University of Birjand

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

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses In Crop Sciences

Vol. 16, No. 2, pp. 419-431 (Summer 2023)

http://dx.doi.org/10.22077/escs.2023.4707.2059

Original article

Evaluation of some physiological, biochemical traits and yield of three rye cultivars under water deficit stress conditions

H. Nouriyani[1*], S.H. Jafarinia[2]

1. Assistant Professor Department of Agronomy and Plant Breeding, Payame Noor University, Iran
2. Former M.Sc. Student, Department of agriculture on agronomy, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

Received 26 September 2021; Accepted 24 November 2021

Extended abstract

Introduction

Water stress is one of the most important threatening factors for the production of crop plants in the arid and semi-arid regions of the world. Understanding plant responses to drought is of great importance and also a fundamental part of making crops stress tolerant. Water stress reduces plant growth and manifests several morphological, physiological and biochemical alterations leading to massive loss in yield of major crops including Rye. Drought susceptibility of a genotype is often measured as a function of the reduction in yield under drought stress, while the values are confounded with differential yield potential of genotypes. The aim of this study was to evaluate the effect of water deficit stress on some physiological, biochemical traits and yield of three Rye cultivars.

Materials and methods

This experiment was carried out as split plot based on randomized complete block design with three replications in Dezful region during 2014-2015 growing season. Treatments included water deficit stress (irrigation after 75, 1000 and 150 mm evaporation from Class A evaporation pan) in main plots and three rye cultivars (Stratoskaya, Danko, Montanum) were in subplots. The evaluated traits included chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoids, soluble proteins, quantum yield of photosystem II, soluble sugars, proline content and grain yield. Analysis of variance was performed using statistical analysis system (SAS version: 9.3). The means were analyzed using the Duncan's test at 5% probability level.

Results and discussion

The results showed that water deficit stress reduced the content of chlorophyll a (27%), chlorophyll b (32%), carotenoids (19%), soluble proteins (71%), quantum yield of photosystem II (28%), grain yield (33%) and in contrast, it increased the amount of soluble sugars (83%) and proline content (145%) compared to the control treatment. The slicing intersections of water deficit stress and cultivar showed that in terms of grain yield, Danko cultivar under irrigation conditions after 75 mm evaporation and Stratoskaya cultivar under irrigation conditions after 150 mm evaporation from the evaporation pan of Class A evaporation had the highest and lowest grain yields with 2414 and 1147 kg per hectare, respectively.

* Corresponding author: Hassan Nouriyani; E-Mail: hnouriyani@pnu.ac.ir

© 2023, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Conclusion
In general, it can be said that under irrigation conditions after 150 mm evaporation Montanum cultivar because of more photosynthetic durability and better osmotic regulation than the other two cultivars had more tolerance to water deficit stress and it had higher grain yield.

***Keywords*:** Chlorophyll fluorescence, Proline, Soluble proteins, Soluble sugars, Stress

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد شانزدهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۲

http://dx.doi.org/10.22077/escs.2023.4707.2059

مقاله پژوهشی

ارزیابی برخی صفات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و عملکرد سه رقم چاودار در شرایط تنش کم‌آبی

حسن نوریانی[1*]، سیدحجت‌اله جعفری‌نیا[2]

۱. استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه پیام نور، ایران
۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه زراعت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دزفول، ایران

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
پروتئین‌های محلول
پرولین
تنش
فلورسانس کلروفیل
قندهای محلول

تاریخ دریافت:
۱۴۰۰/۰۷/۰۴

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۰/۰۹/۰۳

تاریخ انتشار:
تابستان ۱۴۰۲

۱۶(۲): ۴۱۹-۴۳۱

چکیده

به‌منظور بررسی اثر تنش کم‌آبی بر برخی صفات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و عملکرد سه رقم چاودار، آزمایشی به‌صورت کرت‌های یک‌بار خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳ در منطقه دزفول اجرا گردید. کرت‌های اصلی متشکّل از سه سطح تیمار تنش کم‌آبی (آبیاری پس از ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A) و کرت‌های فرعی نیز شامل سه رقم چاودار (استراتوسکایا، دانکو، مونتانوم) بود. نتایج نشان داد که در ارقام مختلف چاودار تنش کم‌آبی نسبت به تیمار شاهد منجر به کاهش محتوای کلروفیل a (۲۷ درصد)، کلروفیل b (۳۲ درصد)، کارتنوئیدها (۱۹ درصد)، پروتئین‌های محلول (۷۱ درصد)، عملکرد کوانتومی فتوسیستم II (۲۸ درصد)، عملکرد دانه (۳۳ درصد) و در مقابل باعث افزایش مقادیر قندهای محلول (۸۳ درصد) و میزان پرولین (۱۴۵ درصد) گردید. برهمکنش تنش کم‌آبی و رقم نشان داد که از نظر عملکرد دانه، رقم دانکو در شرایط آبیاری پس از ۷۵ میلی‌متر تبخیر و رقم استراتوسکایا در شرایط آبیاری پس از ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر کلاس A با مقادیر ۲۴۱۴ و ۱۱۴۷ کیلوگرم در هکتار به ترتیب دارای بیشترین و کمترین عملکرد دانه بودند. درحالی‌که در شرایط آبیاری پس از ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر رقم مونتانوم به دلیل دوام فتوسنتزی بیشتر و تنظیم اسمزی بهتر نسبت به دو رقم دیگر، تحمل بیشتری در مقابل تنش کم‌آبی داشت و از عملکرد دانه بالاتری برخوردار بود.

مقدمه

چاودار (*Secale cereal* L.) به دلیل امکان استفاده دومنظوره از آن، برخورداری از دامنه تحمل بالا به سرما، خشکی و شوری در مقایسه با گندم و جو از اهمیت زیادی برخوردار و سازگارترین گیاه در بین غلات است (Khodabandeh, 2012). تنش آبی باعث ایجاد مجموعه‌ای از واکنش‌های پیچیده می‌شود که به‌صورت تغییرات در سطح مولکولی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی ظاهر می‌گردند. البته این مجموعه واکنش‌ها به‌شدت تنش و دوام آن، ژنوتیپ گیاه و مرحله رشد و همچنین عوامل محیطی ایجادکننده تنش بستگی دارند (Hussain et al., 2018). گیاهان برای مقابله با اثرات تنش خشکی تغییرات خاصی در الگوهای رشد، فرایندهای فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و سلولی خود می‌دهند (Fahad et al., 2017). در این میان تنظیم اسمزی و تغییر صفات فیزیولوژیک از مهم‌ترین مکانیسم‌ها برای سازگاری گیاه به شرایط تنش خشکی است. در فرآیند تنظیم اسمزی که متابولیت‌های دارای وزن مولکولی پایین به‌ویژه قندها درون سلول انباشته می‌شوند، این ترکیبات برای سلول غیر سمی بوده و به‌عنوان تنظیم‌کننده اسمزی بین سیتوپلاسم و واکوئل عمل کرده و به جلوگیری از اتلاف آب از سلول کمک می‌نمایند (Liang et al., 2013) و در شرایط خشکی تجمع یافته و به‌عنوان عامل محافظت اسمزی عمل می‌نماید (Lum et al., 2014). افزایش در میزان پرولین و قندهای محلول

* نگارنده پاسخگو: حسن نوریانی. پست الکترونیک: hnouriyani@pnu.ac.ir

ازجمله واکنش‌هایی است که گیاهان مختلف برای تنظیم اسمزی و کاهش پتانسیل اسمزی برای مقابله با خشکی از خود بروز می‌دهند.

تحت تنش خشکی برخی از ویژگی‌های فیزیولوژیک مانند میزان فتوسنتز خالص و محتوای کلروفیل کل، کاهش می‌یابد زیرا وضعیت آب گیاه در حد بسیار پایین قرار دارد (Singh et al., 2018). دوام فتوسنتز و حفظ کلروفیل برگ تحت شرایط تنش خشکی ازجمله شاخص‌های فیزیولوژیک مناسب جهت مقاومت به تنش خشکی هستند (Tatrai et al., 2016). کارتنوئیدها نیز نقش حفاظتی در برابر تنش اکسیداتیو القاء شده دارند و در سمیت زدایی از کلروفیل نیز مؤثرند و موجب کاهش اثر سمی رادیکال‌های آزاد می‌شوند (Hadi et al., 2016). یکی از عوامل تأثیرگذار تنش خشکی بر فتوسنتز، کاهش میزان کارایی فتوسنتز از طریق فلورسانس کلروفیل است. اندازه‌گیری مقدار فلورسانس کلروفیل می‌تواند ارزیابی مناسبی از حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II (عملکرد کوانتومی) و جریان الکترون در فتوسیستم II را نشان دهد. فلورسانس متغیر (Fv) که از اختلاف فلورسانس حداکثر (Fm) با فلورسانس حداقل (Fo) حاصل می‌شود، وضعیت عبور الکترون از فتوسیستم II به QA را نشان می‌دهد. حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II (Fv/Fm) که تبدیل نور جذبی به انرژی شیمیایی را نشان می‌دهد به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان شاخصی معتبر برای تشخیص اختلالات ناشی از تنش در مراکز فتوشیمیایی و بازدارندگی نوری استفاده‌شده است (Eskandari, 2015).

پروتئین‌های محلول نیز از اجزای مهم و کلیدی در متابولیسم برگ‌ها به‌حساب می‌آیند. رابیسکو آنزیم مؤثر در فتوسنتز بیش از ۵۰ درصد محتوای پروتئین‌های محلول برگ‌ها را تشکیل می‌دهد. لذا هرگونه تغییر در غلظت پروتئین‌های محلول با تغییر در محتوای این آنزیم و درنتیجه با تغییر در سرعت فتوسنتز برگ‌ها همراه است (Van-Oosten et al., 1995). نتایج تحقیقات دیگر نیز حاکی از آن است که تنش کم‌آبی بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی (Molik et al., 2014; Ardalani et al., 2014; Shahriary et al., 2020)، بیوشیمیایی (Karimi et al., 2012; Asghari et al., 2017; Azari-nasrabad et al., 2019) و عملکرد (Lepedus et al. 2012; Czyczyło-Mysza and Myskow, 2017; Karimi et al., 2020) تأثیرگذار بوده است.

ازآنجاکه کمبود آب از طریق ایجاد تغییرات آناتومیک، مورفولوژیک، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی بر جنبه‌های مختلف رشد و نمو و پتانسیل عملکرد گیاه تأثیر می‌گذارد (Jill et al., 2012)، لذا این آزمایش با هدف بررسی تأثیر تنش کم‌آبی بر برخی صفات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و عملکرد سه رقم چاودار طراحی و در منطقه دزفول اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در شرایط مزرعه‌ای و به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳ در منطقه دزفول اجرا گردید. کرت‌های اصلی، متشکّل از سه سطح تیمار تنش کم‌آبی که به‌صورت دور آبیاری، شامل آبیاری پس از ۷۵ میلی‌متر تبخیر (شاهد)، آبیاری پس از ۱۰۰ میلی‌متر تبخیر و آبیاری پس از ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A و کرت‌های فرعی نیز شامل سه رقم چاودار (استراتوسکایا، دانکو، مونتانوم) بود. بذور چاودار مورداستفاده در این آزمایش که شامل استراتوسکایا (تیپ رشد بهاره، متوسط ارتفاع بوته ۱۲۳ سانتی‌متر، کیفیت نانوایی مطلوب، مقادیر بالای تولید علوفه سبز، میانگین وزن هزار دانه ۲۵ گرم و مقاوم به خشکی)، دانکو (تیپ رشد بهاره، متوسط ارتفاع بوته ۱۴۰ سانتی‌متر، میانگین وزن هزار دانه ۲۶ گرم، رنگ دانه تیره، کیفیت نانوایی خوب، نیمه مقاوم نسبت به خوابیدگی و ریزش دانه، متحمل به سرما، مقاوم به زنگ‌های زرد و قهوه‌ای) و مونتانوم (تیپ رشد بهاره، متوسط ارتفاع بوته ۶۰ سانتی‌متر، کیفیت نانوایی متوسط، میانگین وزن هزار دانه ۲۵ گرم، مقاوم نسبت به خوابیدگی و ریزش دانه، قابل‌کشت در انواع خاک‌ها و مقاوم در برابر سرما) بودند که از مؤسسه اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تأمین گردید.

هر کرت شامل هشت خط کشت به طول شش متر و فاصله خطوط ۲۰ سانتی‌متر و تراکم ۳۵۰ بذر در مترمربع اعمال شد. با توجه به نتایج آزمون خاک محل آزمایش (جدول ۱)، کودهای نیتروژن، فسفر و پتاس موردنیاز بر اساس مساحت کرت‌های آزمایشی، برحسب ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن، ۷۰ کیلوگرم فسفر (P_2O_5) و ۹۰ کیلوگرم پتاس (K_2O) در هکتار به ترتیب از منبع اوره، سوپر فسفات تریپل و سولفات پتاسیم محاسبه و مصرف گردید. ۵۰ درصد کود نیتروژن نیز به‌صورت سرک در مرحله ساقه رفتن اعمال شد.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1. Physical and chemical properties of the soil experimental location

عمق نمونه‌برداری Sampling depth	بافت خاک Soil texture	نیتروژن قابل‌جذب Nitrogen	فسفر قابل‌جذب Phosphorus	پتاسیم قابل‌جذب Potassium	ماده آلی Organic matter	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی Electrical conductivity
cm		----------mg.Kg^{-1}----------			%		ds.m^{-1}
0-30	Clay loam	42	6.8	106	0.6	7.2	0.97

پس از پیاده نمودن نقشه آزمایش و اختصاص تیمارها به واحدهای آزمایشی، کشت بذور در ۱۵ آذرماه انجام گردید. آبیاری کرت‌های آزمایشی به‌صورت نشتی ابتدا به‌طورمعمول جهت سبز شدن و استقرار کامل گیاه (مرحله سه برگچه‌ای) انجام شد و پس‌ازآن تیمارهای تنش کم‌آبی اعمال گردید. برای تعیین زمان دقیق آبیاری، در پایان هرروز مقدار تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A با استفاده از داده‌های هواشناسی گزارش‌شده توسط ایستگاه هواشناسی صفی‌آباد دزفول (جدول ۲) محاسبه و پس از رسیدن به حد میزان تبخیر تیمار موردنظر، در صبح روز بعد آبیاری آن صورت می‌گرفت. جهت تعیین میزان آب آبیاری، ابتدا نیاز آبی گیاه در منطقه آزمایش با برآورد میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش تشتک تبخیر کلاس A با استفاده از داده‌های روزانه هواشناسی و سپس اعمال ضریب گیاهی چاودار در مراحل مختلف رشد، مطابق روابط زیر محاسبه گردید (Allen et al., 1998).

$$ET_0 = K_p \times E_p \quad [۱]$$

$$ET_C = K_C \times ET_0 \quad [۲]$$

که در آن ET_0: تبخیر و تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر بر روز)؛ K_p: ضریب تشتک (۰/۷۵-۰/۸۰)، E_p: تبخیر تشتک (میلی‌متر بر روز)؛ K_C: ضریب گیاهی (مقادیر ۰/۸۷، ۱/۱۲ و ۰/۳۰ به ترتیب جهت مراحل توسعه، میانی و پایانی رشد گیاه)؛ ET_C: نیاز آبی گیاه (میلی‌متر بر روز).

جدول ۲. برخی پارامترهای هواشناسی در سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳

Table 2. Some meteorological parameters in the during 2014-2015 growing season.

Month	ماه	میانگین دما Average temperature	بارندگی Rainfall	رطوبت نسبی Relative humidity	میزان تبخیر Evaporation rate
		$^{\circ}$C	mm	---------- % ----------	
November-December	آذر	15.2	72.1	55.2	73.8
December-January	دی	12.6	65.5	75.4	59.1
January-February	بهمن	14.9	67.3	77.1	85.2
February-March	اسفند	17.8	3.8	64.2	121.5
March-April	فروردین	23.3	2.4	52.5	183.2
April-May	اردیبهشت	28.6	0.8	44.2	269.3

سپس با توجه به بسته بودن کرت‌های آزمایشی و انتقال آب تا ابتدای خطوط کشت به‌وسیله لوله، میزان آب آبیاری با راندمان ۹۰ درصد برای هر تیمار محاسبه و با نصب کنتور در مسیر هر تیمار به‌طور جداگانه در اختیار گیاه قرار گرفت.

جهت تعیین میزان غلظت و بررسی وضعیت پایداری محتوای کلروفیل‌های a، b و کارتنوئیدها از هر کرت در سطوح مختلف تیماری، پنج بوته به‌طور تصادفی انتخاب و برگ پرچم آن‌ها جدا و نمونه‌ها به‌سرعت در نیتروژن مایع به‌صورت تفکیک منجمد شد و به آزمایشگاه انتقال یافت. برای تخمین کلروفیل در برگ پرچم، بر اساس روش آرنون (Arnon, 1949) پس از منجمد کردن برگ پرچم در نیتروژن مایع، آسیاب کردن ۰/۵ گرم از نمونه‌ها و تبدیل آن‌ها به پودر، عصاره گیری در ۵ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد در شرایط تاریکی و بالاخره سانتریفوژ کردن آن‌ها، میزان جذب نور توسط عصاره، با استفاده از دستگاه طیف‌سنج (مدل UV-1800 شرکت Shimadzu کشور ژاپن) در طول‌موج‌های ۶۴۶/۸، ۶۶۳/۲ و ۴۷۰ قرائت‌شده و میزان کلروفیل و کارتنوئیدها با استفاده از روابط زیر به دست آمد:

$$\text{کلروفیل } a = [12.25 \cdot A_{663.2} - 2.79 \cdot A_{648.8}] \times [V / 1000W] \quad [۳]$$

$$کلروفیل\ b = [21.50 \cdot A_{646.8} - 5.10 \cdot A_{663.2}] \times [V / 1000W] \quad [۴]$$

$$کارتنوئید = [7.93 \cdot A_{663.2} - 19.53 \cdot A_{648.8}] \times [V / 1000W] \quad [۵]$$

که در این معادلات، A: میزان جذب نور توسط عصاره در طول‌موج‌های معین، V: حجم نهایی عصاره در استن ۸۰ درصد (میلی‌لیتر)؛ و W وزن‌تر نمونه برگ پرچم (گرم) هستند.

به‌منظور بررسی میزان و پایداری نسبی پروتئین‌های محلول از روش برادفورد (Bradford, 1976) استفاده گردید. طبق این روش جهت استخراج پروتئین‌های محلول برگ پرچم از بافر Tris- HCL و برای رنگ‌آمیزی از کوماسی برلیانت بلوجی استفاده شد. تمام مراحل استخراج و رنگ‌آمیزی در سردخانه با دمای ۴-۰ درجه سانتی‌گراد انجام گردید. در این روش، میزان جذب نور توسط محلول به‌دست‌آمده، با استفاده از دستگاه طیف‌سنج در طول‌موج ۴۹۵ نانومتر قرائت و سپس با ترسیم منحنی حاصل از قرائت مقدار جذب نور در غلظت‌های استاندارد پروتئینی تهیه‌شده از سرم آلبومین گاوی (BSA) در غلظت‌های معین، پروتئین‌های محلول تعیین گردید.

اندازه‌گیری پرولین برگ پرچم با استفاده از روش بتیس و همکاران (Bates et al.,1973) انجام گرفت. به این صورت که مقدار ۰/۱ گرم برگ پرچم در دو میلی‌لیتر سولفوسالیسیلیک اسید ۳/۳ درصد ساییده شده و با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه در دمای ۴ درجه سلسیوس به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفوژ و از عصاره به‌دست‌آمده جهت برآورد محتوای پرولین استفاده شد. جذب در دستگاه طیف‌سنج با طول‌موج ۵۲۰ نانومتر قرائت گردید.

برای اندازه‌گیری قندهای محلول از روش فنل اسیدسولفوریک استفاده شد (Chapin and Kennedy, 1987). ۰/۱ گرم از ماده خشک پودر شده بافت برگی در ۱۰ میلی‌لیتر اتانول ۷۰ درصد ریخته شد و پس از یک هفته از بخش رویی محلول برای بخش هوایی ۵ میلی‌لیتر برداشته و با آب مقطر به ۲ میلی‌لیتر رسانده شد. سپس به آن ۱ میلی‌لیتر فنل ۵ درصد اضافه و بعدازآنکه به هم زده شد به آن ۵ میلی‌لیتر اسیدسولفوریک غلیظ افزوده گردید، حدود نیم ساعت پس از خنک شدن کامل محلول، جذب آن توسط دستگاه طیف‌سنج در طول‌موج ۴۸۵ نانومتر خوانده شد. جهت اندازه‌گیری مقدار قندهای محلول از منحنی استاندارد تهیه‌شده از گلوکز استفاده شد.

به‌منظور اندازه‌گیری فلورسانس کلروفیل برگ پرچم با استفاده از دستگاه فلورومتر (مدل Optic Science- OS-30 کشور امریکا) به‌طور تصادفی از تیمارهای آزمایش چهار برگ پرچم کاملاً توسعه‌یافته (بین ساعت ۱۰-۸ صبح) انتخاب گردید. برگ‌های پرچم به مدت ۲۰ دقیقه با تاریکی سازگار شده و سپس میزان فلورسانس تیمارها در شدت نور ۱۰۰۰ میکرومول (فوتون) بر مترمربع در ثانیه مورد ارزیابی قرار گرفت. میزان عملکرد کوانتومی فتوسیستم II (Fv/Fm) مطابق فرمول زیر محاسبه گردید (Arnon, 1949).

$$F_v / F_m = (F_m - F_o) / F_m \quad [۶]$$

که در آن Fm: فلورسانس حداکثر؛ Fo: فلورسانس حداقل؛ Fv: فلورسانس متغیر هستند.

در مرحله رسیدگی کامل، پس از حذف یک متر حاشیه از بالا و پایین دو خط میانی، محصول هر خط به طول ۵ متر (سطحی معادل ۲ مترمربع) کف بر گردید. پس از کوبیدن محصول برداشت‌شده، کاه و کلش از محصول دانه جدا و وزن دانه‌های به‌دست‌آمده به‌عنوان عملکرد دانه منظور گردید.

تجزیه‌وتحلیل داده‌ها و ارزیابی نتایج، با استفاده از نرم‌افزار (Ver. 9.3 SAS) روی داده‌های آزمایش انجام گرفت. مقایسه میانگین صفات مورد ارزیابی، بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد صورت پذیرفت.

نتایج و بحث

رنگیزه‌های فتوسنتزی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثرات ساده سطوح تنش کم‌آبی، رقم و اثر متقابل بین آن‌ها بر محتوای کلروفیل a اثر معنی‌داری داشت (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر متقابل تنش کم‌آبی و رقم نشان داد که بیشترین میزان آن (۲/۶۵ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ) متعلق به تیمار آبیاری پس از ۷۵ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر کلاس A و رقم دانکو بود (I1V2) و از سوی دیگر کمترین آن مربوط به تیمار آبیاری پس از ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر کلاس A و رقم استراتوسکایا (I3V1) به میزان ۱/۸۷ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ به دست آمد (جدول ۴). همان‌گونه که در جدول ۴ مشاهده می‌گردد، با افزایش شدت تنش کم‌آبی محتوای کلروفیل a در تمامی ارقام موردمطالعه کاهش یافت. راد و همکاران (Rad et al., 2012) کاهش

محتوای کلروفیل در شرایط تنش کم‌آبی را به تخریب غشاهای تیلاکوئیدهای کلروپلاست و اکسیداسیون نوری کلروفیل در اثر افزایش فعالیت گونه‌های فعال اکسیژن که باعث پراکسیداسیون این رنگیزه‌ها و همچنین افزایش فعالیت آنزیم کلروفیلاز می‌شود، نسبت داده‌اند؛ بنابراین، حفظ غلظت کلروفیل تحت شرایط تنش به ثبات فتوسنتزی در این شرایط کمک می‌کند. این نتایج با یافته‌های زارعیان و همکاران (Zareian et al., 2017) و آذری نصرآباد و همکاران (Azari-nasrabad et al., 2019) مطابقت دارد.

اثر ساده تیمار تنش کم‌آبی و اثر متقابل تیمار تنش کم‌آبی و رقم بر محتوای کلروفیل b معنی‌دار بود، اما بین اثر ساده ارقام چاودار ازنظر صفت مذکور اختلاف معنی‌داری مشاهده نگردید (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل تنش کم‌آبی و رقم مشخص نمود که بیشترین و کمترین محتوای کلروفیل b به میزان ۱/۳۹ و ۰/۸۹ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ به ترتیب در تیمار آبیاری پس از ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر کلاس A متعلق به رقم دانکو (I1V2) و استراتوسکایا (I3V1) بود (جدول ۴). در خصوص کاهش محتوای کلروفیل b ارقام در اثر تنش خشکی، مولیک و همکاران (Molik et al., 2014) بیان کردند که مقدار کمپلکس پروتئینی جذب‌کننده نور chl a/b موجود در فتوسیستم II به‌شدت کاهش پیدا می‌کند و بخش کلروفیل b این کمپلکس پروتئینی درون غشاء کلروپلاست قرار دارد که در اثر تنش میزان تخریب غشاهای کلروپلاستی آن افزایش می‌یابد.

جدول ۳. تجزیه واریانس صفات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و عملکرد دانه ارقام چاودار در شرایط تنش کم‌آبی

Table 3. Analysis of variance of physiological, biochemical traits and grain yield of Rye cultivars under water deficit stress conditions

S.O.V	منابع تغییرات	درجه آزادی d.f	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کارتنوئیدها Carotenoids	پرولین Proline
Replication	**تکرار**	2	0.04891 ^{ns}	0.01824 ^{ns}	0.43936 ^{ns}	0.01250 ^{ns}
Water Deficit stress	**تنش کم‌آبی**	2	0.82914 **	0.25235 *	2.90010 ^{ns}	3.53685 **
Error (a)	**خطای (a)**	4	0.04573	0.01792	0.49963	0.00435
Cultivar	**رقم**	2	0.20139 *	0.02614 ^{ns}	1.32894 ^{ns}	0.01941 *
Stress × Cultivar	**رقم × تنش**	4	0.15302 *	0.07993 *	1.84641 *	0.04722 **
Error (b)	**خطای (b)**	12	0.03613	0.01689	0.47858	0.00356
CV (%)	**ضریب تغییرات**		*8.25*	*11.34*	*4.07*	*4.22*

Table 3.Continued **جدول ۳. ادامه**

S.O.V	منابع تغییرات	درجه آزادی d.f	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کارتنوئیدها Carotenoids	پرولین Proline
Replication	**تکرار**	2	0.00101 ^{ns}	0.26524 ^{ns}	0.00285 ^{ns}	91920.593 ^{ns}
Water Deficit stress	**تنش کم‌آبی**	2	0.83290 **	115.01868 **	0.08134 **	2100573.481**
Error (a)	**خطای (a)**	4	0.00381	0.27631	0.00382	11593.370
Cultivar	**رقم**	2	0.01708 *	0.37072 ^{ns}	0.01359 *	68014.381 *
Stress × Cultivar	**رقم × تنش**	4	0.02337 **	3.16064 *	0.02088 **	107032.148 **
Error (b)	**خطای (b)**	12	0.00334	0.25816	0.00344	10751.000
CV (%)	**ضریب تغییرات**		*6.47*	*7.40*	*8.27*	*5.92*

ns، * و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد

ns, * and ** Non-Significant, Significant at 5% and 1% probability level, respectively

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر متقابل تنش کم‌آبی و رقم بر صفات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و عملکرد دانه ارقام چاودار

Table 4. Comparison of the mean interaction of water deficit stress and cultivar on physiological, biochemical traits and grain yield of rye cultivars.

تیمارها Treatments	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کارتنوئیدها Carotenoids	پرولین Proline	قندهای محلول Soluble sugars	پروتئین‌های محلول Soluble proteins	عملکرد کوانتومی Quantum yield	عملکرد دانه Grain yield
	----------µg.g^{-1} fw----------				---------mg.g^{-1} fw-------		Fv/Fm	Kg.ha^{-1}
I_1V_1	2.57 ^{a}	1.37 ^{a}	18.60 ^{a}	0.81 ^{h}	0.69 ^{d}	10.80 ^{a}	0.84 ^{a}	2180 ^{b}
I_1V_2	2.65 ^{a}	1.39 ^{a}	18.51 ^{a}	0.92 ^{f}	0.67 ^{d}	10.69 ^{a}	0.81 ^{ab}	2414 ^{a}
I_1V_3	2.46 ^{ab}	1.34 ^{a}	18.42 ^{a}	0.85 ^{fg}	0.63 ^{de}	10.90 ^{a}	0.78 ^{b}	2043 ^{bc}
I_2V_1	2.42 ^{ab}	1.17 ^{abc}	17.89 ^{b}	1.27 ^{de}	0.95 ^{ab}	7.15 ^{b}	0.73 ^{bc}	1984 ^{cd}
I_2V_2	2.50 ^{ab}	1.29 ^{ab}	16.70 ^{c}	1.37 ^{d}	0.86 ^{c}	6.63 ^{c}	0.68 ^{d}	1852 ^{d}
I_2V_3	2.21 ^{bc}	1.10 ^{bcd}	17.39 ^{b}	1.35 ^{d}	0.88 ^{c}	7.58 ^{b}	0.71 ^{bc}	1556 ^{e}
I_3V_1	1.87 ^{c}	0.89 ^{d}	15.49 ^{d}	2.05 ^{b}	1.23 ^{a}	3.05 ^{e}	0.61 ^{e}	1147 ^{g}
I_3V_2	1.96 ^{c}	0.93 ^{d}	14.26 ^{e}	1.93 ^{c}	1.11 ^{b}	4.07 ^{d}	0.57 ^{f}	1242 ^{fg}
I_3V_3	2.07 ^{bc}	0.96 ^{cd}	15.31 ^{d}	2.27 ^{a}	1.29 ^{a}	2.23 ^{f}	0.66 ^{d}	1358 ^{f}

در هر ستون میانگین‌های با حروف مشابه بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.

I1، I2 و I3: به ترتیب آبیاری پس از ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A؛ V1، V2 و V3: به ترتیب رقم استراتوسکایا، دانکو و مونتانوم

Means followed by the same letters in each column are not significantly different at 5% probability level, according to Duncan's test.

I1, I2 and I3: Irrigation after 75, 100 and 150 mm evaporation from Class A evaporation pan, respectively; V1, V2 and V3: Stratoskaya, Danko and Montanum cultivars, respectively

نتایج تجزیه داده‌های آزمایش نیز نشان داد که اثرات ساده تیمارهای تنش کم‌آبی و رقم بر میزان کارتنوئیدها معنی‌دار نگردید، اما اثر متقابل تیمارهای مذکور در سطح پنج درصد بر محتوای کارتنوئیدها معنی‌دار گردید (جدول ۳)، به‌گونه‌ای که مقایسه میانگین اثر متقابل تنش کم‌آبی و رقم نشان داد که بیشترین محتوای کارتنوئیدها در شرایط آبیاری پس از ۷۵ میلی‌متر تبخیر و رقم استراتوسکایا به میزان ۱۸/۶۰ میکروگرم بر گرم وزن‌تر برگ و کمترین آن در تیمار آبیاری پس از ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر کلاس A و دانکو به میزان ۱۴/۲۶ میکروگرم بر گرم وزن‌تر برگ بود (جدول ۴). کاهش محتوای کلروفیل و کاروتنوئیدها در شرایط تنش می‌تواند به دلیل تجزیه بتاکاروتن و تشکیل زآ-زانتین باشد (Oukarroum et al., 2009). این نتایج با گزارش دروگر و همکاران (Derogar et al., 2019) مطابقت دارد. گرچه تنش کم‌آبی موجب کاهش رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی در تمام ارقام موردمطالعه گردید، اما این تغییرات در رقم مونتانوم کمتر از دو رقم استراتوسکایا و دانکو بود. ازاین‌رو شاید بتوان از این صفت فیزیولوژیکی در شرایط تنش کم‌آبی به‌عنوان ابزاری جهت گزینش ارقام متحمل به تنش استفاده کرد.

میزان پرولین

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثرات ساده سطوح تنش کم‌آبی، رقم و اثر متقابل بین آن‌ها بر محتوای پرولین تفاوت معنی‌داری داشت (جدول ۳). همچنین مقایسه میانگین اثر متقابل تنش کم‌آبی و رقم نشان داد که با اعمال تنش کم‌آبی محتوای پرولین در تمامی ارقام به‌صورت معنی‌داری افزایش یافت، به‌طوری‌که بیشترین میزان آن (۲/۲۷ میکروگرم بر گرم وزن‌تر برگ) مربوط به تیمار آبیاری پس از ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر و رقم مونتانوم (I3V3) و کمترین آن به میزان ۰/۸۱ میکروگرم بر گرم وزن‌تر برگ در تیمار آبیاری پس از ۷۵ میلی‌متر تبخیر و رقم استراتوسکایا (I1V1) بود (جدول ۴). افزایش سطح پرولین در شرایط تنش به‌این‌علت است که پرولین، اسمولیت سازگاری است که اکسیژن‌های آزاد تولیدشده در تنش‌های محیطی را حذف و از مولکول‌های بزرگ حفاظت می‌کند (Rahdari et al., 2012)؛ بنابراین افزایش میزان اسیدآمینه پرولین نشان‌دهنده تحمل به تنش کم‌آبی است و می‌توان از آن به‌عنوان یک شاخص جهت غربال‌گری ارقام متحمل به تنش کم‌آبی چاودار استفاده نمود. نتایج این تحقیق با یافته‌های کریمی و همکاران (Karimi et al., 2020) و طباطبایی (Tabatabaei, 2014) همخوانی دارد.

میزان قندهای محلول

همان‌گونه که در جدول تجزیه واریانس ملاحظه می‌گردد بین اثرات ساده سطوح تنش کم‌آبی، رقم و اثر متقابل بین آن‌ها اختلاف معنی‌داری ازنظر میزان قندهای محلول وجود داشت (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر متقابل تنش کم‌آبی و رقم نشان داد که با اعمال تنش کم‌آبی میزان قندهای محلول به‌صورت معنی‌داری افزایش یافت، به‌طوری‌که بیشترین آن متعلق به تیمار آبیاری پس از ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر و رقم مونتانوم به میزان ۱/۲۹ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ و کمترین آن نیز به میزان ۰/۶۳ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ در تیمار آبیاری پس از ۷۵ میلی‌متر تبخیر و رقم مونتانوم بود (جدول ۴). بیان‌شده است، انباشت قندهای محلول در واکنش به تنش خشکی، ممکن است به علت هیدرولیز بیشتر نشاسته، کاهش انتقال ساکارز و یا حتی ساختن قند جدید باشد و ارقام مقاوم که قادر به حفظ پتانسیل اسمزی خود هستند، توانایی افزایش میزان قندهای محلول را داشته و در مقابل ارقام حساس مقدار کمتری از قند محلول را انباشته می‌کند (Tavakoli et al., 2015)؛ بنابراین انباشت بیشتر قندهای محلول را می‌توان به‌عنوان ابزاری به‌منظور انتخاب ارقام متحمل به تنش کم‌آبی چاودار بکار برد. تجمع قندهای محلول در واکنش به تنش کم‌آبی، در مطالعات دیگر نیز ثابت شده است (Karimi et al., 2012; Asghari et al., 2017).

میزان پروتئین‌های محلول

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر ساده تیمار تنش کم‌آبی و اثر متقابل تیمار تنش کم‌آبی و رقم بر میزان پروتئین‌های محلول معنی‌دار بود، اما بین اثر ساده ارقام چاودار ازنظر صفت مذکور اختلاف معنی‌داری مشاهده نگردید (جدول ۳). همچنین مقایسه میانگین اثر متقابل تنش کم‌آبی و رقم مشخص نمود که با اعمال تنش میزان پروتئین‌های محلول به‌صورت معنی‌داری کاهش پیدا کرد، به‌طوری‌که بیشترین و کمترین مقدار آن به میزان ۱۰/۹۰ و ۲/۲۳ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر برگ به ترتیب در تیمار تنش آبیاری پس از ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر کلاس A متعلق به رقم مونتانوم بود (جدول ۴). کاهش غلظت پروتئین‌های محلول برگ کلیه ارقام را می‌توان به کاهش ساخت پروتئین‌ها در شرایط تنش کم‌آبی و یا تجزیه پروتئین‌ها به علت افزایش آنزیم‌های پروتئاز نسبت داد (Mafakheri et al., 2010). نتایج مطالعات قبلی روی گیاهان مختلف نشان داده است که ارقام مقاوم نسبت به ارقام حساس از افزایش پروتئین‌های محلول بیشتری برخوردار بوده‌اند (Ardalani et al., 2014; Asghari et al., 2017).

عملکرد کوانتومی فتوسیستم II (Fv/Fm)

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثرات ساده سطوح تنش کم‌آبی، رقم و اثر متقابل بین آن‌ها بر عملکرد کوانتومی تفاوت معنی‌داری داشت (جدول ۳). مقایسه میانگین اثر متقابل تنش کم‌آبی و رقم نشان داد که با اعمال تنش کم‌آبی عملکرد کوانتومی به‌صورت معنی‌داری کاهش یافت، به‌طوری‌که بیشترین مقدار آن به میزان ۰/۸۴ در تیمار آبیاری پس از ۷۵ میلی‌متر تبخیر و رقم استراتوسکایا (I1V1) بود و از طرف دیگر کمترین مقدار آن مربوط به تیمار آبیاری پس از ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر و رقم دانکو (I3V2) به میزان ۰/۵۷ حاصل شد (جدول ۴). میزان عملکرد کوانتومی نشان‌دهنده ظرفیت انتقال الکترون در فتوسیستم II است؛ بنابراین کاهش عملکرد کوانتومی نشانه کاهش میزان حفاظت نوری بوده و دلیلی است بر اینکه تنش کم‌آبی بر کارایی فتوسنتزی اثر داشته است. گزارش‌شده است ارقام متحمل به خشکی نسبت Fv/Fm بالاتری در برابر ارقام حساس برخوردارند (Mamnuei and Sayed Sharifi, 2011)؛ بنابراین عملکرد کوانتومی، کارایی صفت فیزیولوژیکی مهمی را در گزینش ارقام متحمل به تنش کم‌آبی نشان می‌دهد. این نتایج با گزارش‌های انجوم و همکاران (Anjum et al., 2011) و شهریاری و همکاران (Shahriary et al., 2020) مطابقت دارد.

عملکرد دانه

بین اثرات ساده سطوح تنش کم‌آبی، رقم و اثر متقابل آن‌ها ازنظر عملکرد دانه تفاوت معنی‌داری وجود داشت (جدول ۳). همان‌گونه که در جدول اثر متقابل مشاهده می‌گردد، با افزایش شدت تنش خشکی از آبیاری نرمال تا تنش شدید کم‌آبی، میزان عملکرد دانه در تمامی ارقام موردمطالعه کاهش یافت. در شرایط مطلوب (آبیاری پس از ۷۵ میلی‌متر تبخیر) بیشترین و کمترین عملکرد دانه به ترتیب به ارقام دانکو (۲۴۱۴ کیلوگرم در هکتار) و استراتوسکایا (۲۱۸۰ کیلوگرم در هکتار) تعلق داشت، اما با اعمال تیمارهای تنش کم‌آبی و افزایش سطح آن، یعنی از آبیاری پس از ۱۰۰ میلی‌متر تبخیر

به ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر، عملکرد بین ارقام موردمطالعه به‌صورت متفاوتی کاهش یافت، به‌طوری‌که در سطح تنش آبیاری پس از ۱۰۰ میلی‌متر تبخیر بیشترین و کمترین میزان عملکرد به ترتیب به ارقام استراتوسکایا (۱۹۸۴ کیلوگرم در هکتار) و مونتانوم (۱۵۵۶ کیلوگرم در هکتار) اختصاص داشت، ولی در سطح تنش آبیاری پس از ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر بیشترین و کمترین میزان عملکرد به ترتیب به ارقام مونتانوم (۱۳۵۸ کیلوگرم در هکتار) و استراتوسکایا (۱۱۴۷ کیلوگرم در هکتار) مربوط بود (جدول ۴). در این رابطه می‌توان اظهار داشت کاهش مقادیر کلروفیل a و b براثر تخریب آن‌ها به‌واسطه کم‌آبی، منجر به کاهش فتوسنتز و درنهایت کاهش عملکرد دانه ارقام را به دنبال داشته است. از سوی دیگر، تجمع پرولین و افزایش میزان قندهای محلول توانست موجب افزایش توان اسمزی گیاه شده و با حفظ ظرفیت فتوسنتزی به بهبود عملکرد دانه در شرایط تنش کم‌آبی کمک نماید. بالا بودن عملکرد دانه رقم مونتانوم در این شرایط بیانگر پتانسیل عملکرد دانه بالا و توان بیشتر این رقم در بهره‌برداری از شرایط محیطی به‌ویژه میزان رطوبت خاک است. نتایج مشابهی نیز قبلاً گزارش شده است (Jill et al., 2012; Lepedus et al. 2012; Czyczyło-Mysza and Myskow, 2017).

همبستگی صفات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و عملکرد دانه

همبستگی بین خصوصیات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و عملکرد دانه ارقام موردمطالعه در این آزمایش متفاوت بود (جدول ۵). همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، بالاترین همبستگی با عملکرد دانه به عملکرد کوانتومی (r=۰/۹۲**) و سپس به محتوای کلروفیل a (r=۰/۸۹**) تعلق داشت. وجود همبستگی مثبت بین رنگیزه‌های فتوسنتزی و عملکرد کوانتومی فتوسیستم II را می‌توان این‌گونه بیان نمود که پارامتر عملکرد کوانتومی به‌طور مستقیم به فعالیت کلروفیل‌ها در مراکز واکنش فتوسیستم‌ها ارتباط دارد و ایجاد هرگونه آشفتگی مانند تغییر در محتوای کلروفیل، منجر به کاهش عملکرد کوانتومی در فتوسیستم II می‌گردد. همچنین در این تحقیق، کلروفیل a و کلروفیل b به ترتیب با (r=۰/۸۲**) و (r=۰/۷۸*) بیشترین همبستگی مثبت با محتوای پروتئین‌های محلول را داشتند. با توجه به اینکه رنگیزه‌های موجود در برگ به‌صورت کمپلکسی از کلروفیل و پروتئین می‌باشند، این نوع همبستگی ارتباط نزدیک ثبات پروتئین تحت تنش را با حفظ غلظت کلروفیل در کمپلکس موجود و ادامه فتوسنتز در این شرایط را نشان می‌دهد. بین محتوای کلروفیل (a و b) و میزان پرولین همبستگی منفی و معنی‌داری وجود داشت. ازآنجاکه کاهش میزان کلروفیل می‌تواند به علت تغییر مسیر متابولیسم نیتروژن به سمت ترکیباتی مانند پرولین باشد که در تنظیم اسمزی به کار رود، این امر می‌تواند دلیل چنین همبستگی باشد. وجود همبستگی منفی و معنی‌دار محتوای پروتئین‌های محلول با میزان پرولین (r=-۰/۹۴**) بر این موضوع تأکید می‌نماید که کاهش پروتئین‌های محلول برگ به تولید بیشتر پرولین منجر می‌گردد؛ چراکه غلظت پروتئین‌های محلول در اثر تنش خشکی به علت افزایش فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده پروتئین‌ها، کاهش سنتز پروتئین و تجمع آمینواسید پرولین، کاهش می‌یابد (Zegaoui et al., 2017).

نتیجه‌گیری نهایی

به‌طورکلی نتایج نشان داد که در ارقام مختلف چاودار تنش کم‌آبی نسبت به تیمار شاهد منجر به کاهش محتوای کلروفیل a (۲۷ درصد)، کلروفیل b (۳۲ درصد)، کارتنوئیدها (۱۹ درصد)، پروتئین‌های محلول (۷۱ درصد)، عملکرد دانه (۳۳ درصد) و در مقابل باعث افزایش مقادیر قندهای محلول (۸۳ درصد) و میزان پرولین (۱۴۵ درصد) گردید. همچنین تنش کم‌آبی عملکرد کوانتومی فتوسیستم II (۲۸ درصد) را به دلیل افزایش میزان فلورسانس حداقل (F_o) و کاهش فلورسانس حداکثر (F_m) در تمامی ارقام چاودار موردمطالعه کاهش داد. اثر متقابل تنش کم‌آبی و رقم نشان داد که ازنظر عملکرد دانه، رقم دانکو در شرایط آبیاری پس از ۷۵ میلی‌متر تبخیر و رقم استراتوسکایا در شرایط آبیاری پس از ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشتک تبخیر کلاس A به ترتیب بیشترین و کمترین عملکرد دانه را به میزان ۲۴۱۴ و ۱۱۴۷ کیلوگرم در هکتار دارا بودند. ازآنجاکه محتوای کلروفیل در گیاهان یکی از عوامل مهم حفظ ظرفیت فتوسنتزی است و همچنین برخورداری بیشتر گیاه از اسمولیت‌هایی مانند قندهای محلول و پرولین در شرایط تنش کم‌آبی به‌عنوان عامل محافظت اسمزی تحمل گیاه را نسبت به تنش افزایش می‌دهد. لذا، رقم مونتانوم به‌واسطه دوام فتوسنتزی بیشتر از طریق حفظ میزان رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی و عملکرد کوانتومی بالاتر از یک‌سو و تنظیم اسمزی بهتر از طریق افزایش بیشتر غلظت پرولین و

قندهای محلول از سوی دیگر، در شرایط تنش کم‌آبی بالا (آبیاری پس از ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر) نسبت به دو رقم دیگر از عملکرد دانه بالاتری برخوردار بود. تفاوت در صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی ارقام موردمطالعه می‌تواند نتیجه تفاوت ژنتیکی و استفاده از سازوکارهای مختلف این ارقام برای مقابله با تنش کم‌آبی باشد و بنابراین سیستم تحمل متفاوتی از خود نشان دادند. درنهایت می‌توان اظهار داشت، گرچه تحمل به تنش کم‌آبی یک صفت پیچیده بوده و عوامل مختلفی در بروز آن دخالت دارند، اما نتایج بررسی صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی این تحقیق و همبستگی معنی‌دار با عملکرد دانه نشان داد که توجه به این مهم و شناخت مکانیسم‌های کنترل‌کننده این عوامل، کارایی روش‌های اصلاحی را جهت نیل به عملکرد مطلوب در واحد سطح در شرایط تنش افزایش خواهد داد و می‌توان از چنین صفاتی به‌عنوان معیاری مناسب جهت گزینش ارقام متحمل به تنش کم‌آبی و کشت آن‌ها در شرایط محدودیت آب آبیاری استفاده نمود.

جدول ۵. ضرایب همبستگی بین صفات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و عملکرد دانه

Table 5. Correlation coefficient between physiological, biochemical traits and grain yield

صفات Traits	عملکرد دانه Grain yield	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کارتنوئیدها Carotenoids	پرولین Proline	قندهای محلول Soluble sugars	پروتئین‌های محلول Soluble proteins
کلروفیل a Chlorophyll a	0.89 **						
کلروفیل b Chlorophyll b	0.72 *	0.68 *					
کارتنوئیدها Carotenoids	0.75 *	0.75 *	0.48				
پرولین Proline	-0.86 **	-0.79 *	-0.68 *	-0.66 *			
قندهای محلول Soluble sugars	-0.71 *	-0.76 *	-0.72 *	-0.61 *	0.52 *		
پروتئین‌های محلول Soluble proteins	0.75 *	0.82 **	0.78 *	0.73 *	-0.94 **	-0.88 **	
عملکرد کوانتومی Quantum yield	0.92 **	0.84 **	0.82 **	0.67 *	-0.61 *	-0.48	0.64 *

* و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد

* and ** Significant at 5% and 1% probability level, respectively

منابع

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300, D05109.

Anjum, S.A., Xie, X.Y., Wang, L. Ch., Saleem, M.F., Man, Ch., Lei, W., 2011. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. African Journal Agricultural Research. 6, 2026-2032.

Ardalani, S.H., Saeidi, M., Jalali-Honarmand, S., Ghobadi, M.E., Abdoli, M., 2014. The Physiological responses and antioxidant enzyme activity in bread wheat genotypes under post anthesis drought tension. Crop Physiology Journal. 6, 45-59. [In Persian with English Summary]

Arnon, D.I., 1949. Copper enzymes in isolated chloroplast polyphenol oxidase in *Beta vulgaris*. Plant Physiology. 24, 1-15.

Asghari, N., Jahanbakhsh Godehkahriz, S., Ebadi, A., Tavakoli, T., 2017. Protein profile in wheat as affected by drought Stress and nano-chelate potassium. Journal of Crop Ecophysiology. 11, 229-252. [In Persian with English Summary]

Azari-nasrabad, A., Mousavinik, S.M., Galavi, M., Khazaei, M., Beheshti, S.A., Sirousmehr,

A.R., 2019. Investigation of relationship between some physiological and biochemical characteristics with yield and its components in grain sorghum genotypes under water stress conditions. Environmental Stresses in Crop Sciences. 12, 725-733. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22077/escs.2019.1503.1338

Bates, L.S., Waldren, R.P., Teare, I.D., 1973. Rapid determination of free proline for waterstress studies. Plant and Soil. 39, 205-207.

Bradford, M., 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. Annual Biochenistery. 72, 248-254.

Chapin, M.F., Kennedy, G.F., 1987. Carbohydrate analysis. Lloydia. 22, 111-115.

Czyczyło-Mysza, I., Myskow, B., 2017. Analysis of the impact of drought on selected morphological, biochemical and physiological traits of rye inbred lines. Acta Physiologiae Plantarum. 39, 87-95.

Derogar, H., Fakheri, B., Mehdinezhad, N., Mohammadi, R., 2019. Evaluation of some biochemical traits in cultivars and wild species of wheat under drought stress. Environmental Stresses in Crop Sciences. 12, 685-696. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22077/escs.2019.1473.1325

Eskandari, H., 2015. Physiology of Abiotic Stress in Crop Plants. Arena Press, Tehran, p. 314. [In Persian]

Fahad, S., Bajwa, A.A., Nazir, U., Anjum, S.A., Farooq, A., Zohaib, A., Sadia, S., Nasim, W., Adkins, S., Saud, S., Ihsan, M.Z., 2017. Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options. Frontiers in Plant Science. 8, 1147-1163.

Jill, E.C., Ciro, S., Mateo, V., 2012. Dissecting maize productivity, ideotypes associated with grain yield under drought stress and well-watered conditions. Journal of Integrative Plant Biology. 54, 1007–1020.

Hadi, H., Sayed Sharifi, R., Namvar, A., 2016. Phytoprotectants Abiotic Stresses. University of Urmia Press, Urmia, p. 250. [In Persian]

Hussain, M., Farooq, S., Hasan, W., Ul-Allah, S., Tanveer, M., Farooq, M., Nawaz, A., 2018. Drought stress in sunflower: Physiological effects and its management through breeding and agronomic alternatives. Agricultural Water Management. 201, 152-166.

Karimi, S., Abbaspour, H., Sinaki, J. M., Makarian, H., 2012. Effects of water deficit and chitosan spraying on osmotic adjustment and soluble srotein of sultivars castor bean (*Ricinus communis* L.). Journal of Stress Physiology and Biochemistry. 8, 160-169.

Karimi, A., Ghobadi, M. E., Ghobadi, M., Nosratti, I., 2020. Studying the effect of no irrigation on grain yield and physiological characteristics of corn (*Zea mays* L., S.C.704) in summer planting. Environmental Stresses in Crop Sciences. 12, 1151-1163. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22077/escs.2019.1623.1365

Khodabandeh, N., 2012. Cereal. University of Tehran Press, Tehran, p. 538. [In Persian]

Lepedus, H., Brkic, I., Cesar, V., Jurkovic, V., Antunovic, J., Jambrovic, A., Brkic, J., Simic, D., 2012. Chlorophyll fluorescence analysis of photosynthetic performance in seven maize inbred lines under water-limited conditions. Periodicum Biologorum. 114, 73-76.

Liang, X., Zhang, L., Natarajan, S.K., Becker, D.F., 2013. Proline mechanisms of stress survival. Antioxidants and Redox Signaling. 19, 998-1011.

Lum, M.S., Hanafi, M.M., Rafii, Y.M., Akmar, A.S.N., 2014. Effect of drought stress on growth, proline and antioxidant enzyme activities of upland rice. Journal of Animal and Plant Sciences. 24, 1487-1493.

Mafakheri, A., Siosemardeh, A., Bahramnejad, B., Struik, P.C., Sohrabi, Y., 2010. Effect of drought stress on yield, proline and chlorophyll contents in three chickpea cultivars. Australian Journal of Crop Science. 4, 580-585.

Mamnuei, A., Sayed Sharifi, R., 2011. Effects of water deficit on chlorophyll fluorescence indices and proline in six barley genotypes and its relation with canopy temperature and yield. Plant Biology. 2, 51-62. [In Persian with English Summary]

Molik, K., Pawłowska, E., Kantarek, Z., Milczarski, P., 2014. QTL analysis of chlorophyll content and chlorophyll fluorescence parameter in mapping population of rye. Folia Pomeranae Universitatis Technologiae Stetinensis Agricultura Alimentaria Piscaria et Zootechnica. 312, 105-116.

Oukarroum, A., Schansker, G., Strasser, R.J., 2009. Drought stress effects on photosystem I content and photosystem II thermotolerance

analyzed using Chl a fluorescence kinetics in barley varieties differing in their drought tolerance. Physiologia Plantarum. 137, 188-199.

Rad, M.R.N., Kadir, M.A., Yusop, M.R., 2012. Genetic behaviour for plant capacity to produce chlorophyll in wheat (*Triticum aestivum*) under drought stress. Australian Journal of Crop Science. 6, 415-420.

Rahdari, P., Tavakoli, S., Hosseini, S. M., 2012. Studying of salinity stress effect on germination, proline, sugar, protein, lipid and chlorophyll content in purslane (*Portulaca oleracea* L.) Leaves. Journal of Stress Physiology and Biochemistry. 8, 182-193.

Shahriary, R., Shahbazi, H., Hejran, N., Seifbarghi, S., 2020. Efficiency of some physiological traits in evaluation of tolerance of barley advanced lines (*Hordeum vulgare* L.) to terminal drought stress. Environmental Stresses in Crop Sciences. 13, 57-71. [In Persian with English Summary]. https://doi.org/10.22077/escs.2019.1817.1424

Singh, B., Norvell, E., Wijewardana, C., Wallace, T., Chastain, D., Reddy, K.R., 2018. Assessing morphological characteristics of elite cotton lines from different breeding programmes for low temperature and drought tolerance. Journal of Agronomy and Crop Science. 204, 467-476.

Tabatabaei, S.A., 2014. Effect of salicylic acid pretreatment of barley seed on seedling growth, proline content and antioxidant enzymes activity under drought stress. Crops Improvement. 16, 475-486. [In Persian with English Summary]

Tatrai, Z.A., Sanoubar, R., Pluhar, Z., Mancarella, S., Orsini, F., Gianquinto, G., 2016. Morphological and physiological plant responses to drought stress in Thymus citriodorus. International Journal of Agronomy. 10, 1-8.

Tavakoli, N., Ebadi Khazineh, A., Tavakoli, H., 2015. Variations of dry matter yield, some of osmolytes and nutrient elements in wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.) under drought stress. Journal of Crop Ecophysiology. 9, 353-370. [In Persian with English Summary]

Van-Oosten, J.J., Wilkins, D., Besford, R.T., 1995. Acclimation of tomato to different carbon dioxide concentrations. Relationships between biochemistry and gas exchange during leaf development. New Phytologist. 130, 357-367.

Zareian, A., Hamidi, A., Hasani, F., 2017. Effect of irrigation with holding and foliar potassium application on some physiological characteristics, harvest index and yield of two cultivars and a line of bread wheat. Crops Improvement. 19, 1077-1093. [In Persian with English Summary]

Zegaoui, Z., Planchais, S., Cabassa, S., Djebbar, R., Belbachir, O.A., Carol, P., 2017. Variation in relative water content, proline accumulation and stress gene expression in two cowpea landraces under drought. Journal of Plant Physiology. 218, 26-34.