University of Birjand

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

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses In Crop Sciences

Vol. 15, No. 4, pp. 1109-1126 (Winter 2023)

http://dx.doi.org/10.22077/escs.2021.4238.1994

Original article

Evaluation of different genotypes of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in terms of biochemical and antioxidant properties under normal conditions and water deficit conditions

Z. Najari[1], E. Nabizadeh[2*], H. Azizi[3], K.Fotohi[3]

1. PhD Student, Department of AgroTechnology, Mahabad branch, Islamic Azad University, Mahabad, Iran
2. Assistant Professor, Department of AgroTechnology, Mahabad branch, Islamic Azad University, Mahabad, Iran
3. Research Assistant Professor, Sugar Beet Research Department, West Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research Center, AREEO, Urmia, Iran

Received 7 April 2021; Accepted 6 July 2021

Extended abstract

Introduction

Sugar beet (*Beta vulgaris* L.) is one of the important commercial crops that supply approximately 35% of the world's sugar and is widely cultivated in arid and semi-arid regions. Drought is one of the most important growth restricting environmental factors for crop species in arid and semi-arid regions of the world. Crop losses resulting from abiotic stresses such as drought or salinity can reduce crop yield by as much as 50%.

Material and methods

to investigate the evaluation of different genotypes of sugar beet (*Beta vulgaris* l.) in terms of biochemical and antioxidant properties under normal conditions and water deficit conditions excrement was conducted in split-plot design based on complete random blocks with three replications in Miandoab Agricultural and Natural Resources Research Station at 2017-18 Crop seasons. Irrigation regimes at two levels, (normal Irrigation after 90 mm of evaporation and drought stress after the 10-leaf stage of sugar beet based on 200 mm of evaporation from the Class A evaporation pan) signed to the main plot, and 18 sugar beet genotypes were assigned to sub-plots. In this research root yield, coefficient of sugar extraction, Guaiacol peroxidase, Polyphenol oxidase, Superoxide dismutase, and proline content were measured. After collecting the data, the data were analyzed using SAS software version 9.1 and the comparison of the average of the studied characteristics was performed using LSD test at the probability level of five percent.

Results and discussion

In the present study, the effect of the irrigation regime on all studied traits was significant except for the sugar extraction coefficient at the level of probability of 1%. Among the genotypes studied significant difference was observed in terms of all the studied traits, at the probability level of 1% Interaction of irrigation regime with genotypes on root yield, sugar extraction coefficient, guaiacol peroxidase, polyphenol oxidase, and proline content at 1% probability level and superoxide dismutase at 5% probability level was significant. The results showed that water deficit stress reduced root yield by 17.38% compared to normal irrigation conditions, while the content of glycol peroxidase, polyphenol

[*] Corresponding author: Esmail Nabizadeh; E-Mail: nabizadeh.esmaeil@gmail.com

© 2022, 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).

oxidase, superoxide dismutase, and proline under water deficit conditions was an increase compared to normal irrigation conditions by 118.86, 82.1, 103.61 and 113.92 percent respectively. genotypes Mean comparison in terms of root yield showed that genotype No. 10 with an average of 85.77 t / ha under normal irrigation and 72.14 t / ha under water deficit stress had the highest root yield. Under normal irrigation conditions, the highest guaiacol peroxidase, polyphenol oxidase, superoxide dismutase activity, and proline content were belonged to genotypes 21, 15, 4, and 13, respectively. While underwater stress conditions, the highest values of these traits were recorded in cultivars 10, 20, 19, and 3, respectively. Based on the results of regression analysis under normal irrigation conditions, the Sugar Extraction Coefficient and proline content with the explanation of 80 percent of root yield variation were identified as the most important traits. Based on the results of path analysis, the two traits, directly and indirectly, showed a positive effect on root yield. Underwater deficit stress proline content, guaiacol peroxidase, and superoxide dismutase with 66.3% explanation of changes in root yield Were identified as the most effective traits on root yield. Besides, the mentioned traits had a positive effect on root yield based on the results of path analysis both directly and indirectly.

Conclusion

Among the studied genotypes, cultivar F-20851 had the highest root yield in both irrigation conditions compared to other cultivars, so it can be concluded that the genotype has a high genetic potential for root yield production in different environmental conditions. Among Iranian cultivars, except for Paya cultivar, other cultivars had low ranks of root yield in both environmental conditions. It can be concluded that in addition to root yield, other enzymatic and biochemical properties of Iranian cultivars should be worked on to be competitive with foreign cultivars. In this study, proline content had a positive effect on root yield in both environmental conditions, so improving proline content could be a way to increase root yield in different environmental conditions.

***Keywords*:** Cultivars, Drought, Proline, Root yield

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد پانزدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۱

http://dx.doi.org/10.22077/escs.2021.4238.1994

مقاله پژوهشی

ارزیابی ژنوتیپ‌های مختلف چغندرقند (*Beta vulgaris* L.) ازلحاظ خصوصیات بیوشیمیایی و آنتی‌اکسیدانت تحت شرایط نرمال و تنش کم‌آبی

ظاهر نجاری[۱]، اسمعیل نبی‌زاده[۲*]، حیدر عزیزی[۳]، کیوان فتوحی[۳]

۱. دانشجوی دکتری، گروه آگروتکنولوژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مهاباد، مهاباد، ایران
۲. استادیار گروه آگروتکنولوژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مهاباد، مهاباد، ایران
۳. بخش تحقیقات چغندرقند، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
پرولین
خشکی
رقم
عملکرد ریشه

تاریخ دریافت:
۱۴۰۰/۰۱/۱۸

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۰/۰۴/۱۵

تاریخ انتشار:
زمستان ۱۴۰۱

۱۵(۴) :۱۱۰۹-۱۱۲۶

چکیده

با هدف ارزیابی ژنوتیپ‌های مختلف چغندرقند ازلحاظ خصوصیات بیوشیمیایی و آنتی‌اکسیدانی، ۱۸ رقم تجاری داخل و خارجی تحت شرایط نرمال و تنش کم‌آبی در ایستگاه تحقیقات کشاورزی میاندوآب در دو سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ مورد ارزیابی قرار گرفتند. طرح آزمایشی مورداستفاده اسپلیت‌پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی بود که در سه تکرار اجرا شد. در این مطالعه دور آبیاری در دو سطح (نرمال برحسب ۹۰ میلی‌متر تبخیر و تنش خشکی بعد از مرحله ۱۰ برگی چغندرقند بر اساس ۲۰۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A) در کرت‌های اصلی و ۱۸ رقم چغندرقند به کرت‌های فرعی قرار گرفتند. در این مطالعه صفات عملکرد ریشه، درصد استحصال قند، گایاکول پراکسیداز، پلی فنل اکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز و پرولین اندازه‌گیری شدند، نتایج نشان داد تنش کم‌آبی در مقایسه با شرایط آبیاری نرمال عملکرد ریشه را ۱۷/۳۸ درصد کاهش داد، درحالی‌که محتوی گایکول پراکسیداز، پلی‌فنل اکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز و پرولین تحت شرایط کم‌آبی به ترتیب ۱۱۸/۸۶، ۸۲/۱، ۱۰۳/۶۱ و ۱۱۳/۹۲ درصد در مقایسه با شرایط آبیاری نرمال افزایش نشان داد. میانگین ژنوتیپ‌ها ازنظر عملکرد ریشه نشان داد ژنوتیپ شماره ۱۰ با متوسط ۸۵/۷۷ تن در هکتار در شرایط آبیاری نرمال و ۷۲/۱۴ تن در هکتار در شرایط تنش کم‌آبی بالاترین عملکرد ریشه را به خود اختصاص داد. تحت شرایط آبیاری نرمال بالاترین مقدار فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز، پلی فنل اکسیداز، سوپر اکسید دیسموتاز و محتوی پرولین به ترتیب به ژنوتیپ‌های ۲۱، ۱۵، ۴ و ۱۳ اختصاص داشت. درحالی‌که تحت شرایط تنش کم‌آبی بالاترین مقدار صفات مذکور به ترتیب در ارقام ۱۰، ۲۰، ۱۹ و ۳ ثبت شد. بر اساس نتایج تجزیه رگرسیون در شرایط آبیاری نرمال صفات درصد استحصال قند و پرولین با تبیین ۸۰ درصد و در شرایط تنش کم‌آبی محتوی پرولین، گایاکول پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز با تبیین ۶۶/۳ درصد از تغییرات عملکرد ریشه به‌عنوان مؤثرترین صفات بر عملکرد ریشه شناسایی شدند.

مقدمه

چغندرقند (*Beta vulgaris* L.) یکی از محصولات مهم ریشه‌ای و منبع اصلی شکر در مناطقی با آب‌وهوای معتدل است در سال ۲۰۱۸ سطح زیر کشت و مقدار تولید آن در جهان به ترتیب ۴/۴ میلیون هکتار و ۲۵۳ میلیون تن برآورد شد (FAO, 2020). عملکرد چغندرقند به‌شدت به شرایط اقلیمی در طول فصل رشد بستگی دارد (Mirzaei and Abdollahian- Noghabi 2012). ازاین‌رو تنش آبی یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی محدودکننده تولید چغندرقند در جهان به شمار می‌رود به‌طوری‌که در مواردی میزان عملکرد این گیاه را تا بیش از ۴۰ درصد کاهش می‌دهد (Putnik-Delic et al. 2013) تنش آبی در مراحل اولیه نمو چغندرقند نه‌تنها از رشد و توسعه برگ‌ها ممانعت می‌نماید بلکه رشد

* نگارنده پاسخگو: اسمعیل نبی‌زاده. پست الکترونیک: nabizadeh.esmaeil@gmail.com

ریشه را به صوت قابل‌توجهی کاهش می‌دهد (Chołuj et al., 2014). علاوه بر این، تنش رطوبتی می‌تواند تجمع ماده خشک (DM)، شاخص سطح برگ (LAI) و سرعت رشد محصول (CGR) چغندرقند را به‌طور زیان‌باری تحت تأثیر قرار داده و از این طریق عملکرد ریشه و شکر را کاهش دهد (Abayomi and Wright, 2002).

تحقیقات نشان داده است که تنوع ژنتیکی ازنظر تحمل به خشکی در ژرم‌پلاسم چغندرقند وجود دارد (Abdollahian-Noghabi et al., 2011; Pidgeon et al., 2006) و این گیاه در مقایسه با اکثر گیاهان زراعی توانایی بیشتری در تولید ماده خشک در شرایط خشکی دارد (Schittenhel, 1999) با مشخص شدن میزان تحمل به خشکی در ژنوتیپ‌های موردبررسی برای مناطقی که احتمال کمبود آب در مراحل رشدی بالا بوده و یا کمبود آب مانع کشت گیاه می‌شود می‌توان با اطمینان بیشتری اقدام به کشت ارقام موردنظر نمود ازاین‌رو انتخاب یک واریته جدید چغندرقند که قادر به رشد در شرایط رشد نسبی بوده و از عملکرد اقتصادی قابل‌توجهی برخوردار باشد از اهداف محققین و دست‌اندرکاران به‌نژادی و به‌زراعی این گیاه است (Ober and. Luterbacher, 2002).

خوزایی و همکاران (Khozaei et al. 2020) اظهار داشتند بین رژیم‌های آبیاری ازلحاظ اثر درصد قند خالص و عملکرد قند خالص اختلاف معنی‌دار وجود داشت، در بررسی آن‌ها بالاترین عملکرد ریشه (با متوسط ۸۴/۶۰ تن در هکتار) و عملکرد قند خالص (۱۱/۰۸ تن در هکتار) در تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری گزارش شد. تنش‌های محیطی علاوه بر کاهش محصولات کشاورزی، سبب از بین رفتن تعادل بین گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و دفاع آنتی‌اکسیدانی در بخش‌های مختلف گیاه می‌شود (Taherkhanchi et al. 2014)، گونه‌های فعال اکسیژن به‌طور بالقوه دارای پتانسیلی هستند که با بسیاری از ترکیبات سلولی واکنش می‌دهد و سبب خسارت به غشا و سایر ماکرومولکول‌های ضروری از قبیل رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی، پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک و لیپیدها می‌شود (Bai and Sui, 2006). در مطالعه بر روی چغندرقند تنش کم‌آبی به‌صورت معنی‌داری بر مقدار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت افزود همچنین در این مطالعه بالاترین مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز و سوپراکسید دسموتاز تحت شرایط آبیاری بعد از ۱۸۰ میلی‌متر تبخیر در ژنوتیپ شماره BP-Karaj (G2) اختصاص داشت همچنین بالاترین مقدار فعالیت آنزیم سوپر اکسید دسموتاز نیز به ژنوتیپ شماره BP-Mashhad در شرایط آبیاری بعد از ۱۸۰ میلی‌متر تبخیر اختصاص داشت (Sayfzadeh et al., 2011). در مطالعه‌ای حبیبی و همکاران (Habibi et al., 2011) اختلاف بین سطوح آبیاری و ارقام چغندرقند ازلحاظ مقدار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت معنی‌دار بود در این تحقیق تنش کم‌آبی در مقایسه با آبیاری نرمال بر مقدار فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، گلوتاتیون پراکسیداز، سوپر اکسید دیسموتاز و دی هیدروگوانوزین افزود. در مطالعه فروزش و همکاران (Foroozesh et al., 2012) اختلاف بین ژنوتیپ‌ها ازنظر مقدار فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز معنی‌دار بود آن‌ها نشان دادند ژنوتیپ BP*(261*7112) Mashad بالاترین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت را در شرایط آبیاری نرمال و تنش کم‌آبی به خود اختصاص داد. اسلام و همکاران (Islam et al., 2020) در بررسی تغییرات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهچه چغندرقند در شرایط تنش کم‌آبی نشان دادند بالاترین مقدار فعالیت کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز، پلی فنل اکسیداز و پرولین در گیاهچه‌های ژنوتیپ‌های چغندرقند در واکنش به شرایط تنش کم‌آبی مشاهده شد. با توجه به اهمیت محصول چغندرقند در استان آذربایجان غربی و همچنین نقش متابولیت‌های ثانویه و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت در مقاومت ارقام چغندرقند تحقیق حاضر با هدف ارزیابی و مقایسه ارقام داخلی و خارجی تحت شرایط آبیاری نرمال و تنش کم‌آبی ازلحاظ خصوصیات مذکور انجام شد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور ارزیابی اثر تنش کم‌آبی بر عملکرد ریشه، واکنش‌های آنزیمی و بیوشیمیایی، ۱۸ رقم تجاری (شش رقم داخلی پارس، پایا، شریف، آریا، شکوفا و اکباتان و ۱۲ رقم خارجی) چغندرقند (جدول ۱)، در سال‌های زراعی ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، ایستگاه تحقیقات کشاورزی میاندوآب مورد ارزیابی قرار گرفتند. ایستگاه مذکور در پنج کیلومتری شمال غربی شهر در موقعیت جغرافیایی ۴۶ درجه و ۹۰ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه ۵۸ دقیقه عرض شمالی و در ارتفاع ۱۳۱۴ متری از سطح دریای آزاد واقع شده است. این منطقه ازنظر تقسیمات آب‌وهوایی کشور دارای رژیم دمایی فریک (متوسط دمای سالیانه خاک بین ۸ تا ۱۵ درجه سلسیوس) و رژیم

رطوبتی رزیک (نیمه‌خشک) و خاک محل آزمایش (نمونه-برداری شده از عمق ۳۰ سانتی‌متری) دارای بافت سیلتی لوم با اسیدیته ۸-۷/۵ و هدایت الکتریکی حدود ۲/۳ دسی‌زیمنس بر متر بود (جدول ۲).

جدول ۱. ژنوتیپ‌های چغندرقند مورد آزمایش

Table 1. Evaluated Sugar beet genotypes

شماره Number	ژنوتیپ Genotype	شماره Number	ژنوتیپ Genotype
1	Pars	10	F-20716
2	F-20722	11	Sharif
3	F-20815	12	F-20772
4	F-20817	13	Arya
5	F-20747	14	Shokoofa
6	Paya	15	F-20814
7	F-20723	16	Ekbatan
8	F-20851	17	F-20866
9	F-20734	18	F-20758

پس از آماده‌سازی زمین به طرز مطلوب (شامل شخم، دیسک، تسطیح و کرت‌بندی)، کلیه ارقام در اواسط فروردین‌ماه هرسال آزمایش، به‌صورت طرح کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار با کشت سه خط به طول ۸ متر، فاصله خطوط ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها روی خطوط ۱۸ سانتی‌متر و با تراکم ۱۱۰ هزار بوته در هکتار مورد ارزیابی قرار گرفتند. نوع شرایط (نرمال و تنش) در کرت‌های اصلی و عامل رقم تحت عنوان فاکتور فرعی در نظر گرفته شد. در طول دوره رشد، عملیات داشت (آبیاری، کوددهی، عملیات کولتیواسیون، مبارزه با علف های هرز، مبارزه با آفات، بیماری‌ها و ...) بر اساس عرف منطقه و در حد نیاز انجام شد. تا مرحله تنک و وجین (استقرار بوته ها) آبیاری‌ها به‌طورمعمول و به‌صورت نشتی و در آبیاری‌های بعدی به‌منظور اعمال تنش، آبیاری پس از ۲۰۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A صورت گرفت که این میزان در حالت نرمال، حدود ۹۰ میلی‌متر است (Ghafari et al., 2016). برداشت و توزین ریشه‌ها (از هر سه خط کشت‌شده بعد از حذف نیم متر از ابتدا و انتهای خط به‌عنوان حاشیه) در نیمه دوم مهرماه هرسال صورت گرفت و عملکرد ریشه برای هر رقم برحسب تن در هکتار تبدیل شد.

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 2. Physical and chemical properties of the soil

بافت خاک Soil texture	پتاسیم K	فسفر P	کلسیم Ca	آمونیوم NH_4	نیترات NO_3	منیزیم Mg	نیترات کل N (total)	کربن آلی O.C	درصد مواد خنثی‌شونده T.N.V	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC
	ppm						%				$dS\ m^{-1}$
Silty loam	255	8.05	8	13.15	19.55	3.5	0.13	0.78	8	8	2.14

استخراج عصاره پروتئینی

یک گرم از بافت گیاهی برگ‌های تازه جمع‌آوری‌شده از هر کرت در هاون چینی با استفاده از ازت مایع کوبیده و له شد. سپس یک میلی‌لیتر بافر نمونه فسفات سدیم ۰/۱ مول با pH=6 به آن اضافه و کاملاً مخلوط شد. مخلوط حاصله بلافاصله به میکروتیوب‌های دو میلی‌لیتری منتقل و توسط میکروسانتریفوی در ۱۳۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه در دمای چهار درجه سلسیوس سانتریفوژ شد. مایع رویی برای انجام آزمایش‌ها جدا و تا قبل از آزمایش در دمای ۲۰ - درجه سلسیوس نگهداری شد (Reuveni, 1995).

تعیین میزان کل پروتئین قابل‌حل در عصاره

سنجش میزان پروتئین کل موجود در عصاره برگ‌های نمونه‌ها با استفاده از روش برادفورد (Bradford,1967) انجام شد. میزان جذب نور در طول‌موج حداکثر ۵۹۵ نانومتر یعنی در محدوده نور آبی با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شد. این روش نیاز به معرف برادفورد و محلول پروتئین استاندارد (BSA) دارد. به کمک منحنی استاندارد، مقدار کل پروتئین محلول هر نمونه گیاهی به‌صورت میلی‌گرم پروتئین در هر گرم بافت تازه برگ ارقام چغندرقند محاسبه گردید.

ارزیابی فعالیت آنزیم پراکسیداز

دو میلی‌لیتر مخلوط واکنش شامل ۲۰۰ میکرولیتر عصاره گیاهی،۲۰ میکرولیتر گایاکول و مقدار ۱/۸۶ میلی‌لیتر بافر سیترات فسفات ۲۵ میلی مول با pH= ۵,۴به حجم نهایی دو میلی‌لیتر، در یک لوله‌آزمایش ریخته و دستگاه اسپکتروفتومتر با استفاده از این مخلوط در طول‌موج ۴۷۵ نانومتر صفر گردید. سپس ۱۰ میکرولیتر پراکسید هیدروژن ۳۰ در صد به

این مخلوط اضافه شد و سریعاً تغییرات جذب نور به فواصل ده ثانیه، به مدت یک دقیقه اندازه‌گیری شد (Kazemi and Mohammadi, 2002).

ارزیابی آنزیم پلی فنل اکسیداز یا پلی فنل اکسیداز

دو میلی‌لیتر مخلوط واکنش شامل مقداری از عصاره از هر نمونه ارقام چغندرقند که دارای ۴۰ میلی‌گرم پروتئین باشد، ۲۰ میکرولیتر محلول پرولین و مقدار ۱,۸۶ میلی‌لیتر بافر سیترات‌فسفات ۲۵ میلی مول با pH = ۶,۴ در لوله‌آزمایش کاملاً مخلوط شد. این مخلوط توسط ورتکس به مدت دو دقیقه هوادهی و سپس دستگاه اسپکتروفتومتر با استفاده از این مخلوط صفر گردید. سپس فوراً ۴۰ میکرولیتر محلول پیروپلی فنل اکسیداز ۱۰۰ میلی‌مول به مخلوط واکنش افزوده، سریع مخلوط و بلافاصله تغییرات جذب نور در طول‌موج ۵۱۵ نانومتر به مدت یک دقیقه با فاصله ۱۰ ثانیه اندازه‌گیری شد. فعالیت آنزیم بر اساس تغییرات جذب نور در دقیقه بر میلی‌گرم پروتئین محاسبه شد (Mohammadi and Kazemi, 2002).

تجزیه‌وتحلیل داده‌ها پس از بررسی و تأیید برقراری فرض‌های تجزیه واریانس، انجام شد. تجزیه‌وتحلیل داده‌ها به کمک نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ انجام و مقایسه میانگین پارامترهای موردبررسی نیز با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مرکب صفات در دو شرایط نشان داد اختلاف بین دو سال موردمطالعه ازلحاظ اثر بر عملکرد ریشه و محتوی پلی فنل اکسیداز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. بین دو سطح آبیاری ازلحاظ کلیه صفات موردبررسی به‌غیراز درصد استحصال قند اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد مشاهده شد. اختلاف بین ژنوتیپ‌های موردبررسی ازلحاظ کلیه صفات موردبررسی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. اثر متقابل ژنوتیپ در سال نیز ازلحاظ اثر بر محتوی گایاکول و پلی فنل‌اکسیداز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳).

جدول ۳. تجزیه واریانس مرکب صفات موردبررسی درمجموع دو سال و دو شرایط آبیاری نرمال و تنش کم‌آبی

Table 3. Combined analysis of variance of the studied traits in two years and normal and water deficit conditions

S.O.V	منابع تغیر	درجه آزادی df	عملکرد ریشه Root Yield	درصد استحصال قند Sugar Extraction%	گایاکول پراکسیداز Guaiacol peroxidase	پلی فنل اکسیداز Polyphenol oxidase	سوپراکسید دیسموتاز Superoxide dismutase	پرولین Proline
Year	سال	1	16.18**	46.39^{ns}	0.003^{ns}	0.008**	4783.50^{ns}	0.01ns
Y×R	سال × تکرار	4	0.03	32.75^{ns}	0.001	0.001	2444.56	0.005
Irrigation levels	آبیاری	1	295.27**	54.41^{ns}	21.64**	0.13**	132918.41**	30.92**
Y×I	سال × آبیاری	1	12.32**	29.56^{ns}	0.003^{ns}	0.004^{ns}	3538.71^{ns}	0.001ns
E_a	خطای اصلی	4	0.07	28.25^{ns}	0.003^{ns}	0.0001	2622.18	0.016ns
Genotype	ژنوتیپ	17	3461.63**	184.88**	1.71**	0.013**	9546.17**	1.18**
Y×G	سال × ژنوتیپ	17	1.85^{ns}	29.66^{ns}	0.01**	0.002**	2699.29^{ns}	0.012^{ns}
I×G	آبیاری × ژنوتیپ	17	349.00**	121.23**	1.01**	0.010**	4419.36*	0.33**
Y×I×G	سال× آبیاری× ژنوتیپ	17	0.31^{ns}	30.61^{ns}	0.007^{ns}	0.001^{ns}	2852.89^{ns}	0.019**
E_b	خطای فرعی	215	1.08	30.78	0.007	0.0010	2137.59	0.019
CV%	ضریب تغییرات		*5.49*	*6.56*	*10.22*	*18.77*	*23.61*	*9.54*

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

ns, *, and ** were on significant, significant at level 5 and 1% respectively

بین تیمارهای اثر متقابل آبیاری در ژنوتیپ ازلحاظ اثر بر عملکرد ریشه، درصد استحصال قند، گایاکول پراکسیداز، پلی فنل اکسیداز در سطح احتمال یک درصد و ازلحاظ سوپر اکسید دیسموتاز در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی دار دیده شد. وجود اثر متقابل معنی‌دار ژنوتیپ در آبیاری بیانگر این نکته است که واکنش ژنوتیپ‌های مختلف در دو

محیط آبیاری ازلحاظ صفات موردبررسی متفاوت بوده است بنابراین تجزیه‌های آماری برای دو محیط آبیاری به‌صورت جداگانه انجام شد.

در بررسی تغییرات ژنتیکی برای تحمل به خشکی در فامیل‌های ناتنی چغندرقند فتوحی و همکاران (Fotouhi et al., 2017) بین دو محیط آبیاری نرمال و تنش کم‌آبی ازلحاظ عملکرد ریشه و عملکرد قند خالص و صفات مؤثر بر آن‌ها اختلاف معنی‌داری مشاهده کردند. در ارزیابی خصوصیات کمی و کیفی و ارتباط بین صفات در ژنوتیپ‌های چغندرقند در شرایط نرمال و تنش شوری میر محمودی و همکاران (Mir Mahmoudi et al., 2021) بین دو محیط موردمطالعه ازنظر عملکرد ریشه، درصد استحصال قند و دیگر خصوصیات کمی و کیفی موردبررسی اختلاف معنی‌دار گزارش کردند. سیف‌زاده و همکاران (Sayfzadeh et al, 2011) در ارزیابی ارقام چغندرقند بین سطوح مختلف آبیاری ازلحاظ اثر بر عملکرد ریشه و خصوصیات آنتی‌اکسیدانی در ارقام مختلف چغندرقند اختلاف معنی‌داری گزارش کردند.

تجزیه واریانس مرکب داده‌ها در دو شرایط جداگانه آبیاری نرمال و تنش کم‌آبی نشان داد اختلاف بین دو سال موردبررسی ازلحاظ عملکرد ریشه، درصد استحصال قند، پلی فنل اکسیداز تحت شرایط تنش کم‌آبی در سطح احتمال یک درصد و محتوی سوپراکسید دیسموتاز تحت شرایط نرمال در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. اختلاف بین ژنوتیپ-های موردبررسی ازنظر کلیه صفات موردبررسی در هر دو شرایط به‌غیراز درصد استحصال قند در شرایط تنش کم‌آبی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. اثر متقابل ژنوتیپ در سال نیز بر عملکرد ریشه در سطح یک درصد و محتوی پرولین در سطح پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۴).

جدول ۴. تجزیه واریانس صفات مرتبط با خصوصیات کمی و کیفی در دو شرایط جداگانه

Table 4. Analysis of variance of traits related to quantitative and qualitative characteristics of sugar beet in two conditions

S.O.V	منابع تغییر	درجه آزادی df	عملکرد ریشه Root Yield		درصد استحصال قند Sugar Extraction Coefficient		گایاکول پراکسیداز Guaiacol peroxidase	
			N نرمال	S کم‌آبی	N نرمال	S کم‌آبی	N نرمال	S کم‌آبی
Rep.	تکرار	2	0.03	0.09ns	0.07	65.47	0.0003	0.002
Year	سال	1	0.13^{ns}	28.37**	0.98ns	74.68**	0.0004^{ns}	0.006ns
E1	خطای سال	2	0.02	0.04	0.30	56.27	0.005	0.001
Genotype	ژنوتیپ	17	243. 66**	137.19**	220.36**	85.86^{ns}	0.207**	2.52**
Y×G	سال × ژنوتیپ	17	0.06^{ns}	20.10**	0.17ns	60.11^{ns}	0.014^{ns}	0.02**
E2	خطای آزمایشی	68	0.09	0.16	0.14	61.41	0.009	0.005
CV%	ضریب تغییرات (٪)		*5.52*	*4.45*	*6.45*	*9.21*	*18.46*	*6.30*

Table 4. Continued **جدول ۴. ادامه**

S.O.V	منابع تغییر	درجه آزادی df	پلی فنل اکسیداز Polyphenol oxidase		سوپراکسید دیسموتاز Superoxide dismutase		پرولین Proline	
			N نرمال	S کم‌آبی	N نرمال	S کم‌آبی	N نرمال	S کم‌آبی
Rep.	تکرار	2	0.002	0.00046	835.32	51221.17	0.002	0.022
Year	سال	1	0.006^{ns}	0.025**	199815.1**	28517.3^{ns}	0.009^{ns}	0.007ns
E1	خطای سال	2	0.004	0.0027	176.67	49998.25	0.002	0.015
Genotype	ژنوتیپ	17	0.004**	1.91**	21866.78**	107751.2**	0.44**	1.07**
Y×G	سال × ژنوتیپ	17	0.001^{ns}	0.45**	99205.70**	45601.44^{ns}	0.003^{ns}	0.02*
E2	خطای آزمایشی	68	0.002	0.0070	765.88	42665.12	0.001	0.014
CV%	ضریب تغییرات (٪)		*18.88*	*9.19*	*5.78*	*27.01*	*7.63*	*9.05*

*، ** و ns به ترتیب بیانگر معنی‌داری درسطح پنج درصد، یک درصد و عدم معنی‌داری

*, **, and ^{ns} represent significant at of 5% and 1% probability level and not significant, respectively.

ایلکایی و همکاران (Ilkai et al., 2012) در تحقیقی بر روی چغندرقند نشان دادند بیشترین میزان فعالیت آنزیم‌های سوپر اکسید دیسموتاز، کاتالاز، گلوتاتیون پراکسیداز به تیمار تنش خشکی و کمترین میزان آنزیم به تیمار آبیاری نرمال اختصاص داشت. در مطالعه سیف زاده و همکاران (Sayfzadeh et al., 2011) با تشدید تنش کم‌آبی در چغندرقند بر مقدار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت افزوده شد به‌طوری‌که تیمار شاهد (آبیاری نرمال) کمترین و تیمار آبیاری بعد از ۱۸۰ میلی‌متر تبخیر بیشترین مقدار فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و گلوتاتیون پراکسیداز را به خود اختصاص داد. در تحقیقی دیگر حبیبی و همکاران (Habibi et al., 2011) اظهار داشتند بالاترین مقدار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز، دی تیروزین و مالون‌دی‌آلدهید در چغندرقند به سطوح شدید تنش کم‌آبی اختصاص داشت.

فروزش و همکاران (Foroozesh et al., 2012) در ارزیابی ژنوتیپ‌های مختلف چغندرقند تحت شرایط آبیاری نرمال و تنش کم‌آبی اظهار داشتند مقدار فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و گلوتاتیون پراکسیداز در شرایط تنش کم‌آبی به‌صورت معنی‌داری در مقایسه با شرایط آبیاری نرمال افزایش داد.

عملکرد ریشه

در این مطالعه شرایط تنش کم‌آبی در مقایسه با شرایط آبیاری نرمال عملکرد ریشه را ۱۷/۳۸ درصد کاهش داد. می‌توان اظهار نمود کمبود آب سبب کاهش سطح برگ، درصد پوشش سبز، افزایش تنفس و همچنین صرف انرژی برای رشد مجدد برگ‌ها و اندام‌های هوایی می‌شود که درنهایت موجب کاهش عملکرد ریشه می‌گردد (جدول ۵). همچنین، یکی از مکانیسم‌های گیاهان جهت مقاومت به خشکی، کاهش پتانسیل اسمزی از طریق افزایش سنتز و تجمع کربوهیدرات‌هایی مانند ساکارز در شیره سلولی ریشه است که از این طریق، پتانسیل اسمزی کمتر از پتانسیل اسمزی خاک شده و آب به داخل ریشه جریان پیدا می‌کند. البته چنین فرایندی با صرف انرژی در گیاه همراه است و صرف این مقدار انرژی موجب کاهش رشد ریشه و درنتیجه کاهش عملکرد ریشه می‌شود (Khadem et al., 2011). کاهش عملکرد ریشه چغندرقند تحت شرایط تنش خشکی در مقایسه با شرایط نرمال در مطالعه سایر محققین نیز گزارش شده است (Foroozesh et al., 2012; Khalili and Hamze, 2019, 2021). در مطالعه خوزایی و همکاران (Khozaei et al. 2020) اثر رژیم‌های آبیاری بر عملکرد ریشه معنی‌دار بود آن‌ها بالاترین عملکرد ریشه را با متوسط ۸۴/۶۰ تن در هکتار در تیمار ۱۰۰ درصد آبیاری و کمترین مقدار را با متوسط ۶۳/۲۳ تن در هکتار را در تیمار ۵۰ درصد آبیاری گزارش کردند.

مقایسه میانگین ژنوتیپ‌ها ازنظر عملکرد ریشه در شرایط آبیاری نرمال نشان داد دو ژنوتیپ شماره F-20851 و F-20734 به ترتیب با متوسط ۸۵/۷۷ و ۸۵/۷۲ تن در هکتار بالاترین عملکرد ریشه را به خود اختصاص دادند، کمترین عملکرد ریشه نیز در این شرایط با متوسط ۱۶/۹۴ تن در هکتار به ژنوتیپ Sharif اختصاص داشت (جدول ۵).

تحت شرایط تنش کم‌آبی ژنوتیپ F-20814 با متوسط ۷۳/۹۴ تن در هکتار بالاترین عملکرد ریشه را به خود اختصاص داد اختلاف بین ژنوتیپ مذکور و ژنوتیپ F-20851 ازلحاظ عملکرد ریشه معنی‌دار نبود. همانند شرایط آبیاری نرمال کمترین عملکرد ریشه برای ژنوتیپ داخلی Sharif با متوسط ۱۹/۸۴ تن در هکتار ثبت شد (جدول ۵).

وحیدی و همکاران (Vahidi et al., 2013) در ارزیابی ژنوتیپ‌های مختلف چغندرقند در شرایط مختلف محیطی دریافتند در شرایط آبیاری نرمال و تنش کم¬آبی، ژنوتیپ‌های HS-2 و HS-8 بالاترین و ژنوتیپ و ژنوتیپ‌های HS-13 و HS-10 کمترین عملکرد ریشه را به خود اختصاص دادند. در مطالعه پهلوانیان میاندوآب و همکاران (Pahlavanian Miandoab et al., 2021) بالاترین عملکرد ریشه به رقم دوروتی اختصاص داشت. در مطالعه فتوحی و همکاران (Fotouhi et al., 2017) اختلاف بین ژنوتیپ‌های چغندرقند ازنظر عملکرد ریشه و عملکرد قند خالص معنی‌دار بود در مطالعه آن‌ها در هر دو شرایط محیطی ژنوتیپ HSF۸۸۳ در هر دو شرایط به‌عنوان ژنوتیپ برتر ازنظر عملکرد و کیفیت شناسایی شد. در مطالعه میر محمودی و همکاران (Mir Mahmoudi et al., 2021) نیز اختلاف بین ژنوتیپ‌های چغندرقند در شرایط نرمال و تنش شوری معنی‌دار بود، آن‌ها اظهار داشتند در شرایط نرمال و تنش شوری ژنوتیپ‌های Isela، ۰۰۵ و ۰۰۴ بالاترین عملکرد ریشه را در هر دو شرایط محیطی به خود اختصاص دادند.

جدول ۵. مقایسه میانگین تیمارهای موردبررسی ازنظر صفات کمی و کیفی در دو سال

Table 5. Mean comparison of the studied treatment for quantitative and qualitative traits of sugar beet in two years

ژنوتیپ Genotype	عملکرد ریشه Root Yield (t ha^{-1})		درصد استحصال قند Sugar Extraction Coefficient		گایاکول پراکسیداز Guaiacol peroxidase (µmole g^{-1} FW)	
	N نرمال	S کم‌آبی	N نرمال	S کم‌آبی	N نرمال	S کم‌آبی
Pars	37.93m	31.4m	82.27j	91.81	0.61be	0.76hi
F-20722	56.78k	42.5k	88.84gh	90.69	0.53ef	0.96f
F-20815	74.23d	60.72e	85.55f	88.688	0.4hi	0.68ij
F-20817	66.83f	57.11f	82.29ab	87.67	0.41fgi	1.17e
F-20747	72.37e	70.30c	82.2k	87.987	0.51efg	1.21de
Paya	64.15g	49.70g	81.11bc	87.07	0.39hi	0.79gh
F-20723	62.66i	49.92i	80d	86.06	0.41ghi	0.72hij
F-20851	85.7a	72.14ab	87.7c	86.06	0.7bc	3.20a
F-20734	85.70a	62.21d	89.9gh	85.985	0.31i	0.67j
F-20716	80.7c	70.03c	60m	84.884	0.85ab	1.19de
Sharif	19.40o	16.94o	81.1fg	84.084	0.46egh	0.97f
F-20772	61.7j	46.71l	85.5k	84.084	0.47fgh	2.23b
Arya	61.98j	41.04l	70l	83.883	0.35i	0.75hij
Shokoofa	56.51k	47.01h	81.1e	82.782	0.70cd	1.75c
F-20814	83.12b	73.94a	89.9i	82.182	0.91a	1.26d
Ekbatan	33.09n	32.15n	87.7i	80.28	0.68cd	0.86g
F-20866	63.62h	60.17e	87.7h	80.1	0.39hi	0.87g
F-20758	49.92l	45.16j	87.71a	76.86	0.32i	0.87g

Table 5. Continued **جدول ۵. ادامه**

ژنوتیپ Genotype	پلی فنل اکسیداز Polyphenol oxidase (mg/g FW)		سوپراکسید دیسموتاز Superoxide dismutase (µmole/g FW)		پرولین Proline (mg/g FW)	
	N نرمال	S کم‌آبی	N نرمال	S کم‌آبی	N نرمال	S کم‌آبی
Pars	0.022de	0.056ij	9363.4a	7499.17b-e	0.635e	1.16d
F-20722	0.002e	0.020l	8812.7b	5456.36de	0.253i	1.80a
F-20815	0.013de	0.111f	6133.5c	14800.58ab	0.786c	1.16d
F-20817	0.025de	0.049j	5918.1c	14085.15ab	0.316gh	1.46c
F-20747	0.018de	0.144c	5853.2c	12422.42a-d	0.425f	1.23d
Paya	0.031cde	0.119ef	4847.7d	6480.36cde	0.258i	1.02e
F-20723	0.08abc	0.126de	4791.9d	8077.89b-e	0.263i	1.3d
F-20851	0.044cde	0.035k	4737.4d	14713.41ab	0.851b	1.7ab
F-20734	0.007de	0.132d	4714.1d	6238.63cde	0.848b	1.7ab
F-20716	0.039cde	0.051j	4592.3d	13388.18abc	0.983a	1.8a
Sharif	0.103a	0.160b	4231.6e	9794.58b-e	0.238i	0.56g
F-20772	0.097ab	0.085g	3822.7f	9783.69b-e	0.847b	1.79a
Arya	0.039cde	0.017l	3790.7f	19394.32a	0.443f	1.26d
Shokoofa	0.050b-e	0.074h	3452.2g	9312.45b-e	0.963a	1.47c
F-20814	0.048b-e	0.066h	3261.3g	9425.84b-e	0.695d	1.66b
Ekbatan	0.020d-e	0.090g	2774.0h	3900.54e	0.354g	0.76f
F-20866	0.056a-e	0.065hi	2563.1h	4883.25e	0.667de	1.25d
F-20758	0.043cde	0.242a	2512.4h	5806.08de	0.268hi	0.43g

میانگین دارای حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۵ هستند.

Similar lettesrs for means indicating non significant difference at 0.05 probability level.

در مطالعه بشیری و همکاران (Bashiri et al., 2015) بر روی چغندرقند در شرایط عادی ژنوتیپ شماره (۲۶۰۶۰) با متوسط ۵۸/۷۸ تن در هکتار بالاترین و ژنوتیپ شماره ۵ (۲۸۷۰۸) با متوسط ۳۶/۴۲ کمترین عملکرد ریشه را به خود اختصاص دادند، تحت شرایط شوری نیز ژنوتیپ شماره ۳ با (۲۷۱۲۲) متوسط ۳۶/۹۳ تن و ژنوتیپ شماره ۴ (۲۷۳۰۶) با

متوسط ۱۷/۶۰ تن در هکتار به ترتیب بیشترین و کمترین عملکرد ریشه را نشان دادند.

درصد استحصال قند

مقایسه میانگین ژنوتیپ‌ها ازلحاظ شاخص برداشت در شرایط نرمال نشان داد اگرچه ژنوتیپ F-20747 با متوسط ۸۹/۷۱ بالاترین درصد استحصال قند را به خود اختصاص داد اما بین ژنوتیپ مذکور و ژنوتیپ F-20817 اختلاف معنی‌دار مشاهده نشد. (جدول ۵). در این مطالعه کمترین درصد استحصال قند نیز با متوسط ۶۵/۰۲ درصد به ژنوتیپ Sharif اختصاص یافت. در مطالعه میر محمودی و همکاران (Mir Mahmoudi et al., 2021) اختلاف بین ژنوتیپ‌های چغندرقند در شرایط نرمال ازنظر درصد استحصال قند معنی-دار بود، آن‌ها نشان دادند ژنوتیپ‌های ۰۰۵ و ۰۰۴ بیشترین درصد استحصال قند را در شرایط مذکور به خود اختصاص دادند.

بشیری و همکاران (Bashiri et al., 2015) نشان دادند ژنوتیپ شماره ۱ (۲۶۰۶۰) با متوسط ۸۷/۵ درصد بالاترین و ژنوتیپ شماره ۱۱ (۳۰۹۲۱) با متوسط ۸۲/۹۳ درصد کمترین درصد استحصال را در شرایط عادی دارند، اما اختلاف بین ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش شوری ازلحاظ درصد استحصال قند معنی‌دار نبود. در تحقیقی دیگر بخشی خانیکی و همکاران (Bkhshikhangi et al., 2011) اختلاف معنی‌داری را بین ژنوتیپ‌های چغندرقند ازلحاظ درصد استحصال قند مشاهده کردند و دریافتند رقم شیرین بالاترین درصد استحصال قند را به خود اختصاص داد.

بر اساس نتایج جدول همبستگی بین صفات درصد استحصال قند با عملکرد ریشه تحت شرایط آبیاری نرمال در سطح احتمال یک درصد همبستگی مثبت و معنی¬دار نشان داد (جدول ۶). با آبیاری منظم چغندرقند از نسبت ناخالصی‌های قند ریشه ازجمله نیتروژن، سدیم و پتاسیم کاسته شده و درصد استحصال قند افزایش نشان خواهد داد.

خصوصیات آنتی‌اکسیدانی

نتایج نشان داد محتوی گایکول پراکسیداز، پلی فنل اکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز تحت شرایط کم‌آبی به ترتیب ۱۱۸/۸۶، ۸۲/۱ و ۱۰۳/۶۱ درصد در مقایسه با شرایط آبیاری نرمال افزایش نشان داد (جدول ۵). در شرایط عادی مقدار تولید گونه‌های فعال اکسیژن با مقدار حذف آن¬ها با مکانیسم‌های آنتی‌اکسیدانی کارآمد گیاهان در حال تعادل است (Iturbe-ormaetxe et al., 1998)؛ اما در شرایط تنش کم‌آبی این تعادل از بین رفته و مقدار تولید گونه‌های فعال اکسیژن بسیار بیشتر از مقدار پاک‌سازی آن‌ها است، بالا رفتن مقدار فعالیت پراکسید هیدروژن در اثر شرایط تنش خشکی نیز به دلیل اختلال در این تعادل است که منجر به ایجاد تنش اکسیداتیو در گیاه می‌شود، خسارت به غشاء و رهاسازی یون‌ها از سلول به فضای بین سلولی، یکی از آسیب‌های جدی تنش خشکی است. این پدیده به دلیل تجمع رادیکال‌های آزاد اکسیژن است که باعث پراکسیداسیون لیپید، افزایش نفوذپذیری غشاء و خسارت به سلول می‌شود (Halliwell and Gutteridge, 2015). تنش‌ها با تحریک تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)، موجب آسیب به بافت‌های گیاه شده پیری گیاه را تشدید می‌کند. فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و ارتباط بین فعالیت سطح رونوشت‌برداری از ژن می‌تواند نقش حفاظتی از گیاهان در برابر آسیب اکسیداتیو در تنش خشکی را بازی کند (Hossein et al., 2015). یکی از مهم‌ترین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت به‌ویژه کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز تجزیه ماده سمی پراکسید هیدروژن به اکسیژن و آب است که با این عمل از ایجاد صدمه به ساختار سلول تحت شرایط کم‌آبی جلوگیری می‌کنند (Manivannan et al., 2007a). نتایج پژوهش حاضر نشان داد که با اعمال تنش خشکی بر میزان فعالیت آنزیم‌های گایکول پراکسیداز، پلی فنل اکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز جهت مقابله با خسارات رادیکال‌های آزاد افزوده شد. همسو با این تحقیق افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در گوجه‌فرنگی و برخی ارقام کلزا و افزایش فعالیت گایاکول پراکسیداز برای آرابیدوپسیس، گندم و ارقام کلزا تحت شرایط تنش خشکی گزارش داده شده است (Mirzaee et al, 2013).

گزارش شده است که کاتالاز، سوپر اکسید دیسموتاز، پلی‌فنل‌اکسیداز از مهم‌ترین آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت گیاهی هستند که در نقش اساسی در پاک‌سازی پراکسید هیدروژن ایجادشده در اثر تنش کم‌آبی دارند، این آنزیم‌ها موجب جابجایی اکسیژن (O^{2-}) از H_2O_2 شده و آن را به اکسیژن و آب تجزیه می‌کنند (Shen et al., 2010; Gill et al., 2010; Bi et al., 2016). تنش‌های محیطی مانند تنش کم‌آبی سبب القای تولید H2O2 می‌شود، این آنزیم‌ها هم با عمل کردن به‌عنوان یک پیام‌رسان بیوزیستی و هم به‌عنوان تحریک بیان ژن‌های مقاومت به تنش موجب تعدیل اثر

تنش‌های محیطی می‌شوند (Alam et al., 2014). گزارش شده است که پلی فنل اکسیداز از کاهش بیش‌ازحد زنجیره انتقال الکترون در جریان تنش‌های محیطی جلوگیری می‌کند (Boeckx et al., 2015). در مطالعه‌ای فعالیت پلی فنل اکسیداز در تیمار هفت روز پس از اعمال تنش کم‌آبی به‌صورت چشم‌گیری افزایش نشان داد (Lee et al., 2007).

گلوتاتیون پراکسیداز به‌عنوان کاتالیزور سبب تبدیل گلوتاتیون به گلوتاتیون دی سولفید شده و از این طریق الکترون اضافه‌ی موجود در هیدروژن پراکسید را گرفته و موجب تبدیل آن به آب می‌شود و از این طریق سبب انتقال الکترون اضافه از هیدروژن پراکسید به آن و تبدیل هیدروژن پراکسید به آب می‌شود. گلوتاتیون بر فعالیت آنزیم دی آسکوربات رداکتاز که موجب تبدیل دی هیدروآسکوربات به آسکوربات می‌شود تأثیرگذار است (Hirayama et al., 2006; Krishna et al., 2010). الیاکی و همکاران (Ilkai et al., 2012) در تحقیقی بر روی چغندرقند نشان دادند بیشترین میزان فعالیت آنزیم‌های سوپر اکسید دیسموتاز، کاتالاز، گلوتاتیون پراکسیداز به تیمار تنش خشکی و کمترین میزان آنزیم به تیمار آبیاری نرمال اختصاص داشت. در مطالعه سیف زاده و همکاران (Sayfzadeh et al., 2011) با تشدید تنش کم‌آبی در چغندرقند بر مقدار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت افزوده شد به‌طوری‌که تیمار شاهد (آبیاری نرمال) کمترین و تیمار آبیاری بعد از ۱۸۰ میلی‌متر تبخیر بیشترین مقدار فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و گلوتاتیون پراکسیداز را به خود اختصاص داد. در تحقیقی دیگر حبیبی و همکاران (Habibi et al., 2011) اظهار داشتند بالاترین مقدار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز، دی تیروزین و مالون دی‌آلدئید در چغندرقند به سطوح شدید تنش کم‌آبی اختصاص داشت. فروزش و همکاران (Foroozesh et al., 2012) در ارزیابی ژنوتیپ‌های مختلف چغندرقند تحت شرایط آبیاری نرمال و تنش کم‌آبی اظهار داشتند مقدار فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و گلوتاتیون پراکسیداز در شرایط تنش کم‌آبی به‌صورت معنی‌داری در مقایسه با شرایط آبیاری نرمال افزایش داد.

گایاکول پراکسیداز

کاتالاز و گایاکول پراکسیداز آنزیم‌های حاوی یون‌های آهن است و برای زدودن پراکسید هیدروژن تولیدشده توسط سوخت‌وساز طبیعی و یا تحت شرایط استرس وارد عمل می‌شوند (Karuppandapandian et al., 2011).

تحت شرایط آبیاری نرمال ژنوتیپ F-20814 با متوسط ۰/۹۱ میکرومول بر گرم وزن‌تر بالاترین مقدار فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز را به خود اختصاص داد هرچند اختلاف بین ژنوتیپ مذکور و ژنوتیپ شماره F-20716 ازنظر مقدار فعالیت آنزیم مذکور معنی‌دار نبود، سه ژنوتیپ F-20734، ۲ F-20758 و Arya به ترتیب با متوسط ۰/۳۲، ۰/۳۲ و ۰/۳۵ میکرومول بر گرم وزن‌تر کمترین مقدار فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز را به خود اختصاص دادند (جدول ۳).

مقایسات میانگین ژنوتیپ‌ها ازلحاظ مقدار فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز در شرایط کم‌آبی نشان داد دو ژنوتیپ F-20851 و F-20734 به ترتیب با متوسط ۳/۳۰ و ۰/۶۷ میکرومول بر گرم وزن‌تر بیشترین و کمترین مقدار فعالیت آنزیم مذکور را به خود اختصاص دادند (جدول ۵).

در این مطالعه همبستگی گایاکول پراکسیداز با عملکرد ریشه در شرایط تنش کم‌آبی در سطح احتمال یک درصد مثبت و معنی‌دار بود (جدول ۶). به نظر می‌رسد یکی از دلایل بالا بودن عملکرد ریشه ژنوتیپ F-20851 در شرایط تنش کم‌آبی بالا بودن محتوی فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز در این رقم باشد. به نظر می‌رسد با افزایش فعالیت آنزیم مذکور رادیکال‌های آزاد تولیدشده در اثر تنش کم‌آبی به‌صورت مؤثری پاک‌سازی شده، آسیب وارده به غشاء سلولی کاهش یافته و درنتیجه عملکرد ریشه بهبود نشان داده است.

پلی فنل اکسیداز

مقایسه میانگین ژنوتیپ‌ها ازلحاظ محتوی فعالیت پلی فنل اکسیداز نشان داد ژنوتیپ Sharif با متوسط ۰/۱۰۳ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر بالاترین محتوی آنزیم مذکور را به خود اختصاص داد، اختلاف بین ژنوتیپ مذکور و ژنوتیپ‌های F-20772، F-20723 و F-20866 ازلحاظ آماری معنی‌دار نبود. کمترین محتوی فعالیت آنزیم پلی فنل اکسیداز با متوسط ۰/۰۰۲ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر به ژنوتیپ F-20722 اختصاص داشت (جدول ۵).

تحت شرایط تنش کم‌آبی ژنوتیپ F-20758 با متوسط ۰/۲۴۲ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر بالاترین و ژنوتیپ‌های Shokoofa و F-20722 به ترتیب با متوسط ۰/۰۱۷ و ۰/۰۲۰ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر کمترین مقدار فعالیت آنزیم پلی فنل اکسیداز را به خود اختصاص دادند.

اسلام و همکاران (Islam et al., 2021) نشان دادند اختلاف بین ژنوتیپ‌های چغندرقند در شرایط آبیاری نرمال و تنش کم‌آبی ازلحاظ محتوی فعالیت پلی فنل اکسیداز معنی-دار بود آن‌ها اظهار داشتند تحت شرایط آبیاری نرمال ژنوتیپ‌های ۳، ۴ و ۸ و تحت شرایط تنش کم‌آبی ژنوتیپ‌های ۵، ۶ و ۱ بالاترین مقدار فعالیت آنزیم مذکور را نشان دادند.

بر اساس نتایج جدول همبستگی بین صفات مقدار محتوی فعالیت آنزیم پلی فنل اکسیداز با درصد استحصال و گایاکول پراکسیداز همبستگی منفی و معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد در شرایط آبیاری نرمال نشان داد (جدول ۵). تحت شرایط تنش کم‌آبی همبستگی محتوی پلی فنل اکسیداز با عملکرد ریشه در سطح احتمال یک درصد و با گایاکول پراکسیداز در سطح احتمال پنج درصد منفی و معنی‌دار بود (جدول ۵). در این مطالعه دو ژنوتیپ شماره F-20851 و F-20814 که از مقادیر عملکرد ریشه بالایی در شرایط تنش کم‌آبی برخوردار بودند از دسته ژنوتیپ¬هایی بودند که محتوی کم فعالیت آنزیم پلی فنل اکسیداز را به خود اختصاص داده بودند.

سوپراکسید دیسموتاز

تحت شرایط آبیاری نرمال بالاترین مقدار فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز با متوسط ۹۳۹۳/۴ میکرومول بر گرم وزن‌تر به ژنوتیپ F-20815 اختصاص داشت. کمترین مقدار فعالیت مذکور به ترتیب با متوسط ۲۷۷۴/۰، ۲۵۶۳/۱ و ۲۵۱۲/۴ میکرومول بر گرم وزن‌تر به ژنوتیپ‌های Ekbatan، F-20734 و F-20722 اختصاص داشت (جدول ۵).

نتایج مقایسات میانگین ژنوتیپ‌ها ازلحاظ مقدار فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز تحت شرایط تنش کم‌آبی نشان داد ژنوتیپ Arya با متوسط واحد بالاترین مقدار فعالیت آنزیم مذکور را به خود اختصاص داد بین ژنوتیپ مذکور و ژنوتیپ‌های F-20815، F-20851، F-20716 و F-20747 اختلاف معنی‌داری دیده نشد. در این مطالعه کمترین مقدار فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز به دو ژنوتیپ Ekbatan و F-20866 اختصاص داشت (جدول ۵). لازم به ذکر است که مقدار فعالیت سوپراکسید دیسموتاز در کلیه ژنوتیپ‌های موردمطالعه در واکنش به تنش کم‌آبی افزایش نشان داد.

گزارش شده است مقدار فعالیت سوپراکسید در ارقام حساس به خشکی در مقایسه با دیگر ارقام کم است، همچنین ارتباط مثبتی بین مقدار فعالیت سوپر اکسید دیسموتاز و مقدار مقاومت به تنش کم‌آبی گزارش شده است (Stajner et al., 1995). در مطالعات مختلفی افزایش فعالیت آنزیم-های آنتی‌اکسیدانت با افزایش تحمل به تنش کم‌آبی به اثبات رسیده است.

اسلام و همکاران (Islam et al., 2021) گزارش کردند که اختلاف بین ارقام چغندرقند ازلحاظ خصوصیات آنتی‌اکسیدانی معنی‌دار بود آن‌ها اظهار داشتند تحت شرایط آبیاری نرمال ژنوتیپ‌های BSRI Sugarbeet 1، BSRI Sugarbeet 2، TOLERANZA و SV2347 بیشترین و تحت شرایط تنش کم‌آبی ژنوتیپ SV2348 بالاترین مقدار فعالیت سوپراکسید دیسموتاز را به خود اختصاص دادند.

در این مطالعه محتوی آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز با عملکرد ریشه در هر دو شرایط محیطی همبستگی مثبت و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد نشان داد. در این مطالعه ژنوتیپ شماره F-20851 که یکی از ژنوتیپ‌های پر محصول در شرایط کم‌آبی بود در مقایسه با دیگر ژنوتیپ‌ها از محتوی سوپر اکسید دیسموتاز بالاتری برخوردار بود، به نظر می‌رسد یکی از مکانیسم‌های افزایش عملکرد ریشه در این رقم تنظیم مقدار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت است که با پاک‌سازی رادیکال‌های آزاد در شرایط تنش کم‌آبی خسارت کم‌آبی را به حداقل مقدار رسانیده است، افزایش عملکرد در سایر ژنوتیپ‌های دیگر به نظر می‌رسد به‌واسطه سایر مکانیسم‌های غیر آنتی‌اکسیدانی باشد.

گزارش شده که SOD یک آنتی‌اکسیدانت قوی است که اولین ماده تولیدشده از احیاء یک ظرفیتی اکسیژن، یعنی رادیکال سوپر اکسید را از بین می‌برد، بنابراین به SOD دفاع اولیه در مقابل رادیکال‌های آزاد اکسیژن اطلاق می‌شود (Jung, 2004). طی دوران تنش خشکی، وضعیت آب درون‌سلولی نقش کلیدی را در فعال کردن این مکانیسم‌های دفاعی بازی می‌کند. با افزایش میزان تنش، سیستم آنتی‌اکسیدانت گیاه فعال‌شده و با افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسیداز دیسموتاز به‌عنوان اولین سد دفاعی در مقابل حمله رادیکال‌های اکسیژن در مقابل خسارات ناشی از تنش مقاومت می‌نماید و تا زمانی که گیاه قادر به مهار حجم سوپراکسید تولیدشده در گیاه باشد این فرایند ادامه دارد (Jung, 2004).

در مطالعه بر روی چغندرقند سیف زاده و همکاران (Sayfzadeh et al., 2011) بالاترین مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز و سوپراکسید دسموتاز تحت شرایط آبیاری بعد از ۱۸۰

میلی‌متر تبخیر در ژنوتیپ شماره BP-Karaj (G2)گزارش شد، همچنین بالاترین مقدار فعالیت آنزیم سوپر اکسید دسموتاز به ژنوتیپ شماره BP-Mashhad در شرایط آبیاری بعد از ۱۸۰ میلی‌متر تبخیر اختصاص داشت.

در مطالعه‌ای حبیبی و همکاران (Habibi et al., 2011) گزارش کردند که اختلاف بین ژنوتیپ‌های چغندرقند ازلحاظ مقدار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت متفاوت بود به‌طوری‌که بالاترین و پایین‌ترین مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز به ژنوتیپ شماره ۱۳ و ۱ بالاترین و پایین‌ترین مقدار فعالیت گلوتاتیون پراکسیداز به ژنوتیپ‌های شماره ۱۴ و ۷، همچنین بالاترین و پایین‌ترین مقدار فعالیت دی‌تیروزین به ژنوتیپ‌های ۱۵ و ۱ بالاترین و پایین‌ترین مقدار فعالیت دی هیدروگوانوزین به ترتیب به ژنوتیپ‌های شماره ۸ و ۱۰ اختصاص داشت. در مطالعه فروزش و همکاران (Foroozesh et al., 2012) اختلاف بین ژنوتیپ‌ها ازنظر مقدار فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز معنی‌دار بود آن‌ها نشان دادند ژنوتیپ BP Mashad*(۲۶۱*۷۱۱۲) بالاترین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت را در شرایط آبیاری نرمال و تنش کم‌آبی به خود اختصاص داد.

پرولین

در این بررسی تنش کم‌آبی محتوی پرولین را ۱۱۳/۹۲ درصد در مقایسه با شرایط آبیاری نرمال در چغندرقند افزایش داد (جدول ۵). یکی از مکانیسم‌های کارآمدی که گیاه به هنگام مواجه با خشکی برای حفظ تورژسانس و آماس سلولی به خدمت می‌گیرد، تنظیم اسمزی است. در طی این پدیده فیزیولوژیکی، پتانسیل اسمزی بافت‌های تحت تنش، در اثر انباشت یک سری مواد اسمزی در سلول‌ها کاهش می‌یابد، بنابراین فشار تورگر سلول‌ها در حد مطلوب نگهداری می‌شود (Omidi, 2010). طی بروز خشکی، بر میزان تجمع ترکیب‌های آلی مانند پرولین در تمام اندام‌های گیاهان افزوده می‌شود، تجمع پرولین در بافت‌های گیاهان تحت تنش می‌تواند تا حدی شرایط لازم برای ادامه جذب آب از محیط ریشه را فراهم سازد (Heuer, 1994). افزایش پرولین در گیاه هنگام تنش، نوعی مکانیسم دفاعی است پرولین از طریق تنظیم اسمزی، جلوگیری از تخریب آنزیم‌ها و پاک کردن رادیکال‌های هیدروکسیل، بردباری و تحمل گیاه در برابر تنش‌ها را افزایش می‌دهد. این مواد اسمزی شامل تجمع مولکول‌های آلی نظیر پرولین، بتائین و کربوهیدرات‌ها و یون‌های معدنی همچون پتاسیم، کلسیم و سدیم است. در بین این مواد احتمالاً پرولین فراوان‌ترین تنظیم‌کننده اسمزی به شمار می‌آید. پرولین یک اسیدآمینه مهم در گیاه است که در شرایط تنش خشکی از اکسیداسیون درون‌سلولی و تشکیل رادیکال‌های آزاد جلوگیری می‌کند و همچنین فشار اسمزی گیاه را برای جذب آب تنظیم می‌کند؛ بنابراین افزایش محتوی پرولین در تحقیق حاضر را می‌توان یک واکنش دفاعی در برابر آسیب‌های تنش کم‌آبی دانست. همچنین مونرال و همکاران (Monreal et al., 2007) عامل تجمع پرولین در برگ در اثر تنش خشکی را به افزایش غلظت پرولین در شیره سلولی گیاهان و انتقال آن به برگ‌ها مربوط دانستند. کاهش مصرف پرولین نیز در چنین شرایطی از دلایل تجمع آن در گیاه است به‌طوری‌که توقف در اکسایش پرولین در پتانسیل‌های آب پایین اتفاق می‌افتد (Huguet-Robert et al., 2003). در مطالعه اسلام و همکاران (Islam et al., 2021) محتوی پرولین برگ در چغندرقند تحت شرایط تنش کم‌آبی به‌صورت معنی‌داری در مقایسه با شرایط آبیاری نرمال افزایش نشان داد.

مقایسه میانگین ژنوتیپ‌ها در شرایط آبیاری نرمال ازلحاظ محتوی پرولین نشان داد دو رقم F-20716 و Shokoofa به ترتیب با متوسط ۰/۹۸ و ۰/۹۶ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر بالاترین مقدار صفت مذکور را به خود اختصاص دادند، کمترین محتوی پرولین بر در این بررسی به ترتیب با متوسط ۰/۲۳، ۰/۲۵، ۰/۲۵ و ۰/۲۶ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر به ژنوتیپ‌های شماره Sharif، F-20722، Paya و F-20723 اختصاص داشت (جدول ۵).

مقایسه میانگین ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش کم‌آبی نشان داد ژنوتیپ‌های F-20716، F-20722 و F-20772 به ترتیب با متوسط ۱/۸۴، ۱/۸۰، ۱/۷۹ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر بالاترین محتوی پرولین را به خود اختصاص دادند، لازم به ذکر است که بین ژنوتیپ‌های مذکور و دو ژنوتیپ F-20851 و F-20734 اختلاف معنی‌دار دیده نشد، کمترین محتوی پرولین برگ نیز به ترتیب با متوسط ۰/۴۳ و ۰/۵۶ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر به دو ژنوتیپ شماره ۲۷ و ۱۵ اختصاص داشت (جدول ۳) در مطالعه اسلام و همکاران (Islam et al., 2021) بالاترین محتوی پرولین به ژنوتیپ BORNITA و GREGOIA تحت شرایط تنش کم‌آبی اختصاص داشت.

نتایج جدول همبستگی بین صفات (جدول ۶) نشان داد در شرایط نرمال همبستگی پرولین با عملکرد ریشه و گایاکول

پراکسیداز در هر دو شرایط آبیاری در سطح احتمال یک درصد مثبت و معنی‌دار بود، اما همبستگی پرولین با سوپراکسید دیسموتاز تنها در شرایط آبیاری نرمال در سطح احتمال پنج درصد مثبت و معنی‌دار بود (جدول ۶).

جدول ۶. همبستگی بین صفات اعداد پایین مربوط به شرایط نرمال اعداد بالا مربوط به شرایط کم‌آبی در دو سال است

Table 6. The correlation between traits, low numbers related to normal and high numbers related to water deficit conditions at two years

صفات Traits	عملکرد ریشه Root yield	درصد استحصال قند Sugar extraction coefficient	گایاکول پراکسیداز Guaiacol peroxidase	پلی فنل اکسیداز Polyphenol oxidase	سوپر اکسید دیسموتاز Superoxide dismutase	پرولین Proline
عملکرد ریشه Root Yield	1	0.03^{ns}	0.30**	0.34**	0.26**	0.56**
درصد استحصال قند Sugar extraction coefficien	0.71**	1	0.14^{ns}	-0.21^{ns}	-0.05^{ns}	0.12^{ns}
گایاکول پراکسیداز Guaiacol peroxidase	0.16^{ns}	0.02^{ns}	1	0.20*	0.17^{ns}	0.43**
پلی فنل اکسیداز Polyphenol oxidase	-0.15^{ns}	-0.25**	-0.15^{ns}	1	0.12^{ns}	0.05^{ns}
سوپر اکسید دیسموتاز Superoxide dismutase	0.25**	0.10^{ns}	-0.02^{ns}	0.01^{ns}	1	0.13^{ns}
پرولین Proline	0.48**	0.15^{ns}	0.39**	-0.04^{ns}	0.20*	1

ns، * و ** به ترتیب عدم معنی‌دار و معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ و ۰/۰۱

ns, *, ** significant and insignificant at 1 and 5% levels respectively

تجزیه رگرسیون و علیت صفات مؤثر بر عملکرد ریشه

نتایج تجزیه رگرسیون چندگانه برای مشخص نمودن اجزای مؤثر بر عملکرد ریشه به‌عنوان صفت وابسته تحت شرایط آبیاری نرمال در جدول (۷) درج شده است. در این شرایط درصد استحصال قند و محتوی پرولین با تبیین ۸۰ درصد از تغییرات عملکرد ریشه به‌عنوان تأثیرگذارترین صفات در توجیه تغییرات عملکرد ریشه شناسایی شدند. در بین صفات مذکور مقدار درصد استحصال قند و محتوی پرولین به‌تنهایی به ترتیب ۷۱ و ۱۰ درصد از تغییرات کل عملکرد ریشه را به خود اختصاص دادند. چنانچه عملکرد ریشه به‌عنوان متغیر وابسته با Y، و درصد استحصال قند و محتوی پرولین به‌عنوان متغیرهای مستقل به ترتیب با X1 و X2 نشان داده شوند، معادله خط رگرسیون به‌صورت ذیل تبیین خواهد شد.

$$Y=-138.32+2.16X_1+27.86X_2 \qquad [۱]$$

نتایج تجزیه علیت صفات مؤثر بر عملکرد ریشه نشان داد درصد استحصال قند و محتوی پرولین اثر مستقیم مثبت و معنی‌داری بر عملکرد ریشه نشان دادند در این تحقیق دو صفت مذکور به صوت غیرمستقیم نیز از طریق یکدیگر اثر مثبتی بر عملکرد ریشه نشان دادند (جدول ۸). نتایج تجزیه رگرسیون گام‌به‌گام تحت شرایط تنش کم‌آبی نشان داد صفات محتوی پرولین، گایاکول پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز با تبیین ۶۶/۳ درصد از تغییرات عملکرد ریشه به‌عنوان مؤثرترین صفات بر عملکرد ریشه شناسایی شدند (جدول ۹). در این شرایط محتوی پرولین به‌تنهایی با تبیین ۵۶/۳ به‌عنوان تأثیرگذارترین صفت بر عملکرد ریشه در شرایط تنش کم‌آبی شناخته شد. چنانچه عملکرد ریشه به‌عنوان متغیر وابسته با Y، و محتوی پرولین، گایاکول پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز به‌عنوان متغیرهای مستقل به ترتیب با X_1 و X_2 و X_3 نشان داده شوند، معادله خط رگرسیون به‌صورت ذیل تبیین خواهد شد.

$$Y=19.91-18.20X_1+70.54X_2+0.56X_3 \qquad [۲]$$

بر اساس نتایج تجزیه علیت صفات، در شرایط تنش کم‌آبی صفات پرولین و گایاکول پراکسیداز در سطح احتمال یک درصد و سوپر اکسید دیسموتاز در سطح احتمال پنج درصد اثر مستقیم مثبت و معنی‌داری بر عملکرد ریشه نشان

دادند، همچنین اثر غیرمستقیم هر یک از صفات از طریق همدیگر بر عملکرد ریشه مثبت و معنی‌دار بود (جدول ۱۰).

تحت شرایط تنش کم‌آبی ژنوتیپ F-20851 در مقایسه با دیگر ژنوتیپ‌های موردبررسی از محتوی پرولین، گایاکول پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز بالاتری در مقایسه با دیگر ارقام برخوردار بود، بنابراین بالا بودن عملکرد ریشه در این ژنوتیپ را می‌توان به بالا بودن فعالیت آنتی‌اکسیدانی و غیر آنتی‌اکسیدانی این رقم نسبت داد.

در مطالعه میر محمودی و همکاران (Mir Mahmoudi et al., 2021) در شرایط محیطی نرمال درصد استحصال قند هم به‌صورت مستقیم و هم غیرمستقیم از طریق عملکرد ریشه اثر معنی‌داری بر عملکرد قند خالص نشان داد.

جدول ۷. نتایج تجزیه رگرسیون گام‌به‌گام صفات موردمطالعه با عملکرد ریشه به‌عنوان متغیر تابع در شرایط نرمال

Table 7. Results of stepwise regression analysis of the studied traits with root yield as dependent variable under normal condition

Variables	متغیرها	1	2
Contrast	عدد ثابت	-138.77	-138.32
Sugar extraction coefficien	درصد استحصال قند	2.36	2.16
Proline	پرولین		27.86
R^2	ضریب تبیین	*0.71*	*0.80*

جدول ۸. تجزیه علیت صفات مؤثر بر عملکرد ریشه در شرایط نرمال

Table 8. Path analysis of traits affecting root yield under normal condition

			اثر غیرمستقیم Indirect effect		
Variables	متغیرها	اثر مستقیم Direct effect	درصد استحصال قند Sugar Extraction Coefficien	محتوی پرولین Proline	ضریب همبستگی R
Sugar Extraction Coefficien	درصد استحصال قند	0.65**	-	0.057	0.71**
Proline	پرولین	0.38**	0.097	-	0.48**

جدول ۹. نتایج تجزیه رگرسیون گام‌به‌گام صفات موردمطالعه با عملکرد ریشه به‌عنوان متغیر تابع در شرایط کم‌آبی

Table 9. Results of stepwise regression analysis of the studied traits with root yield as dependent variable under water deficit condition

Variables	متغیرها	1	2	3
Contrast	عدد ثابت	27.89	21.73	19.91
Proline	پرولین	19.76	18.92	18.20
Guaiacol peroxidase	گایاکول پراکسیداز		75.09	70.54
Superoxide dismutase	سوپر اکسید دیسموتاز			0.56
R^2	ضریب تبیین	0.563	0.644	0.663

نتیجه‌گیری نهایی

در بین ژنوتیپ‌های موردبررسی رقم F-20851 در هر دو شرایط آبیاری از عملکرد بالایی در مقایسه با دیگر ارقام برخوردار بود، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت ژنوتیپ مذکور از پتانسیل ژنتیکی بالایی برای عملکرد ریشه در شرایط مختلف محیطی برخوردار است، در بین ارقام ایرانی به‌غیراز رقم پایا دیگر ارقام در هر دو شرایط محیطی از رتبه‌های پایین عملکرد ریشه برخوردار بودند. در این مطالعه همبستگی عملکرد ریشه با محتوی پرولین در هر دو شرایط محیطی مثبت و معنی‌دار بود، همچنین بر اساس نتایج تجزیه رگرسیون و علیت پرولین در هر دو شرایط محیطی اثر مستقیم مثبت و معنی‌داری بر عملکرد ریشه داشت، در ارقام چغندرقند چه در شرایط تنش و چه در شرایط آبیاری نرمال که گیاه دوره‌های از تنش کم‌آبی را با شدت‌های مختلف تجربه می‌کند محتوی پرولین بالا می‌تواند در افزایش عملکرد ریشه مؤثر باشد، همچنین تحت شرایط تنش کم‌آبی علاوه بر پرولین گایاکول پراکسیداز و

سوپراکسید دیسموتاز نیز اثر مثبت مستقیم و غیرمستقیمی بر عملکرد ریشه نشان دادند، می‌توان نتیجه گرفت گیاهان تحت تنش کم‌آبی با تنظیم مقدار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت سعی در حفظ عملکرد ریشه دارند.

جدول ۱۰. تجزیه علیت صفات مؤثر بر عملکرد ریشه در شرایط نرمال

Table 10. Path analysis of traits affecting root yield under normal condition

متغیرها Variable	اثر مستقیم Direct effect	اثر غیرمستقیم Indirect effect			ضریب همبستگی Correlation
		پرولین Proline	گایاکول پراکسیداز Guaiacol peroxidase	سوپر اکسید دیسموتاز Superoxide dismutase	
پرولین Proline	0.52**	-	0.12	0.02	0.65**
گایاکول پراکسیداز Guaiacol peroxidase	0.29**	0.22	-	0.02	0.30**
سوپر اکسید دیسموتاز Superoxide dismutase	0.160*	0.06	0.04	-	0.26**

منابع

Abdollahian-Noghabi, M., Radaei-al-amoli, Z., Akbari, G.H.A., Sadat-Nuri, S.A., 2011. Effect of severe water stress on morphological, quantitative and qualitative characteristics of 20 sugar beet genotypes. Iranian Journal of Field Crops Science. 42, 453-464 [In Persian with English summary].

Alam, M.M., Nahar, K., Hasanuzzaman, M., Fujita, M., 2014. Exogenous jasmonic acid modulates the physiology, antioxidant defense and glyoxalase systems in imparting drought stress tolerance in diferent Brassica species. Plant Biotechnology Reports. 8, 279–293.

Arora, A., Sairam, R, K., Srivastava, G. C., 2002. Oxidative stress and antioxidant system in plants. Plant Physiology, 82, 1227-1237.

Bi, A., Fan, J., Hu, Z., Wang, G., Amombo, E., Fu, J., Hu, T., 2016. Di_erential acclimation of enzymatic antioxidant metabolism and photosystem II photochemistry in tall fescue under drought and heat and the combined stresses. Frontiers in Plant Science. 7, 453.

Bkhshikhangi, G.R., Javadi, P., Khani, M., Tahmasebi, D., 2011. Effect of drought stress on the qualitative and quantitative characteristics of the new modified sugar beet varieties. Journal of Cellular and Molecular Biotechnology Works. 1, 74-65. [In Persian with English summary].

Boeckx, T., Winters, A.L., Webb, K.J., Kingston-Smith, A.H., 2015. Polyphenol oxidase in leaves: Is there any significance to the chloroplastic ocalization? Journal of Experimental Botany, 66, 3571–3579.

Fotouhi, K., Majidi, E., Rajabi, A., Azizinejad, R., 2017. Study of genetic variation for drought tolerance in sugar beet half-sib families. Journal of Sugar beet, 33, 1-16. [In Persian with English summary].

Gill, S.S., Tuteja, N. 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. Plant Physiology and Biochemistry.48, 909–930.

Habibi, D., Fatollah Taleghani, D., Oroojnia, S., 2011. Physiological Evaluation of Sugar Beet Genotypes under Drought Stress. 2011 2nd International Conference on Chemical Engineering and Applications IPCBEE vol. 23 (2011) © (2011) IACSIT Press, Singapore.

Halliwell, B., Gutteridge, J.M., 2015. Free radicals in biology and medicine. Oxford University Press, USA, 569 P.

Heuer. B., 1994. Osmoregulatory role of proline in water stress and salt-stressed plants, 363-381. In: Pessarakli. M., (Ed.). Handbook of Plant and Crop Stress. Marcel Dekker Publisher. New York. P. 697.

Hirayama, M., Wada, Y., Nemot, H., 2006. Estimation of drought tolerance based on leaf temperature in upland rice breeding. Breeding Science 56, 47-54

Hosseini, M., Hasanloo, T., Mohammadi, S., 2015. Physiological characteristics, antioxidant

enzyme activities, and gene expression in 2 spring canola (*Brassica napus* L.) cultivars under drought stress conditions. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 3, 413-420.

Huguet-Robert, V., Sulpice, R., Lefort, C., Maerskalck, V., Emery, N., Larcher, F.R., 2003. The suppression of osmoinduced stresse response of *Brassica napus* L. var. oleifera leaf discs by polyunsaturated fatty acids and methyljasmonate. Plant Science. 164,119-127.

Ilkai, M., Foroozeh, P., Habibi, D., Fathollah Taleghani, D., Rajabi, A., Orujnia, S., Davoodifard, M., 2012. Investigation of biochemical characteristics of different sugar beet genotypes under drought conditions. Iranian Journal of Agronomy and Plant Breeding, 8, 87-99. [In Persian with English summary].

Islam, M.D., Kim, J. W., Begum, K., Taher Sohel, A., Lim,Y. S, 2021. Physiological and biochemical changes in sugar beet seedlings to confer stress adaptability under drought condition. Plants. 9, 1-27.

Iturbe-ormaetxe, I., Escuredo, P.R., Arrese-Igor, C., Becana, M., 1998. Oxidative damage in pea plant exposed to water deficit or paraquat. Plant Physiology, 116, 173-181.

Khalili, M., Hamze. H. 2021. Effect of different fertilizer treatments on quantitative and qualitative characteristics of sugar beet (*Beta vulgaris*.L) under different irrigation regimes. Journal of Agricultural Science and Sustainable Production. 31(1), 171-192. [In Persian].

Khalili, M., Hamze. H., 2019. Effect of super-adsorbent and irrigation levels on quantitative and qualitative characteristics of sugar beet (*Beta vulgaris*). Journal of Crop Ecophysiology. 13, 395-412. . [In Persian with English summary].

Khozaei, M., Kamgar, A., Haghighi, A., Zand Parsa, S., Sepaskhah, A.R., Razzaghi, F., Yousefabadi, V., Emamd, Y., 2020. Evaluation of direct seeding and transplanting in sugar beet for water productivity, yield and quality under different irrigation regimes and planting densities. Agricultural Water Management. 238, 1-12.

Krishna, P., Govindasamy Mugesh, B., 2010. Functional Mimics of Glutathione Peroxidase: Bio inspired Synthetic Antioxidants. Accounts of Chemical Research> 43 (11),1408- 1419.

Lee, B. R., Kim, K. Y., Jung, W.J., Avice, J.C., Ourry, A., Kim, T. H., 2007. Peroxidases and lignification in relation to the intensity of water-deficit stress in white clover (*Trifolium repens* L.). Journal of Experimental Botany, 58, 1271–1279.

Manivannan, P., Jaleel, C.A., Kishorekumar, A., Sankar, B., Somasundaram, R., Sridharan, R., Panneerselvam, R., 2007a. Changes in antioxidant metabolism of *Vigna unguiculata* L. Walp., by propiconazole under water deficit stress. Colloids Surf. B: Biointerfaces, 57, 69–74

Mir Mahmoudi, T., Fotouhi, K., Hamza, H., Azizi H., 2021. Study of the effect of salinity stress on quantitative and qualitative characteristics of sugar beet genotypes. Environmental Stresses in Crop Sciences, 14, 221-233. . [In Persian with English summary].

Mirzaee, M., Moieni, A., Ghanati, F., 2013. Effects of drought stress on the lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities in two Canola (*Brassica napus* L.) cultivars. Journal of Agricultural Science and Technology. 15, 593-602.

Monreal, J.A., Jim´enez, E.T., Remesal, E., Morillo-Velarde, R., Garc´ıa-Mauri˜no, S., Echevarr´ıa, C., 2007. Proline content of sugar beet storage roots: Response to water deficit and nitrogen fertilization at field conditions. Environmental and Experimental Botany. 60, 257–267.

Ober, E.S., Luterbacher, M.C., 2002. Genotypic variation for drought tolerance in *Beta vulgaris*. Oxford Journals. 89, 917-924.

Pahlavanian Miandoab, S.H., Dadashi, M. R., Mir Mahmoudi, T., Shahrooghbi, A., Adjam Norouzi, H., 2021. Study Qualitative and quantitative traits of sugar beet cultivars at different planting times in transplanting and seedling cultivation system in West Azarbaijan area. Journal of Crop Production.13, 23-40. . [In Persian with English summary].

Pidgeon, J.D., Ober, E., Qi, A., Clark, C.J.A., Royal, A., Jaggard, K.W., 2006. Using multi-environment sugar beet variety trials to screen for drought tolerance. Field Crops Research. 95, 268-279.

Sayfzadeh, S., Habibi, D., Fathollah taleghani, D., Kashani, A., Vazan,S., Hossein sadre qaen, S., Habib Khodaei,A., Masoud Mashhadi Akbar Boojar, M., Rashid, M., 2011. Response of antioxidant enzyme activities and root yield

in sugar beet to drought stress. International Journal of Agriculture & Biology, 13, 357–362

Schittenhel, M.S., 1999. Agronomic performance of root chichory, Jerursalem artichoke and sugar beet in stress and non-stress environments. Crop Science. 39, 1815-1823.

Shen, C., Zhang, Q., Li, J., Bi, F., Yao, N., 2010. Induction of programmed cell death in Arabidopsis and rice by single-wall carbon nanotubes. American Journal of Botany. 97, 1602–1609.

Vahidi, H., Rajabi, A., Seyed Hadi, M., Fathollah Taleghani, D., 2013. Screening of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) genotype for drought tolerance. Journal of Agriculture and Crop Sciences. 6(16), 1104-1113.