



The effect of water deficit stress on physiological, biochemical and antioxidant properties of wheat cultivars and lines

Ali Shabanzadeh¹, Esmail Nabizadeh^{2*} , Soleiman Mohammadi³,
Saman Yezdan seta⁴, Aida Hossainzadeh Mahotchi⁵

¹ Department of Agrothechnology , Mahabad branch, Islamic Azad University, Mahabad.Iran, Email: ali_shabanzadeh@yahoo.com

²Department of Agrothechnology and Plant Breeding, Mahabad branch, Islamic Azad University, Mahabad, Iran, Email: Nabizadeh.Esmail@gmail.com

³ Cereals Department, West Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research Center, AREEO, Urmia, Iran , Email: soleyman_45@yahoo.com

⁴Department of Agrothechnology and Plant Breeding, Mahabad branch, Islamic Azad University, Mahabad.Iran, Email: yezdan79@yahoo.com

⁵ Higher Education Institute of Rab-Rashid, Tabriz, Iran, Email: aimahootchy@gmail.com

Article type:

Research article

Abstract

An experiment was conducted to evaluate the effect of water stress on the physiological, biochemical, and antioxidant properties of wheat lines in the form of split plots in a randomized complete block design with three replications. The results showed that the water stress in the spike stage of wheat lines had significant effects on the studied traits, and there were genetic differences between the lines in terms of the studied traits except for carotenoid and soluble carbohydrates content. Water deficit stress significantly reduced grain yield (24.8%), and among the studied lines, line 5 had the highest grain yield. Lines 2, 5, and 8 showed the highest chlorophyll a, and b content under stress conditions. Increased malondialdehyde (MDA) and total protein accumulation in leaves of wheat lines were observed during water deficit stress, which was accompanied by increased antioxidant enzymes superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), and catalase (CAT) activity, and the highest activity of antioxidant enzymes was observed in line 9. Also, potassium (K), calcium (Ca) and magnesium (Mg) uptake by wheat lines decreased in water deficit conditions, and there was a difference between wheat lines in terms of the amount of these elements uptake under stress conditions. In general, a decrease in chlorophyll content and nutrient uptake under water deficit stress can lead to loss of grain yield, and wheat lines can increase their tolerance to stress conditions by increasing antioxidant activity and reducing MDA accumulation.

Article history

Received: 20.06.2023

Revised: 10.09.2023

Accepted: 19.09.2023

Published: 21.03.2025

Keywords

Antioxidant enzymes

Grain yield

Mineral Nutrients

Water deficit

Wheat

Introduction: Water deficit is a major abiotic stress that severely restricts wheat productivity, particularly during reproductive growth stages such as heading. Drought stress disrupts photosynthesis, accelerates oxidative damage, limits nutrient uptake, and ultimately reduces grain yield. Genetic variability among wheat genotypes provides an opportunity to identify drought-tolerant lines based on physiological and biochemical responses, which is essential for sustainable wheat production under water-limited environments.

Materials and Methods: A two-year field experiment was conducted using a randomized complete block design with three replications to evaluate ten wheat genotypes under two irrigation

regimes, including normal irrigation and water deficit imposed at the heading stage. Grain yield, photosynthetic pigments, soluble carbohydrates, malondialdehyde content, total protein concentration, antioxidant enzyme activities, and mineral nutrient contents were determined using standard analytical methods. Statistical analyses were performed to assess treatment and genotype effects.

Results and Discussion: Water deficit significantly reduced grain yield, chlorophyll a and b, carotenoid content, and mineral nutrient accumulation, while it increased malondialdehyde concentration, soluble carbohydrates, total protein, and antioxidant enzyme activities. Genotypes differed markedly in their responses to drought stress, indicating substantial genetic variability. Higher antioxidant enzyme activities and lower membrane lipid peroxidation were associated with improved drought tolerance. Certain genotypes maintained relatively higher photosynthetic pigment levels and grain yield under stress, reflecting more efficient physiological adjustment and oxidative stress mitigation.

Conclusion: Water deficit at the heading stage imposed pronounced effects on yield and stress-related traits in wheat. Enhanced antioxidant defense capacity, maintenance of photosynthetic pigments, and improved metabolic regulation contributed to drought tolerance. The identified superior genotypes represent valuable genetic resources for breeding programs aimed at improving wheat performance under drought-prone conditions.

Cite this article as: Shabanzadeh, A., Nabizadeh, E., Mohammadi, S., Yezdan seta, S., Hossainzadeh Mahotchi, A. (2025). The effect of water deficit stress on physiological, biochemical and antioxidant properties of wheat cultivars and lines. *Journal of Plant Environmental Physiology*, 77(1): 1-16.



©The author(s)

Publisher: Islamic Azad University, Gorgan branch

Doi: <https://doi.org/10.71890/iper.2025.984009>

تأثیر تنش کم آبی بر صفات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و خصوصیات آنتی اکسیدانی ارقام و لاین های گندم

علی شعبان زاده^۱، اسمعیل نبی زاده^{۲*} , سلیمان محمدی^۳، سامان یزدان ستا^۴، ایدا حسین زاده ماهوتچی^۵

^۱ گروه آگروتکنولوژی، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد، ایران، رایانامه: ali_shabanzadeh@yahoo.com

^۲ گروه آگروتکنولوژی، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد، ایران، رایانامه: Nabizadeh.esmaeil@gmail.com

^۳ بخش غلات، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، ارومیه، ایران، رایانامه: soleyman_45@yahoo.com

^۴ گروه آگروتکنولوژی، واحد مهاباد، دانشگاه آزاد اسلامی، مهاباد، ایران، رایانامه: yezdan79@yahoo.com

^۵ موسسه آموزش عالی ربع رشید، تبریز، ایران رایانامه: aimahootchy@gmail.com

نوع مقاله:	چکیده
مقاله پژوهشی	آزمایشی به منظور تأثیر تنش کم آبی بر خصوصیات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و آنتی اکسیدانی لاین های گندم به صورت طرح کرت های خرد شده در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار طی دو سال زراعی انجام شد. نتایج نشان داد که تنش کم آبی پس از مرحله سنبله دهی لاین های گندم اثرات قابل توجهی بر صفات مورد بررسی داشت و اختلافات ژنتیکی بین لاین ها از نظر صفات مورد بررسی به جز محتوای کاروتنوئید و کربوهیدرات محلول وجود داشت. تنش کم آبی منجر به کاهش معنی دار عملکرد دانه (۲۴/۸ درصد) شد و در بین لاین های مورد بررسی لاین شماره ۵ بالاترین عملکرد دانه را به خود اختصاص داد. لاین های ۲، ۵ و ۸ بیشترین مقدار کلروفیل a و b را در شرایط تنش نشان دادند. افزایش تجمع مالون دی آلدئید و پروتئین کل در برگ های لاین های گندم طی تنش کم آبی مشاهده شد که همراه با افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان سوپراکسید دیسموتاز، پراکسیداز و کاتالاز بود و بیشترین فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان در لاین ۹ مشاهده گردید. همچنین جذب عناصر پتاسیم، کلسیم و منیزیم نیز توسط لاین های گندم در شرایط کم آبی کاهش یافت و در بین لاین های گندم از نظر مقدار جذب این عناصر در شرایط تنش تفاوت وجود داشت. به طور کلی کاهش میزان کلروفیل و جذب عناصر غذایی تحت تنش کم آبی می تواند منجر به تلفات عملکرد دانه شود و لاین های گندم می توانند با افزایش فعالیت آنتی اکسیدان و کاهش تجمع مالون دی آلدئید تحمل خود به شرایط تنش بالا ببرند.
واژه های کلیدی:	
آنزیم های آنتی اکسیدان	
کم آبی	
گندم	
عملکرد دانه	
مواد مغذی	

استناد: شعبان زاده، علی؛ نبی زاده، اسمعیل؛ محمدی، سلیمان؛ یزدان ستا، سامان؛ حسن زاده ماهوتچی، ایدا (۱۴۰۴). تأثیر تنش کم آبی بر صفات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و خصوصیات آنتی اکسیدانی ارقام و لاین های گندم. فیزیولوژی محیطی گیاهی،

۷۷ (۱)، ۱-۱۶.

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی گرگان

DOI: <https://doi.org/10.71890/iper.2025.984009>

© نویسندگان.



مقدمه

تنش های محیطی بر رشد، نمو و عملکرد گیاهان تاثیر منفی می گذارد و امنیت غذایی جمعیت در حال گسترش جهان را به شدت تهدید می کند (Yadav et al., 2021). تنش کمبود آب یکی از انواع تنش های محیطی است که تولید محصولات کشاورزی در جهان را تحت تاثیر قرار می دهد (Munns, 2011). طبق گزارش سازمان جهانی بهداشت، معیشت ۵۵ میلیون نفر در سراسر جهان تحت تاثیر تنش خشکسالی قرار می گیرد و تخمین زده می شود که در سال ۲۰۳۰ حدود ۷۰۰ میلیون نفر به دلیل خشکسالی در معرض خطر آوارگی قرار خواهند گرفت (Mishra et al., 2020). تنش خشکی و کم آبی در سطح مورفولوژیکی با کاهش اندام های ساقه، ریشه، برگ و گل در نهایت منجر به کاهش زیست توده و عملکرد می شود (Haddoudi et al., 2021). در سطح فیزیولوژیکی نرخ فتوسنتز و تعرق در نتیجه بسته شدن روزنه ها تحت شرایط کم آبی کاهش می یابد و منجر به کاهش محتوای نسبی آب برگ می شود. علاوه بر این، بسته شدن روزنه ها موجب کاهش آسمیلاسیون دی اکسید کربن، محتوای کلروفیل و کارتنوئیدها می شود (Yadav et al., 2021; Yang et al., 2021). در سطح بیوشیمیایی نیز تنش کم آبی موجب تجمع گونه های فعال اکسیژن (ROS)، مالون دی آلدید و نشت الکترولیت، پرولین و قند محلول می شود (Singhal et al., 2016). کلروپلاست و میتوکندری سلول های گیاهی از مهم ترین اندامک های تولیدکننده گونه های فعال اکسیژن هستند. این گونه های اکسیژن، با پراکسیداسیون لیپیدها و در نتیجه تخریب غشاء، تخریب پروتئین ها، غیرفعال کردن آنزیم ها، از بین بردن رنگیزه های فتوسنتزی و اختلال در عملکرد DNA تنش ثانویه اکسیداتیو ایجاد می کند که خسارت های جدی به ساختارهای سلولی و گیاه

وارد می کند (Lau et al., 2021). گیاهان در مقابله با اثرات تنش، سازوکارهای حفاظتی متفاوتی مانند سازوکارهای آنزیمی و غیر آنزیم در برابر تنش اکسیداتیو ناشی از تنش دارند. آنزیم های آنتی اکسیدانی مانند کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز و گلوکاتایون ردوکتاز می باشند که گیاهان با تولید این آنزیم ها اکسیژن های فعال را خنثی می کنند (Jiao et al., 2012; Qayyum et al., 2021). توانایی سیستم آنتی اکسیدانی ممکن است از آسیب ناشی از تنش جلوگیری کند که این مسئله به مقاومت گیاهان به تنش مربوط می شود (Malekpoor et al., 2017). علاوه بر این ها، تنش کم آبی باعث کاهش پتانسیل خاک می باشد که منجر به کاهش جذب عناصر غذایی می شود (Nascimento Silva et al., 2020; Ghosh et al., 2020). بنابراین، درک بهتر واکنش گیاهان به تنش های محیطی و تحقیقات برای یافتن ژنوتیپ های متحمل که در شرایط کم آبی و خشکسالی رشد و عملکرد بهتری داشته باشند، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک که دارای محدودیت آب هستند، ضرورت دارد و پیش نیازی برای بهبود تحمل به خشکی و عملکرد آنها در شرایط کم آبی است (Kumar et al., 2018; Ramanjulu & Bartels, 2002).

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از مهم ترین منابع غذایی جهان است. با این حال، این محصول مهم اقتصادی همواره تحت تنش های محیطی نظیر کم آبی و خشکی قرار دارد (Jia et al., 2017)، و این تنش ها به صورت انفرادی و برهمکنش با سایر تنش های محیطی نظیر شوری، گرما و سرما باعث افت شدید عملکرد می شود. افت شدید عملکرد ناشی از کاهش سنتز کربوهیدرات ها و خسارت به رنگیزه ها (به علت تولید گونه های فعال اکسیژن، واسرشتگی

پروتئین، تخریب ساختارهای غشایی و غیرفعال شدن آنزیم‌ها) است که باعث کاهش فتوسنتز می‌گردد (Zhao et al., 2017). کمبود آب در مرحله زایشی یک گیاه (در غلات در مرحله سنبله رفتن) مهمترین تهدید برای ازدیاد محصول به حساب می‌آید (Farooq et al., 2014). Sattar و همکاران (۲۰۱۹) گزارش دادند که در شرایط کمبود آب در گندم، محتوای کلروفیل به طور معنی‌داری کاهش یافت و فعالیت آنزیمی آنتی اکسیدان‌ها افزایش قابل توجهی نشان داد. بررسی‌های انجام گرفته در محیط‌های کم آب و با آب کافی نشان می‌دهد که میزان حساسیت ارقام گندم به خشکی متفاوت بوده و این حساسیت به شدت تنش خشکی محیط دارد (Qaseem et al., 2019). Dugasa و همکاران (۲۰۱۹) گزارش دادند در ارقام متحمل گندم تحت تنش شوری تجمع کمتری از مالون دی‌آلدهید مشاهده شد، در حالی که فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان (کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز) در ارقام متحمل نسبت به ارقام حساس بیشتر بود. Khatrnezhad و Gholamin (۲۰۲۰) گزارش دادند که در ژنوتیپ‌های مختلف گندم فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید تحت تاثیر تنش کم آبی قرار گرفتند و فعالیت آنزیم کاتالاز تحت تنش افزایش یافت. همچنین میزان کلروفیل نیز در برگ پرچم کاهش معنی‌داری داشت. همچنین گزارش شده است که کاهش دسترسی به آب به دلیل تنش کم آبی، جذب مواد مغذی را در ریشه، اندام هوایی و برگ گندم را کاهش داد که این محدودیت در جذب مواد مغذی، سیستم دفاع آنتی اکسیدانی رقم مورد آزمایش را تضعیف و آن را در برابر تنش کم آبی حساس‌تر کرد (Ghosh et al., 2020).

تولید محصول در شرایط کم آبی، نیازمند درک واکنش‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی محصولات

است که می‌تواند در عملیات زراعی مورد توجه قرار گیرد (Kumar et al., 2018; Haddoudi et al., 2021). علاوه بر این، با توجه به همزمانی مراحل انتهائی رشد فیزیولوژیکی گندم با خشکی و کم آبی، ضرورت دارد که ارقام و لاین‌های گندم با قابلیت تحمل به تنش کم آبی شناسایی و معرفی گردد. بنابراین، تحقیق حاضر به منظور یافتن ارقام و لاین‌هایی از گندم که در شرایط کم آبی از عملکرد مطلوب به واسطه واکنش‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی مناسب برخوردار باشند، اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

محل انجام، تیمارهای آزمایشی و نحوه اجرای طرح: به منظور بررسی عملکرد، اجزای عملکرد و انتقال مجدد ارقام و لاین‌های گندم تحت شرایط تنش کم آبی، آزمایش مزرعه‌ای در دو سال زراعی به ترتیب، ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار در ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی میاندوآب، ایران (موقعیت جغرافیایی ۴۶ درجه و ۹۰ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۵۸ دقیقه عرض شمالی) به ارتفاع ۱۳۱۴ متر از سطح دریا اجرا شد. خصوصیات خاک محل اجرای آزمایش در جدول (۱) آورده شده است. در این تحقیق ۱۰ رقم و لاین گندم (جدول ۲) در دو سطح آبیاری شامل آبیاری مطلوب و قطع آبیاری در مرحله سنبله‌دهی مورد بررسی قرار گرفتند. هر کرت دارای شش خط کاشت به طول ۳ متر و فاصله ردیف ۲۰ سانتی‌متر (به ابعاد ۱/۲ × ۳ متر) بود. مطابق آزمایشات خاکشناسی، نیاز زمین به کودهای پیش‌کاشتی شامل فسفات آمونیوم (۱۵۰ کیلوگرم در هکتار)، سولفات پتاسیم (۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) و اوره (۷۰ کیلوگرم در هکتار) با خاک مخلوط گردید. عملیات کاشت در تاریخ ۱۵ آبان سال‌های آزمایش با تراکم ۴۵۰ بذر در

متر مربع صورت گرفت و اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت بذرها جهت سبز نمودن بذور و استقرار آنها در خاک به صورت سطحی انجام شد. در مرحله پنجه زنی، مقدار ۴۰ گرم کود اوره ۴۶ درصد در هر کرت به صورت سرک استفاده شد. کنترل علف های هرز پهن برگ با استفاده از علف کش توفوردی (۲ لیتر در هکتار) در مرحله پنجه زنی صورت گرفت.

جدول ۱: مشخصات خاک محل اجرای آزمایش در مزرعه تحقیقاتی میان دو آب.

منطقه	بافت	pH	ماده آلی (%)	کربنات کلسیم (%)	نیتروژن (%)	فسفر (قسمت در میلیون)	پتاسیم (قسمت در میلیون)
میان دو آب	لومی رسی	۷/۵	۰/۶۱	۲۱/۵	۰/۰۶۱	۹/۶	۲۸۶

pH (اسیدیته)، OM (ماده آلی)، OC (کربن آلی)، Mg (منیزیم)، K (پتاسیم)، P (فسفر)، N (نیتروژن)

جدول ۲: شجره ارقام و ژنوتیپ های گندم

ژنوتیپ ها	شجره
۱	Mihan
۲	Haydari
۳	Zarrineh
۴	Ghk"s"/Bow"s"/90Zhong87/3/Shiroodi/4/55.174/P101/Maya/3/Snb
۵	Ghk"s"/Bow"s"/90Zhong87/3/Shiroodi/4/55.174/P101/Maya/3/Snb
۶	Vorona/Milan/Sha7/3/MV17/4/Pehlivan
۷	Tam113
۸	Unknown/Zolotava/6/Jup/4/Cllf/3/II1453/Odin//Ci134431/Sel6425/Wa00477*2/5/Croc-1/Ae.Squarro1 (213)//Pgo
۹	Charger//CMH80A.768/3*Cno79
۱۰	MV35-13

زیر، محتوای رنگدانه محاسبه و بر حسب میلی گرم در گرم وزن تر (FW) ثبت شد.

Chlorophyll a = $15.56 A_{666} - 7.340 A_{653}$
 Chlorophyll b = $27.05 A_{653} - 11.21 A_{666}$
 Carotenoid = $(1000 A_{470} - 2.860 C_a - 129.2 C_b) / 245$

تعیین مالون دی آلدئید و کربوهیدرات های محلول: تجمع مالون دی آلدئید (MDA) با استفاده از معرف تیوباربیتریک اسید (TBA) طبق روش Janer (۱۹۹۰) با تغییرات جزئی اندازه گیری شد. میزان جذب مایع رویی در طول موج های ۵۳۲، ۶۰۰ و ۴۵۰ نانومتر برآورد شد و با معادله زیر، محتوای MDA محاسبه و به صورت میکرومول در گرم وزن تازه (FW) بیان شد.

عملکرد دانه: در زمان بلوغ فیزیولوژیکی بوته های گندم، برداشت با در نظر گرفتن اثر حاشیه ای انجام شد و عملکرد دانه بر حسب وزن دانه در متر مربع محاسبه شد.

محتوای کلروفیل a، b و کاروتنوئیدها: مقدار کلروفیل a، b و کاروتنوئید در برگ گندم با استفاده از روش Moran (۱۹۸۲) محاسبه شد. بر اساس این روش ۰/۱ گرم از بافت برگ تازه وزن شده و رنگدانه ها با ۸۰ درصد استون استخراج شد. پس از فیلتر کردن عصاره با کاغذ صافی، جذب با دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل JENWAY 6300) به ترتیب در ۴۷۰، ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر قرائت شد. با معادلات

$$\text{MDA content} = 6.45 \times (\text{OD}_{532} - \text{OD}_{600}) - 0.56 \times \text{OD}_{450}.$$

اندازه‌گیری محتوای کربوهیدرات محلول به روش Huber و Israel (۱۹۸۲) انجام شد. مخلوط واکنش حاوی ۱ میلی‌متر فنل ۵ درصد، ۵ میلی‌متر اسید سولفوریک غلیظ و ۲ میلی‌متر عصاره فیلتر شده بود. محتوای کربوهیدرات‌های محلول توسط اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۳۵ نانومتر تعیین شد.

پروتئین کل و آنزیم‌های آنتی اکسیدانی: محتوای پروتئین کل توسط روش Bradford (۱۹۷۹) در طول موج ۵۹۵ نانومتر با اسپکتروفتومتر تعیین شد. اندازه‌گیری فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD) با روش Mittler (۲۰۰۲) در ۵۶۰ نانومتر، آنزیم کاتالاز (CAT) به روش Chance و Maehly (۱۹۵۵) در ۲۴۰ نانومتر و فعالیت آنزیم پراکسیداز (POD) به روش Gueta-Dahan و همکاران (۱۹۹۷) در ۴۷۰ نانومتر در ۱۸۰ ثانیه بر حسب جذب در دقیقه (Abs/min) توسط طیف‌سنج UV-Visible (Cary 300) انجام شد. فعالیت آنزیم‌ها به عنوان واحد آنزیمی در هر میلی گرم پروتئین بیان شد.

محتوای عناصر معدنی: برای اندازه‌گیری عناصر پتاسیم (K)، کلسیم (Ca) و منیزیم (Mg)، ۰/۵ گرم نمونه خشک و آسیاب شده دانه‌ها به مدت ۳ ساعت در آون با دمای ۵۵۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد تا نمونه‌ها به خاکستر تبدیل شوند.

سپس ۵ میلی‌متر اسید کلریدریک به هر نمونه اضافه شد و در نهایت با آب مقطر تا ۵۰ میلی‌متر رقیق شد. از این عصاره برای اندازه‌گیری عناصر استفاده شد. پتاسیم توسط دستگاه فلیم فتومتر (Corning-310 C, USA)، و عناصر کلسیم و منیزیم توسط طیف سنج جذب اتمی (مدل-Shimadzu AA670) اندازه‌گیری شد (Pratt and Chapman, 1961).

تحلیل آماری داده‌ها

آنالیز داده‌ها با استفاده از نرم افزار SAS (نسخه ۹/۴) انجام شد و میانگین‌ها با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۰/۰۵ مقایسه شدند.

نتایج

عملکرد دانه: عملکرد دانه گندم تحت تأثیر تنش کمبود آب و نوع لاین قرار گرفت ($p \leq 0.05$)، ولی اثر متقابل تنش و لاین تأثیر معنی‌داری بر عملکرد دانه نداشت (جدول ۳). اعمال تنش آبیاری بعد از مرحله سنبله‌دهی به طور معنی‌داری عملکرد دانه گندم را کاهش داد (جدول ۴). در بین لاین‌های مورد بررسی، بیشترین (۵۳۷/۲۱ گرم در متر مربع) و کمترین (۴۱۱/۶۰ گرم در متر مربع) عملکرد به ترتیب در لاین‌های ۵ و ۸ مشاهده شد (جدول ۴).

جدول ۳: تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری شده لاین‌های گندم در شرایط تنش

منبع تغییرات	درجه آزادی	عملکرد دانه	کلروفیل a	کلروفیل b	کاروتنوئید	میانگین مربعات				مستقیم
						کریو هیدرات محلول	مالون دی آلدئید	پروتئین	سوپراکسید دیسموتاز	
خطا	۷۶	۹۹۴۸۷۳۳	۰/۸۸۰	۰/۸۰۰	۰/۴۰۰	۸/۳	۸۷/۱	۱۷/۳	۳۵/۰	۳۸/۳
لاین × تنش	۹	۱۳۲۷۲۰/۵ ^{ns}	۰/۳۲۷	۰/۳۰۰	۰/۳۰۰	۰/۳۸۷	۰/۱۳۱	۰/۳۳۱	۰/۳۸۰	۰/۳۸۰
لاین × لاین	۹	۳۵۶۰۴ ^{ns}	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰	۰/۳۰۰	۰/۳۸۷	۰/۱۳۱	۰/۳۳۱	۰/۳۸۰	۰/۳۸۰
لاین × تنش × لاین	۹	۵۷۴۰۰۰ ^{ns}	۰/۳۲۷	۰/۳۰۰	۰/۳۰۰	۰/۳۸۷	۰/۱۳۱	۰/۳۳۱	۰/۳۸۰	۰/۳۸۰
تنش × سال	۱	۱۷۷۱۵۹۱/۵ ^{ns}	۰/۳۲۷	۰/۳۰۰	۰/۳۰۰	۰/۳۸۷	۰/۱۳۱	۰/۳۳۱	۰/۳۸۰	۰/۳۸۰
لاین × تنش × سال	۹	۱۹۱۶۱/۱	۰/۳۲۷	۰/۳۰۰	۰/۳۰۰	۰/۳۸۷	۰/۱۳۱	۰/۳۳۱	۰/۳۸۰	۰/۳۸۰
تکرار (سال)	۴	۴۶۱۱/۳۴	۰/۳۲۷	۰/۳۰۰	۰/۳۰۰	۰/۳۸۷	۰/۱۳۱	۰/۳۳۱	۰/۳۸۰	۰/۳۸۰
سال	۱	۳۱۰۱۹/۱ ^{ns}	۰/۳۲۷	۰/۳۰۰	۰/۳۰۰	۰/۳۸۷	۰/۱۳۱	۰/۳۳۱	۰/۳۸۰	۰/۳۸۰

*، **، *** تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد و ns به ترتیب غیرمعنی دار.

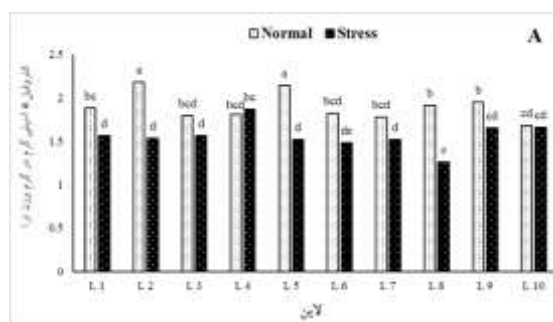
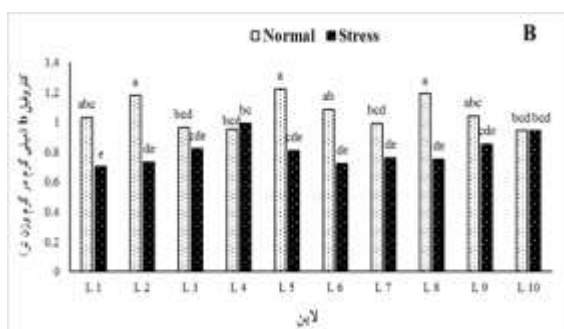
جدول ۴: مقایسه میانگین اثرات تنش و لاین بر عملکرد دانه، کاروتنوئید، محتوای کربوهیدرات‌های محلول و فعالیت آنزیم پراکسیداز لاین‌های گندم.

تیماها	عملکرد دانه (gr/ m ²)	کاروتنوئیدها (mg g ⁻¹ FW)	کربوهیدرات محلول (mg g ⁻¹ DW)	آنزیم پراکسیداز (U mg ⁻¹ protein)
تنش				
بدون تنش	۵۲۴/۵۴ ^a	۰/۵۵۶ ^a	۵/۶۵ ^b	۰/۶۰۷ ^b
تنش	۳۹۴/۱۱ ^b	۰/۴۲۹ ^b	۱۱/۳۱ ^a	۱/۲۶۱ ^a
لاین‌ها				
۱	۴۶۹/۱۳ ^{abc}	۰/۴۴۵ ^a	۷/۷۶ ^a	۰/۸۵ ^{bc}
۲	۴۷۶/۳۷ ^{abc}	۰/۴۹۷ ^a	۹/۱۳ ^a	۰/۹۱ ^{abc}
۳	۴۱۷/۹۵ ^c	۰/۴۹۰ ^a	۸/۰۳ ^a	۰/۹ ^{abc}
۴	۴۷۳/۳۹ ^{abc}	۰/۵۰۷ ^a	۸/۵ ^a	۰/۸۹ ^{abc}
۵	۵۳۷/۲۱ ^a	۰/۵۱۲ ^a	۸/۴۶ ^a	۰/۷۷ ^c
۶	۴۵۵/۹۰ ^{bc}	۰/۴۶۲ ^a	۸/۳۸ ^a	۰/۹۵ ^{abc}
۷	۴۳۷/۶۳ ^{bc}	۰/۴۸۳ ^a	۸/۳ ^a	۰/۹۱ ^{abc}
۸	۴۱۱/۶۰ ^c	۰/۶۰۷ ^a	۹/۹۵ ^a	۱/۰۳ ^{ab}
۹	۴۱۶/۸۱ ^c	۰/۴۸۲ ^a	۷/۹۱ ^a	۱/۰۷ ^a
۱۰	۴۹۷/۲۸ ^{ab}	۰/۴۵۴ ^a	۸/۳۶ ^a	۱/۰۵ ^{ab}

حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی‌دار بین تیمارها بر اساس آزمون LSD است.

کلروفیل **a**، **b** و کاروتنوئید: اثر تنش کمبود آب، نوع لاین و برهمکنش این دو عامل بر محتوای کلروفیل **a** و **b** لاین‌های گندم معنی‌دار بود ($p \leq 0.05$) (جدول ۳). تنش کمبود آب موجب کاهش معنی‌دار محتوای کلروفیل **a** و **b** شد، و بیشترین مقدار کلروفیل **a** در شرایط نرمال در لاین‌های ۲ و ۵، و در شرایط تنش در لاین ۴ مشاهده شد (شکل ۱ A). بیشترین مقدار کاروتنوئید نداشت (جدول ۳).

کلروفیل **a**، **b** و کاروتنوئید: اثر تنش کمبود آب، نوع لاین و برهمکنش این دو عامل بر محتوای کلروفیل **a** و **b** لاین‌های گندم معنی‌دار بود ($p \leq 0.05$) (جدول ۳). تنش کمبود آب موجب کاهش معنی‌دار محتوای کلروفیل **a** و **b** شد، و بیشترین مقدار کلروفیل **a** در شرایط نرمال در لاین‌های ۲ و ۵، و در شرایط تنش در لاین ۴ مشاهده شد (شکل ۱ A). بیشترین مقدار کاروتنوئید نداشت (جدول ۳).

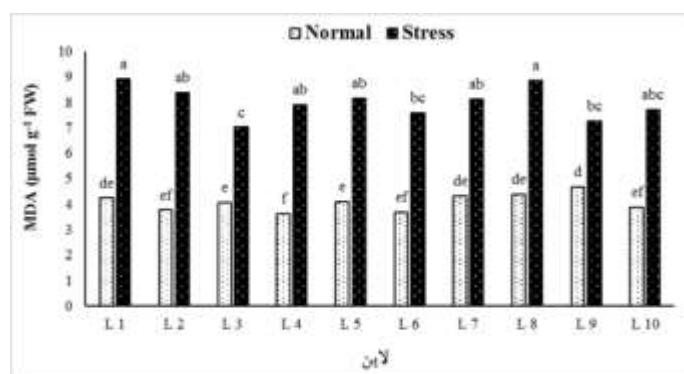


شکل ۱: محتوای کلروفیل **a** (A) و کلروفیل **b** (B) لاین‌های گندم در شرایط تنش آبی.

حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی‌دار بین تیمارها بر اساس آزمون LSD است.

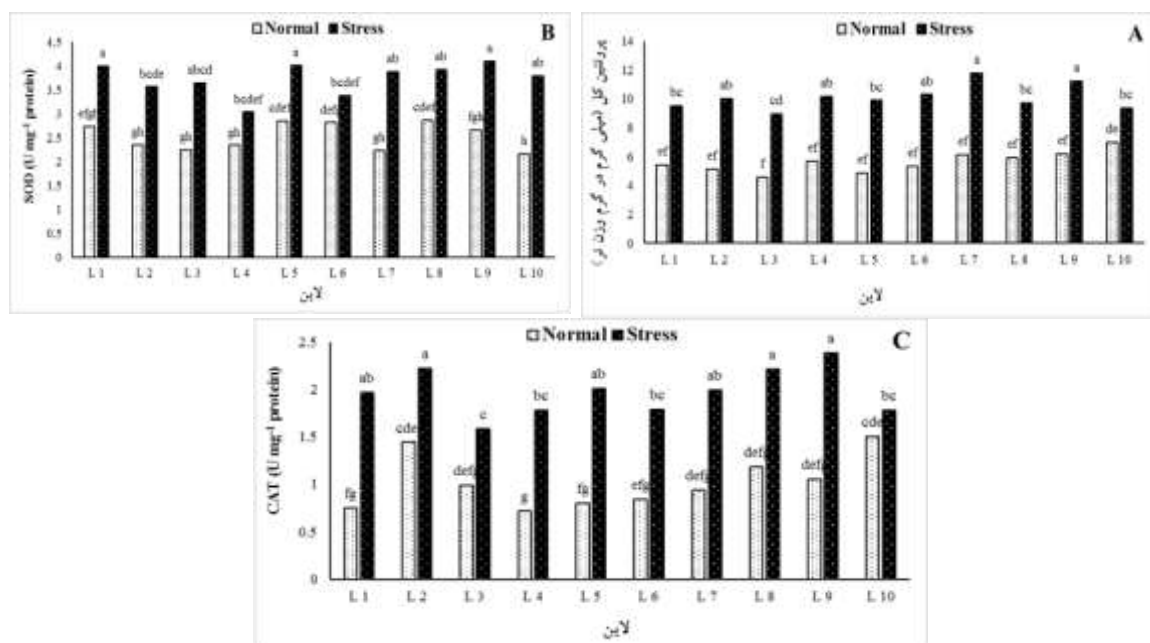
تجمع مالون دی آلدئید (MDA) و کربوهیدرات محلول: تجمع کربوهیدرات‌های محلول فقط تحت تاثیر تنش کمبود آب قرار گرفت و میزان آن به طور معنی‌داری تحت شرایط تنش افزایش یافت (جدول ۴)، ولی اثر نوع لاین و برهمکنش تنش و لاین تاثیر معنی‌داری بر میزان کربوهیدرات‌های محلول نداشت (جدول ۳). اثر تنش کمبود آب، نوع لاین و

برهمکنش این دو عامل بر تجمع MDA در لاین‌های گندم معنی‌دار بود ($p \leq 0.05$) (جدول ۳). در شرایط تنش تجمع MDA در لاین‌های گندم افزایش معنی‌داری نشان داد و بیشترین مقدار تجمع MDA در لاین‌های ۱ و ۸، و کمترین مقدار تجمع MDA در لاین ۳ مشاهده گردید (شکل ۲).



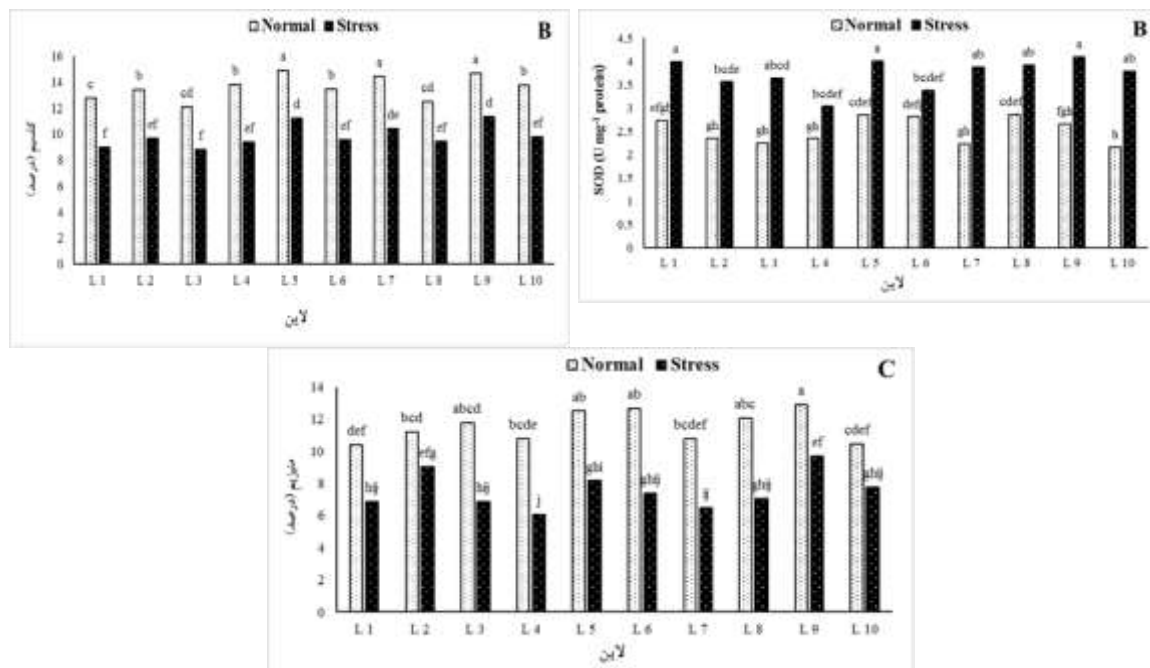
شکل ۲: تجمع MDA در لاین‌های گندم در شرایط تنش آبی.

حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین تیمارها بر اساس آزمون LSD است.



شکل ۳: محتوای پروتئین کل (A)، سوپراکسید دیسموتاز (B) و کاتالاز (C) لاین‌های گندم تحت تنش کم آبی.

حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین تیمارها بر اساس آزمون LSD است.



شکل ۴: محتوای پتاسیم، کلسیم و منیزیم لاین‌های گندم تحت تنش کم آبی.

حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی دار بین تیمارها بر اساس آزمون LSD است.

محتوای عناصر معدنی: اثر تنش کمبود آب و نوع لاین و برهمکنش این دو عامل بر میزان عناصر پتاسیم، کلسیم و منیزیم گندم معنی دار بود (جدول ۳). بیشترین میزان پتاسیم در شرایط نرمال در لاین‌های ۴، ۷، ۹ و ۱۰، و در شرایط تنش در لاین ۹ مشاهده گردید (شکل ۴A). بیشترین میزان کلسیم در شرایط نرمال در لاین‌های ۵، ۷ و ۹، و در شرایط تنش در لاین ۵ و ۹ مشاهده گردید (شکل ۴B). همچنین بیشترین میزان منیزیم در شرایط نرمال و تنش در لاین ۹ مشاهده شد (شکل ۴C).

بحث

نتایج ما نشان داد که تنش کم آبی باعث کاهش عملکرد لاین‌های گندم شد که در تطابق با نتایج احمد و همکاران (۲۰۱۸) و Gholamin و Khayatnezhad (۲۰۲۰) بود. دلیل کاهش عملکرد دانه در شرایط تنش می‌تواند ناشی از کاهش تعداد خوشه گیاه و تعداد دانه

پروتئین کل و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان: اثر تنش کمبود آب و نوع لاین بر میزان پروتئین کل و فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، پراکسیداز و کاتالاز معنی دار بود، ولی برهمکنش این دو عامل بر میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز معنی دار نبود (جدول ۳). در بین لاین‌های مورد بررسی، بیشترین و کمترین فعالیت آنزیم پراکسیداز نیز به ترتیب در لاین‌های ۹ و ۵ مشاهده گردید (جدول ۴). در شرایط تنش میزان پروتئین کل و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان به طور معنی داری افزایش یافت. بیشترین میزان پروتئین کل در شرایط تنش در لاین‌های ۷ و ۹، و کمترین مقدار در لاین ۳ مشاهده گردید (شکل ۳A). بیشترین فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در شرایط تنش در لاین‌های ۱، ۵ و ۹، و کمترین فعالیت در لاین ۴ مشاهده گردید (شکل ۳B). بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز نیز در شرایط تنش در لاین‌های ۲، ۸ و ۹، و کمترین فعالیت در لاین ۳ مشاهده گردید (شکل ۳B).

در خوشه باشد (Kumar et al., 2018). تنش کم آبی در هر مرحله‌ی رشدی منجر به کاهش عملکرد می‌شود و در شرایط کم آبی، در دسترس بودن مواد تولید شده در فرآیند فتوسنتز برای افزایش پر کردن بذر اغلب به شدت کاهش می‌یابد. در چنین شرایطی، وارسته‌ای که بتواند ذخایر کربوهیدرات‌ها را از ساقه تا دانه یا مخزن بهتر ارسال (mobilize) نماید، می‌تواند عملکرد بالاتری تولید کند.

کلروفیل جزء اصلی فتوسنتز است و یکی از فرایندهای فیزیولوژیکی حساس به تنش می‌باشد (Hussain et al., 2019). کمبود آب ممکن است باعث ایجاد پراکسیداسیون لیپیدی و نشت الکترولیتی از غشاهای کلروپلاست و تیلاکوئید شود، که منجر به از دست دادن محتوای کلروفیل می‌شود (Herbinger et al. 2002). کاهش در میزان کلروفیل طی شرایط تنش نشان دهنده‌ی ظرفیت کمتر برگ برای فتوسنتز و تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) می‌باشد (Kumar et al. 2016). نتایج ما نشان داد که میزان کاهش محتوای کلروفیل a و b، در شرایط کمبود آب به طور قابل توجهی بین لاین‌های مورد مطالعه متفاوت بود، که نشان‌دهنده تنوع ژنتیکی احتمالی برای این صفات است، به گونه‌ای که لاین‌های ۴ و ۱۰ تحمل بسیار بیشتری نسبت به سایر لاین‌ها به تنش کم آبی نشان دادند. واکنش متفاوت ژنوتیپ‌های گندم به تنش آبی از نظر میزان کلروفیل توسط Khayatnezhad و Gholamin (۲۰۲۰) گزارش شده است که در تطابق با نتایج ما است.

غشای سلول‌ها از نخستین قسمت‌های گیاه است که تحت تاثیر اثرات تنش ناشی از افزایش ROSها قرار می‌گیرد و میزان مالون دی‌آلدهید می‌تواند به عنوان محصول نهایی پراکسیداسیون اسیدهای چرب غیراشباع غشا به عنوان نشانگر زیستی تنش اکسیداتیو استفاده شود، که تجمع آن سبب کاهش یکپارچگی

غشا می‌شود (Hodges et al., 1999; Ghosh et al., 2020). افزایش تجمع MDA در مطالعه حاضر نشان‌دهنده آسیب شدید غشاء به دلیل تولید ROS بیشتر در اثر تنش کم آبی می‌باشد. تجمع کمتر MDA در برخی لاین‌ها مثل لاین ۳ نشان‌دهنده محافظت بیشتر در برابر تنش اکسیداتیو است. تجمع کمتر MDA در ارقام متحمل گندم تحت تنش شوری توسط Dugasa و همکاران (۲۰۱۹) گزارش شده است.

در مطالعه حاضر مشاهده شد که تجمع کربوهیدرات محلول طی شرایط تنش کم آبی در برگ لاین‌های گندم افزایش یافت. انباشت کربوهیدرات محلول در شرایط تنش علاوه بر نقش‌های فیزیولوژیکی مهمی که از نظر تامین انرژی و جلوگیری از مرگ حتمی ایفا می‌کند، می‌تواند باعث کاهش پتانسیل اسمزی سلول شده و از طریق تنظیم اسمزی موجب بالاتر نگه داشتن میزان آب نسبی در ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی شده و به این ترتیب در سازوکار تحمل به خشکی نقش مهمی داشته باشند (Kumar et al., 2015). نتایج ما با نتایج Echeverria و همکاران (۲۰۲۱) مطابقت دارد، که دریافتند سطوح بالاتری از محتوای کربوهیدرات می‌تواند به محافظت آنها در برابر تنش کمبود آب منجر شود، هر چند در مطالعه‌ی ما اختلاف معنی‌داری بین لاین‌های گندم از نظر محتوای کربوهیدرات محلول مشاهده نشد.

نتایج ما نشان داد که محتوای پروتئین و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان برگ‌ها در شرایط تنش کم آبی افزایش یافت. پاسخ محتوای پروتئین برگ به تنش متغیر می‌باشد و می‌تواند افزایشی، کاهشی و یا بدون تغییر باشد. فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی به طور کلی در طول تنش افزایش می‌یابد و این با افزایش حفاظت سلولی در ارتباط است. افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان ممکن است مسئول تاخیر در پیری برگ

و پژمردگی برگ باشد. علاوه بر این، آسیب ناشی از ROSها به سلول ممکن است توسط فعالیت آنزیمهای آنتی اکسیدان کاهش یا جلوگیری شود (Bal, 2021). افزایش توانایی لاینهای گندم در بهبود فعالیت آنزیمهای آنتی اکسیدان می تواند نشان دهندهی بالا رفتن توانایی تحمل این لاین ها به اثرات تنش کم آبی باشد. افزایش غلظت آنزیمها موجب می شود تا از پراکسیداسیون لیپیدهای غشاء، تخریب پروتئین ها و اسیدهای نوکلئیک جلوگیری شده و در نهایت میزان ماده خشک گیاه بالا رفته و عملکرد محصول افزایش یابد (Soltys-Kalina et al., 2016). بنابراین ارقام مقاوم و با تحمل بالا با افزایش فعالیت آنزیمهای آنتی اکسیدان چنین نتایجی را نشان خواهند داد. تحقیقات مختلف نشان داده است که ارتباط قوی بین تحمل به تنش های اکسیداتیو که به دلیل تنش های محیطی ایجاد می شود و افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان در گیاهان فتوسنتزکننده وجود دارد (Haddoudi, 2021). در تطابق با نتایج ما؛ Sattar و همکاران (۲۰۱۹) و Gholamin و Khayatnezhad (۲۰۲۰) گزارش دادند که فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان در ژنوتیپ های گندم تحت تنش کم آبی افزایش یافت و افزایش پاسخ آنتی اکسیدانی با افزایش تحمل به تنش کم آبی مرتبط است.

کاهش جذب مواد مغذی، انتقال به قسمت های مختلف گیاه و توزیع مجدد آن به طور کلی در شرایط تنش کم آبی کاهش می یابد (Tripathi et al., 2018; Rouphael et al., 2012). نتایج ما نشان داد که میزان عناصر معدنی پتاسیم، کلسیم و منیزیم طی تنش کم آبی در برگ های لاین های گندم کاهش یافت. پتاسیم یک ماده مغذی اصلی است که در تنظیم روزه، تنظیم اسمزی، تحریک فعال شدن مکانیسم های آنتی اکسیدانی و تحمل بیشتر به تنش کم آبی و دیگر تنش های غیرزنده نقش دارد (Tripathi et al., 2018).

کاهش غلظت پتاسیم در برگ طی شرایط تنش کم آبی ناشی از محدودیت در جذب پتاسیم و انتقال آن به قسمت های هوایی گیاه است که موجب کاهش تحمل به کم آبی، اختلال در هدایت روزه ای و تأثیر منفی بر تثبیت فتوسنتزی CO_2 ، انتقال و استفاده از آسمیلات ها می شود (Hasanuzzaman et al. 2018). مانند K، منیزیم به عنوان یک یون فعال اسمزی در تنظیم تورژیدگی سلولی دخیل است (Maschner, 2012). علاوه بر این، با توجه به اینکه کلسیم به صورت توده ای همراه آب در آوندهای چوبی انتقال می یابد، و بر اثر تنش خشکی روزه ها بسته و تبخیر و تعرق کاهش می یابد، بنابراین جذب کلسیم کاهش می یابد (Nascimento Silva et al., 2020). در تطابق با نتایج ما Ghosh و همکاران (۲۰۲۰) گزارش دادند که کاهش دسترسی به آب به دلیل تنش کم آبی، جذب مواد مغذی را در ریشه، اندام هوایی و برگ گندم کاهش داد که این محدودیت در جذب مواد مغذی، موجب تضعیف ارقام گندم در برابر تنش کم آبی گردید.

نتیجه گیری نهایی

نتایج ما نشان داد که تنش کم آبی در مرحله سنبله دهی لاین های گندم اثرات قابل توجهی بر صفات مورد بررسی داشت و اختلافات ژنتیکی بین لاین ها از نظر صفات مورد بررسی به جز محتوای کاروتنوئید و کربوهیدرات محلول وجود داشت. مشخص شد که در بین لاین های مورد بررسی لاین شماره ۵ بالاترین عملکرد دانه را به خود اختصاص داد. بیشترین مقدار کلروفیل a و b در شرایط تنش در لاین های ۲، ۵ و ۸ مشاهده شد. طی تنش کم آبی افزایش تجمع مالون دی آلدئید و پروتئین کل در برگ های لاین های گندم مشاهده شد که همراه با افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان سوپراکسید دیسموتاز، پراکسیداز و

منعکس می‌کند که نتیجه آن تلفات عملکرد است.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله نگارندگان از دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مهاباد و همچنین پروریس تحقیقات و آموزش کشاورزی میاندوآب (بخش غلات) که امکانات لازم برای انجام این تحقیق و بررسی را فراهم نمودند کمال تشکر و قدردانی می‌نمایند.

کاتالاز بود و بیشترین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در لاین ۹ مشاهده گردید. همچنین کاهش جذب عناصر معدنی پتاسیم، کلسیم و منیزیم نیز توسط لاین‌های گندم در شرایط کم آبی صورت گرفت. به طور کلی محدودیت دسترسی به مواد فتوسنتزی و تغذیه‌ای تحت تنش کم آبی ممکن است موجب کاهش تنظیم دفاع آنتی‌اکسیدانی شده که تنش اکسیداتیو بالا مخصوصاً در طی پر شدن دانه را

References

- Ahmad, Z., Waraich, E. A., Akhtar, S., Anjum, S., Ahmad, T., Mahboob, W. and Rizwan, M. (2018). Physiological responses of wheat to drought stress and its mitigation approaches. *Acta Physiologiae Plantarum*, 40(4): 1-13.
- Bal, E. (2021). Effect of melatonin treatments on biochemical quality and postharvest life of nectarines. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(1): 288-295.
- Bradford, M.M. (1979). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principles of protein dyebinding. *Analytical Biochemistry* 72: 248-254.
- Chance, b. and Maehly, A.C. (1955). Assay of catalase and peroxidases. *Methods Enzymology*. 2: 764-775.
- Nascimento Silva, A., Ramos, M. L. G., Júnior, W. Q. R., de Alencar, E. R., da Silva, P. C., de Lima, C. A. and Silva, M. A. V. (2020). Water stress alters physical and chemical quality in grains of common bean, triticale and wheat. *Agricultural Water Management*, 231: 106023.
- Dugasa, M. T., Cao, F., Ibrahim, W. and Wu, F. (2019). Differences in physiological and biochemical characteristics in response to single and combined drought and salinity stresses between wheat genotypes differing in salt tolerance. *Physiologia Plantarum*, 165(2): 134-143.
- Echeverria, A., Larrainzar, E., Li, W., Watanabe, Y., Sato, M., Tran, C. D. and Gonzalez, E. M. (2021). *Medicago sativa* and *Medicago truncatula* show contrasting root metabolic responses to drought. *Frontiers in Plant Science*, 12: 612.
- Farooq, M., Hussain, M. and Siddique, K. H. (2014). Drought stress in wheat during flowering and grain-filling periods. *Critical reviews in plant sciences*, 33(4): 331-349.
- Gholamin, R. and Khayatnezhad, M. (2020). Study of bread wheat genotype physiological and biochemical responses to drought stress. *Helix-The Scientific Explorer Peer Reviewed Bimonthly International Journal*, 10(05): 87-92.
- Ghosh, A., Agrawal, M. and Agrawal, S. B. (2020). Effect of water deficit stress on an Indian wheat cultivar (*Triticum aestivum* L. HD 2967) under ambient and elevated level of ozone. *Science of The Total Environment*, 714: 136837.
- Gueta-Dahan Y., Yaniv Z., Zilinskas B.A., and Ben-Hayyim G. (1997). Salt and oxidative stress: similar and specific responses and their relation to salt tolerance in citrus. *Planta*, 203: 460-469.
- Haddoudi, L., Hdira, S., Hanana, M., Romero, I., Haddoudi, I., Mahjoub, A. and Badri, M. (2021). Evaluation of the Morpho-Physiological, Biochemical and Molecular Responses of Contrasting *Medicago truncatula* Lines under Water Deficit Stress. *Plants*, 10(10): 2114.
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. B., Nahar, K. and Hossain, M. S. Jubayer Al Mahmud, Md. Shahadat Hossen, Abdul Awal Chowdhury Masud, Moumita and Masayuki Fujita. (2018). Potassium: a vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses.

- Herbinger, K., Tausz, M., Wonisch, A., Soja, G., Sorger, A. and Grill, D. (2002). Complex interactive effects of drought and ozone stress on the antioxidant defence systems of two wheat cultivars. *Plant Physiology and Biochemistry*, 40(6-8): 691-696.
- Hodges, D. M., DeLong, J. M., Forney, C. F. and Prange, R. K. (1999). Improving the thiobarbituric acid-reactive-substances assay for estimating lipid peroxidation in plant tissues containing anthocyanin and other interfering compounds. *Planta*, 207(4): 604-611.
- Huber, S. C. and Israel, D. W. (1982). Biochemical basis for partitioning of photosynthetically fixed carbon between starch and sucrose in soybean (*Glycine max* Merr.) leaves. *Plant Physiology*, 69(3): 691-696.
- Hussain, H. A., Men, S., Hussain, S., Chen, Y., Ali, S., Zhang, S. and Wang, L. (2019). Interactive effects of drought and heat stresses on morpho-physiological attributes, yield, nutrient uptake and oxidative status in maize hybrids. *Scientific Reports*, 9(1): 1-12.
- Janero, D.R. (1990). Malondialdehyde and thiobarbituric acid-reactivity as diagnostic indices of lipid peroxidation and peroxidative tissue injury. *Free Radical Biology and Medicine*, 9: 515-540.
- Jia, Q., Sun, L., Ali, S., Liu, D., Zhang, Y., Ren, X. and Jia, Z. (2017). Deficit irrigation and planting patterns strategies to improve maize yield and water productivity at different plant densities in semi-arid regions. *Scientific Reports*, 7(1): 1-13.
- Jiao, Z., Li, Y., Li, J., Xu, X., Li, H., Lu, D. and Wang, J. (2012). Effects of exogenous chitosan on physiological characteristics of potato seedlings under drought stress and rehydration. *Potato Research*, 55(3): 293-301.
- Kumar, A., Sharma, S. K., Lata, C., Sheokand, S. and Kulshreshtha, N. (2015). Combined effect of boron and salt on polypeptide resolutions in wheat (*Triticum aestivum*) varieties differing in their tolerance. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 85(12): 1626-32.
- Kumar, A., Lata, C., Kumar, P., Devi, R., Singh, K., Krishnamurthy, S. L. and Sharma, S. K. (2016). Salinity and drought induced changes in gas exchange attributes and chlorophyll fluorescence characteristics of rice (*Oryza sativa*) varieties. *ICAR. Indian Journal of Agricultural Sciences* 86 (6): 19-27.
- Kumar, A. S. H. W. A. N. I., Sharma, S. K., Lata, C., Devi, R., Kulshreshtha, N., Krishnamurthy, S. L. and Yadav, R. K. (2018). Impact of water deficit (salt and drought) stress on physiological, biochemical and yield attributes on wheat (*Triticum aestivum*) varieties. *Indian Journal of Agricultural Science*, 88: 1624-1632.
- Lau, S. E., Hamdan, M. F., Pua, T. L., Saidi, N. B. and Tan, B. C. (2021). Plant nitric oxide signaling under drought stress. *Plants*, 10(2): 360.
- Malekpoor, F., Salimi, A. and Ghasemi Pirbalouti, A. (2017). Effect of bio-elicitor chitosan on physiological and morphological properties in purple basil (*Ocimum basilicum* L.) under water deficit. *Journal of Plant Ecophysiology*, 8(27): 56-71.
- Mishra, A., Bruno, E. and Zilberman, D. (2021). Compound natural and human disasters: Managing drought and COVID-19 to sustain global agriculture and food sectors. *Science of the Total Environment*, 754: 142210.
- Munns, R. (2011). Plant adaptations to salt and water stress: differences and commonalities. *Advances in Botanical Research*, 57: 1-32.
- Pratt, P. and Chapman, H. (1961). Gains and losses of mineral elements in an irrigated soil during a 20-year lysimeter investigation. *Hilgardia*, 30(16): 445-467.
- Qaseem, M. F., Qureshi, R. and Shaheen, H. (2019). Effects of pre-anthesis drought, heat and their combination on the growth, yield and physiology of diverse wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes varying in sensitivity to heat and drought stress. *Scientific Reports*, 9(1): 1-12.
- Qayyum, A., Al Ayoubi, S., Sher, A., Bibi, Y., Ahmad, S., Shen, Z. and Jenks, M. A. (2021). Improvement in drought tolerance in bread wheat is related to an improvement in osmolyte production, antioxidant enzyme activities, and gaseous exchange. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(9): 5238-5249.
- Ramanjulu, S. and Bartels, D. (2002). Drought- and desiccation- induced modulation of gene expression in plants. *Plant, Cell & Environment*, 25(2): 141-151.

- Rouphael, Y., Cardarelli, M., Schwarz, D., Franken, P., and Colla, G. (2012). Effects of drought on nutrient uptake and assimilation in vegetable crops. In *Plant responses to drought stress* (pp. 171-195). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Sattar, A., Cheema, M. A., Sher, A., Ijaz, M., Ul-Allah, S., Nawaz, A. and Ali, Q. (2019). Physiological and biochemical attributes of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings are influenced by foliar application of silicon and selenium under water deficit. *Acta Physiologiae Plantarum*, 41(8): 1-11.
- Singhal, P., Jan, A. T., Azam, M. and Haq, Q. M. R. (2016). Plant abiotic stress: a prospective strategy of exploiting promoters as alternative to overcome the escalating burden. *Frontiers in Life Science*, 9(1): 52-63.
- Soltys-Kalina, D., Plich, J., Strzelczyk-Żyta, D., Śliwka, J. and Marczewski, W. (2016). The effect of drought stress on the leaf relative water content and tuber yield of a half-sib family of 'Katahdin'-derived potato cultivars. *Breeding Science*, 66(2): 328-331.
- Tripathi, A. M., Klem, K., Fischer, M., Orság, M., Trnka, M. and Marek, M. V. (2018). Water availability influences accumulation and allocation of nutrients and metals in short-rotation poplar plantation. *Biomass and Bioenergy*, 116: 151-160.
- Yadav, B., Jogawat, A., Rahman, M. S. and Narayan, O. P. (2021). Secondary metabolites in the drought stress tolerance of crop plants: A review. *Gene Reports*, 23: 101040.
- Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z. and Chen, S. (2021). Response Mechanism of Plants to Drought Stress. *Horticulturae*, 7: 50.
- Zhao, G., Xu, H., Zhang, P., Su, X. and Zhao, H. (2017). Effects of 2, 4-epibrassinolide on photosynthesis and Rubisco activase gene expression in *Triticum aestivum* L. seedlings under a combination of drought and heat stress. *Plant Growth Regulation*, 81(3): 377-384.