

## بررسی واکنش‌های فیزیولوژیکی چند ژنوتیپ چغندر قند در سطوح مختلف تنش

### شوری

پریا نوری، سدابه جهان بخش<sup>\*</sup>، سلیم فرزانه، سیده یلدا رئیسی ساداتی و سعید حیدرزاده گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

### چکیده

شوری از مهم‌ترین تنش‌های محیطی است که گسترش روزافزون آن، رشد و عملکرد گیاهان زراعی را کاهش می‌دهد، در این راستا شناسایی ارقام چغندر قند متحمل به تنش شوری جهت بهبود واکنش‌های فیزیولوژیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به همین منظور پژوهشی جهت بررسی ویژگی‌های فیزیولوژیکی ژنوتیپ‌های چغندر قند تحت تنش شوری در سال ۱۳۹۹ انجام گرفت. این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دانشگاه محقق اردبیلی تحت شرایط گلخانه‌ای انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل ژنوتیپ‌های مختلف چغندر قند (۹ ژنوتیپ) به عنوان فاکتور اول و تنش شوری به عنوان فاکتور دوم در چهار سطح (شاهد و ۴، ۸ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) بودند. نتایج نشان داد که اثرات تنش شوری بر محتوای کلروفیل، پروتئین محلول، محتوای پرولین، قندهای محلول و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز) ارقام مختلف چغندر قند معنی‌دار بود. سطوح بالاتر تنش شوری (۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) موجب افزایش معنی‌دار پروتئین محلول، محتوای پرولین، قندهای محلول و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز نسبت به سایر سطوح تنش شوری و تیمار شاهد شد. در حالی که، بیش‌ترین محتوای کلروفیل a، b و کلروفیل کل در رقم شماره ۱۵ و ۴ در تیمار عدم اعمال تنش شوری مشاهده شد. در ژنوتیپ‌های مورد مطالعه، ژنوتیپ‌های شماره ۶، ۱۵ و ۲۰ از بیش‌ترین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در شرایط تنش شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر برخوردار بودند. لذا، در سطوح بالاتر تنش شوری، ارقام مقاوم چغندر قند با بهبود محتوای اسمولیت‌های سازگار و فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی از طریق حفظ ساختار غشاء از کاهش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی جلوگیری می‌کنند.

**واژه‌های کلیدی:** آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، پرولین، تنش شوری، چغندر قند

### مقدمه

چغندر قند گیاه صنعتی جدیدی است که حاصل تلاش‌های مدام به‌نژادگران طی دو قرن گذشته است. (اسدی نسب و همکاران، ۱۳۹۳). چغندر قند یکی از مهم‌ترین محصولات بخش کشاورزی و صنعت است، و سهم قابل چشم‌گیری در رونق فعالیت‌های صنعتی بوده دارد (فرهودی و همکاران، ۱۳۹۹). (Heydarzadeh et al., 2021). از آنجا که، چغندر قند جزو محصولات کشاورزی پایه و ماده اولیه تولید شکر و قند کشور است، در نتیجه از جنبه‌های اقتصادی دارای اهمیت بیشتری می‌باشد. سطح زیر کشت چغندر قند در کشور حدود ۵۶ هزار هکتار است و تقریباً عملکرد ریشه آن نزدیک به ۳۴ تن در هکتار می‌باشد (Heydarzadeh et al., 2021).

<sup>\*</sup> نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: jahanbakhsh@uma.ac.ir

شوری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیر زنده در مناطق خشک و نیمه‌خشک، از جمله عوامل مهم محدودکننده‌ی رشد رویشی و زایشی بیش‌تر گیاهان است، به گونه‌ای که میانگین عملکرد گیاهان زراعی را تا حدود ۵۰٪ کاهش می‌دهد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۵). به گونه میانگین ۲۰۰۰ هکتار از زمین‌های آبیاری شده در مناطق خشک و نیمه‌خشک ۷۵ کشور دنیا توسط نمک تخریب می‌شود (نیازیان و همکاران، ۱۳۹۵). در ایران شوری منابع آب و خاک، یکی از مشکلات کشاورزی محسوب می‌شود، به گونه‌ای که مساحت اراضی شور ایران در حدود ۲۴ میلیون هکتار است که معادل ۱۵٪ از اراضی کشور است (نیازیان و همکاران، ۱۳۹۵). شوری آب و خاک سبب بروز تغییرات مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی متعددی در گیاهان می‌شود، به‌علاوه تحمل شوری در گیاهان یکسان نیست و در یک گیاه نیز مراحل مختلف رشد و نمو ممکن است حساسیت‌های متفاوتی (در مراحل اولیه جوانه‌زنی حساس به شوری و در مراحل رشد رویشی مقاوم به شوری است) نسبت به تنش شوری نشان دهد (Abd El-Mageed *et al.*, 2021). پاسخ گیاهان به تنش شوری در برگ‌گیرنده پاسخ‌های متنوع بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی به ویژه در مرحله گیاهچه‌ای بوده، در عین حال این پاسخ‌ها پیچیده بوده و به عوامل متفاوتی همچون مرحله رشد گیاه، نوع و غلظت املاح، پتانسیل ژنتیکی گیاه و به عوامل محیطی، بستگی دارد (Abu-Ellail *et al.*, 2020). تنش شوری در ابتدا جوانه‌زنی بذر و طول گیاهچه را در مراحل اول رشد کاهش می‌دهد و در مراحل بعدی رشد، موجب کاهش تولید و در نتیجه سبب کاهش عملکرد می‌شود (Ahmad *et al.*, 2019). توسعه سطح برگ یا زیست توده ساقه از حساس‌ترین و مهم‌ترین شاخصه‌های رشد هستند (Ahmed *et al.*, 2022). از پاسخ‌های بیوشیمیایی گیاهان در برابر تنش شوری، تجمع اسمولیت‌های سازگار مانند قندهای محلول و پرولین است (Alavilli *et al.*, 2023). گیاهان استراتژی‌های مختلفی نظیر تنظیم جذب یون به‌وسیله ریشه و انتقال آن به قسمت‌های مختلف گیاه، تغییر آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی، تغییر مکانیسم‌های فتوسنتزی برای کاهش اثرات سمیت نمک و جلوگیری از آسیب گونه‌های فعال اکسیژن در سطح کل گیاه دارند (Aycan *et al.*, 2023). در تنش شوری، ارقام مقاوم توانایی آن را دارند که یون‌های معدنی مثل پتاسیم را جمع کنند که باعث کاهش پتانسیل اسمزی سلول می‌شود، در نتیجه باعث جذب و حفظ آب بیشتر از سلول‌های ریشه و بافت‌های تحت تنش می‌شوند (Bouras *et al.*, 2021). بنابراین شناخت ویژگی‌های فیزیولوژیکی-زراعی مربوط به تحمل گیاه در مقابله با شوری در ژنوتیپ‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و می‌تواند کمک موثری در گزینش و معرفی ارقام مناسب برای شرایط شور باشد (El-Mageed *et al.*, 2022). طبق مطالعات انجام شده پژوهشگران ویژگی‌های رشدی چون سطح برگ، تعداد برگ، سرعت رشد نسبی و سرعت جذب خالص (سرعت فتوسنتز خالص) گیاه چغندر قند در شرایط تنش شوری کمتر می‌شوند، این رخدادهای می‌تواند به کاهش استفاده از نور بازگشته از کاهش حداکثر فلورسانس از طریق افزایش مقدار فلورسانس در فتوسیستم دو و حداکثر عملکرد کوانتومی در ارتباط باشند (Gholipor *et al.*, 2022). گزارش شده است که رنگدانه‌های فتوسنتزی ارقام مختلف چغندر قند تحت تنش شوری کاهش یافت اما میزان پرولین و پروتئین کل محلول و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان از جمله پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز در رقم حساس افزایش یافت (Hossain *et al.*, 2021). در گیاه کلزا (Raees *et al.*, 2023) و سویا (Mangena, 2011) و جو (Ghonaim *et al.*, 2023) محتوای کلروفیل گیاه کاهش یافت، در حالی که قندهای محلول، پرولین و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل-اکسیداز) گیاه با افزایش شوری به شدت افزایش پیدا کرد. با توجه به شوری خاک‌های زراعی ایران و گسترش روز افزون آن با کاهش نزولات آسمانی، شناسایی ارقام چغندر قند متحمل به تنش شوری جهت بهبود عملکرد کمی و کیفی

از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، لذا هدف از این پژوهش ارزیابی ژنوتیپ‌های مختلف چغندر قند از نظر برخی از صفات فیزیولوژیکی در مرحله گیاهچه‌ای تحت تنش شوری و بدون تنش شوری بود.

## مواد و روش‌ها

این پژوهش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در گلخانه دانشگاه محقق اردبیلی جهت بررسی صفات فیزیولوژیکی برخی ژنوتیپ‌های مختلف چغندر قند تحت تنش شوری در سال ۱۳۹۹ طراحی و انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل ۹ ژنوتیپ مختلف چغندر قند (جدول ۱) به عنوان فاکتور اول و تنش شوری (کلرید سدیم) در چهار سطح (شاهد و ۴، ۸ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) به عنوان فاکتور دوم بودند.

جدول ۱- ژنوتیپ‌های مختلف چغندر قند مورد استفاده در این آزمایش

|                             |                        |           |
|-----------------------------|------------------------|-----------|
| SHR.1-P12                   | 4=419*SB36=419*KWS=006 | 33-----41 |
|                             | 5=231*261              | 31-----42 |
| F-8662=31192                | 6=SB37*28874=31459     | 21-----60 |
|                             | 9=419*SB36=419*KWS=006 | 22-----57 |
| FC709-2/24                  | 12=SB37*28874=31459    | 38-----48 |
|                             | 15=7112*436            | 39-----47 |
| S <sub>1</sub> -88239=31187 | 17=SB37*28874=31459    | 30-----51 |
|                             | 19=7112*SB36=7112*KWS  | 27-----55 |
|                             | 20=7112*436            | 29-----54 |

بذور چغندر قند مورد مطالعه از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل تهیه شدند و بعد از ضدعفونی با وایتکس (هیپوکلریت سدیم) ۱۰ درصد، بر روی کاغذ صافی قرار گرفته و در ادامه به مدت دو روز برای جوانه‌زنی در داخل دستگاه ژرمیناتور در دما  $25 \pm 2$  و ۱۶ ساعت نور در شبانه روز قرار داده شد. سپس بذور جوانه‌دار شده به درون گلدان‌های پلاستیکی حاوی خاک معمولی، ماسه بادی به نسبت ۲ به ۱ و هدایت الکتریکی بستر کشت با ۰/۲ دسی‌زیمنس بر متر انتقال یافت و مورد کشت قرار گرفت. برای محاسبه غلظت محلول‌های نمک کلرید سدیم از معادله‌ی ۱ استفاده شد (Yolcu et al., 2021).

$$TDS = EC \times 0.64 \quad (1)$$

که در آن EC هدایت الکتریکی بر حسب دسی‌زیمنس بر متر و TSD میزان نمک مورد استفاده بر حسب گرم در لیتر می‌باشد. جهت اطمینان از EC بدست آمده از معادله با استفاده از EC متر هدایت الکتریکی تمامی محلول‌های مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند.

میزان نمک مورد نیاز برای هر سطح شوری در آب حل شد و سپس در شروع آزمایش به خاک اضافه شدند. گلدان‌ها به مدت یک هفته مرتب آبیاری شدند تا کل نمک در خاک پخش شود. اعمال تنش شوری سه بار و به فاصله هر سه روز یکبار در مراحل چهار و هشت برگی چغندر قند انجام شد و سپس تا مرحله برداشت، گلدان‌ها هر چهار روز یکبار، با آب مقطر آبیاری شدند. بعد از اعمال تنش شوری هدایت الکتریکی خاک برای اطمینان از انجام صحیح شوری خاک،

تعیین شد. همچنین در پایان آزمایش در مرحله هشت برگی نیز هدایت الکتریکی خاک دوباره اندازه‌گیری شد. تغذیه گیاه با کودهای (N.P.K) از مرحله اولیه رشد هر هفته یک بار انجام شد. گلدان‌ها در شرایط گلخانه‌ای با تنظیم دمای روزانه محدوده  $25 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد و دمای شبانه  $15 \pm 3$  درجه سانتی‌گراد با طول دوره روشنایی ۱۵-۱۶ ساعت و تاریکی ۸ ساعت و نیز رطوبت ۴۰ الی ۵۰٪ نگهداری شدند. بذور کاشته شده در گلدان‌ها به تعداد ۲۵ عدد بود و پس از کاشت بذرها سبز شده روزانه شمارش شده و جهت محاسبه صفات سبزشدن ثبت شدند. همچنین نمونه‌ها برگی در مرحله ۴ برگی و ۸ برگی برای اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیکی در فویل آلومینیوم قرار داده شد و پس از انجماد سریع در نیتروژن مایع به آزمایشگاه در یخچال  $70^-$  درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

**محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی:** محتوای کلروفیل و کاروتنوئید برگ با استفاده از روش آرنون (Arnon, 1967) اندازه‌گیری شد.  $0.2$  گرم از بافت برگ پرچم را با استن  $80$  درصد به تدریج له کرده تا کلروفیل وارد محلول استونی شود و در نهایت حجم محلول با استن  $80$  درصد به حجم  $20$  میلی‌لیتر رسانده شد. محلول حاصل به مدت  $10$  دقیقه در  $4000$  دور سانتریفیوژ شد و سپس جذب نوری محلول رویی در طول موج‌های  $645$  و  $663$  نانومتر توسط اسپکتروفتومتر قرائت شد. غلظت پروتئین به روش Bradford (1976) تعیین شد و میزان پروتئین در طول موج  $595$  نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شد. سنجش قندهای کل برگ به روش Dubios و همکاران (1956) انجام شد. بدین منظور ابتدا  $0.5$  گرم از بافت برگی برداشته و سپس  $5$  میلی‌لیتر اتانول  $95$  درصد به آن افزوده شد و برای مدت  $30$  ثانیه ورتکس گردید. سپس مایع رویی به مدت  $15$  دقیقه سانتریفیوژ شد. پس از جداسازی محلول رویی،  $0.1$  میلی‌لیتر از عصاره‌ی الکلی برداشته و داخل لوله‌های آزمایش ریخته شد. بعد از آن  $3$  میلی‌لیتر آنترون به آن اضافه و به مدت  $10$  دقیقه در بن ماری قرار گرفت. بعد نمونه‌ها در طول موج  $625$  نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شد. برای استخراج پرولین برگ از روش Bates (1973) استفاده شد. بدین منظور  $0.1$  گرم بافت برگی در  $10$  میلی‌لیتر سولفوسالیسیلیک اسید  $3$  درصد به خوبی سائیده و همگنای به دست آمده سانتریفیوژ گردید. سپس در فالکن دیگری،  $2$  میلی‌لیتر از عصاره حاصل با  $2$  میلی‌لیتر معرف نین هیدرین و  $2$  میلی‌لیتر اسید استیک گلاسیال خالص ترکیب شد. سپس فالکن‌ها به مدت  $1$  ساعت در بن ماری با دمای  $100$  درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و بعد از افزودن  $4$  میلی‌لیتر تولوئن به هر فالکن، مدت  $15$  تا  $20$  ثانیه ورتکس شدند. پس از ایجاد دو فاز مجزا، فاز رویی رنگی، با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج  $520$  نانومتر قرائت شد.

**سنجش فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز:** جهت تهیه عصاره آنزیمی  $0.1$  میلی‌گرم نمونه‌ی فریز شده وزن‌تر برگ، در  $1/2$  میلی‌لیتر بافر تریس  $0.05$  میلی‌مولار و با  $pH=7.5$  ساییده و مدت  $20$  دقیقه در  $8000$  دور در دقیقه سانتریفیوژ گردید. از این عصاره برای سنجش آنزیم کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل اکسیداز استفاده گردید (Sudhakar et al., 2001). جهت سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز پس از آماده‌سازی عصاره آنزیمی  $3$  میلی‌لیتر بافر فسفات  $50$  میلی‌مولار،  $0.1$  میلی‌لیتر  $H_2O_2$   $15$  میلی‌مولار و  $0.05$  میلی‌لیتر از عصاره سلولی را ریخته و در طول موج  $240$  نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت گردید. سرانجام فعالیت آنزیمی بر حسب تغییرات واحد جذب در دقیقه به ازای هر میلی‌گرم پروتئین محاسبه شدند (Meahly and Chans, 1995). برای اندازه‌گیری میزان فعالیت پراکسیداز نیز از روش کار و میشر (Karo and Mishra, 1976) استفاده گردید، به این صورت که تریس اسیدکلریدریک  $100$  میلی‌مولار با پیروگالول  $10$  میلی‌مولار و آب اکسیژنه  $5$  میلی‌مولار مخلوط و از مخلوط به دست آمده  $2/5$  میلی‌لیتر برداشته و به آن  $50$  میکرو لیتر عصاره آنزیمی (در روش کاتالاز تهیه گردید) افزوده شد و سپس، ورتکس انجام و قرائت در طول موج

۴۲۵ نانومتر صورت گرفت. فعالیت سینتیکی آنزیم پلی فنل اکسیداز با روش کار و میشر (Karo and Mishra, 1976) بررسی شد. بدین صورت که ۱/۵ میلی لیتر تریس ۰/۲ مولار، ۰/۳ میلی لیتر پیروگالول ۰/۰۲ مولار و ۰/۱ میلی لیتر عصاره آنزیمی اضافه شده و در طول موج ۴۲۰ نانومتر پس از گذشت ۵ دقیقه قرائت شد. سرانجام فعالیت آنزیمی بر حسب تغییرات واحد جذب در دقیقه به ازای هر میلی گرم پروتئین محاسبه شد. تجزیه و تحلیل های آماری داده های حاصل از این آزمایش، با استفاده از نرم افزار SAS 9.1 صورت گرفت و مقایسه میانگین ها به روش LSD در سطح احتمال ۰/۵ انجام شد.

## نتایج و بحث

مطابق جدول ۲ تجزیه واریانس، برهمکنش تنش شوری و ژنوتیپ چغندر قند در مرحله چهار برگی بر محتوای کلروفیل a، کلروفیل a+b، پروتئین محلول، فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدان کاتالاز، پراکسیداز و پلی فنل اکسیداز معنی دار بودند (جدول ۲). اثر ساده تنش شوری و ژنوتیپ چغندر قند بر کلروفیل b و پرولین معنی دار بود (جدول ۲). در حالی که قند محلول فقط تحت تاثیر تنش شوری دارای تاثیر معنی داری بود (جدول ۲).

جدول ۲- تجزیه واریانس تاثیر تنش شوری بر برخی صفات فیزیولوژیکی برگ ژنوتیپ چغندر قند در مرحله چهار برگی

| پلی فنل -<br>اکسیداز | پراکسیداز | میانگین مربعات |        |              |         |           | کلروفیل<br>a+b | کلروفیل<br>b | کلروفیل<br>a | ژنوتیپ              | تنش شوری |
|----------------------|-----------|----------------|--------|--------------|---------|-----------|----------------|--------------|--------------|---------------------|----------|
|                      |           | کاتالاز        | پرولین | قند<br>محلول | پروتئین | پراکسیداز |                |              |              |                     |          |
| ۲۶۸/۸۲**             | ۱/۳۴**    | ۵۷/۳**         | ۰/۹۲ns | ۱۳۲/۵۲**     | ۳/۵۶**  | ۲/۸۹**    | ۰/۹۵**         | ۰/۵۴**       | ۲            | تکرار               |          |
| ۱                    | ۳۸        |                |        | ۸            | ۴       |           |                |              |              |                     |          |
| ۸۵۶/۸۷**             | ۹/۲۵**    | ۴۹۱/۱۵**       | ۱/۹۶** | ۷۴۴/۹۶**     | ۲/۲۲**  | ۰/۰۸۱**   | ۰/۵۷**         | ۲/۲۶**       | ۳            | تنش شوری<br>(A)     |          |
|                      | ۳۹        |                | ۳      |              | ۹       |           |                |              |              |                     |          |
| ۴۸/۱۵**              | ۱/۴۹**    | ۱۳/۴۶**        | ۱/۷۶** | ۱۳/۱۲ns      | ۲/۳۲**  | ۰/۶۴**    | ۰/۰۸**         | ۰/۲۸**       | ۸            | ژنوتیپ (B)          |          |
|                      | ۸         |                |        |              |         |           |                |              |              |                     |          |
| ۳۰/۹۷**              | ۲/۶۴**    | ۱۳/۱۳**        | ۰/۳۸ns | ۱۰/۷۸ns      | ۰/۹۹*   | ۰/۱**     | ۱/۰۰۶۸ns       | ۰/۰۸*        | ۲۴           | A×B                 |          |
|                      | ۴         |                |        |              |         |           |                |              |              |                     |          |
| ۵/۴۳                 | ۶/۵۲      | ۴/۱۶           | ۰/۳۲   | ۸/۰۹         | ۰/۴۹    | ۰/۰۴۱     | ۰/۰۰۷۱         | ۰/۰۴۱        | ۷۰           | خطا                 |          |
| ۴/۲۹                 | ۴/۵۲      | ۴/۶۱           | ۱۱/۳۸  | ۴/۹۴         | ۶/۳۲    | ۴/۵۹      | ۶/۶۸           | ۶/۳۵         | -            | ضریب تغییرات<br>(%) |          |

ns، \*، \*\* و ns به ترتیب نشان دهنده معنی دار بودن در سطح احتمال پنج، یک و عدم معنی داری می باشد.

اثر برهمکنش تنش شوری × ژنوتیپ چغندر قند در مرحله هشت برگی نمونه برداری بر محتوای کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل a+b، پروتئین محلول، پرولین، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان کاتالاز، پراکسیداز، پلی‌فنل اکسیداز و عملکرد ریشه معنی‌دار بودند (جدول ۳). در حالی که قند محلول فقط تحت تاثیر تنش شوری قرار گرفت (جدول ۳).

جدول ۳- تجزیه واریانس تاثیر تنش شوری بر برخی صفات فیزیولوژیکی ژنوتیپ چغندر قند در مرحله هشت برگی

| منابع تغییر  | درجه آزادی | میانگین مربعات |           |             |               |                     |         |          |           |                 |
|--------------|------------|----------------|-----------|-------------|---------------|---------------------|---------|----------|-----------|-----------------|
|              |            | کلروفیل a      | کلروفیل b | کلروفیل a+b | پروتئین محلول | قند محلول           | پرولین  | کاتالاز  | پراکسیداز | پلی‌فنل-اکسیداز |
| تکرار        | ۲          | ۰/۵**          | ۰/۷۴**    | ۱/۸۲**      | ۱۲/۹**        | ۱۲۷۴/۸**            | ۵/۴**   | ۱۱۸/۳۲** | ۱۲۰۸/۰۳** | ۱۴۳۳/۹۲**       |
| تنش شوری (A) | ۳          | ۱/۲۵**         | ۰/۴۵**    | ۳/۲**       | ۱۹/۳۶**       | ۷۶۱/۴**             | ۲۲/۰۴** | ۶۹۷/۳۷** | ۹۶۱/۱۶**  | ۸۵۸/۳۲**        |
| ژنوتیپ (B)   | ۸          | ۰/۱۷**         | ۰/۰۴۹**   | ۰/۳۹**      | ۱/۵۲**        | ۲۸/۰۵ <sup>ns</sup> | ۰/۹۹**  | ۲۷/۰۸**  | ۷۴/۷**    | ۴۶/۳۶**         |
| A×B          | ۲۴         | ۰/۰۴۳**        | ۰/۰۱۳**   | ۰/۰۹۹**     | ۰/۹**         | ۴/۱ <sup>ns</sup>   | ۰/۴۹*   | ۲۱/۴۷**  | ۱۳/۹۷**   | ۳۰/۲۰**         |
| خطا          | ۷۰         | ۰/۰۲           | ۰/۰۰۴۹    | ۰/۰۳۶       | ۰/۱۷          | ۱۳/۹۹               | ۰/۲۹    | ۵/۶۹     | ۴/۴۶      | ۶/۹۹            |
| ضریب         | -          | ۴/۹۲           | ۶/۰۴      | ۴/۷۵        | ۴/۲۲          | ۶/۸                 | ۱۰/۶۹   | ۵/۲۲     | ۴/۰۲      | ۴/۶۴            |
| تغییرات (%)  | -          |                |           |             |               |                     |         |          |           |                 |

ns، \*\* و \* به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌دار بودن در سطح احتمال پنج، یک و عدم معنی‌داری می‌باشد.

**محتوای کلروفیل:** براساس نتایج، بیش‌ترین محتوای کلروفیل a و کلروفیل a+b (به ترتیب ۳/۶۹۷ و ۵/۱۰۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) در رقم شماره ۱۵ در تیمار عدم اعمال شوری مشاهده شد که از افزایش به ترتیب ۳۸/۰۵ و ۳۸/۷۹٪ نسبت به شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر در رقم شماره ۴ برخوردار بود (جدول ۴). همچنین، تنش شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر موجب کاهش ۳۲/۵ و ۱۲/۰۱٪ محتوای کلروفیل b نسبت به تیمار شاهد شوری شد (جدول ۵). رقم شماره ۹ نیز از بیش‌ترین محتوای کلروفیل b (۱/۳۴۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) برخوردار بود (جدول ۵). ارقام ۱۹ و ۹ در شرایط شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر از کم‌ترین محتوای کلروفیل a، کلروفیل b و کلروفیل a+b (به ترتیب ۲/۴۷۱، ۹۰۶ و ۳/۴۱۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) و ارقام شماره ۱۵ و ۴ تحت شرایط عدم اعمال شوری (به ترتیب ۳/۲۸۹، ۱/۳۹۱ و ۴/۶۷۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) از بیش‌ترین محتوای این صفات برخوردار بودند (جدول ۴). به نظر می‌رسد کاهش محتوای کلروفیل در تنش شوری می‌تواند به دلیل کاهش عناصر اثرگذار از جمله منگنز، منیزیم، نیتروژن و آهن در ساختمان کلروفیل، تخریب کلروفیل و افزایش حساسیت برگ به اتیلن و تجمع یون کلر باشد (Hussain et al., 2014). همچنین، گزارش شده است که در شرایط شوری جذب نیترات به وسیله رقابت مستقیم کلرید با نیترات و تغییر یافتن غشاء پلاسمایی تحت تاثیر قرار گرفته (Islam et al., 2022) و همین موضوع نیز می‌تواند دلیلی بر کاهش محتوای کلروفیل در شرایط شوری باشد. برخی پژوهشگران معتقدند شوری با اختلال در تعادل کمپلکس‌های پروتئین-رنگیزه،

القای تخریب کلروپلاست و افزایش فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده کلروفیل، محتوای کلروفیل را کاهش می‌دهد (Khayamim *et al.*, 2021). اسدی‌نسب و همکاران (۱۳۹۳) گزارش کردند که تنش شوری از طریق کاهش وزن ریشه موجب کاهش کلروفیل ارقام چغندر قند شد، همچنین این پژوهشگران اظهار داشتند که ارقام چغندر قند متحمل به تنش شوری از طریق حفظ ساختار ریشه خود در شرایط تنش شوری، از محتوای کلروفیل بیشتری نسبت به سایر ارقام برخوردار بودند.

**محتوای پروتئین:** براساس نتایج حاصل از مراحل چهار و هشت برگی نمونه‌برداری، کم‌ترین محتوای پروتئین محلول برگ چغندر قند در سطوح بالاتر تنش شوری مشاهده شد (جدول ۴). به گونه‌ای که در مراحل چهار و هشت برگی نمونه‌برداری کم‌ترین محتوای پروتئین برگ چغندر قند (به ترتیب ۳۲/۰۹ و ۲۷/۲۹ میلی‌گرم در میلی‌لیتر) در ارقام شماره ۶ و ۵ تحت شرایط شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر و بیش‌ترین محتوای این صفت (به ترتیب ۵۱/۸۹ و ۴۵/۱۹ میلی‌گرم در میلی‌لیتر) در ارقام شماره ۹ و ۵ در تیمار عدم اعمال تنش شوری مشاهده شد (جدول ۴). به نظر می‌رسد کاهش محتوای پروتئین محلول برگ در شرایط تنش به دلیل کاهش سنتز پروتئین، افزایش فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده پروتئین و واکنش پروتئین با رادیکال‌های آزاد باشد (Li *et al.*, 2022). گزارش کردند که با افزایش سطوح تنش شوری بر میزان پروتئین برگ چغندر قند افزوده می‌شود (Mekdad *et al.*, 2021). همچنین میرمحمودی و همکاران (۲۰۲۱) دریافتند که میزان پروتئین محلول گیاه چغندر قند در حضور کلرید سدیم به‌طور قابل توجهی افزایش یافت.

جدول ۴- مقایسه میانگین تاثیر تنش شوری بر محتوای پروتئین و پرولین برخی ژنوتیپ چغندر قند

| شوری           | ارقام چغندر قند | مرحله چهار برگی                    |                                      | مرحله هشت برگی                     |                                    |
|----------------|-----------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
|                |                 | کلروفیل a<br>(میلی‌گرم وزن تر برگ) | کلروفیل a+b<br>(میلی‌گرم وزن تر برگ) | کلروفیل a<br>(میلی‌گرم وزن تر برگ) | کلروفیل b<br>(میلی‌گرم وزن تر برگ) |
| عدم اعمال شوری | ۴               | ۳/۴۱۷ <sup>a-g</sup>               | ۴/۷۵۹ <sup>b-h</sup>                 | ۳/۲۸۹ <sup>a</sup>                 | ۱/۳۸۷ <sup>a</sup>                 |
|                | ۵               | ۳/۶۶۸ <sup>ab</sup>                | ۵/۰۱۵ <sup>abc</sup>                 | ۳/۲۶۷ <sup>ab</sup>                | ۱/۳۷۸ <sup>a</sup>                 |
|                | ۶               | ۳/۵۰۳ <sup>a-e</sup>               | ۴/۸۳۳ <sup>a-g</sup>                 | ۳/۰۹۴ <sup>a-f</sup>               | ۱/۲۹۵ <sup>a-e</sup>               |
|                | ۹               | ۳/۴۰۴ <sup>a-h</sup>               | ۴/۹۳۹ <sup>a-e</sup>                 | ۳/۲۲۱ <sup>a-d</sup>               | ۱/۳۵۶ <sup>abc</sup>               |
|                | ۱۲              | ۳/۱۳۴ <sup>f-k</sup>               | ۴/۶۰۴ <sup>f-i</sup>                 | ۲/۹۸۵ <sup>e-i</sup>               | ۱/۲۳۳ <sup>d-h</sup>               |
|                | ۱۵              | ۳/۶۹۷ <sup>a</sup>                 | ۵/۱۰۲ <sup>a</sup>                   | ۳/۲۸۳ <sup>a</sup>                 | ۱/۳۹۱ <sup>a</sup>                 |
|                | ۱۷              | ۳/۶۴۵ <sup>abc</sup>               | ۵/۰۵۱ <sup>abc</sup>                 | ۳/۰۰۵ <sup>d-i</sup>               | ۱/۲۳۴ <sup>d-g</sup>               |
|                | ۱۹              | ۳/۶۹۱ <sup>a</sup>                 | ۵/۰۸۶ <sup>ab</sup>                  | ۳/۰۴۶ <sup>b-g</sup>               | ۱/۲۶ <sup>b-f</sup>                |
|                | ۲۰              | ۳/۳۹۶ <sup>a-h</sup>               | ۴/۶۷۹ <sup>d-i</sup>                 | ۳/۱۴ <sup>a-e</sup>                | ۱/۳۱۹ <sup>a-d</sup>               |
|                | ۴               | ۳/۳۳ <sup>c-h</sup>                | ۴/۵۸۲ <sup>g-j</sup>                 | ۳/۲۳۸ <sup>abc</sup>               | ۱/۳۶۵ <sup>ab</sup>                |

|                     |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |     |
|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----|
| ۴/۲۴ <sup>i-m</sup> | ۱۰/۱۶ <sup>f-i</sup> | ۳/۹۶۶ <sup>h-m</sup> | ۱/۱۳۵ <sup>g-k</sup> | ۲/۸۳۱ <sup>g-m</sup> | ۱۱/۰۵ <sup>e-i</sup> | ۴/۶۴۷ <sup>e-i</sup> | ۳/۳۹ <sup>a-h</sup>  | ۵   |
| ۴/۷۱ <sup>g-k</sup> | ۹/۲۲ <sup>j-m</sup>  | ۴/۲۸۲ <sup>c-g</sup> | ۱/۲۶۲ <sup>b-f</sup> | ۳/۰۱۹ <sup>c-h</sup> | ۱۲/۱۲ <sup>a-e</sup> | ۴/۲۴ <sup>klm</sup>  | ۳/۱۰۲ <sup>g-l</sup> | ۶   |
| ۴/۷۴ <sup>f-k</sup> | ۱۰/۲۲ <sup>f-i</sup> | ۴/۳۰۴ <sup>b-f</sup> | ۱/۲۶ <sup>b-f</sup>  | ۳/۰۴۳ <sup>b-h</sup> | ۱۱/۷۴ <sup>cde</sup> | ۵/۰۲۲ <sup>abc</sup> | ۳/۶۳۸ <sup>abc</sup> | ۹   |
| ۴/۹۳ <sup>e-j</sup> | ۹/۰۴ <sup>j-o</sup>  | ۳/۷۷۴ <sup>j-p</sup> | ۱/۰۷۴ <sup>j-n</sup> | ۲/۶۹۹ <sup>k-q</sup> | ۱۰/۳۳ <sup>g-l</sup> | ۴/۶۲۴ <sup>e-i</sup> | ۳/۳۵۶ <sup>b-h</sup> | ۱۲  |
| ۵/۰۵ <sup>e-j</sup> | ۱۰/۵۳ <sup>e-h</sup> | ۴/۴۵۳ <sup>a-d</sup> | ۱/۳۱۹ <sup>a-d</sup> | ۳/۱۳۴ <sup>a-f</sup> | ۱۱/۴۹ <sup>def</sup> | ۴/۹۲۵ <sup>a-f</sup> | ۳/۵۶۹ <sup>a-d</sup> | ۱۵  |
| ۵/۶۷ <sup>b-e</sup> | ۸/۸۲ <sup>l-p</sup>  | ۴/۰۵۵ <sup>f-j</sup> | ۱/۱۶۸ <sup>f-j</sup> | ۲/۸۸۶ <sup>f-k</sup> | ۱۱/۳۹ <sup>d-g</sup> | ۴/۴۱۲ <sup>i-l</sup> | ۳/۲۱۴ <sup>e-j</sup> | ۱۷  |
| ۴/۹۲ <sup>e-j</sup> | ۱۰/۶۷ <sup>c-g</sup> | ۳/۸۲۵ <sup>i-o</sup> | ۱/۰۸۸ <sup>i-m</sup> | ۲/۷۳۶ <sup>j-p</sup> | ۱۱/۲۸ <sup>e-h</sup> | ۴/۹۸۷ <sup>a-d</sup> | ۳/۶۱۲ <sup>a-d</sup> | ۱۹  |
| ۵/۲ <sup>d-g</sup>  | ۹/۸۶ <sup>hij</sup>  | ۳/۹۷۸ <sup>g-l</sup> | ۱/۱۶۳ <sup>f-j</sup> | ۲/۸۱۴ <sup>h-n</sup> | ۱۰/۹۸ <sup>e-j</sup> | ۴/۰۰۵ <sup>m-p</sup> | ۲/۹۴ <sup>i-n</sup>  | ۲۰  |
| ۴/۵۹ <sup>g-l</sup> | ۹/۶۳ <sup>ijk</sup>  | ۳/۳۷۵ <sup>a-d</sup> | ۱/۲۹۱ <sup>a-e</sup> | ۳/۰۸۴ <sup>a-f</sup> | ۱۱/۲۸ <sup>e-h</sup> | ۳/۹۶۲ <sup>m-p</sup> | ۲/۸۸۶ <sup>j-n</sup> | ۴   |
| ۶/۲۱ <sup>abc</sup> | ۹/۱ <sup>k-n</sup>   | ۴/۲۸۷ <sup>b-f</sup> | ۱/۲۴۹ <sup>c-f</sup> | ۳/۰۳۷ <sup>b-h</sup> | ۹/۷ <sup>kl</sup>    | ۴/۲۶۱ <sup>j-m</sup> | ۳/۱۳۳ <sup>f-k</sup> | ۵   |
| ۵/۲۷ <sup>d-g</sup> | ۹/۴۱ <sup>jkl</sup>  | ۳/۹۹۹ <sup>f-k</sup> | ۱/۱۴۸ <sup>f-k</sup> | ۲/۸۵۱ <sup>g-l</sup> | ۱۱/۱۳ <sup>e-i</sup> | ۳/۸۵۳ <sup>nop</sup> | ۲/۸۱ <sup>k-n</sup>  | ۶   |
| ۵/۷۲ <sup>b-e</sup> | ۱۰/۲۸ <sup>f-i</sup> | ۳/۷۱۳ <sup>k-q</sup> | ۱/۰۳۵ <sup>k-o</sup> | ۲/۶۷۸ <sup>k-q</sup> | ۱۱/۰۵ <sup>e-i</sup> | ۴/۷۷۳ <sup>a-h</sup> | ۳/۴۵۵ <sup>a-f</sup> | ۹   |
| ۵/۱۲ <sup>e-i</sup> | ۹/۰۱ <sup>k-o</sup>  | ۳/۶۴۱ <sup>n-q</sup> | ۱/۰۳۷ <sup>k-o</sup> | ۲/۶۰۳ <sup>m-q</sup> | ۱۰/۵۴ <sup>f-k</sup> | ۴/۴۱ <sup>i-l</sup>  | ۳/۱۹۳ <sup>e-j</sup> | ۱۲  |
| ۵/۱ <sup>e-j</sup>  | ۱۰/۲ <sup>f-i</sup>  | ۳/۹۳۴ <sup>h-n</sup> | ۱/۱۱۹ <sup>h-l</sup> | ۲/۸۱۴ <sup>h-n</sup> | ۱۲/۴۹ <sup>a-d</sup> | ۴/۷۲۹ <sup>c-i</sup> | ۳/۴۳۷ <sup>a-f</sup> | ۱۵  |
| ۵/۰۳ <sup>e-j</sup> | ۸/۵۸ <sup>m-p</sup>  | ۳/۶۳۳ <sup>n-q</sup> | ۱/۰۲ <sup>l-p</sup>  | ۲/۶۱۳ <sup>m-q</sup> | ۱۰/۲۱ <sup>h-l</sup> | ۴/۰۴ <sup>mno</sup>  | ۲/۹۶۸ <sup>i-n</sup> | ۱۷  |
| ۵/۶۱ <sup>c-f</sup> | ۱۰/۱ <sup>ghi</sup>  | ۳/۶۱۶ <sup>opq</sup> | ۱/۰۱۹ <sup>l-p</sup> | ۲/۵۹۷ <sup>n-q</sup> | ۱۱/۷۹ <sup>b-e</sup> | ۴/۴۸ <sup>h-k</sup>  | ۳/۲۶۴ <sup>d-i</sup> | ۱۹  |
| ۵/۲۵ <sup>d-g</sup> | ۸/۷۷ <sup>l-p</sup>  | ۴/۱۲۹ <sup>e-i</sup> | ۱/۱۹۳ <sup>e-i</sup> | ۲/۹۳۵ <sup>e-j</sup> | ۹/۸۷ <sup>jkl</sup>  | ۳/۷۴۷ <sup>op</sup>  | ۲/۷۲۳ <sup>n</sup>   | ۲۰  |
| ۵/۳ <sup>d-g</sup>  | ۹/۴۱ <sup>jkl</sup>  | ۳/۴۸۳ <sup>pq</sup>  | ۰/۹۶۹ <sup>nop</sup> | ۲/۴۷۱ <sup>pq</sup>  | ۱۰/۱۴ <sup>h-l</sup> | ۳/۶۷۶ <sup>p</sup>   | ۲/۶۷۸ <sup>n</sup>   | ۴   |
| ۵/۱۸ <sup>d-h</sup> | ۸/۵۳ <sup>nop</sup>  | ۳/۹۶۶ <sup>h-m</sup> | ۱/۱۳۲ <sup>g-l</sup> | ۲/۸۳۳ <sup>g-m</sup> | ۹/۲۲ <sup>l</sup>    | ۳/۸۶۷ <sup>nop</sup> | ۲/۸۲۵ <sup>k-n</sup> | ۵   |
| ۶/۴۲ <sup>abc</sup> | ۹/۰۶ <sup>k-o</sup>  | ۳/۶۵۸ <sup>m-q</sup> | ۱/۰۳۷ <sup>k-o</sup> | ۲/۶۲۱ <sup>l-q</sup> | ۹/۹۹ <sup>i-l</sup>  | ۳/۹۳۷ <sup>m-p</sup> | ۲/۸۲۵ <sup>k-n</sup> | ۶   |
| ۶/۲۱ <sup>abc</sup> | ۹/۲۲ <sup>j-m</sup>  | ۳/۶۸۵ <sup>l-q</sup> | ۰/۹۰۶ <sup>p</sup>   | ۲/۷۷۸ <sup>i-n</sup> | ۹/۷۹ <sup>kl</sup>   | ۴/۲۰۱ <sup>klm</sup> | ۳/۰۷۲ <sup>h-m</sup> | ۹   |
| ۶/۰۷ <sup>a-d</sup> | ۹/۰۴ <sup>k-o</sup>  | ۳/۶۰۳ <sup>opq</sup> | ۰/۹۹۲ <sup>m-p</sup> | ۲/۶۱۱ <sup>m-q</sup> | ۹/۴۵ <sup>kl</sup>   | ۳/۹۵۵ <sup>m-p</sup> | ۲/۸۹۵ <sup>j-n</sup> | ۱۲  |
| ۶/۶۵ <sup>a</sup>   | ۸/۶۳ <sup>m-p</sup>  | ۳/۸۳۲ <sup>i-o</sup> | ۱/۰۸۷ <sup>i-m</sup> | ۲/۷۴۵ <sup>j-o</sup> | ۹/۸۳ <sup>kl</sup>   | ۳/۸۰۸ <sup>nop</sup> | ۲/۷۷۷ <sup>lm</sup>  | ۱۵  |
| ۶/۵ <sup>ab</sup>   | ۸/۴۱ <sup>op</sup>   | ۳/۶۵۹ <sup>m-q</sup> | ۱/۰۳۸ <sup>k-o</sup> | ۲/۶۲۱ <sup>l-q</sup> | ۱۰/۳۷ <sup>f-l</sup> | ۳/۷۸۶ <sup>nop</sup> | ۲/۷۵۸ <sup>mn</sup>  | ۱۷  |
| ۶/۸۶ <sup>a</sup>   | ۹/۰۴ <sup>k-o</sup>  | ۳/۴۱۴ <sup>q</sup>   | ۰/۹۴۳ <sup>op</sup>  | ۲/۴۷۱ <sup>q</sup>   | ۱۰/۵۱ <sup>f-k</sup> | ۴/۰۸۳ <sup>lmn</sup> | ۲/۹۲۷ <sup>j-n</sup> | ۱۹  |
| ۶/۳۳ <sup>abc</sup> | ۸/۳۲ <sup>p</sup>    | ۳/۵۴۸ <sup>opq</sup> | ۱/۰۰۱ <sup>m-p</sup> | ۲/۵۴۶ <sup>opq</sup> | ۹/۵۳ <sup>kl</sup>   | ۳/۷۴۹ <sup>op</sup>  | ۲/۷۹۷ <sup>lmn</sup> | ۲۰  |
| ۰/۸۸۶               | ۰/۶۷۲                | ۰/۳۱۳                | ۰/۱۱۴                | ۰/۲۳۱                | ۱/۱۴۷                | ۰/۳۲۹                | ۰/۳۳۱                | LSD |

شوری ۸ دسی زیمنس بر متر

شوری ۱۲ دسی زیمنس بر متر

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری بر اساس آزمون LSD با هم ندارند.

محتوای پرولین: نتایج مقایسه میانگین نشان داد که در مرحله چهار برگی نمونه‌برداری، کم‌ترین محتوای پرولین در تیمار عدم اعمال تنش شوری (۴/۱۱ میکروگرم بر گرم وزن تر برگ) مشاهده شد که نسبت به شرایط تنش شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر از کاهش ۴۰/۶۳٪ برخوردار بود (جدول ۵). همچنین، بیش‌ترین محتوای پرولین چغندر قند در رقم شماره ۹ مشاهده شد که نسبت به سایر ارقام از اختلاف معنی‌داری برخوردار بود (جدول ۵). در مرحله هشت برگی



نمونه برداری، بیشترین محتوای پرولین برگ (۶/۸۶ میکروگرم بر گرم وزن تر برگ) در رقم شماره ۱۹ در شرایط تنش شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر مشاهده شد که از نظر آماری با رقم شماره ۱۵ اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۴). در حالی که، کمترین محتوای این صفت (۳/۶۸ میکروگرم بر گرم وزن تر برگ) در رقم شماره ۴ تحت شرایط عدم اعمال تنش شوری به دست آمد (جدول ۴). فرهودی و خیامیم (۱۳۹۹) در بررسی تاثیر تنش شوری بر ارقام مختلف چغندر قند مشاهده کردند که رقم پایا از بیشترین محتوای پرولین برخوردار بود، این پژوهشگران اظهار داشتند که تجمع املاح در محیط ریشه گیاه در شرایط تنش شوری موجب کاهش جذب آب توسط گیاه می‌شود و در چنین شرایطی، گیاهی موفق است که با ساخت و تجمع اسمولیت‌های سازگار از جمله قندهای محلول، یون‌های مفید و پرولین، آب بیشتری را جذب نمایند. همچنین گزارش کردند که تنش شوری موجب افزایش محتوای پرولین می‌شود و رقم ای سی چغندر قند در شرایط تنش شوری از بیشترین محتوای پرولین برخوردار بود (Ramani et al., 2021).

با توجه به اینکه تنش شوری موجب تنش اکسیداتیو، تشکیل گونه‌های فعال اکسیژن، افزایش محتوای اسید آسبزیک، پرولین و بسته شدن روزنه‌ها را به همراه دارد، لذا افزایش محتوای پرولین تحت تنش شوری به عنوان یک اسمولیت سازگار به این دلیل است که گونه‌های فعال اکسیژن تولید شده در شرایط تنش‌های محیطی به وسیله پرولین حذف و از مولکول‌های بزرگ حفاظت می‌نماید (حسینی و همکاران، ۱۳۹۵). از سویی دیگر، تولید پرولین با تولید قندهای محلول ارتباط دارد؛ زیرا یکی از مسیرهای تولید پرولین، گلو تامات است و با افزایش تولید قندهای محلول، میزان تولید گلو تامات افزایش می‌یابد و سنتز پرولین تشدید می‌شود (Skorupa et al., 2022). در این راستا Taghizadegan و همکاران (۲۰۱۹) بیان کردند که در شرایط تنش شوری محتوای پرولین برگ گیاه چغندر قند از طریق تخریب و اختلال در فرآیند سنتز پروتئین‌ها، افزایش می‌یابد. همچنین دیگر پژوهشگران اظهار داشتند که افزایش فعالیت آنزیم سنتز کننده پرولین، آنزیم اورنیتین آمینوترانسفراز یا ممانعت از آنزیم‌های کاتالیز کننده پرولین از جمله پرولین هیدروژناز و پرولین اکسیداز می‌تواند از دلایل دیگر بهبود محتوای پرولین در شرایط تنش باشد (Mahadevaiah et al., 2023).

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر تنش شوری بر محتوای کلروفیل ب، پرولین و قندهای محلول ذنوتیپ چغندر قند

| مرحله هشت<br>برگی  | مرحله چهار برگی                                 |  |  |    | تیمار              |
|--------------------|---|--|--|----|--------------------|
|                    | محتوای قندهای محلول<br>(میلی گرم بر گرم وزن تر) | محتوای پرولین<br>(میکروگرم بر گرم<br>وزن تر) | محتوای کلروفیل<br>b<br>(میلی گرم بر گرم<br>وزن تر) |    |                    |
| ۴۸/۴۶ <sup>d</sup> | ۵۰/۷۷ <sup>d</sup>                              | ۴/۱۱ <sup>d</sup>                            | ۱/۳۹ <sup>a</sup>                                  | ۰  | سطوح تنش شوری      |
| ۵۳/۴۵ <sup>c</sup> | ۶۵/۴۴ <sup>c</sup>                              | ۴/۷۲ <sup>c</sup>                            | ۱/۲۵۴ <sup>b</sup>                                 | ۴  | (دسی‌زیمنس بر متر) |
| ۵۷/۱۷ <sup>b</sup> | ۶۰/۳۵ <sup>b</sup>                              | ۵/۲۷ <sup>b</sup>                            | ۱/۱۵۳ <sup>c</sup>                                 | ۸  |                    |
| ۶۰/۸۹ <sup>a</sup> | ۶۲/۸۱ <sup>a</sup>                              | ۵/۷۸ <sup>a</sup>                            | ۱/۰۴۹ <sup>d</sup>                                 | ۱۲ |                    |
| ۲/۰۳               | ۱/۵۴۴   | ۰/۳۰۷  | ۰/۰۴۵۹   |    | LSD                |
| -                  | -   | ۴/۱۶ <sup>d</sup>                            | ۱/۱۶۷ <sup>d</sup>                                 | ۴  | ارقام چغندر قند    |

|   |   |                     |                     |     |
|---|---|---------------------|---------------------|-----|
| - | - | ۵/۰۲ <sup>abc</sup> | ۱/۱۹۳ <sup>cd</sup> | ۵   |
| - | - | ۴/۶۲ <sup>cd</sup>  | ۱/۱۳۹ <sup>de</sup> | ۶   |
| - | - | ۵/۴۱ <sup>a</sup>   | ۱/۳۴۲ <sup>a</sup>  | ۹   |
| - | - | ۴/۹۲ <sup>bc</sup>  | ۱/۲۵۳ <sup>bc</sup> | ۱۲  |
| - | - | ۵/۲۸ <sup>ab</sup>  | ۱/۲۷۱ <sup>b</sup>  | ۱۵  |
| - | - | ۵/۱۸ <sup>ab</sup>  | ۱/۱۷۵ <sup>d</sup>  | ۱۷  |
| - | - | ۵/۲۱ <sup>ab</sup>  | ۱/۲۸۵ <sup>ab</sup> | ۱۹  |
| - | - | ۴/۹۴ <sup>bc</sup>  | ۱/۰۸ <sup>e</sup>   | ۲۰  |
| - | - | ۰/۴۶۱               | ۰/۰۶۸۹              | LSD |

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری بر اساس آزمون LSD با هم ندارند.

**قندهای محلول:** مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که در مراحل چهار و هشت برگی نمونه‌برداری، تنش شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر موجب افزایش ۲۳/۷۱ و ۲۵/۶۵٪ محتوای قندهای محلول نسبت به شرایط عدم اعمال تنش شوری شد (جدول ۵). بیشترین میزان قندهای محلول در چغندر قند به ترتیب با ۶۲/۸۱ و ۶۰/۸۹ میلی گرم بر گرم وزن تر برگ در تنش شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر به دست آمد. در حالی که کمترین میزان آن با ۵۰/۷۷ و ۴۸/۴۶ میلی گرم بر گرم وزن تر برگ در شرایط عدم اعمال تنش شوری حاصل شد (جدول ۵). گزارش شده است که در شرایط تنش شوری قندهای نامحلول (نشاسته) تجزیه شده و قندهای محلول را ایجاد می‌کنند که سلول به این طریق قادر به حفظ پتانسیل اسمزی شده و موجب کاهش خطر دهیدراتاسیون سلول می‌شود (Tahjib-UI-Arif *et al.*, 2019). پژوهشگران بیان کردند که قندهای تجمع یافته تحت تنش شوری از طریق برهم‌کنش با ماکرومولکول‌های سلولی از جمله آنزیم‌ها به برقراری و ثبات ساختارهای سلولی و عملکرد آن‌ها کمک می‌کنند (Yolcu *et al.*, 2021). تجمع قندهای محلول در زمان تنش می‌تواند به علت تخریب قندهای غیر محلول، توقف رشد یا سنتز این ترکیبات از مسیرهای غیرتوسنتزی باشد (Abd El-Mageed *et al.*, 2021). بیان کردند که در شرایط تنش‌زای محیطی گیاهان متابولیسم قندها را افزایش می‌دهند. همچنین، این پژوهشگران اظهار داشتند که با کاهش انتقال آب به برگ‌ها و اختلال در سرعت تعرق برگ موجب تغییرات فراساختاری در اندامک‌های سلول و تغییر در رفتار آنزیم‌های کلیدی از جمله مسیر متابولیسم قند می‌شود (Abu-Ellail *et al.*, 2020). با تجمع قندهای محلول، گیاه ذخیره کربوهیدراتی خود را برای حفظ متابولیسم پایه سلول در شرایط محیطی تحت تنش، در مطلوب نگه می‌دارد (Alavilli *et al.*, 2023). فرهودی و خیامیم (۱۳۹۹) نیز در بررسی خود گزارش کردند که تنش شوری موجب افزایش معنی‌دار محتوای قندهای محلول در ارقام چغندر قند شد. اظهار داشتند که تیمارهای تنش شوری موجب افزایش محتوای قندهای محلول ارقام چغندر قند نسبت به شرایط عدم اعمال شوری شد (Gholipor *et al.*, 2022).

جدول ۶- مقایسه میانگین تاثیر تنش شوری بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی برخی ژنوتیپ چغندر قند

| تیمار | مرحله چهاربرگی |           | مرحله هشت برگی |                 |
|-------|----------------|-----------|----------------|-----------------|
|       | کاتالاز        | پراکسیداز | کاتالاز        | پراکسیداز       |
|       |                |           |                | پلی فنل اکسیداز |

تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه)

|                      |                      |                      |                      |                      |                      |    |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----|
| ۴۹/۶۸ <sup>p-s</sup> | ۴۲/۸۷ <sup>q</sup>   | ۴۰/۹۱ <sup>i-m</sup> | ۴۷/۱۶ <sup>lm</sup>  | ۴۶/۷۶ <sup>q</sup>   | ۳۹/۳۰ <sup>opq</sup> | ۴  |
| ۴۹/۱۴ <sup>rs</sup>  | ۴۶/۵۹ <sup>m-p</sup> | ۴۰/۰۴ <sup>j-m</sup> | ۴۶/۶۱ <sup>lmn</sup> | ۴۹/۵۱ <sup>n-q</sup> | ۳۹ <sup>pq</sup>     | ۵  |
| ۴۵/۷۸ <sup>s</sup>   | ۴۴/۹۳ <sup>opq</sup> | ۳۸/۷۲ <sup>lmn</sup> | ۴۳/۲۵ <sup>n</sup>   | ۵۰/۵۲ <sup>n-q</sup> | ۴۰/۴ <sup>l-p</sup>  | ۶  |
| ۵۳/۷۷ <sup>k-p</sup> | ۴۹/۱۱ <sup>j-n</sup> | ۴۳/۶۷ <sup>g-k</sup> | ۵۱/۲۴ <sup>h-k</sup> | ۴۹/۳۷ <sup>opq</sup> | ۳۶/۷ <sup>qr</sup>   | ۹  |
| ۴۸/۷۵ <sup>rs</sup>  | ۴۹/۳ <sup>i-n</sup>  | ۴۰/۲۵ <sup>j-m</sup> | ۴۶/۲۲ <sup>mn</sup>  | ۵۲/۳۱ <sup>l-o</sup> | ۳۹/۷ <sup>m-q</sup>  | ۱۲ |
| ۵۲/۰۶ <sup>n-r</sup> | ۴۴/۰۸ <sup>pq</sup>  | ۳۵/۳۸ <sup>n</sup>   | ۴۹/۵۳ <sup>i-m</sup> | ۴۷/۵ <sup>pq</sup>   | ۳۶/۷ <sup>qr</sup>   | ۱۵ |
| ۴۹/۱۷ <sup>qrs</sup> | ۴۴/۸۸ <sup>n-q</sup> | ۳۹/۸۲ <sup>klm</sup> | ۴۶/۶۴ <sup>lmn</sup> | ۵۰/۵۴ <sup>n-q</sup> | ۳۹/۸ <sup>m-q</sup>  | ۱۷ |
| ۵۰/۶۴ <sup>o-r</sup> | ۴۸/۰۹ <sup>l-o</sup> | ۳۷/۸۴ <sup>mn</sup>  | ۴۸/۱۲ <sup>klm</sup> | ۵۰/۷۲ <sup>n-q</sup> | ۴۲/۶ <sup>i-o</sup>  | ۱۹ |
| ۴۹/۳۹ <sup>qrs</sup> | ۴۳/۵۴ <sup>q</sup>   | ۴۱/۰۳ <sup>i-m</sup> | ۴۶/۸۷ <sup>lmn</sup> | ۴۷/۳۸ <sup>pq</sup>  | ۳۹/۶ <sup>n-q</sup>  | ۲۰ |
| ۴۹/۸۷ <sup>p-s</sup> | ۴۴/۷۰ <sup>pq</sup>  | ۴۰/۸۷ <sup>i-m</sup> | ۴۷/۳۵ <sup>lm</sup>  | ۵۲/۶۵ <sup>l-o</sup> | ۴۴/۴ <sup>g-k</sup>  | ۴  |
| ۵۱/۱۵ <sup>o-r</sup> | ۵۲/۸۷ <sup>fgh</sup> | ۴۲/۳ <sup>h-l</sup>  | ۵۱/۹۵ <sup>g-j</sup> | ۵۵/۰۷ <sup>j-m</sup> | ۴۳/۲ <sup>i-l</sup>  | ۵  |
| ۶۰ <sup>d-i</sup>    | ۴۹/۴۲ <sup>i-m</sup> | ۴۲ <sup>h-l</sup>    | ۵۷/۴۷ <sup>cde</sup> | ۵۱/۲۱ <sup>m-p</sup> | ۳۹/۶ <sup>n-q</sup>  | ۶  |
| ۵۳/۴۶ <sup>l-q</sup> | ۵۱/۹۵ <sup>f-k</sup> | ۴۵/۰۳ <sup>fgh</sup> | ۴۸/۵۳ <sup>j-m</sup> | ۵۵/۴ <sup>i-l</sup>  | ۴۱/۹ <sup>j-p</sup>  | ۹  |
| ۵۸/۱۱ <sup>f-j</sup> | ۴۵/۹ <sup>n-q</sup>  | ۴۷/۳۸ <sup>efg</sup> | ۵۵/۵۹ <sup>d-g</sup> | ۵۱/۱۵ <sup>m-p</sup> | ۴۴/۶ <sup>f-k</sup>  | ۱۲ |
| ۵۸/۰۶ <sup>f-k</sup> | ۴۶/۳۸ <sup>m-p</sup> | ۴۳/۰۲ <sup>h-k</sup> | ۵۵/۵۴ <sup>d-g</sup> | ۵۵/۹۵ <sup>h-l</sup> | ۴۴/۹ <sup>f-j</sup>  | ۱۵ |
| ۶۱/۷۴ <sup>c-g</sup> | ۵۳/۲۵ <sup>efg</sup> | ۴۵/۰۱ <sup>fgh</sup> | ۵۷/۹۵ <sup>cd</sup>  | ۴۹/۹۷ <sup>n-q</sup> | ۴۲/۷ <sup>i-n</sup>  | ۱۷ |
| ۵۷/۵۵ <sup>g-l</sup> | ۵۲/۳۹ <sup>f-j</sup> | ۴۵/۲۳ <sup>fgh</sup> | ۵۳/۷۵ <sup>e-h</sup> | ۵۹/۴۴ <sup>d-i</sup> | ۴۳/۷ <sup>h-l</sup>  | ۱۹ |
| ۵۲/۸۶ <sup>m-r</sup> | ۴۸/۶۲ <sup>k-n</sup> | ۴۳/۸۸ <sup>g-j</sup> | ۵۰/۳۳ <sup>h-l</sup> | ۵۵/۱۱ <sup>j-m</sup> | ۴۱/۵ <sup>k-p</sup>  | ۲۰ |
| ۵۴/۵۴ <sup>j-o</sup> | ۵۲/۲۹ <sup>f-j</sup> | ۴۹/۸۲ <sup>cde</sup> | ۵۲/۷۲ <sup>f-j</sup> | ۶۳/۴۷ <sup>a-d</sup> | ۴۷/۹ <sup>b-f</sup>  | ۴  |
| ۵۶/۸۱ <sup>h-m</sup> | ۵۶/۴۶ <sup>cde</sup> | ۴۵/۰۱ <sup>fgh</sup> | ۵۲/۳۱ <sup>f-j</sup> | ۵۸/۹۴ <sup>e-i</sup> | ۴۵/۷ <sup>d-i</sup>  | ۵  |
| ۵۸/۸۶ <sup>e-i</sup> | ۵۲/۶۳ <sup>f-i</sup> | ۴۴/۴۵ <sup>f-i</sup> | ۵۳/۱۷ <sup>f-i</sup> | ۵۶/۸۱ <sup>g-k</sup> | ۴۲/۴ <sup>i-o</sup>  | ۶  |
| ۵۷/۹۰ <sup>f-k</sup> | ۵۷/۰۲ <sup>bcd</sup> | ۵۳/۶۷ <sup>abc</sup> | ۵۲/۳ <sup>f-j</sup>  | ۵۸/۲۳ <sup>f-j</sup> | ۴۸/۸ <sup>bcd</sup>  | ۹  |
| ۶۳/۷۶ <sup>a-d</sup> | ۴۹/۶۱ <sup>h-m</sup> | ۴۵/۴۶ <sup>fgh</sup> | ۶۱/۲۴ <sup>abc</sup> | ۵۳/۵۸ <sup>k-n</sup> | ۴۳/۸ <sup>h-k</sup>  | ۱۲ |
| ۵۵/۹۸ <sup>h-n</sup> | ۵۰/۴۳ <sup>g-l</sup> | ۵۰/۹۱ <sup>b-e</sup> | ۵۳/۴۵ <sup>fgh</sup> | ۶۰/۴۹ <sup>b-g</sup> | ۴۳ <sup>i-m</sup>    | ۱۵ |
| ۶۴/۸۱ <sup>abc</sup> | ۵۹/۳۷ <sup>abc</sup> | ۴۳/۴۴ <sup>h-k</sup> | ۶۲/۰۸ <sup>ab</sup>  | ۶۲/۲۱ <sup>a-f</sup> | ۴۵/۴ <sup>e-i</sup>  | ۱۷ |
| ۵۶/۳۱ <sup>h-n</sup> | ۶۰/۶۶ <sup>a</sup>   | ۴۷/۸۸ <sup>ef</sup>  | ۵۷/۶ <sup>cd</sup>   | ۶۴/۵۶ <sup>ab</sup>  | ۴۵/۴ <sup>e-i</sup>  | ۱۹ |
| ۶۲/۵۸ <sup>b-e</sup> | ۵۴/۳۷ <sup>def</sup> | ۴۵/۴۵ <sup>fgh</sup> | ۵۸/۶۳ <sup>bcd</sup> | ۵۸/۰۹ <sup>f-j</sup> | ۴۶/۹ <sup>c-h</sup>  | ۲۰ |
| ۶۴/۰۱ <sup>a-d</sup> | ۵۶/۷ <sup>bcd</sup>  | ۵۴/۶ <sup>ab</sup>   | ۶۱/۱۶ <sup>abc</sup> | ۶۰/۶۳ <sup>b-g</sup> | ۴۷/۹ <sup>b-f</sup>  | ۴  |
| ۶۰/۳۹ <sup>d-h</sup> | ۶۰/۴۹ <sup>a</sup>   | ۴۹/۳۶ <sup>de</sup>  | ۵۷/۸۶ <sup>cd</sup>  | ۶۲/۶ <sup>a-e</sup>  | ۴۵/۷ <sup>d-i</sup>  | ۵  |
| ۶۲/۰۲ <sup>c-f</sup> | ۶۱/۹۸ <sup>a</sup>   | ۴۸/۱۷ <sup>ef</sup>  | ۶۲/۹۱ <sup>a</sup>   | ۶۵/۵۲ <sup>a</sup>   | ۴۲/۴ <sup>i-o</sup>  | ۶  |
| ۶۰/۲۳ <sup>d-i</sup> | ۶۱/۴۸ <sup>a</sup>   | ۵۰/۱۳ <sup>cde</sup> | ۵۵/۹۳ <sup>def</sup> | ۶۳/۱۱ <sup>abc</sup> | ۴۸/۸ <sup>bcd</sup>  | ۹  |
| ۶۶/۵۶ <sup>ab</sup>  | ۵۳/۷۷ <sup>d-g</sup> | ۵۱/۱۹ <sup>b-e</sup> | ۶۳/۷۴ <sup>a</sup>   | ۶۰/۰۵ <sup>c-h</sup> | ۴۳/۸ <sup>h-k</sup>  | ۱۲ |

عدم اعمال شوری

شوری ۴ دسی زیمنس بر متر

شوری ۸ دسی زیمنس بر متر

شوری ۱۲ دسی زیمنس بر متر

|                      |                      |                      |                     |                      |                     |     |
|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|-----|
| ۵۸/۵۳ <sup>e-j</sup> | ۵۹/۷۵ <sup>abc</sup> | ۵۶/۱۲ <sup>a</sup>   | ۵۶ <sup>def</sup>   | ۶۵/۱۹ <sup>a</sup>   | ۴۳ <sup>i-m</sup>   | ۱۵  |
| ۶۴/۹۴ <sup>abc</sup> | ۶۰/۸۱ <sup>a</sup>   | ۴۸/۱۷ <sup>ef</sup>  | ۶۲/۴۱ <sup>ab</sup> | ۵۹/۶۶ <sup>d-h</sup> | ۴۵/۴ <sup>e-i</sup> | ۱۷  |
| ۶۴/۳ <sup>a-d</sup>  | ۶۱/۷۸ <sup>a</sup>   | ۵۲/۲۴ <sup>a-d</sup> | ۶۲/۹۸ <sup>a</sup>  | ۶۰/۴۸ <sup>b-g</sup> | ۴۵/۴ <sup>e-i</sup> | ۱۹  |
| ۶۷/۷۲ <sup>a</sup>   | ۶۰/۰۴ <sup>ab</sup>  | ۵۵/۲۳ <sup>a</sup>   | ۶۴/۷۹ <sup>a</sup>  | ۶۵/۸۴ <sup>a</sup>   | ۴۶/۹ <sup>c-h</sup> | ۲۰  |
| ۴/۳                  | ۳/۴۳۹                | ۳/۸۸                 | ۳/۷۹۷               | ۴/۱۵۸                | ۳/۳۲                | LSD |

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری بر اساس آزمون LSD با هم ندارند.

### فعالیت آنزیم آنتی‌اکسیدانی

طبق نتایج حاصل، اعمال تنش شوری موجب افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی ارقام مختلف چغندر شد (جدول ۶). در مرحله چهار برگی، بیش‌ترین فعالیت آنزیم کاتالاز (۵۲/۶) تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه) در رقم شماره ۲۰ چغندر قند تحت تنش شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر به دست آمد (جدول ۶). در حالی که، کم‌ترین فعالیت این آنزیم (۷/۳۶) تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه) در شرایط عدم اعمال تنش شوری در رقم شماره ۱۵ مشاهده شد که از نظر آماری اختلاف معنی‌داری با رقم شماره ۱۲ نشان نداد (جدول ۶). در مرحله هشت برگی نمونه‌برداری نیز بیش‌ترین فعالیت آنزیم کاتالاز (۵۶/۱۲) تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه) در رقم شماره ۱۵ تحت شرایط شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر و کم‌ترین فعالیت این آنزیم (۳۵/۳۸) تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه) در شرایط عدم اعمال تنش شوری در رقم شماره ۱۵ مشاهده شد (جدول ۶). همچنین، بیش‌ترین فعالیت آنزیم پراکسیداز در مرحله چهار برگی نمونه‌برداری (۶۵/۸۴) تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه) در شرایط تنش شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر مشاهده شد که از نظر آماری اختلاف معنی‌داری با ارقام شماره ۶ و ۱۵ نداشت (جدول ۶). در مرحله نمونه‌برداری هشت برگی، بیش‌ترین فعالیت آنزیم پراکسیداز (۶۱/۹۸) تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه) در شرایط شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر و کم‌ترین فعالیت این آنزیم (۴۴/۰۸) تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه) در رقم شماره ۱۵ تحت شرایط عدم اعمال تنش شوری به دست آمد (جدول ۶). در رابطه با فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز در مرحله چهار برگی نمونه‌برداری نتایج نشان داد که بیش‌ترین فعالیت این آنزیم (۶۴/۷۹) تغییرات جذب در میکروگرم پروتئین بر دقیقه) در شرایط شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر در رقم شماره ۲۰ مشاهده شد که از نظر آماری اختلاف معنی‌داری با ارقام ۶، ۱۲ و ۱۹ نداشت. همچنین در مرحله هشت برگی نمونه‌برداری، تنش شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر در رقم شماره ۲۰ موجب افزایش ۴۷/۹۲ درصدی فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز نسبت به ترکیب تیماری رقم شماره ۶ چغندر قند تحت عدم اعمال تنش شوری شد (جدول ۶).

گزارش شده است که آنزیم کاتالاز با اثر مستقیم بر پراکسید هیدروژن، موجب کاهش اثرهای سمی آن می‌شود. پراکسید هیدروژن ماده‌ای سمی است که طی بسیاری از مکانیسم‌ها و واکنش‌های طبیعی سلول ایجاد می‌شود. تجمع این ماده برای سلول‌ها و بافت‌ها بسیار آسیب‌رسان است و باید بلافاصله تجزیه شود. در واقع کاتالاز از پراکسید هیدروژن به‌عنوان سوبسترا استفاده می‌کند و با تجزیه سریع این ماده اثرهای مخرب آن را مهار می‌کند (El-Mageed et al., 2022). آنزیم کاتالاز از جمله مهم‌ترین آنزیم‌های دخیل در فرآیند جمع‌آوری و خنثی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن است و زمانی که مقدار ROS تحت تنش افزایش می‌یابد در سم‌زدایی شرکت و فرآیند تجزیه  $H_2O_2$  به آب و اکسیژن را در پراکسیزوم کاتالیز و سلول‌ها را از آسیب اکسیداتیو ناشی از  $H_2O_2$  و OH حفظ می‌کند (Aycan et al., 2023). آنزیم‌هایی مانند

کاتالاز و پراکسیداز که با کاهش میزان پراکسید هیدروژن و تبدیل آن به آب، نقش اساسی در دفع مسمومیت گونه‌های فعال اکسیژن ایفا می‌نمایند (Heydarzadeh et al., 2023). آنزیم پراکسیداز نیز به‌عنوان آنزیم مقابله با تنش در گیاهان عالی، در برخی از فرآیندهای سلولی مانند سازوکار دفاعی، اتصال عرضی مونومرهای گلیکوپروتئین‌های غنی از هیدروکسی پرولین موجود در دیواره سلولی، اتصال عرضی پلی‌سارکاریدهای پکتیکی به‌وسیله اسیدهای فنولیک در دیواره سلولی و عمل و چوبی شدن و چوب‌پنبه‌ای شدن شرکت می‌کند و از این طریق موجب تعدیل اثرات مخرب تنش‌های محیطی از جمله شوری و خشکی در گیاهان می‌شود (Heydarzadeh et al., 2022). آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز، اکسیدوردوکتازهایی هستند که نقش بسیار مهمی را در پاسخ به تنش‌های غیرزیستی مانند خشکی و شوری دارند و همچنین در سم‌زدایی اشکال مختلف اکسیژن فعال شده در سلول اهمیت دارند که در هنگام بروز تنش موجب جمع‌آوری رادیکال‌های آزاد اکسیژن تولید شده، می‌شوند و با اکسیداسیون متفاوت در مکانیسم دفاعی شرکت می‌کنند (Ramani et al., 2023). در این راستا برخی محققین بیان کردند که در شرایط شوری گیاه چغندر قند به‌منظور کاهش گونه‌های فعال اکسیژن، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی خود را افزایش می‌دهد (Hussain et al., 2014). گزارش کردند که تنش شوری موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاه چغندر قند شده و در نتیجه اثرات مخرب تنش شوری را در این گیاهان کاهش داده است (Taghizadegan et al., 2019). افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از جمله کاتالاز تحت شرایط تنش شوری در ارقام چغندر قند نیز توسط فرهودی و خیامیم (۱۳۹۹) گزارش شده است.

### نتیجه‌گیری کلی

ارقام شماره ۴ و ۱۵ تحت شرایط تنش شوری ۸ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر تأثیر منفی تنش کمبود رطوبت بر محتوای کلروفیل، تنظیم اسمزی و دفاع از فعالیت آنتی‌اکسیدانی را خنثی کردند. بنابراین، به گیاه چغندر قند کمک کردند تا فشار ناشی از تنش شوری را با چندین ابزار از جمله افزایش وضعیت پرولین و تنظیم اسمزی تحمل کنند. در حالی تنش شوری موجب کاهش محتوای کلروفیل آ، کلروفیل ب و کلروفیل کل ارقام مختلف چغندر قند شد. تحت شرایط شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر، رقم شماره ۴ چغندر قند از بیش‌ترین محتوای پرولین برخوردار بود. ارقام شماره ۱۵ و ۴ نقش موثری در محتوای کلروفیل تحت شرایط تنش نشان دادند. همچنین ارقام شماره ۲۰، ۱۵ و ۶ دارای بیش‌ترین فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و پلی‌فنل‌اکسیداز در شرایط شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر بود. علاوه بر این، می‌توان نتیجه گرفت که ارقام شماره ۴ و ۱۵ ممکن است یک عملکرد اساسی در رشد و نمو گیاه و ویژگی‌های فیزیولوژیکی چغندر قند که در شرایط تنش کمبود رطوبت رشد می‌کنند، انجام دهد، که باعث کاهش تعرق و در نتیجه رطوبت قابل استفاده بیشتر برای گیاهان برای رشد و تولید سودآورتر می‌شود. به طور کلی، توصیه می‌شود که ارقام شماره ۴ و ۱۵ تا حدی تأثیر تنش شوری را بهبود بخشیده و می‌تواند عملکرد رشدی مطلوبی برای کاهش اثرات مضر استرس کمبود رطوبت بر چغندر قند باشد.

### منابع مورد استفاده

اسدی نسب، نفیسه، حسینی، پیمان، روشنفکر، حبیب اله، و مسکرباشی، موسی (۱۳۹۳). اثر تنش شوری بر رشد، فتوسنتز، تبادلات گازی و فلئورسانس کلروفیل در ارقام چغندر قند (*Beta vulgaris* L.) در مرحله گیاهچه‌ای تحت

شرایط کنترل شده. پژوهش‌های زراعی ایران، ۱۲(۴)، ۶۲۱-۶۳۱. Doi:10.22067/gsc.v12i4.45145

حسیبه، حسینی، موسوی فرد، صادق، فاتحی، فواد، و قادری، اردشیر (۱۳۹۵). تغییرات فتوشیمیایی و صفات مرفو-فیزیولوژیکی گیاهان دارویی آویشن باغی (*Thymus vulgaris* L.) تحت تنش شوری. گیاهان دارویی، ۱۰، ۳۴-۲۲.

Doi: 20.1001.1.2717204.2017.16.61.18.9

فروودی، روزبه، و سمر، خیامیم (۱۳۹۹). بررسی واکنش ارقام تجاری ایرانی چغندر قند به تنش شوری در مرحله جوانه‌زنی و رشد رویشی. فرآیند و کارکرد گیاهی، ۹(۳۶)، ۳۹۷-۴۱۲. Doi: 20.1001.1.23222727.1399.9.36.12.5

نیازیان، محسن، نعمانی، معصومه، و سادات نوری، سید احمد (۱۳۹۵). مروری بر روش‌های بیومتری برای اصلاح مقاومت

به شوری در گیاهان زراعی. پژوهش‌نامه اصلاح گیاهان زراعی، ۱۷، ۲۴-۴۱. Doi:10.18869/acadpub.jcb.8.17.41

Abbasi, Z., Arzani, A., Majidi, M.M., Rajabi, A., & Jalali, A. (2019). Genetic analysis of sugar yield and physiological traits in sugar beet under salinity stress conditions. *Euphytica*, 215, 1-12. Doi: 10.1007/s10681-019-2422-5

Abd El-Mageed, T.A., Rady, M.O., Semida, W.M., Shaaban, A., & Mekdad, A.A. (2021). Exogenous micronutrients modulate morpho-physiological attributes, yield, and sugar quality in two salt-stressed sugar beet cultivars. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21, 1421-1436. Doi: 10.1007/s42729-021-00450-y

Abu-Ellail, F.F.B., Sadek, K.A., & El-Bakary, H.M.Y. (2020). Evaluation of ten sugar beet varieties in terms of growth, yield and quality under different soil salinity levels. *Journal of Sugar Beet*, 35(2), 233-249. Doi: 10.22092/jsb.2020.341558.1232

Ahmad, R., Hussain, S., Anjum, M.A., Khalid, M.F., Saqib, M., Zakir, I., Hassan, A., Fahad, S., & Ahmad, S. (2019). Oxidative stress and antioxidant defense mechanisms in plants under salt stress. *Plant abiotic stress tolerance: Agronomic, Molecular and Biotechnological Approaches*, 10, 191-205. Doi/10.1002/9781119468677.ch12

Ahmed, H.G.M.D., Zeng, Y., Raza, H., Muhammad, D., Iqbal, M., Uzair, M., Khan, M.A., Iqbal, R., & El Sabagh, A. (2022). Characterization of wheat (*Triticum aestivum* L.) accessions using morpho-physiological traits under varying levels of salinity stress at seedling stage. *Frontiers in Plant Science*, 13, p.953670. Doi:10.3389/fpls.2022.953670/full

Alavilli, H., Yolcu, S., Skorupa, M., Aciksoz, S.B., & Asif, M. (2023). Salt and drought stress-mitigating approaches in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) to improve its performance and yield. *Planta*, 258(2), p.30. Doi: 10.1007/s00425-023-04189-x

Arnon, A.N. (1967). Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*, 23, 112-121.

Aycan, M., Erkilic, E.G., Ozgen, Y., Poyraz, I., & Yildiz, M. (2023). The response of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) genotypes at different ploidy levels to salt (NaCl) stress. *International Journal of Plant Biology*, 14(1), 199-217. Doi: doi.org/10.3390/ijpb14010017

Bates, L.S., Waldren R.P., & Teare, I.D. (1973). Rapid determination of free prolin for wither stress studies. *Plant Soil*, 39, 205-208. Doi:10.1007/BF00018060

Bouras, H., Bouaziz, A., Bouazzama, B., Hirich, A., & Choukr-Allah, R. (2021). How phosphorus fertilization alleviates the effect of salinity on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) productivity and quality. *Agronomy*, 11(8), p.1491. Doi: doi.org/10.3390/agronomy11081491

Bradford, M.M. (1976). A rapid and sensitive for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72, p 248. Doi: 10.1006/abio.1976.9999

Chance, B., & Maehly, A.C. (1955). Assay of catalase and peroxidases. *Methods in Enzymology*, 2, 764-775. Doi: 10.1002/9780470110171.ch14

Dubios, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Roberts P.A., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Annals of Chemistry*, 28, 350-356. Doi: 10.1021/ac60111a017

- El-Mageed, T.A.A., Mekdad, A.A., Rady, M.O., Abdelbaky, A.S., Saady, H.S., & Shaaban, A. (2022). Physio-biochemical and agronomic changes of two sugar beet cultivars grown in saline soil as influenced by potassium fertilizer. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(3), 3636-3654. Doi: 10.1007/s42729-022-00916-7
- Gholipor, B., Mozaffari, A., Maleki, A., Mirzaei Heydari, M., & Babaii, F. (2022). Antioxidant and biochemical alterations in sea beet (*Beta vulgaris* subsp. *maritima* (L.) Arcang.) and sugar beet (*Beta vulgaris* L.) exposed to salt stress. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 24(1), 123-138. Doi: 20.1001.1.16807073.2022.24.1.2.2
- Ghonaim, M.M., Attya, A.M., Aly, H.G., Mohamed, H.I., & Omran, A.A. (2023). Agro-morphological, biochemical, and molecular markers of barley genotypes grown under salinity stress conditions. *BMC Plant Biology*, 23(1), p.526. Doi:10.1186/s12870-023-04550-y
- Heydarzadeh, S., Arena C., Vitale, E., Rahimi, A., Mirzapour, M., Nasar, J., Kisaka, O., Sow, S., Ranjan, S., & Gitari, H. (2023). Impact of different fertilizer sources under supplemental irrigation and rainfed conditions on eco-physiological responses and yield characteristics of dragon's head (*Lallemantia iberica*). *Plants*, 12(8),1693. Doi:10.3390/plants12081693
- Heydarzadeh, S., Gitari, H., Rahimi, A., Khiavi, H.K., Maitra, S., & Hosseinpour, A. (2021). Yield and quality traits of field-grown sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in response to foliar application of micronutrients and different levels of manure. *International Journal of Bioresource Science*, 8(2), 109-118. Doi: 10.30954/2347-9655.02.2021.7
- Heydarzadeh, S., Jalilian, J., Pirzad, A., Petrusa, E., & Jamei, R. (2022). Fodder value and physiological aspects of rainfed smooth vetch affected by biofertilizers and supplementary irrigation in an agri-silviculture system. *Agroforestry System*, 96, 221-232. Doi:10.1007/s10457-021-00695-7
- Hossain, M.S., Alam, M.I., Rahman, M.M., Mandal, P., Hasan, M.K., & Akter, S. (2021). Performance of different sugar beet genotypes under salinity stress. *Asian Journal of Crop*, 6(01), 213-220. Doi: 10.3390/ajpb14010017
- Hussain, Z., Khattak, R.A., Irshad, M., & Mahmood, Q. (2014). Sugar beet (*Beta vulgaris* L.) response to diammonium phosphate and potassium sulphate under saline-sodic conditions. *Soil use and management*, 30(3), 320-327. Doi:10.1111/sum.12132
- Islam, M.J., Uddin, M.J., Hossain, M.A., Henry, R., Begum, M.K., Sohel, M.A.T., Mou, M.A., Ahn, J., Cheong, E.J., & Lim, Y.S. (2022). Exogenous putrescine attenuates the negative impact of drought stress by modulating physio-biochemical traits and gene expression in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *PloS One*, 17(1), p.e0262099. Doi: 10.1371/journal.pone.0262099
- Karo, M., & Mishra., D. (1976). Catalase, peroxidase and polyphenol oxidase activity during rice leaf senescence. *Plant Physiology*, 57, 315-319. DOI: 10.1104/pp.57.2.315
- Khayamim, S., Noshad, H., Rajabi, A., & Jafari, R. (2021). Response of sugar beet multigermin genotypes to salinity stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 14(1), 235-247. Doi.org/10.22077/escs.2019.2664.1697
- Li, J., Yu, B., Ma, C., Li, H., Jiang, D., Nan, J., Xu, M., Liu, H., Chen, S., Duanmu, H., & Li, H. (2022). Functional characterization of sugar beet M14 antioxidant enzymes in plant salt stress tolerance. *Antioxidants*, 12(1), p.57. Doi: 10.3390/antiox12010057
- Mahadevaiah, C., Vignesh, P., Appunu, C., Valarmathi, R., Dhansu, P., Kumar, A., Dharshini, S., Padmanabhan, T.S.S., Narayan, J.A., Selvamuthu, K., Sreenivasa, V. (2023). Physiological characterization of *Triplidium arundinaceum* and Sugarcane (*Saccharum* spp.) germplasm for salinity stress tolerance at the formative stage. *Sustainability*, 15(8), p.6962. Doi.org/10.3390/su15086962
- Mangena, P. (2023). Impact of Polyploidy Induction for Salinity Stress Mitigation in Soybean (*Glycine max* L. Merrill). *Plants*, 12(6), p.1356. Doi:10.3390/plants12061356
- Mekdad, A.A., Rady, M.M., Ali, E.F., & Hassan, F.A. (2021). Early sowing combined with adequate potassium and sulfur fertilization: promoting *Beta vulgaris* (L.) yield, yield quality, and K-and S-use efficiency in a dry saline environment. *Agronomy*, 11(4), p.806. Doi: 10.3390/agronomy11040806
- Raees, N., Ullah, S., & Nafees, M. (2023). Interactive effect of tocopherol, salicylic acid and ascorbic acid on agronomic characters of two genotypes of *brassica napus* L. under induced drought and salinity stresses. *Gesunde Pflanzen*, 75(5), 1905-1923. Doi: 10.1007/s10343-022-00808-x
- Ramani, D.H., Singh, A.K., Prajapati, N.N., Tiwari, K.K., & Bhadauria, H.S. (2023). Genotypic difference in growth and physiological indices of grain amaranth species under salinity stress. *International Journal of Bio-resource and Stress Management*, 14(2), 268-278.
- Skorupa, M., Szczepanek, J., Yolcu, S., Mazur, J., Tretyn, A., & Tyburski, J. (2022). Characteristic of the ascorbate oxidase gene family in *Beta vulgaris* and analysis of the role of AAO in response to salinity

- and drought in beet. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(21), p.12773. DOI: 10.3390/ijms232112773
- Sudhakar, C., Lakshmi, A., & Giridara kumar, S. (2001). Changes in the antioxidant enzyme efficacy in two high yielding genotypes of mulberry (*Mours alba* L.) under NaCl salinity. *Plant Science*, 167, 613-619. Doi.org/10.1016/S0168-9452(01)00450-2
- Taghizadegan, M.E.H.D.I., Toorchi, M.A.H.M.O.U.D., Vahed, M.M., & Khayamim, S. (2019). Evaluation of sugar beet breeding populations based morpho-physiological characters under salinity stress. *Pakistan Journal of Botany*, 51(1), 11-17. Doi: 10.30848/PJB2019-1(7)
- Tahjib-UI-Arif, M., Sohag, A.A.M., Afrin, S., Bashar, K.K., Afrin, T., Mahamud, A.S.U., Polash, M.A.S., Hossain, M.T., Soheli, M.A.T., Brestic, M., & Murata, Y. (2019). Differential response of sugar beet to long-term mild to severe salinity in a soil-pot culture. *Agriculture*, 9(10), p.223. DOI: 10.3390/agriculture9100223
- Yolcu, S., Alavilli, H., Ganesh, P., Panigrahy, M., & Song, K. (2021). Salt and drought stress responses in cultivated beets (*Beta vulgaris* L.) and wild beet (*Beta maritima* L.). *Plants*, 10(9), p.1843. Doi:10.3390/plants10091843





## **Investigating the physiological response of different genotypes of sugar beet in different levels of salinity stress**

### **Abstract**

Salinity is one of the most important environmental stresses, the increasing spread of which reduces the growth and yield of agricultural plants, in this regard, identifying sugar beet cultivars tolerant to salinity stress to improve quantitative and qualitative yield is of particular importance. For this purpose, research was conducted to investigate the physiological characteristics of some sugar beet genotypes under salt stress in 2019. This experiment was carried out factorially in the form of randomized complete blocks with three replications in Mohaghegh Ardabili University under greenhouse conditions. The experimental factors included different genotypes of sugar beet (9 genotypes) as the first factor and salinity stress as the second factor at four levels (control and 4, 8 and 12 dS/m). The results showed that the effects of salinity stress on chlorophyll content, soluble protein, proline content, soluble sugars and the activity of antioxidant enzymes (catalase, peroxidase and polyphenol oxidase) of different sugar beet cultivars were significant. Higher levels of salinity stress (12 dS/m) caused a significant increase in soluble protein, proline content, soluble sugars and activity of catalase, peroxidase and polyphenol oxidase enzymes compared to other levels of salinity stress and the control treatment. Whereas, the highest content of chlorophyll a, b and total chlorophyll was observed in cultivars number 15 and 4 in the treatment of not applying salt stress. Among the studied genotypes, genotypes No. 6, 15 and 20 had the highest activity of antioxidant enzymes under the condition of 12 dS/m salinity stress. Therefore, at higher levels of salinity stress, resistant sugar beet cultivars prevent the reduction of photosynthetic pigment content by improving the content of compatible osmolytes and antioxidant activities through correct membrane structure.

**Keywords:** antioxidant enzymes, proline, salinity stress, sugar beet