌ترین میزان آن در کم‌آبیاری شدید و عدم مصرف نیتروژن مشاهده شد. نیتروژن به‌عنوان یک عنصر اصلی تشکیل‌دهنده کلروفیل در گیاهان، به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در فتوسنتز شناخته می‌شود. تحقیقات نشان داده است که با افزایش غلظت محلول‌پاشی اوره دو و سه درصد نسبت به شاهد (عدم محلول‌پاشی) به‌ترتیب ۳۳/۱۹ و ۲۸/۶۳ درصد مقدار کلروفیل را افزایش داد (Momeni-Shijani *et al.*, 2024). غلظت کلروفیل به‌عنوان یک شاخص برای ارزیابی قدرت منبع شناخته می‌شود، زیرا غلظت کلروفیل برگ‌ها یکی از عوامل کلیدی در تعیین سرعت فتوسنتز و تولید ماده خشک است (Nayyar & Gupta, 2006). کاهش کلروفیل در شرایط تنش خشکی می‌تواند به‌عنوان یک عامل محدود کننده غیرروزنه‌ای در فتوسنتز در نظر گرفته شود. گزارش‌هایی مبنی بر کاهش محتوای کلروفیل برگ تحت تأثیر تنش‌های محیطی نظیر خشکی وجود دارد (Kirnak *et al.*, 2001).



شکل ۱۱- برهمکنش رژیم آبیاری × کود نیتروژن بر میزان کلروفیل کل سورگوم شیرین

Figure 11. Intraction of irrigation regime × nitrogen fertilizer on total chlorophyll content of sweet sorghum

قند محلول

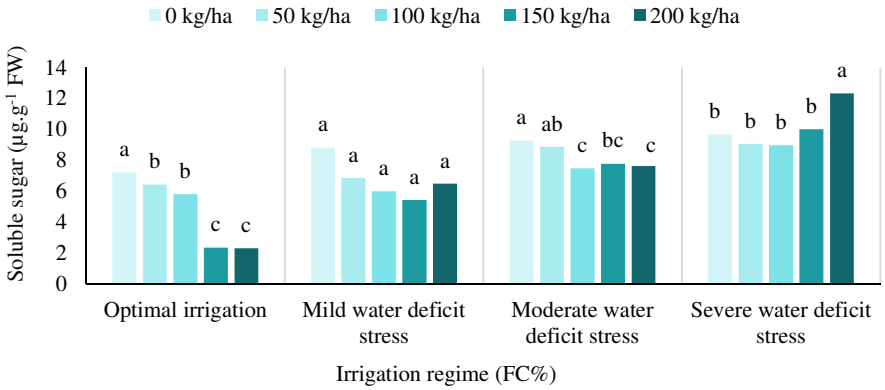
برهمکنش کود نیتروژن×رژیم‌های آبیاری بر میزان قند محلول در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بالاترین مقدار قند محلول در کم‌آبیاری شدید و مصرف ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن و کم‌ترین مقدار آن در آبیاری مطلوب و مصرف ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن به‌دست آمد. در کم‌آبیاری شدید، متوسط و ملایم، عدم کاربرد کود نیتروژن میزان قند محلول را به‌ترتیب ۲۵، ۲۲ و ۱۸ درصد و کاربرد ۵۰ کیلوگرم نیتروژن میزان قند محلول را به‌ترتیب ۲۸، ۲۷ و ۶ درصد نسبت به آبیاری مطلوب افزایش داد، اما در آبیاری مطلوب، کاربرد ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن، میزان قند محلول را به‌ترتیب ۱۰، ۱۹، ۶۷ و ۶۸ درصد کاهش داد (شکل ۱۲).

به‌طورکلی، تنش‌های محیطی به‌ویژه خشکی باعث افزایش تجمع کربوهیدرات‌های محلول، پرولین و اسیدهای آمینه آزاد می‌شوند. این ترکیبات وزن مولکولی کمی دارند و در غلظت‌های بالا نیز سمی نیستند و اجزای سلول را از صدمات دهیدراسیون محافظت می‌کنند (Shao *et al.*, 2005). تجمع قندهای محلول در سلول نقش مهمی در تنظیم اسمزی دارد و به کاهش پتانسیل آب سلول کمک می‌کند و در نتیجه در شرایط تنش کم‌آبی، آب بیش‌تری برای حفظ فشار تورژسانس در داخل سلول باقی می‌ماند (Amiryousefi *et al.*, 2021). در تنش خشکی فعالیت آنزیم آمیلاز افزایش می‌یابد و در نتیجه با تجزیه نشاسته غلظت قندهای محلول را در سلول افزایش می‌دهد (Bazrgar *et al.*, 2023).

با توجه به‌معنی‌دار بودن برهمکنش رژیم کودی در آبیاری (جدول ۳) مقایسه میانگین سطوح نیتروژن در هر سطح آبیاری انجام شد (شکل ۱۳) و نشان داد که رابطه رگرسیونی درجه ۲ بین قند محلول و نیتروژن در کم‌آبیاری ملایم و شدید و رابطه رگرسیونی درجه یک بین قند محلول و نیتروژن در آبیاری مطلوب و کم‌آبیاری متوسط برقرار و در سطح ۱درصد معنی‌دار می‌باشد. بیشینه قند محلول در کم‌آبیاری شدید با کاربرد۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن به‌دست آمد. درمقایسه، در آبیاری مطلوب و کم‌آبیاری ملایم و متوسط بیشینه قند محلول در شرایط بدون استفاده از نیتروژن مشاهده شد. همچنین رابطه رگرسیونی هر سطح نیتروژن در رژیم‌های آبیاری برای میزان قند محلول برقرار بود. این رابطه از نظر آماری برای تمامی مقادیر به‌کاررفته نیتروژن در سطح یک درصد معنی‌دار بود.

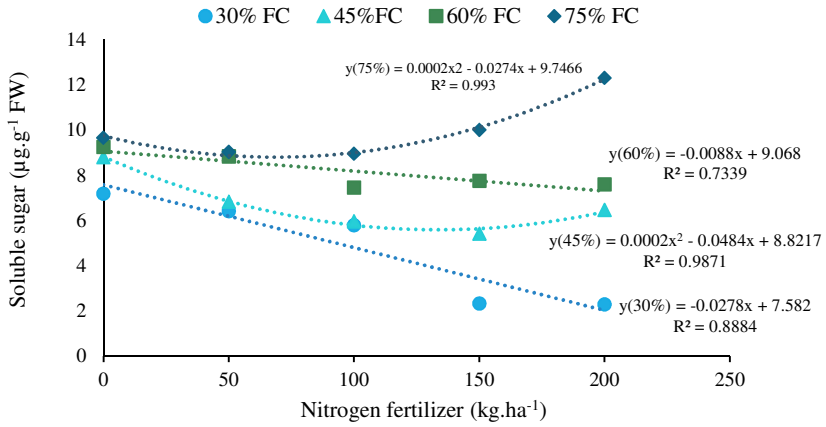
نتیجه‌گیری کلی

بر اساس نتایج این مطالعه، بیش‌ترین عملکرد دانه سورگوم شیرین رقم پگاه با ۷۳۹۰/۹۳، ۵۶۹۸/۴۰، ۳۷۸۲/۹۴ و ۹۳۸/۲۳ کیلوگرم در هکتار با مصرف ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره به‌ترتیب در رژیم آبیاری مطلوب، کم‌آبیاری ملایم، کم‌آبیاری متوسط و کم‌آبیاری شدید به‌دست آمد. بنابراین، با توجه به یافته‌های این آزمایش، برای بهبود صفات فیزیولوژیک، عملکرد و اجزای عملکرد سورگوم شیرین رقم پگاه در تمامی شرایط آبیاری کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره پیشنهاد می‌شود.



شکل ۱۲- برهمکنش رژیم آبیاری و مقدار کود نیتروژن بر میزان قند محلول سورگوم شیرین

Figure 12. Intraction of irrigation regime × nitrogen fertilizer on soluble sugar content in sweet sorghum



۱۳- رابطه رگرسیونی بین رژیم‌های مختلف آبیاری و مقادیر مختلف کود نیتروژن بر میزان قند محلول سورگوم شیرین

Figure 13. Regression relationship between different irrigation regimes and different nitrogen fertilizer levels on soluble sugar content of sweet sorghum

تضاد منافع

نویسندگان تایید می‌کنند که این تحقیق در غیاب هرگونه روابط تجاری یا مالی می‌تواند به عنوان تضاد منافع بالقوه تعبیر شود، انجام شده است.

رعایت اخلاق در نشر

نویسندگان اعلام می‌کنند که در نگارش این مقاله به‌طور کامل از اخلاق نشر از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و انتشار دوگانه، پیروی کرده‌اند. همچنین این مقاله حاصل یک کار تحقیقاتی اصیل بوده و تاکنون به‌طور کامل به هیچ زبانی و در هیچ نشریه یا همایشی چاپ و منتشر نشده است و هیچ اقدامی نیز برای انتشار آن در هیچ نشریه یا همایشی صورت نگرفته و نخواهد گرفت.

اجازه انتشار مقاله

نویسندگان با چاپ این مقا له به صورت دستر سی باز موافقت کرده و کلیه ح قوق ا ستفاده از مح توا، جدول ها، شکل‌ها، تصویرها و غیره را به ناشر واگذار می‌کنند.

References

Abedi, A. , Modarres-Sanavy, S. A. M. , & Heidarzadeh, A. (2024). Study of yield and yield components of camelina (*Camelina sativa* L.) under water deficit stress conditions with the application of zeolite and wood vinegar. *Plant Productions*, . doi: 10.22055/ppd.2024.46482.2155[in Persian]

Ahmadi, K., Ebadzadeh, H. R., Hatami, F., Abdeshah, H., & Kazemian, A. (2020). Agricultural Statistics Yearbook, 2018-2019. Vol. I: Crop Products. Information and Communications Technology Center, Deputy of Planning and Economics, Ministry of Agriculture Jihad, Tehran, Iran. [In Persian].

Agati, G., Matteini, P., Goti, A., & Tattini, M. (2007). Chloroplast-located flavonoids can scavenge singlet oxygen. *New Phytologist*, *174*(1), 77-89. doi: 10.1111/j.1469-8137.2007.01986.x.

Almodares, A., Hotjatabady, R. H., & Mirniam, E. (2013). Effects of drought stress on biomass and carbohydrate contents of two sweet sorghum cultivars. *Journal of Environmental Biology*, *34*(3), 585-589.

Almodares, A., Taheri, R., Chung, M., & Fathi, M. (2008). The effect of nitrogen and potassium fertilizers on growth parameters and carbohydrate contents of sweet sorghum cultivars. *Journal of Environmental Biology*, *29*(6), 849-852.

Ameri, A. A., Nassiri Mahalati, M., & Rezvani Moghadam, P. (2007). The effect of different nitrogen levels and plant density on nitrogen use efficiency, flower yield, and essential oils of *Calendula officinalis* L. *Iranian Journal of Agricultural Research*, *5*(2), 315-325. [In Persian]. doi: 10.22067/gsc.v5i2.1153.

Amiryousefi, M., Tadayon, M. R., & Ebrahimi, R. (2021). Effect of nitrogenous and phosphorus biofertilizers on seed germination and some biochemical characteristics of two quinoa cultivars (*Chenopodium quinoa* Willd) under drought stress. *Journal of Plant Biological Sciences*, *13*(1), 107-126. [In Persian]. doi: 10.22108/ijpb.2021.125105.1227.

Arazmjo, A., Heidari, M., & Ghanbari, A. (2010). The effect of water stress and three sources of fertilizers on flower yield, physiological parameters and nutrient uptake in chamomile (*Matricaria chamomilla* L.). *Iranian Journal of Medicinal & Aromatic Plants*, *25*(4), 482-494. [In Persian].

Asghari Lalami, H., Valadabadi, S. A., Yazdani, M. R., Zakerin, H. R., & Allah Gholipor, M. (2020). Effect of rotational irrigation on physiological growth indexes and water use of four rice (*Oryza sativa* L.) cultivars in Gilan province. *Journal of Agroecology*, *12*(4), 595-612. [In Persian]. doi: 10.22067/agry.2020.37569.

Ayub, M. A. N. M., Khalid, M., Tariq, M., Elahi, M., & Nadeem, M. A. (2012). Comparison of sorghum genotypes for forage production and quality. *Journal of Animal & Plant Sciences*, *22*(3), 733-737.

Bazgir, M., Rafiee, M., & Khorgami, A. (2020). Comparison of grain sorghum varieties base on yield and water use efficiency under drought stress in summer cropping. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 51(4), 1-11. doi: 10.22059/ijfcs.2020.263387.654506

Bazrgar, G., Nabavi Kalat, S. M., Khavari Khorasani, S., 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*(4), e15477. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e15477.

Castro, F. M. R., Lombardi, G. M. R., Nunes, J. A. R., da Costa Parrella, R. A., & Bruzi, A. T. (2022). Accumulation of biomass and lignocellulosic compounds in photoperiod-sensitive biomass sorghum genotypes. *Biomass & Bioenergy*, *158*, 106344. doi: 10.1016/j.biombioe.2022.106344.

Cerqueira, J. V. A., de Andrade, M. T., Rafael, D. D., Zhu, F., Martins, S. V. C., Nunes-Nesi, A., Benedito, V., Fernie, A. R., & Zsögön, A. (2023). Anthocyanins and reactive oxygen species: A team of rivals regulating plant development? *Plant Molecular Biology*, *112*(4), 213-223. doi: 10.1007/s11103-023-01362-4.

Chalker-Scott, L., (2002). Do anthocyanins function as osmoregulators in leaf tissues? *Advances in Botanical Research*, *37*, 103-127. doi: 10.1016/S0065-2296(02)37046-0.

Daneshiyan, G., Jabari, H., & Farokhi, A. (2006). Effects of water stress and plant density on yield and agronomic characteristics of sunflower second crop. Proceedings of the 9th Iranian Crop Science Congress. Aug. 27-29, 2006, Tehran, Iran. [In Persian].

Earl, H. J., & Davis, R. F. (2003). Effect of drought stress on leaf and whole canopy radiation use efficiency and yield of maize. *Agronomy Journal*, *95*(3), 688-696. doi: 10.2134/agronj2003.6880.

Eltelib, H. A., Hamad, M. A., & Ali, E. E. (2006). The effect of nitrogen and phosphorus fertilization on growth, yield and quality of forage maize (*Zea mays* L.). *Journal of Agronomy*, *5*(3), 515-518.

Fales, F. W. (1951). The assimilation and degradation of carbohydrates by yeast cells. *Journal of Biological Chemistry*, *193*(1), 113-124. doi: 10.1016/S0021-9258(19)52433-4.

Fouman, A., Mokhtarzadeh, A., Beheshti, A. R., Shiri, M. R., Rahnema, A., Nadali, F., Nourmohammadi, S., & Hasanzadeh Moghaddam, H. (2008). Cultivar release, Pegah, A new forage sorghum cultivar. *Seed & Plant Journal*, *24*(2), 367-371. [in Persian]. doi: 10.22092/spij.2017.110811.

Ghodsi, M. H., Poryusef, M., Jabari, F., & Azimi. M. R, (2013). Effect of limited irrigation regime and nitrogen fertilizer on the yield and yield components of sorghum var. Payam, *Journal of Applied Crop Research*, *26*(99), 141-149. [In persian].

Gupta, S. N., Dahiya, B. S., Malik, B. P. S., & Bishnoi, N. R. (1995). Response of chickpea to water deficits and drought stress. *Haryana Agricultural University Journal of Research*, *25*(1/2), 11-19.

Haankuku, C., Epplin, F. M., & Kakani, V. G. (2014). Forage sorghum response to nitrogen fertilization and estimation of production cost. *Agronomy Journal*, *106*(5), 1659-1666. doi: 10.2134/agronj14.0078.

Habyarimana, E., Laureti, D., de Ninno, M., & Lorenzoni, C. (2004). Performances of biomass sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] under different water regimes in Mediterranean region. *Industrial Crops & Products*, *20*(1), 23-28. doi: 10.1016/j.indcrop.2003.12.019.

Hazrati, S., Tahmasebi-Sarvestani, Z., Modarres-Sanavy, S. A. M., Mokhtassi-Bidgoli, A., & Nicola, S. (2016). Effects of water stress and light intensity on chlorophyll fluorescence parameters and

pigments of *Aloe vera* L. *Plant Physiology & Biochemistry*, *106*, 141-148. doi: 10.1016/j.plaphy.2016.04.046.

Hiscox, J. T., & Israelstam, G. (1979). A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. *Canadian Journal of Botany*, *57*(12), 1332-1334. doi: 10.1139/b79-163.

Hu, F., Zhang, Y., & Guo, J. (2023). Effects of drought stress on photosynthetic physiological characteristics, leaf microstructure, and related gene expression of yellow horn. *Plant Signaling & Behavior*, *18*(1), 2215025. doi: 10.1080/15592324.2023.2215025.

Jaenudin, A., Dukat, D., Alaydrus, U., & Maryuliyanna, M. (2023). Effect of planting space and dose of phosphate fertilizer on the development and production of white sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) Samurai-2 variety. doi: 10.23960/jtep-l.v12i2.431-442.

Khamari, S., Ghasemi, K., Alyari, H., & Zehtab Salmasi, S. (2007). Effect of irrigation withhold on phenology and grain yield of three sunflower cultivars in Tabriz. *The Journal of Agricultural Sciences & Natural Resources*, *14*(6), 72-80. [In Persian].

Kirnak, H., Kaya, C., Tas, I., & Higgs, D. (2001). The influence of water deficit on vegetative growth, physiology, fruit yield and quality in eggplants. *Bulgarian Journal of Plant Physiology*, *27*(3-4), 34-46.

Kohan M. A., & Mazaheri, D. (2003). Effect of irrigation intervals and nitrogen fertilizer splitting on some quantitative and qualitative traits of forage sorghum. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, *5*(2), 75-84. [In Persian].

Krizek, D. T., Kramer, G. F., Upadhyaya, A., & Mirecki, R. M. (1993). UV-B response of cucumber seedling grown under metal halid and high-pressure sodium/deluxe lamps. *Physiologia Plantarum*, *88*(2), 350-358. doi: 10.1111/j.1399-3054.1993.tb05509.x.

Maghsudi, E., Ghalavand, A., & Aghaalikhan, M. (2014). The effect of different levels of fertilizer (organic, biological and chemical) on morphological traits and yield of maize single cross hybrid 704. *Applied Field Crops Research*, *27*(104), 129-135. [In Persian]. doi: 10.22092/aj.2014.101820.

Mahmud, K., Ahmad, I., & Ayub, M. (2003). Effect of nitrogen and phosphorus on the fodder yield and quality of two sorghum cultivars (*Sorghum bicolor* L.). *International Journal of Agriculture & Biology*, *5*(1), 61-63.

Momeni-Shijani, K., Modarres-Sanavy, S. A. M., Heidarzadeh, A., & Abedi, A. M. (2024). Study of photosynthetic pigments, seed yield and oil compositions of camelina (*Camelina sativa* L.) under the influence of urea foliar application and irrigation regimes in Tehran. *Plant Productions*, *47*(3), 387-403. [In Persian]. doi: 10.22055/ppd.2024.46765.2161.

Mousavi, S., & Zakarinejad, S. (2020). The effect of nitrogen management on morphophysiological traits, yield, and yield components of maize hybrids (*Zea mays* L.). *Agricultural Plant Physiology*, *12*(1), 91-111. [In Persian].

Nandeshwar, B. C., Bhoite, A. G., Gadkari, P. A., Garoma, B., Jalata, Z., Sreekrishna, V., Gurmesa, K., & De, D. K. (2018). Sweet sorghum: An alternative source of food, feed, sugar and bio-fuel. *International Journal of Tropical Agriculture*, *36*(3), 783-79.

Nayyar, H., & Gupta, D. (2006). Differential sensitivity of C3 and C4 plants to water deficit stress: Association with oxidative stress and antioxidants. *Environmental & Experimental Botany*, *58*(1-3), 106-113. doi: 10.1016/j.envexpbot.2005.06.021.

Olugbemi, O., & Abiola Ababyomi, Y. (2016). Effects of nitrogen application on growth and ethanol yield of sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] varieties. *Advances in Agriculture*, 2016(1), 8329754. https://doi.org/10.1155/2016/8329754

Ozkur, O., Ozdemir, F., Bor, M., & Turkan, I. (2009). Physiochemical and antioxidant responses of the perennial xerophyte *Capparis ovata* Desf. to drought. *Environmental & Experimental Botany*, *66*(3), 487-492. doi: 10.1016/j.envexpbot.2009.04.003.

Pagter, M., Bragato, C., & Brix, H. (2005). Tolerance and physiological responses of *Phragmites australis* to water deficit. *Aquatic Botany*, *81*(4), 285-299. doi: 10.1016/j.aquabot.2005.01.002.

Rahman, M., Fukai, S., & Blamey, F. P. C. (2001). Forage production and nitrogen uptake of forage sorghum, grain sorghum and maize as affected by cutting under different nitrogen levels. Proceedings of the 10th Australian Agronomy Conference. Jan. 29-February 1, 2001, Hobart, Tasmania, Australia.

Razmi, N., & Ghasemi, M. (2007). Effect of different irrigation regimes on growth, grain yield, and its components in grain sorghum (*Sorghum bicolor* L.) under Esfahan conditions. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, *9*, 169-183. [in persian]. dor: 20.1001.1.15625540.1386.9.2.6.4.

Saeidi, M., Moradi, F., Ahmadi, A., Spehri, R., Najafian, G., & Shabani, A. (2011). The effects of terminal water stress on physiological cahractersitics and sink-source relations in two bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *Iranian Journal of Crop Sciences*, *12*(4), 392-408. dor: 20.1001.1.15625540.1389.12.4.3.6.

Sandhu, N., Sethi, M., Kumar, A., Dang, D., Singh, J., & Chhuneja, P. (2021). Biochemical and genetic approaches improving nitrogen use efficiency in cereal crops: A review. *Frontiers in Plant Science*, *12*, 657629. doi: 10.3389/fpls.2021.657629.

Scarsbrook, C. E., & Doss, B. D. (1973). Leaf area index and radiation as related to corn yield. Agronomy Journal, 65(3), 459-461. doi: 10.2134/agronj1973.00021962006500030031x.

Shao, H. B., Liang, Z. S., & Shao, M. A. (2005). Changes of some anti-oxidative enzymes under soil water deficits among 10 wheat genotypes at maturation stage. *Colloids & Surfaces B: Biointerfaces*, *45*(1), 7-13.

Siam, H. S., Abd-El-Kader, M. G., & El-Alia, H. I. (2008). Yield and yield components of maize as affected by different sources and application rates of nitrogen fertilizer. *Research Journal of Agriculture & Biological Sciences*, *4*(5), 399-412.

Smith, K. F., Reed, K. F. M., & Foot, J. Z. (1997). An assessment of the relative importance of specific traits for the genetic improvement of nutritive value in dairy pasture. *Grass & Forage Science*, *52*(2), 167-175. doi: 10.1111/j.1365-2494.1997.tb02347.x.

Taiz, L., & Zeiger, E. (2006) Plant physiology. 4th ED. Sinauer Associates, Inc.

Tariq-Al-Islami, M., Zarghami, R., Mashhadi Akbar Boojar, M., & Oveysi, M. (2012). Effect of nitrogen fertilizer and water deficit stress on physiological indexes of corn (*Zea mays* L.). *Iranian Journal of Agronomy & Plant Breeding*, *8*(1), 161-174. [In Persian].

Turgut, I., Bilgili, U. Ğ. U. R., Duman, A., & Acikgoz, E. (2005). Production of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) increases with increased plant densities and nitrogen fertilizer levels. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil & Plant*, *55*(3), 236-240. doi: 10.1080/09064710510029051.

Uribelarrea, M., Moose, S. P., & Below, F. E. (2007). Divergent selection for grain protein affects nitrogen use in maize hybrids. *Field Crops Research*, *100*(1), 82-90. doi: 10.1016/j.fcr.2006.05.008.

Wang, C., Zhou, L., Zhang, G., Xu, Y., Zhang, L., Gao, X., Gao, J., Jiang, N., & Shao, M. (2017). Optimal fertilization for high yield and good quality of waxy sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Field Crops Research*, *203*, 1-7. doi: 10.1016/j.fcr.2016.12.009.

Wright, G. C., & Rao, R. C. N. (1994). Groundnut water relations. In: Smartt, J. (Ed.). The Groundnut Crop. A Scientific Basis for Imporovement. Springer Dordrecht. pp: 281-335. doi: 10.1007/978-94-011-0733-4_9.

Yazar, A., Gökçel, F., & Sezen, M. S. (2009). Corn yield response to partial rootzone drying and deficit irrigation strategies applied with drip system. *Plant, Soil & Environment*, *55*(11), 494-503. doi: 10.17221/96/2009-PSE.

Zegada-Lizarazu, W., Luna, D. F., & Monti, A. (2015). Photosynthetic acclimation of sweet sorghum under progressive water stress. *Industrial Crops & Products*, *66*, 216-219. doi: 10.1016/j.indcrop.2014.12.045.

Zeinvand Lorestani, E., Jahansouz, M. R., Oveisi, M., Ahmadi, A., & Soufizadeh, S. (2022). The effects of tillage systems, water stress and nitrogen fertilizer on yield and quality of forage sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *Iranian Journal of Field Crop Science*, *53*(4), 203-218. [In Persian]. doi: 10.22059/ijfcs.2022.330330.654852.

Zhao, D., Reddy, K. R., Kakani, V. G., & Reddy, V. R. (2005). Nitrogen deficiency effects on plant growth, leaf photosynthesis, and hyperspectral reflectance properties of sorghum. *European Journal of Agronomy*, *22*(4), 391-403. doi: 10.1016/j.eja.2004.06.005.