

Original article

Evaluation of physiological index in response to cold stress in four potato cultivars (*Solanum tuberosum* L.)Toktam Ahmadi¹, Seyed Hossein Nemati^{2*} , Jafar Nabati³ 

1. Ph.D. Student, Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2. Assistant Professor Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3. Assistant Professor Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Received 31 October 2023; Revised 12 December 2023; Accepted 9 January 2024

Extended abstract**Introduction**

Cold and freezing temperatures can cause serious damage to the potato plant (*Solanum tuberosum* L.) and decrease yield. In intense cases, the cold stress can even destroy the entire production. Most potato cultivars are sensitive to cold, and temperature plays a crucial role in their geographic dispersal. Physiological responses of plants to cold stress include increased calcium transfer, changes in membrane lipid composition, enhanced antioxidant capacity, and accumulation of osmotic protectors. Compatibility, which involves the aggregation of cold-protecting polypeptides and osmolytes, is the primary method that plants use to cope with cold stress. Cold-compatible plants often store higher levels of soluble carbohydrates in their underground tissues. This study was conducted to investigate the mechanisms of cold tolerance in four potato cultivars: Agria, Fontane, Arinda, and Santé, highlighting the importance of cold stress to potato plants.

Materials and methods

The study was conducted using a completely randomized design with four replications. The factors considered were temperature (4, 2, 0, -2, -4°C) and potato cultivars (Agria, Fontane, Arinda, and Sante). To evaluate the response to cold, six-week-old seedlings were transferred to a thermogradient freezer with darkness and a temperature of five degrees Celsius. The temperature gradually decreased at a rate of two degrees Celsius per hour, and the seedlings were exposed to the desired temperatures (-4, -2, 0, +2, +4 °C) for one hour. Two weeks after exposure to cold stress, the percentage of survival, plant height, and the highest shoot dry weight of the cultivars were recorded. The content of malondialdehyde (MDA), soluble carbohydrates, total phenols, proline, catalase enzyme activity, peroxidase, and superoxide dismutase were evaluated. The statistical analysis was performed using Minitab v.17.3.1 software, and mean comparison was conducted using Duncan's multi-range test at a five percent probability level with standard error.

Results and discussion

The results revealed that the survival rate in cultivar Santé significantly decreased with decreasing temperature. Cultivar Fontane exhibited a higher survival rate than other cultivars at a temperature of -4°C. The phenol content in cultivar Santé at -2°C was 81% higher than in cultivar Fontane. In cultivar Sante, the proline content increased fourfold as the temperature decreased from 4 to 0°C. In cultivar Fontane, the proline content increased with a temperature decrease from 4 to -2°C and then decreased

* Corresponding author: Hossein Nemati; E-Mail: nemati@um.ac.ir

with further temperature reduction. The soluble carbohydrate content increased with a temperature decrease in cultivars Santé, Arinda, and Agria, while it decreased in cultivar Fontane. Cultivar Santé exhibited the highest increase in MDA (malondialdehyde) content, whereas cultivar Fontane showed the lowest increment when the temperature decreased from 4 to -4°C. Regarding enzyme activities, the CAT (catalase) enzyme activity increased 9.2-fold in cultivar Santé at a temperature of 0°C. In cultivar Fontane, the highest CAT enzyme activity was observed at 2°C. The POD (peroxidase) enzyme activity showed the highest increase in cultivar Santé with a temperature decrease to -2°C. In cultivar Fontane, the SOD (superoxide dismutase) enzyme activity decreased with a temperature decrease to 2°C and then increased by 80% with further temperature reduction to 0°C. After exposure to cold stress, plant height decreased in cultivars Santé and Agria compared to the control, while it increased in cultivar Fontane with a temperature decrease. The highest shoot dry weight was observed in cultivar Fontane at a temperature of -4°C, whereas the lowest shoot dry weight was observed in cultivar Sante.

Conclusion

Generally, this study showed that cultivar Santé is more sensitive to cold than cultivars Agria, Fontane, and Arinda. On the other hand, cultivars Fontane and Agria were found to be more tolerant. The studied metabolites and antioxidant compounds of cultivar Fontane were more significant under cold stress conditions, indicating more efficient defensive mechanisms compared to other cultivars. This ultimately resulted in better cold tolerance for cultivar Fontane.

Keywords: Antioxidants, Cold tolerance, MDA (malondialdehyde), Proline, Survival percentage

بررسی شاخص‌های فیزیولوژیکی در پاسخ به تنش سرما در چهار رقم سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.)

تکتم احمدی^۱، سید حسین نعمتی^۲، جعفر نباتی^۳

۱. دانشجوی دکتری گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۲. استادیار گروه باغبانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۳. استادیار گروه آگروتکنولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

مشخصات مقاله	چکیده
واژه‌های کلیدی:	به‌منظور بررسی تحمل به سرما در برخی ارقام سیب‌زمینی، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار انجام شد. تیمارهای دمایی شامل (۴، ۲، ۰، -۲، -۴ °C) و ارقام سیب‌زمینی (اگریا، فونتانه، آریندا و سائنه) بودند. نتایج حاصل نشان داد در رقم سائنه بقا به‌طور معنی‌داری با افت دما کاهش پیدا کرد. بقا در دمای ۴- در رقم فونتانه ۵۵ درصد بیشتر از رقم سائنه بود. محتوای فنل در رقم سائنه در دمای ۲-، ۸۱ درصد بیشتر از رقم فونتانه بود. در رقم سائنه محتوای پرولین با کاهش دما از ۴ به صفر درجه سانتی‌گراد چهار برابر افزایش پیدا کرد. در رقم فونتانه کاهش دما از ۴ به ۲- محتوای پرولین افزایش و با کاهش بیشتر دما کاهش یافت. محتوای کربوهیدرات‌های محلول در رقم سائنه، آریندا و اگریا با کاهش دما افزایش و در رقم فونتانه کاهش یافت. رقم سائنه بیشترین و رقم فونتانه کمترین روند افزایشی مالون‌دی‌آلدئید را با کاهش دما از ۴ به ۴- داشتند. فعالیت آنزیم کاتالاز با کاهش دما تا دمای صفر درجه سانتی‌گراد در رقم سائنه ۲/۹ برابر افزایش پیدا کرد. در رقم فونتانه بیشترین فعالیت آنزیم CAT در دمای ۲- بود. فعالیت آنزیم پراکسیداز در رقم سائنه با کاهش دما از صفر به ۲- حدود ۹/۳ برابر افزایش یافت. در رقم فونتانه با کاهش دما تا ۲- فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز کاهش یافت و با کاهش دما به صفر درجه سانتی‌گراد، ۸۰ درصد افزایش یافت. ارتفاع بوته بعد از اعمال تنش سرما در رقم سائنه و اگریا نسبت به شاهد کمتر بود ولی در رقم فونتانه با کاهش دما ارتفاع بوته نسبت به شاهد بیشتر بود. در دمای ۴- بیشترین وزن خشک اندام هوایی در رقم فونتانه و کمترین وزن خشک اندام هوایی در رقم سائنه مشاهده شد. به‌طور کلی رقم فونتانه که دارای سازوکار دفاعی بهتر و کارآمدتری نسبت به سایر ارقام بود تحمل به سرمای بهتری نشان داد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۹	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۲۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۹	
تاریخ انتشار:	
بهار ۱۴۰۴	
۱۸(۱): ۱۰۹-۱۲۶	

مقدمه

به‌عنوان یک منبع غذایی مهم در نظر گرفته می‌شود (Van Harrsselaar et al., 2017).

سرمازدگی و یخبندان دو عامل اصلی طبیعی هستند که بر تولید سیب‌زمینی تأثیر می‌گذارند. سالانه تمام مناطق تولیدکننده سیب‌زمینی در سراسر جهان سطوح متفاوتی از خسارت سرما و یخ‌زدگی را تجربه می‌کنند (Chang and Sohn, 2014). سرمازدگی و یخبندان می‌توانند به سیب‌زمینی آسیب جدی وارد کنند و منجر به کاهش عملکرد

سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum* L.) چهارمین محصول غذایی بعد از گندم، برنج و ذرت است (Gültekin and Ertek, 2018). سیب‌زمینی در دامنه وسیعی از زیستگاه‌ها از ارتفاع ۴۰۰۰ متر از سطح دریا و عرض جغرافیایی ۴۷ درجه جنوبی تا ۶۵ درجه شمالی رشد می‌کند (Hijmans, 2001). غده‌های سیب‌زمینی سرشار از مواد غذایی از جمله نشاسته، ویتامین‌ها، مواد معدنی و اسیدهای آمینه ضروری هستند و

نگردد تعریف می‌شود (Yadav, 2010). این فرایند همراه با تغییرات بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی همراه است که در نهایت تغییرات چشمگیری را در بیان ژن، وضعیت لیپیدهای غشایی و تجمع مولکول‌های کوچک به دنبال خواهد داشت (Yamaguchi-Shinozaki and Shinozaki, 2006). سازگاری به سرما باعث افزایش تحمل گیاه به تغییرات فیزیکی و فیزیوشیمیایی در زمان مواجهه به دماهای یخ‌زدگی می‌شود (Chen et al., 1983). با توجه به اهمیت تنش سرما و حجم بالای خسارت این تنش به گیاه سیب‌زمینی این مطالعه به منظور بررسی سازوکارهای تحمل به سرما در چهار رقم سیب‌زمینی اگریا، فونتانه، آریندا و سانته انجام شد.

مواد و روش‌ها

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و با چهار تکرار در سال ۱۳۹۹ در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. عوامل آزمایش شامل پنج سطح دما (۴، ۲، ۰، -۲، -۴ درجه سانتی‌گراد) و چهار رقم سیب‌زمینی (اگریا، فونتانه، آریندا و سانته) بودند. منشأ گیاهان از گیاهچه‌های کشت بافتی عاری از ویروس که از پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی اصفهان تهیه شده بودند. گیاهچه‌ها در گلدان‌های پلاستیکی با قطر ۱۰ سانتی‌متر حاوی بستر به نسبت ۶۰ به ۴۰ درصد کوکوپیت به پرلیت کشت شدند. گیاهچه‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد روزانه و ۱۵ درجه سانتی‌گراد شبانه و رطوبت نسبی ۸۰ درصد تحت نور طبیعی در گلخانه رشد کردند.

برای ارزیابی پاسخ به تنش سرما، گیاهچه‌های شش‌هفته‌ای به فریزر ترموگرادیان در شرایط تاریکی و دمای پنج درجه سانتی‌گراد منتقل شدند. دما به صورت تدریجی با سرعت دو درجه سانتی‌گراد در ساعت کاهش یافت و گیاهچه‌ها به مدت یک ساعت در معرض دماهای موردنظر (۴، ۲، ۰، -۲، -۴ درجه سانتی‌گراد) قرار گرفتند. سپس گیاهان به اتاقک سرد با دمای 4 ± 1 درجه سانتی‌گراد با رطوبت نسبی ۸۰-۷۰ درصد و فتوپریود ۱۶ ساعت (شدت تابش $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) منتقل و پس از نگهداری به مدت ۲۴ ساعت در اتاقک رشد، نمونه‌برداری از برگ‌ها صورت گرفت. دو هفته پس از مواجهه با تنش سرما، درصد بقا و ارتفاع بوته، وزن خشک اندام هوایی در ارقام ثبت گردید (Nezami et al., 2018).

یا حتی از دست دادن کامل عملکرد شوند. در کشت‌های زود هنگام سیب‌زمینی جوانه‌زنی تحت تأثیر دماهایی پایین قرار می‌گیرد از طرفی در مرحله بلوغ خسارت زیادی در اثر سرما و یخبندان زودرس به سیب‌زمینی وارد می‌شود (Chang et al., 2014).

بررسی‌ها نشان داده است که با رسیدن دما به کمتر از هفت درجه سانتی‌گراد رشد گیاه سیب‌زمینی متوقف می‌شود و در دمای ۰/۸- درجه سانتی‌گراد آسیب سرمازدگی و در دمای ۲- درجه سانتی‌گراد خسارت یخ‌زدگی و دمای ۳- درجه سانتی‌گراد گیاه از بین می‌رود (Fuyi and Mengyun, 1995).

به‌طور کلی، ظهور علائم خسارت سرما، بستگی به حساسیت گیاه به تنش سرما دارد و از یک گیاه به گیاه دیگر متفاوت است. حدود ۴۸-۷۲ ساعت بعد از قرارگیری در معرض سرما، علائم صدمات سرما در گیاه قابل مشاهده است. گیاهانی که در معرض سرما قرار گرفته‌اند علائم ظاهری مشابهی از جمله کاهش سطح برگ، پژمردگی و نکروزه شدن بافت (مرگ بافت) را نشان می‌دهند. دمای پایین به غشاء سلولی سیب‌زمینی آسیب می‌زند (Willick et al., 2018) و بر محتوای مالون‌دی‌آلدئید (Lin et al., 2017)، اسید آسبیزیک (Huang et al., 2017)، پرولین (Phukan et al., 2016)، کربوهیدرات‌های محلول (Bustamante et al., 2016) و متابولیت‌های دیگر تأثیرگذار است و منجر به تغییر در سوخت‌وساز مولکولی و فیزیولوژیکی گیاه می‌شود. پاسخ‌های فیزیولوژیکی شامل افزایش سطح انتقال یون کلسیم، تغییر در ترکیب‌ها لیپیدی غشاء، افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و تجمع محافظت‌کننده‌های اسمزی است (Fu et al., 2016).

مطالعات نشان داده است که تشکیل یخ داخل سلولی عامل اصلی آسیب به رشد گیاهان در دمای پایین است (Yadav, 2010). تشکیل یخ در بافت‌های گیاهی منجر به پسابیدگی شده که باعث آسیب مکانیکی به دیواره سلول، غشاء پلاسما، شکننده شدن سلول (کاهش استحکام غشا و نشت مواد حل‌شده) و کاهش استحکام اندام‌ها می‌شود (Yadav, 2010). سازگاری به دماهای پایین با قرارگیری در معرض سرماهای کوتاه‌مدت حاصل می‌شود که این فرایند سازگاری به سرما نامیده می‌شود. تحمل به سرما عبارت است از توانایی گیاه به تحمل دماهای پایین (۱۵-۰ درجه سانتی‌گراد) به‌طوری‌که صدمه و خسارتی به بافت گیاه وارد

طول موج ۲۴۰ نانومتر (Velikova et al., 2000)، پراکسیداز در طول موج ۴۷۰ نانومتر (Srinivas et al., 1999) و آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در طول موج ۵۶۰ نانومتر (Giannopolitis and Ries, 1977) از طریق اسپکتروفتومتری اندازه‌گیری شد.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با نرم‌افزار Minitab ۱۷.3.1 و مقایسه میانگین آن‌ها توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد و خطای استاندارد انجام شد. برای برآورد همبستگی، از نرم‌افزار JMP4 و برای تجزیه به مؤلفه‌های اصلی از نرم‌افزار STATISTICA8 استفاده شد.

نتایج و بحث

جدول تجزیه واریانس نشان می‌دهد که اثرات صفات اصلی رقم و دما و همچنین برهمکنش این دو عامل برای کلیه صفات مورد بررسی معنی‌دار گردید (جدول ۱). در مورد بقا نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بقا تحت تأثیر رقم، دما و برهمکنش آن‌ها قرار گرفت (جدول ۱). همان‌طور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود بقا در رقم سانت به‌طور معنی‌داری با افت دما کاهش پیدا کرد و بیشترین کاهش در دمای ۲- درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. در رقم اگریا بقا از دمای ۲- درجه سانتی‌گراد شروع به کاهش کرد درحالی‌که در رقم آریندا کاهش بقا از دمای صفر درجه سانتی‌گراد شروع شد. در رقم فونتانه با کاهش دما تغییر معنی‌داری در بقا مشاهده نشد. بقا در دمای ۴- درجه سانتی‌گراد در رقم فونتانه حدود ۲/۳ برابر بیشتر از بقا در همین دما در رقم سانت به (شکل ۱).

وزن خشک گیاهان ۴۸ ساعت پس از قرار گرفتن در آون ۷۰ درجه سانتی‌گراد ثبت شد. به‌منظور ارزیابی درصد بقا، گیاهچه‌ها به گلخانه منتقل شدند و پس از چهار هفته، درصد بقای آن‌ها تعیین شد. درصد بقا از طریق شمارش تعداد بوته زنده در هر گلدان با استفاده از معادله ۱ محاسبه شد (Nezami et al., 2018).

$$S(\%) = (Paf / Pbf) \times 100 \quad [1]$$

که در این معادله، S: درصد بقا، Pbf: تعداد گیاهان قبل از تیمار سرما و Paf: تعداد گیاهان زنده چهار هفته پس از اعمال تیمار سرما است.

پراکسیداسیون لیپیدها با اندازه‌گیری محتوای مالون‌دی‌آلدئید (MDA) (Stewart and Bewley, 1980) ارزیابی شد. محتوای کربوهیدرات‌های محلول نیز با استفاده از روش فنل سولفوریک اسید و استاندارد گلوکز اندازه‌گیری شد (Dubois et al., 1956). محتوای فنل کل با استفاده از روش معرف فولین سیکالتو در جذب ۷۶۵ نانومتر و با استفاده از استاندارد اسید گالیک تعیین شد (Singleton and Rossi, 1965). مقدار پرولین بافت برگ بر اساس روش باتس (Bates et al., 1973) اندازه‌گیری شد.

برای ارزیابی فعالیت آنزیمی، ۱۰۰ میلی‌گرم بافت برگ تازه (جوان‌ترین برگ کاملاً توسعه‌یافته) در نیتروژن مایع، پودر شد و بافر فسفات پتاسیم ۰/۱ مولار با اسیدیته ۷/۸، حاوی EDTA یک میلی‌مولار به آن اضافه شد. مواد نامحلول توسط سانتریفیوژ یخچال‌دار (سیگما مدل K۱۸-۳) با ۱۲۰۰۰ جی به مدت ۲۰ دقیقه در دمای چهار درجه سانتی‌گراد جدا و محلول بالایی به‌عنوان منبع برای ارزیابی آنزیم‌ها استفاده گردید. سپس فعالیت آنزیم کاتالاز در

جدول ۱. تجزیه واریانس (سطح احتمال) صفات مورد مطالعه در گیاهچه‌های سیب‌زمینی پس از اعمال سرما

Table 1. Analysis of variance (P value) of studied traits in potato seedlings after cold stress

S.O.V	منابع تغییرات	درجه آزادی df	بقا Survival	فنل Phenol	پرولین Proline	کربوهیدرات Carbohydrate	مالون‌دی‌آلدئید MDA
Temperature (T)	دما	4	0.0001**	0.0001**	0.0001**	0.001**	0.0001**
Cultivar (C)	رقم	3	0.0001**	0.0001**	0.0001**	0.0001**	0.0001**
T×C	دما × رقم	12	0.0001**	0.0001**	0.0001**	0.0001**	0.0001**
Error	خطا	60					
C.V%	ضریب تغییرات		7.2	8.66	13.64	21.27	16.71

Table 1. Continued

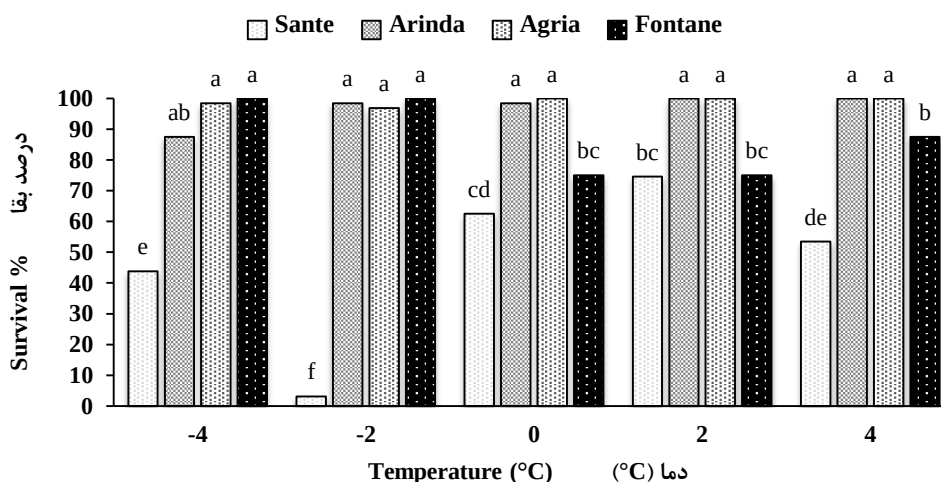
S.O.V	منابع تغییرات	درجه		سوپر			وزن خشک Shoot dry weight
		آزادی	کاتالاز CAT	پراکسیداز POX	اکسید دیسموتاز SOD	ارتفاع Plant height	
Temperature (T)	دما	4	0.0001**	0.0001**	0.0001**	0.0001**	0.0001**
Cultivar (C)	رقم	3	0.134 ^{ns}	0.0001**	0.0001**	0.0001**	0.0001**
T×C	دما × رقم	12	0.0001**	0.0001**	0.0001**	0.0001**	0.0001**
Error	خطا	60					
C.V%	ضریب تغییرات		32.57	25.95	0.22	5.52	7.48

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

ns and **: Non-significant and significant in probability levels of 1% respectively

ارقام فونتانه و آگریا احتمالاً به دلیل داشتن سازوکارهای دخیل در تغییر متابولیسم چربی و فسفولیپید، افزایش اسیدهای چرب و کربوهیدرات‌های محلول تحمل به سرما می‌بیشتری نشان دادند و از طرفی شاید به علت سازوکارهای آنتی‌اکسیدانی کارآمدتر نسبت به دو رقم دیگر توانسته‌اند در برابر اثرات مخرب گونه‌های فعال اکسیژن گیاهچه‌ها را از خسارت سرما محافظت نمایند (Alisoltani et al., 2012).

پژوهشگران محدوده بقا را بین ۶۰ تا ۹۰ درصد در شرایط عدم خوسرمایی و خوسرمایی گزارش کردند (Nezami et al., 2009). از دلایل کاهش بقا در اثر تنش سرما صدمات وارده به گیاهچه‌ها و افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن است که سبب اختلالاتی در سلول به‌ویژه از طریق اکسیداسیون لیپیدهای غشاء، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک می‌گردند (Fridovich, 1986). در مطالعه حاضر



شکل ۱. تأثیر دما بر درصد بقا گیاهچه‌های سیب‌زمینی در مرحله گیاهچه‌ای

Fig. 1. Effect of temperature on survival percent in potato seedling

کل در رقم سانتی در دماهای ۴ و -۴ درجه سانتی‌گراد ۵۶ درصد بود (جدول ۲). رقم آریندا نسبت به رقم سانتی محتوای فنل کل کمتری داشت در این رقم محتوای فنل کل تا دمای صفر درجه سانتی‌گراد روند کاهشی و بعد از آن روند افزایشی داشت. در رقم آگریا محتوای فنل کل تا دمای صفر درجه سانتی‌گراد افزایش یافت و بعد از آن روند کاهشی نشان داد که این کاهش معنی‌دار نبود. در رقم فونتانه تا دمای -۲ درجه سانتی‌گراد روند کاهشی محتوای فنل کل مشاهده شد، در

محتوای فنل کل

بررسی تغییرات محتوای فنل کل در ارقام سیب‌زمینی نشان داد که دما، رقم و برهمکنش آن‌ها تأثیر معنی‌داری بر این ویژگی داشت (جدول ۱). در رقم سانتی با کاهش دما محتوای فنل کل روند کاهشی داشت، با این وجود در دمای -۲ درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای صفر درجه سانتی‌گراد مقداری افزایش نشان داد که معنی‌دار نبود. تفاوت بین محتوای فنل

درجه سانتی‌گراد میزان بقا کاهش و محتوای فنل افزایش پیدا کرد که با نتایج همبستگی مطابقت دارد. مطالعات نشان داده است که محتوای فنل کل در گیاهان به دلیل عوامل تنش‌زای محیطی و زیستی به‌طور چشمگیری افزایش پیدا می‌کند. این ترکیب‌ها در القای بیان ژن مسیرهای انتقال پیام و هموستاز متابولیک در گیاهان در شرایط نامساعد محیطی نقش دارند تا گیاهان بتوانند پاسخ‌های مناسبی به شرایط تنش داشته باشند (Singh et al., 2011). افزایش قابل توجه در محتوای فنل کل در گیاهان گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) و هندوانه (*Citrullus lanatus*) کشت‌شده در شرایط سرد گزارش شده است.

دمای ۴- درجه سانتی‌گراد روند تغییرات افزایشی بود که تغییرات آن از نظر آماری معنی‌دار نبود. نتایج نشان داد که محتوای فنل در رقم سانته در دمای ۲- درجه سانتی‌گراد ۸۱ درصد از محتوای فنل کل در رقم فونتانه بیشتر بود. همبستگی بین صفات بین محتوای فنل کل و بقا در دمای ۴- درجه سانتی‌گراد ($r = -0.72^{**}$)، دمای ۲- درجه سانتی‌گراد ($r = -0.89^{**}$)، دمای ۴ درجه سانتی‌گراد ($r = -0.84^{**}$) و دمای ۲ درجه سانتی‌گراد ($r = -0.49^{**}$) معنی‌دار بود (جدول ۵ و ۷). با توجه به نتایج به‌دست‌آمده با کاهش دما تا صفر درجه سانتی‌گراد درصد بقا تغییر معنی‌داری نداشت و محتوای فنل با کاهش دما تا صفر درجه سانتی‌گراد روند کاهشی داشت و با کاهش بیشتر دما به ۴-

جدول ۲. تأثیر دما بر صفات مورد مطالعه در ارقام سیب‌زمینی در مرحله گیاهچه‌ای

Table 2. Effect of temperatures on study traits in potato cultivars in seedling stage

صفت Treat	رقم Cultivar	Temperature (°C)				
		-4	-2	0	2	4
محتوای فنل کل Total phenol content (mg.gfw ⁻¹)	Sante	116 ^{c-h}	162 ^{ab}	140 ^{bc}	139 ^{bc}	181 ^a
	Arinda	102 ^{e-i}	95.8 ^{f-i}	76.1 ⁱ	93.9 ^{g-i}	104 ^{d-h}
	Agria	101 ^{e-i}	120 ^{c-g}	128 ^{c-e}	130 ^{cd}	123 ^{c-f}
	Fontane	91.5 ^{h-i}	89.1 ^{h-i}	104 ^{d-h}	121 ^{c-g}	122 ^{c-f}
محتوای پرولین Proline content (mg.gfw ⁻¹)	Sante	0.490 ^{cd}	0.650 ^b	1.90 ^a	0.770 ^b	0.460 ^{de}
	Arinda	0.320 ^{d-g}	0.320 ^{d-g}	0.300 ^g	0.410 ^{f-g}	0.400 ^g
	Agria	0.390 ^{d-g}	0.410 ^{bc}	0.220 ^{d-g}	0.260 ^{d-f}	0.220 ^{d-g}
	Fontane	0.320 ^{d-g}	0.710 ^{d-f}	0.350 ^{e-g}	0.400 ^{d-f}	0.270 ^{fg}
محتوای کربوهیدرات‌های محلول Soluble carbohydrates content (mg.gfw ⁻¹)	Sante	4.25 ^a	2.56 ^{a-c}	1.55 ^{a-f}	2.72 ^{ab}	3.04 ^{a-e}
	Arinda	3.18 ^{a-d}	3.31 ^{b-f}	2.99 ^{c-f}	3.94 ^{b-f}	2.78 ^{a-f}
	Agria	1.96 ^{c-f}	1.81 ^{e-f}	1.77 ^f	2.09 ^{c-f}	1.81 ^{d-f}
	Fontane	2.34 ^{c-f}	1.64 ^{d-f}	2.34 ^{d-f}	2.12 ^{c-f}	2.74 ^{b-f}
مالون دی‌آلدئید MDA (ng.gfw ⁻¹)	Sante	18.1 ^{de}	29.8 ^{bc}	6.31 ^{g-h}	27.9 ^c	3.44 ^h
	Arinda	23.8 ^{cd}	28.6 ^{bc}	36.8 ^{ab}	18.2 ^{de}	14.7 ^{e-g}
	Agria	12.0 ^{e-h}	9.90 ^{e-h}	18.3 ^{de}	6.95 ^{gh}	8.60 ^{f-h}
	Fontane	15.7 ^{d-f}	13.4 ^{e-g}	41.0 ^a	28.7 ^{bc}	11.6 ^{e-h}

میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر صفت بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (Duncan)، تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد ندارند. Means with the similar letter are not significantly different ($P \leq 0.01$) based on last significant difference test (Duncan).

محتوای پرولین

درجه سانتی‌گراد به ترتیب موجب افزایش محتوای پرولین به مقدار ۸۶ و ۷۷ درصد نسبت به دمای چهار درجه سانتی‌گراد گردید. در رقم فونتانه کاهش دما از چهار به ۲- درجه سانتی‌گراد محتوای پرولین افزایش و با کاهش بیشتر دما محتوای پرولین کاهش یافت (جدول ۲). در بین ارقام کمترین محتوای پرولین در رقم آگریا در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد به دست آمد.

همان‌طور که نتایج نشان داد در رقم سانته میزان پرولین در اثر سرما در دمای صفر درجه سانتی‌گراد افزایش

نتیجه این مطالعه نشان داد که اثر دما، رقم و برهمکنش آن‌ها بر محتوای پرولین معنی‌دار بود (جدول ۱). در رقم سانته محتوای پرولین با کاهش دما از چهار درجه سانتی‌گراد تا دمای صفر درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا کرد و پس از آن کاهش یافت. میزان افزایش پرولین از دمای چهار به صفر درجه سانتی‌گراد در رقم سانته چهار برابر بود. در رقم آریندا بین دماهای مورد مطالعه تفاوت معنی‌داری از نظر محتوای پرولین مشاهده نشد. در رقم آگریا کاهش دما به ۲- و ۴-

ساختار غشاء از خسارت تنش به آن ممانعت می‌نمایند (Gusta and Wisniewski, 2013). کاهش کربوهیدرات‌های محلول در رقم فونتانه احتمالاً به این علت بوده است که سایر مسیرهای فتوسنتزی سعی کرده‌اند به جای تجمع کربوهیدرات‌های محلول، آن‌ها را صرف بیوسنتز سایر مسیرهای آنزیمی اکسیدانی و غیر اکسیدانی کنند تا سازوکارهای دفاعی را فعال کنند. افزایش محتوای کربوهیدرات‌های محلول در ارقام سانه، آریندا و اگرینا در دمای ۴- درجه سانتی‌گراد به علت متوقف شدن کل فعالیت‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی سلول در این دما بوده و گیاه فرصتی برای فعال کردن سازوکارهای القای تحمل به واسطه محتوای کربوهیدرات‌های محلول را نداشته است (Rihan et al., 2017). بر همین اساس همبستگی بین بقا و محتوای کربوهیدرات‌های محلول نیز منفی بود و این ویژگی نتوانست در بهبود بقای ارقام مورد مطالعه مؤثر باشد.

پراکسیداسیون لیپیدها

به منظور بررسی پایداری غشاء سلولی محتوای مالون‌دی‌آلدئید (MDA) اندازه‌گیری شد. کاهش دما بر محتوای مالون‌دی‌آلدئید به عنوان فرآورده نهایی پراکسیداسیون لیپیدی غشاء در هر چهار رقم تفاوت معنی‌داری داشت (جدول ۱). افزایش اکسیداسیون لیپیدهای غشای سلول و محتوای مالون‌دی‌آلدئید در رقم سانه با کاهش دما از ۴ به ۴- درجه سانتی‌گراد روند افزایشی داشت که بیشترین افزایش در دمای ۲- درجه سانتی‌گراد مشاهده شد که ۸/۵ برابر بیشتر از دمای چهار درجه سانتی‌گراد بود (جدول ۲). رقم آریندا، اگرینا و فونتانه هم در محتوای مالون‌دی‌آلدئید افزایش معنی‌داری با کاهش دما نشان دادند که این افزایش نسبت به رقم سانه کمتر بود. رقم فونتانه با ۳۴ درصد افزایش محتوای مالون‌دی‌آلدئید از دمای ۴ به ۴- درجه سانتی‌گراد کمترین میزان افزایش را داشت (جدول ۲). گیاهان مقدار زیادی از گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) را تحت تنش دمای پایین تولید می‌کنند که به غشای سلول آسیب می‌رساند و مواد مضر در سلول تجمع می‌یابد. در میان آن‌ها محتوای مالون‌دی‌آلدئید به طور معنی‌داری افزایش بیشتری دارد (Mittler et al., 2004). محتوای مالون‌دی‌آلدئید به عنوان یکی از شاخص‌های آسیب اکسیداتیو در نظر گرفته می‌شود و با تحمل سرمایی گیاه همبستگی منفی دارد (Li et al., 2008). در این پژوهش نیز همبستگی

معنی‌داری داشت که بعد از آن با روند کاهشی همراه شد، ولی همچنان از دماهای بالای صفر بیشتر بود که به علت یخ بستن و متوقف شدن فعالیت‌های متابولیکی سلول (Rihan et al., 2017) محتوای پرولین نسبت به دمای صفر درجه سانتی‌گراد کاهش پیدا کرد. با توجه به نتایج به دست آمده تغییر محتوای پرولین ارقام سیب‌زمینی نسبت به نوسانات دما متفاوت است. نتایج بررسی همبستگی بین صفات نیز نشان داد که همبستگی بین محتوای پرولین و بقا در دمای ۴- ($r = -0.60^{**}$)، صفر ($r = 0.80^{**}$)، ۲ ($r = 0.64^{**}$)، و ۴ درجه سانتی‌گراد ($r = -0.59^{**}$) منفی و معنی‌دار بود (جدول ۵، ۶ و ۷). همبستگی بین محتوای پرولین و محتوای فنل فقط در دمای صفر درجه سانتی‌گراد ($r = 0.59^{**}$) مثبت و معنی‌دار بود و در دماهای دیگر همبستگی معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۵، ۶ و ۷). نتایج به دست آمده با نتایج به دست آمده در گیاه برنج (*Oryza sativa*) و نیشکر (*Saccharum officinarum*) مطابقت داشت (de Freitas et al., 2019).

محتوای کربوهیدرات‌های محلول: اثر دما، رقم و برهمکنش آن‌ها بر محتوای کربوهیدرات‌های محلول معنی‌دار بود (جدول ۱). در رقم سانه (۳۹ درصد)، آریندا (۱۴ درصد) و اگرینا (۸ درصد) محتوای کربوهیدرات‌های محلول با کاهش دما از ۴ به ۴- درجه سانتی‌گراد افزایش یافت (جدول ۲). برعکس سایر ارقام در رقم فونتانه محتوای کربوهیدرات‌های محلول با کاهش دما از ۴ به ۴- درجه سانتی‌گراد، ۱۴ درصد کاهش پیدا کرد اما این تغییرات معنی‌داری نبود. بیشترین میزان افزایش محتوای کربوهیدرات‌های محلول با کاهش دما در رقم سانه مشاهده شد.

همبستگی منفی و معنی‌داری بین محتوای کربوهیدرات‌های محلول و بقا در دمای ۴- درجه سانتی‌گراد ($r = -0.78^{**}$) مشاهده شد. همچنین بین محتوای کربوهیدرات‌های محلول و محتوای فنل در دمای ۴- ($r = -0.60^{**}$)، صفر ($r = -0.64^{**}$) و ۲ درجه سانتی‌گراد ($r = -0.54^{**}$) همبستگی منفی و معنی‌دار وجود داشت (جدول ۵، ۶ و ۷). تنش دمای پایین می‌تواند سبب خسارت به غشای سلول و ایجاد اختلال در انتقال یون‌ها شود. در گیاهان متحمل، تجمع کربوهیدرات‌های محلول در گیاه انرژی مورد نیاز را در طی خوسرمایی به منظور مقابله با تنش یخ‌زدگی فراهم می‌کند (Soliman et al., 2018). تجمع کربوهیدرات‌های محلول به عنوان اسمولیت‌های سازگار سبب افزایش تحمل گیاه به تنش یخ‌زدگی شده و از طریق حفظ

فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT)

نتایج این بررسی نشان داد که برهمکنش دما و رقم بر فعالیت آنزیم کاتالاز معنی‌دار بود (جدول ۱). در رقم سانت به کاهش دما تا دمای صفر درجه سانتی‌گراد فعالیت آنزیم ۲/۹ برابر افزایش پیدا کرد ولی با کاهش بیشتر دما به ۴- درجه سانتی‌گراد فعالیت آنزیم ۲/۸ برابر نسبت به دمای صفر درجه سانتی‌گراد کاهش یافت (جدول ۳). در رقم آریندا فعالیت آنزیم کاتالاز با کاهش دما تا ۲- درجه سانتی‌گراد کاهش یافت و با کاهش بیشتر دما به ۴- درجه سانتی‌گراد فعالیت این آنزیم افزایش یافت. فعالیت آنزیم کاتالاز در رقم آگریا روند ثابتی نداشت و بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز در دمای صفر درجه سانتی‌گراد دیده شد. همچنین در این رقم فعالیت آنزیم کاتالاز در دمای ۴- درجه سانتی‌گراد ۱/۳ برابر بیشتر از دمای ۴ درجه سانتی‌گراد بود. در رقم فونتانه بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز در دمای ۲ درجه سانتی‌گراد بود که با کاهش دما به ۴- درجه سانتی‌گراد ۳/۴ برابر فعالیت آنزیم کاهش یافت (جدول ۳).

بین محتوای مالون‌دی‌آلدئید و محتوای فنل در دمای صفر ($r=0.79^{**}$) و ۴ درجه سانتی‌گراد ($r=-0.84^{**}$) منفی و معنی‌دار بود (جدول ۶ و ۷). نتایج پژوهش‌های پیشین نشان داد که کاهش در میزان مالون‌دی‌آلدئید نشانگر پایداری بیشتر اسیدهای چرب غیراشباع و تحمل بیشتر به تنش سرما در لاین‌های گوجه‌فرنگی متحمل به سرما است (Liu et al., 2012). همچنین در واکنش به دمای پایین میزان مالون‌دی‌آلدئید رقم متحمل به سرما کلزا بهاره، بسیار کمتر از رقم حساس به سرما افزایش یافت (Moieni-Korbekandi et al., 2014). همبستگی محتوای مالون دی‌آلدئید و بقا در دمای ۲- ($r=-0.57^*$) و ۲ درجه سانتی‌گراد ($r=-0.84^{**}$) منفی و معنی‌دار و در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد ($r=0.73^{**}$) مثبت و معنی‌داری بود (جدول ۵ و ۷).

اثر تنش سرما بر فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT)، آنزیم پراکسیداز (POD) و آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز (SOD)

جدول ۳. تأثیر دما بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در ارقام سیب‌زمینی در مرحله گیاهچه‌ای

Table 3. Effect of temperatures on antioxidants activity in potato cultivars in seedling stage

صفات Treats	Cultivar رقم	Temperature (°C)					دما
		-4	-2	0	2	4	
کاتالاز CAT (Unit.gfw ⁻¹)	Sante	686 ^c	1267 ^c	2669 ^{ab}	1281 ^c	913 ^c	
	Arinda	1202 ^c	892 ^c	1295 ^c	1345 ^{bc}	1345 ^c	
	Agria	1462 ^{bc}	1296 ^c	1485 ^{bc}	984 ^c	1080 ^c	
	Fontane	833 ^c	1866 ^{ac}	1314 ^c	2880 ^a	852 ^c	
پراکسیداز POX (Unit.gfw ⁻¹)	Sante	1110 ^b	2105 ^a	225 ^e	675 ^d	243 ^e	
	Arinda	232 ^e	130 ^e	1167 ^b	756 ^{cd}	138 ^e	
	Agria	60 ^e	114 ^e	1046 ^{bc}	181 ^e	85 ^e	
	Fontane	206 ^e	179 ^e	161 ^e	164 ^e	129 ^e	
سوپر اکسید دیسموتاز SOD (Unit.gfw ⁻¹)	Sante	0.968 ^a	0.964 ^a	0.280 ^g	0.549 ^{ef}	0.942 ^{ab}	
	Arinda	0.914 ^{a-d}	0.918 ^{a-d}	0.919 ^{a-c}	0.896 ^{a-d}	0.890 ^{a-d}	
	Agria	0.704 ^{c-e}	0.685 ^{d-f}	0.723 ^{b-e}	0.462 ^{fg}	0.549 ^{ef}	
	Fontane	0.860 ^{a-d}	0.826 ^{a-d}	0.826 ^{a-d}	0.731 ^{b-e}	0.745 ^{a-e}	

میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر صفت بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (Duncan)، تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد ندارند.

Means with the similar letter are not significantly different ($P \leq 0.01$) based on last significant difference test (Duncan).

سانتی‌گراد در رقم فونتانه باعث از بین رفتن و جلوگیری از آسیب‌های H_2O_2 شود. کاهش فعالیت این آنزیم در دماهای ۲- و ۴- درجه سانتی‌گراد احتمالاً به خاطر رفع نیاز سلول و کنترل اثرات مخرب تنش است. عموماً فرض بر این است که کاهش در فعالیت آنزیم کاتالاز ناشی از غلظت بالای

همبستگی بین فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT) و بقا در دمای صفر ($r=-0.62^{**}$) و ۲ درجه سانتی‌گراد ($r=-0.50^*$) منفی و معنی‌دار بود (جدول ۶ و ۷). می‌توان احتمال داد که فعالیت بیشتر و کاراتر آنزیم CAT در دمای صفر درجه سانتی‌گراد در رقم سانت به و آگریا و در دمای ۲ درجه

فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز (SOD)

نتایج این مطالعه نشان داد که برهمکنش سرما و رقم بر فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز در معنی‌دار بود (جدول ۱). میزان فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز در رقم سانتی با کاهش دما تا صفر درجه سانتی‌گراد کاهش پیدا کرد ولی با کاهش بیشتر دما به ۴- درجه سانتی‌گراد فعالیت آنزیم برابر افزایش یافت. در رقم آریندا، اگر با فونتانه فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز با کاهش دما روند افزایشی داشت (جدول ۳). در رقم اگر با کاهش دما تا ۲ درجه سانتی‌گراد فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز کاهش یافت و با کاهش بیشتر دما به صفر درجه سانتی‌گراد ۵۲ درصد فعالیت این آنزیم افزایش یافت. در رقم فونتانه و آریندا به ترتیب با کاهش دما فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز، ۱۷ و ۲ درصد افزایش یافت. این افزایش فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز می‌تواند نشان‌دهنده کارایی آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز در ایجاد تحمل به سرما در شرایط تنش باشد.

به‌طور کلی آنتی‌اکسیدان‌ها نقش مهمی در تحمل به سرما ایفا می‌کنند. بین فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها و تحمل گیاه به تنش سرما ارتباط و همبستگی نزدیکی وجود دارد. به‌گونه‌ای که فعالیت آن‌ها در گیاهان متحمل بیشتر از گیاهان حساس است (Caverza et al., 2012). در مطالعه حاضر همبستگی بین فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز و محتوای مالون دی‌آلدئید در دمای ۴- ($r = -0.66^{***}$)، ۲- ($r = 0.70^{***}$) و صفر درجه سانتی‌گراد ($r = 0.82^{***}$) مثبت و معنی‌دار بود به این مفهوم که با افزایش عوامل تخریب‌کننده میزان فعالیت آنزیمی برای کاهش خسارت افزایش می‌یابد از طرفی همبستگی بین فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز و بقا در دمای ۴- ($r = 0.60^{***}$)، ۲ ($r = -0.52^*$) و ۴ درجه سانتی‌گراد ($r = -0.62^{***}$) منفی و معنی‌دار بود و در دمای صفر درجه سانتی‌گراد ($r = 0.70^{***}$) مثبت و معنی‌دار بود (جدول ۵، ۶ و ۷). به نظر می‌رسد در سرماهای شدید نقش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز کمتر می‌شود و تا دمای صفر درجه موجب بهبود بقای گیاه سیب‌زمینی می‌گردد.

ارتفاع بوته

اثر دما، رقم و برهمکنش آن‌ها بر ارتفاع بوته معنی‌دار بود (جدول ۱). ارتفاع بوته بعد از اعمال تنش سرما و کاهش دما از ۴ به ۴- درجه سانتی‌گراد در رقم سانتی ۳۳ درصد و در رقم اگر با ۲۹ درصد نسبت به شاهد کاهش پیدا کرد. در رقم

H₂O₂ است (Anderson et al., 1995). کاتالاز نقش مهمی در تحمل سرما (Prasad et al., 1994) و حذف H₂O₂ (Willekens H et al., 1997) در گیاهان دارد. در مطالعه حاضر همبستگی بین فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT) و محتوای مالون دی‌آلدئید در دمای صفر درجه سانتی‌گراد ($r = -0.67^{***}$) منفی و معنی‌دار بود (جدول ۶). مقایسه فعالیت آنزیم کاتالاز در سیب‌زمینی در شرایط تنش سرما نشان داد که میانگین فعالیت آنزیم کاتالاز در تنش سرما بالاتر بود (Che et al., 2020).

فعالیت آنزیم پراکسیداز (POD)

فعالیت آنزیم پراکسیداز تحت تأثیر عوامل دما، رقم و برهمکنش این دو عامل معنی‌دار بود (جدول ۱). نتایج نشان داد که در رقم سانتی با کاهش دما فعالیت آنزیم پراکسیداز افزایش پیدا کرد. در این رقم بیشترین افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز در دمای ۲- درجه سانتی‌گراد مشاهده شد که ۸/۶ برابر بیشتر از دمای ۴ درجه سانتی‌گراد بود (جدول ۳). در رقم آریندا فعالیت آنزیم پراکسیداز با کاهش دما روند افزایشی داشت که بیشترین میزان فعالیت این آنزیم در دمای صفر درجه سانتی‌گراد بود که ۸/۴ برابر بیشتر از دمای ۴ درجه سانتی‌گراد بود. در رقم اگر با روند تغییرات فعالیت آنزیم پراکسیداز با کاهش دما تا صفر درجه سانتی‌گراد ۱۲ برابر افزایش پیدا کرد و با کاهش دما به ۴- درجه سانتی‌گراد فعالیت آنزیم پراکسیداز کاهش یافت. در رقم فونتانه با کاهش دما از ۴ به ۴- درجه سانتی‌گراد فعالیت آنزیم پراکسیداز، ۵۹ درصد افزایش پیدا کرد ولی افزایش معنی‌دار نبود (جدول ۳). ارتباط معقولی بین افزایش فعالیت آنزیم پراکسیداز و تحمل به سرما در ارقام وجود دارد. زمانی که گیاه در معرض سرما قرار می‌گیرد تولید گونه‌های اکسیژن فعال در آن افزایش می‌یابد. این مولکول‌ها باعث تخریب پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک و غشاهای سلولی می‌شوند. لذا سلول‌ها برای کاهش اثرات تخریبی این مولکول‌ها، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان از جمله پراکسیداز و سوپر اکسید دیسموتاز را افزایش می‌دهند (Luo et al., 2012). بررسی همبستگی بین فعالیت آنزیم پراکسیداز و بقا در دمای ۴- ($r = -0.85^{***}$)، ۲ ($r = -0.99^{***}$) و ۴ درجه سانتی‌گراد ($r = -0.52^*$) منفی و معنی‌دار بود (جدول ۵ و ۷). به نظر می‌رسد این آنزیم در مطالعه حاضر نتوانسته تأثیر معنی‌داری بر بهبود بقا در شرایط تنش سرما در سیب‌زمینی داشته باشد.

و توانایی اولیه بالاتری بودند (Barzan et al., 2018)، همچنین گزارشی مبنی بر کاهش ارتفاع بوته رازیانه (*Fueniculum vulgar*) در اثر کاهش دما از صفر به ۸۰- درجه سانتی‌گراد وجود دارد (Siahmerghouie et al., 2011). در این مطالعه ارتفاع بوته و بقا در دمای ۴- ($r=0/94^{**}$) و صفر درجه سانتی‌گراد ($r=0/85^{**}$) همبستگی مثبت و معنی‌دار داشتند (جدول ۵ و ۷). این نتیجه می‌تواند به این مفهوم باشد که احتمالاً ارقام مقاوم در برابر تنش سرما در ادامه فصل رشد با ترمیم سریع‌تر خسارت‌های سرما قادر به رشد بیشتر می‌باشند.

آریندا با کاهش دما ارتفاع بوته تغییر معنی‌داری نداشت. در رقم فونتانه با کاهش دما از ۴ به ۴- درجه سانتی‌گراد برخلاف ارقام دیگر ارتفاع بوته به‌طور معنی‌داری ۱۵ درصد نسبت به شاهد افزایش پیدا کرد (جدول ۴).

برخی از خصوصیات مانند پایداری غشاءهای سلولی (Cyril et al., 1988)، ترکیب و ذخیره کربوهیدرات‌های محلول (Fry et al., 1993) و سنتز پروتئین‌های تنش سرما نقش مهمی در تحمل به یخ‌زدگی و توان بازیابی گیاهچه پس از دوره سرما دارد. پژوهشگران بیان کردند که ژنوتیپ‌های متحمل به سرما در کلزا (*Brassica napus* L.) دارای بنیه

جدول ۴. تأثیر دما بر ارتفاع بوته و وزن خشک اندام هوایی در ارقام سیب‌زمینی در مرحله گیاهچه‌ای

Table 4. Effect of temperatures on plant height and shoot dry weight in potato cultivars in seedling stage

صفات Treats	رقم Cultivar	Temperature (°C)				
		-4	-2	0	2	4
ارتفاع گیاه Plant height (cm)	Sante	15.1 ⁱ	10.8 ^j	10.1 ^j	18.3 ^{gh}	20.1 ^{d-h}
	Arinda	20.9 ^{c-h}	18.0 ^h	19.9 ^{e-h}	21.5 ^{b-f}	20.4 ^{d-h}
	Agria	20.5 ^{c-h}	19.6 ^{e-h}	24.2 ^{ab}	23.4 ^{bc}	26.5 ^a
	Fontane	23.0 ^{b-d}	21.1 ^{c-g}	19.2 ^{f-h}	22.5 ^{b-e}	19.9 ^{e-h}
وزن خشک Shoot dry weight (mg.plant ⁻¹)	Sante	48.9 ^h	35.2 ^h	37.4 ^h	28.3 ^h	30.0 ^h
	Arinda	193 ^{c-f}	182 ^{e-f}	199 ^{b-f}	225 ^{a-c}	148 ^g
	Agria	254 ^a	225 ^{a-c}	200 ^{b-f}	188 ^{d-f}	216 ^{b-d}
	Fontane	213 ^{b-e}	232 ^{ab}	189 ^{d-f}	214 ^{b-e}	176 ^{f-g}

میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر صفت بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (Duncan)، تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد ندارند.

Means with the similar letter are not significantly different ($P \leq 0.01$) based on last significant difference test (Duncan).

وزن خشک اندام هوایی

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که وزن خشک اندام هوایی تحت تأثیر رقم، دما و برهمکنش آن‌ها قرار گرفت (جدول ۱). در رقم سانه وزن خشک اندام هوایی با اعمال تنش سرما و کاهش دما افزایش پیدا کرد که این افزایش معنی‌دار نبود (جدول ۴). در ارقام آریندا، آگریا و فونتانه وزن خشک اندام هوایی با اعمال تنش سرما به‌طور معنی‌داری افزایش پیدا کرد. در دمای ۴- درجه سانتی‌گراد بیشترین وزن خشک اندام هوایی در رقم فونتانه و کمترین وزن خشک اندام هوایی در رقم سانه مشاهده شد (جدول ۴).

در شرایط تنش تولید متابولیت‌های گیاهی همراه با صرف انرژی است (Adhikari et al., 2022) بررسی نتایج همبستگی نشان داد که بین وزن خشک و محتوای فنل در دمای ۴- ($r=0/56^{**}$)، ۲ ($r=0/85^{**}$)، صفر ($r=0/61^{**}$)، ۲ ($r=0/63^{**}$)، ۴ درجه سانتی‌گراد ($r=0/81^{**}$) همبستگی منفی و معنی‌دار وجود دارد. از طرفی همبستگی بین وزن خشک و محتوای پرولین در دمای ۴- ($r=0/57^{**}$)، صفر ($r=0/99^{**}$)، ۴ ($r=0/76^{**}$) و ۲ درجه سانتی‌گراد ($r=0/86^{**}$) منفی و معنی‌دار بود. همچنین بین وزن خشک و محتوای کربوهیدرات‌های محلول در دمای ۴- ($r=0/85^{**}$) و ۴ درجه سانتی‌گراد ($r=0/52^{**}$) منفی و معنی‌دار بود (جدول ۵، ۶ و ۷).

جدول ۵. ضرایب همبستگی صفات اندازه‌گیری شده در گیاهچه‌های سیب‌زمینی تحت تأثیر دما (قطر بالا ۴- درجه سانتی‌گراد و قطر پایین ۲- درجه سانتی‌گراد)

Table 7. Correlation coefficients of studied traits in potato seedlings after application of low temperature (2 °C and 4 °C) (upper diameter -4 °C and lower diameter -2 °C)

		-2°C	-4°C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	بقا Survival			1	-0.72**	-0.59**	-0.77**	-0.24 ^{ns}	0.45 ^{ns}	-0.85**	-0.60**	0.85**	0.91**
2	فنول Phenol			-0.89**	1	0.44 ^{ns}	0.60**	0.04 ^{ns}	-0.28 ^{ns}	0.47 ^{ns}	0.21 ^{ns}	-0.64**	-0.56*
3	پرولین Prolin			-0.43 ^{ns}	0.21 ^{ns}	1	0.52 ^{ns}	-0.28 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.65**	0.20 ^{ns}	-0.69**	-0.57*
4	کربوهیدرات Souble Carbohydrate			-0.19 ^{ns}	0.09 ^{ns}	-0.37 ^{ns}	1	0.25 ^{ns}	-0.33 ^{ns}	0.74**	0.62**	-0.73**	-0.85**
5	مالون دی‌آلدئید MDA			-0.57*	0.37 ^{ns}	-0.06 ^{ns}	0.66**	1	-0.32 ^{ns}	0.19 ^{ns}	0.66**	0.01 ^{ns}	-0.24 ^{ns}
6	کاتالاز CAT			0.08 ^{ns}	-0.15 ^{ns}	0.49*	-0.35 ^{ns}	-0.24 ^{ns}	1	-0.34 ^{ns}	-0.37 ^{ns}	0.19 ^{ns}	0.46 ^{ns}
7	پراکسیداز POD			-0.99**	0.87**	0.44 ^{ns}	0.17 ^{ns}	0.57*	-0.04 ^{ns}	1	0.65**	-0.86**	-0.96**
8	سوپراکسید دیسموتاز SOD			-0.52*	0.27 ^{ns}	0.13 ^{ns}	0.50*	0.70**	-0.14 ^{ns}	0.57*	1	-0.36 ^{ns}	-0.68**
9	ارتفاع گیاه Plant height			0.94**	-0.84**	-0.17 ^{ns}	-0.35 ^{ns}	-0.70**	0.23 ^{ns}	-0.92**	-0.57*	1	0.84**
10	وزن خشک Dry weight			0.96**	-0.85**	-0.26 ^{ns}	-0.38 ^{ns}	-0.73**	0.17 ^{ns}	-0.96**	-0.67**	0.96**	1

ns و * و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد
ns and * and **: Non-significant and significant in probability levels of 5% and 1% respectively

جدول ۶. ضرایب همبستگی صفات اندازه‌گیری شده در گیاهچه‌های سیب‌زمینی تحت تأثیر دمای پایین (صفر درجه سانتی‌گراد)
Table 6. Correlation coefficients of studied traits in in potato seedlings after application of low temperature (0 °C)

		NO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	بقا Survival		1									
2	فنول Phenol		-0.46 ^{ns}	1								
3	پرولین Prolin		-0.80**	0.59*	1							
4	کربوهیدرات Souble carbohydrate		0.37 ^{ns}	-0.64**	-0.44 ^{ns}	1						
5	مالون دی‌آلدئید MDA		0.35 ^{ns}	-0.79**	-0.73**	0.59*	1					
6	کاتالاز CAT		-0.62**	0.57*	0.75**	-0.39 ^{ns}	-0.67**	1				
7	پراکسیداز POD		0.92**	-0.41 ^{ns}	-0.56*	0.26 ^{ns}	0.16 ^{ns}	-0.44 ^{ns}	1			
8	سوپراکسید دیسموتاز SOD		0.70**	-0.79**	-0.91**	0.59*	0.82**	-0.84**	0.50*	1		
9	ارتفاع گیاه Plant height		0.85**	-0.41 ^{ns}	-0.93**	0.25 ^{ns}	0.49*	-0.69**	0.64**	0.77**	1	
10	وزن خشک Dry weight		0.81**	-0.61**	-0.99**	0.43 ^{ns}	0.75**	-0.82**	0.58*	0.93**	0.92**	1

ns و * و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد
ns and * and **: Non-significant and significant in probability levels of 5% and 1% respectively

جدول ۷. ضرایب همبستگی صفات اندازه‌گیری شده در گیاهچه‌های سیب‌زمینی تحت تأثیر دما (قطر بالا ۴ درجه سانتی‌گراد و قطر پایین ۲ درجه سانتی‌گراد)

Table 7. Correlation coefficients of studied traits in potato seedlings after application of low temperature (2°C and 4°C) (upper diameter 4 °C and lower diameter 2°C)

		4 °C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		2 °C										
1	بقا	Survival	1	-0.84**	-0.59*	-0.42 ^{ns}	0.73**	0.12 ^{ns}	-0.52*	-0.62**	0.40 ^{ns}	0.84**
2	فنول	Phenol	-0.49*	1	0.44 ^{ns}	0.31 ^{ns}	-0.84**	-0.21 ^{ns}	0.55*	0.31 ^{ns}	-0.21 ^{ns}	-0.81**
3	پرولین	Prolin	-0.64**	0.35 ^{ns}	1	0.68**	-0.20 ^{ns}	0.18 ^{ns}	0.33 ^{ns}	0.66**	-0.62**	-0.76**
4	کربوهیدرات	Souble carbohydrate	0.35 ^{ns}	-0.54*	0.20 ^{ns}	1	-0.04 ^{ns}	-0.09 ^{ns}	0.11 ^{ns}	0.45 ^{ns}	-0.60**	-0.52*
5	مالون دی‌آلدئید	MDA	-0.84**	0.12 ^{ns}	0.62**	-0.04 ^{ns}	1	0.16 ^{ns}	-0.39 ^{ns}	-0.17 ^{ns}	-0.14 ^{ns}	0.58*
6	کاتالاز	CAT	-0.50*	-0.20 ^{ns}	-0.08 ^{ns}	-0.09 ^{ns}	0.63**	1	0.29 ^{ns}	0.12 ^{ns}	-0.05 ^{ns}	0.09 ^{ns}
7	پراکسیداز	POD	0.06 ^{ns}	-0.34 ^{ns}	0.56*	0.11 ^{ns}	0.18 ^{ns}	-0.27 ^{ns}	1	0.50 ^{ns}	-0.35 ^{ns}	-0.55*
8	سوپراکسید دیسموتاز	SOD	0.11 ^{ns}	-0.63**	-0.09 ^{ns}	0.45 ^{ns}	0.31 ^{ns}	0.41 ^{ns}	0.40 ^{ns}	1	-0.68**	-0.73**
9	ارتفاع گیاه	Plant height	0.47 ^{ns}	-0.32 ^{ns}	-0.89**	-0.60**	-0.47 ^{ns}	0.23 ^{ns}	-0.68**	-0.02 ^{ns}	1	0.54*
10	وزن خشک	Dry weight	0.53*	-0.63**	-0.86**	-0.52*	-0.36 ^{ns}	0.36 ^{ns}	-0.32 ^{ns}	0.47 ^{ns}	0.75**	1

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

ns and * and **: Non-significant and significant in probability levels of 5% and 1% respectively

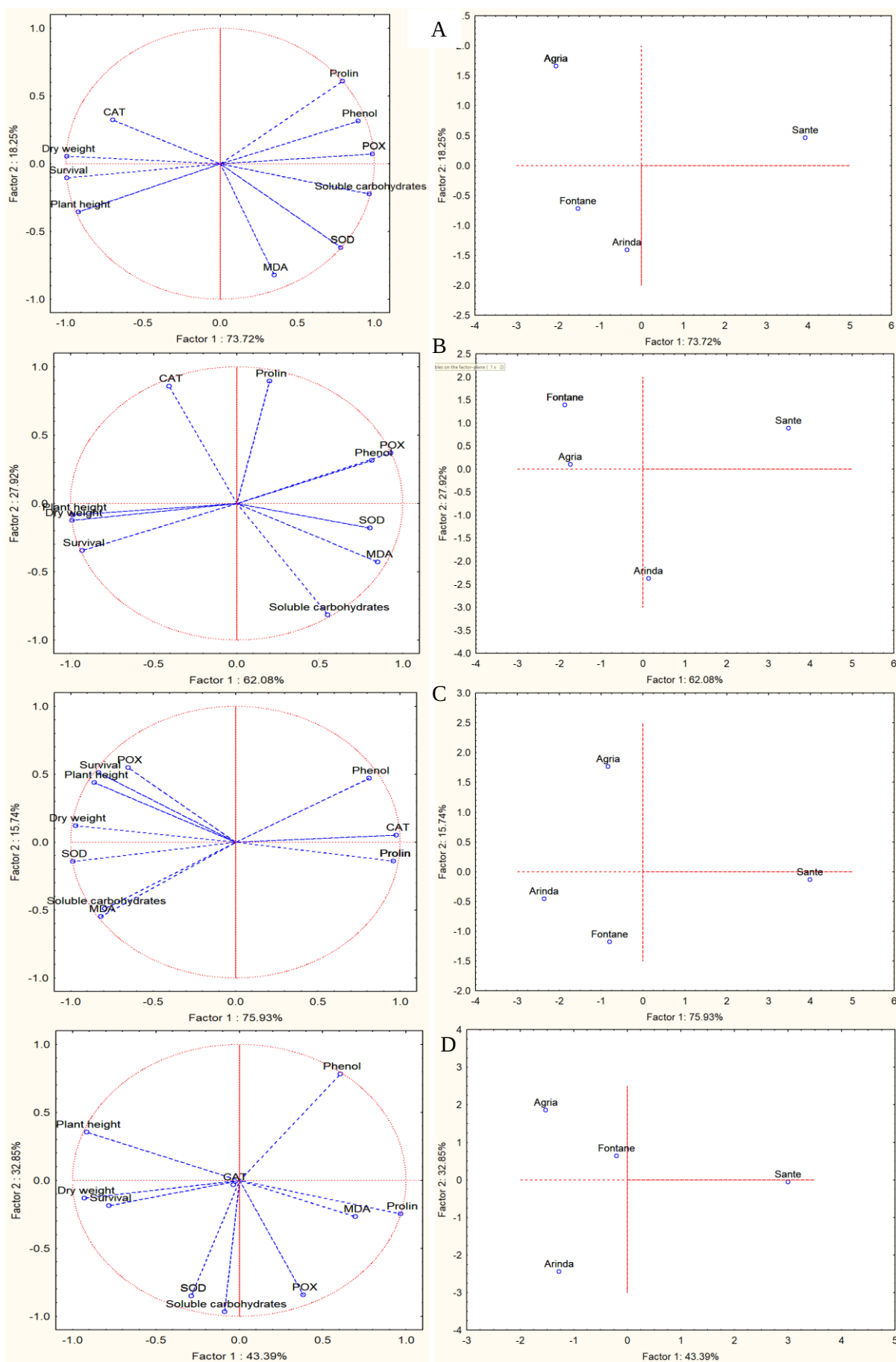
داده‌ها را توجیه کردند. در تمامی دماها رقم سانته جدا از سایر ارقام قرار گرفت و بقای پایین‌تری نیز دارا بود. در دماهای ۴- و ۲-°C ارقام فونتانه و آگریا در یک بعد قرار گرفته و از نظر بقا، فعالیت آنزیم کاتالاز، وزن ارتفاع بوته و خشک اندام هوایی برتر بودند (شکل ۲).

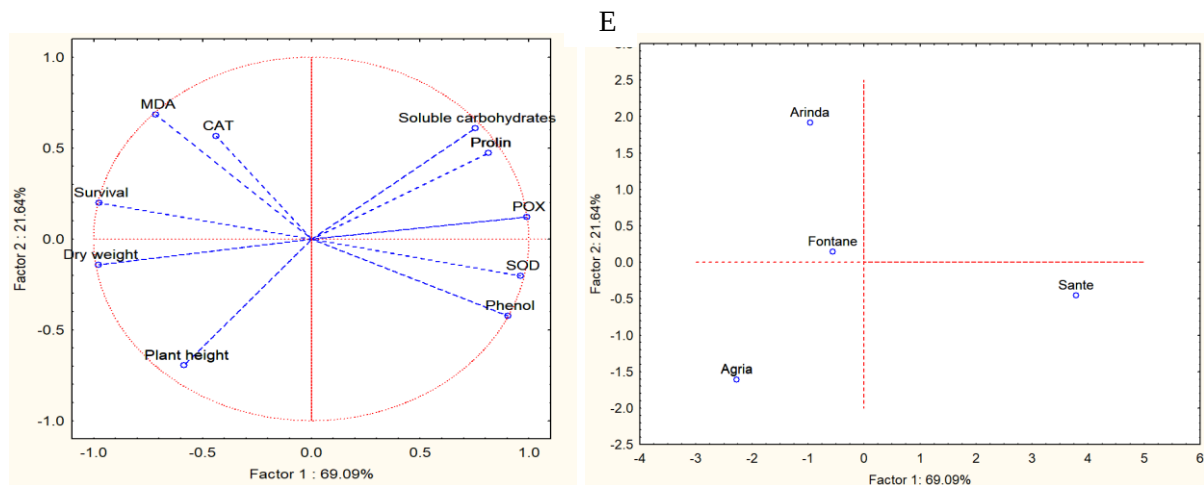
نتیجه‌گیری نهایی

به‌طور کلی در این مطالعه مشاهده شد که رقم سانته نسبت به سه رقم آگریا، فونتانه و آریندا از حساسیت بیشتری به سرما برخوردار بود از طرف دیگر ارقام فونتانه و آگریا از نظر تحمل به سرما نسبتاً متحمل‌تر بودند و بقایی بالاتری نیز داشتند. اثر متابولیت‌ها و ترکیب‌های آنتی‌اکسیدانی مورد مطالعه رقم فونتانه در شرایط تنش سرما بارزتر بوده و موجب ایجاد سازوکار دفاعی بهتر و کارآمدتر نسبت به سایر ارقام شد که در نهایت تحمل به سرمای بهتری نیز نشان داد. در تجزیه مؤلفه‌های اصلی نیز در تمامی دماها رقم سانته جدا از سایر ارقام قرار گرفت و بقای پایین‌تری نیز دارا بود. در دماهای ۴- و ۲- درجه سانتی‌گراد ارقام فونتانه و آگریا از نظر بقا، فعالیت آنزیم کاتالاز، وزن ارتفاع بوته و خشک اندام هوایی برتر بودند.

احتمالاً رقم‌های مقاوم به سرما در این بررسی با تغییر در ساختار غشاء، ترکیب اسیدهای چرب غشاء، تغییرات متابولیکی، تغییر در مقادیر پروتئین، افزایش فعالیت آنزیم‌های دخیل در جمع‌آوری گونه‌های فعال اکسیژن و به طبع با کاهش صدمات وارده به غشاء سلولی و کاهش نشت الکترولیت‌ها توانسته‌اند یکپارچگی ساختار غشاء را حفظ نموده و فرایندهای متابولیسمی را با کارایی بیشتر در شرایط سرما در پی بگیرند و وزن خشک اندام هوایی بیشتری پس از دوره سرما تولید کنند (Nezami et al., 2016). در این پژوهش همبستگی بین وزن خشک و بقا در دمای ۴- (r=۰/۹۱**)، ۲ (r=۰/۹۶***)، صفر (r=۰/۸۱**)، ۲ (r=۰/۵۳*) و ۴ درجه سانتی‌گراد (r=۰/۸۴**) مثبت و معنی‌دار بود (جدول ۵، ۶ و ۷). پژوهشگران، کاهش وزن خشک اندام هوایی را در دوره بازیافت را به دلیل اثر خسارت ناشی از یخ‌زدگی و کاهش رشد مجدد اندام‌های هوایی دانسته‌اند (Nezami et al., 2010).

نمودار بای‌پلات بر مبنای مؤلفه‌های اصلی اول و دوم در هر یک از تیمارهای دمایی برای صفات و ارقام رسم شد (شکل ۲). بر اساس بای‌پلات رسم شده در دمای ۴، ۲، ۰، ۲- و ۴- درجه سانتی‌گراد مؤلفه‌های اول و دوم در مجموع به ترتیب ۷۶/۲۴، ۹۱/۱۱، ۹۱/۶۷، ۹۰/۰۰ و ۹۱/۹۷ درصد از واریانس





شکل ۲. پراکنش ارقام سیب‌زمینی بر اساس دو عامل اصلی اول و دوم A: ۴- درجه سانتی‌گراد، B: ۲- درجه سانتی‌گراد، C: ۰- درجه سانتی‌گراد، D: ۲- درجه سانتی‌گراد، E: ۴- درجه سانتی‌گراد

Fig. 2. Distribution of potato cultivars based on two main factors: A: 4°C, B: 2°C, C: 0°C, D: -2°C, E: -4°C.

منابع

- Adhikari, L., Baral, R., Paudel, D., Min, D., Makaju, S.O., Poudel, H.P., Acharya, J.P., Missaoui, A.M., 2022. Cold stress in plants: Strategies to improve cold tolerance in forage species. *Plant Stress*, 4, 100081. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100081>
- Alisoltani, A., Alizadeh, H., Mahfoofi, S., Khayalparast, F., 2012. The effect of short and long terms cold acclimation on biochemical characteristics of spring and winter wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 14, 108-120. [I In Persian with English Summary].
- Anderson, M. D., Prasad, T.K., Stewart, C. R., 1995. Changes in isoenzyme profiles of catalase, peroxidase and glutathione reductase during acclimation to chilling in mesocotyls of maize seedlings. *Plant Physiology*, 109, 1247-1257. <https://doi.org/10.1104/pp.109.4.1247>
- Barzan, Z., Dehdari, M., Amiri Fahliani, R., 2018. Evaluation of cold tolerance in rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes at seedling stage and its association with microsatellite markers. *Journal of Crop Production and Processing*, 8, 33-45. [In Persian with English Summary]. <https://doi.org/10.29252/jcpp.8.2.33>
- Bates L., Waldren R.P., Teare I.D., Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant Soil*, 1973; 39, 205-207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
- Bustamante, C. A., Monti, L. L., Gabilondo, J., Scossa, F., Valentini, G., Budde, C. O., 2016. Differential metabolic rearrangements after cold storage are correlated with chilling injury resistance of peach fruits. *Front. Plant Science*. 7:1478. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01478>
- Caverzan, A., Passaia, G., Rosa, S.B., Ribeiro, C.W., Lazzarotto, F., Margis-Pinheiro, M., 2012. Plant responses to stresses: role of ascorbate peroxidase in the antioxidant protection. *Genetics and Molecular Biology*. 35, 1011-1019. <https://doi.org/10.1590/S1415-47572012000600016>
- Chang, D.C., Sohn, H.B., Cho, J.H., Im, J.S., Jin, Y.I., Do, G.R., Kim, S.J., Cho, H.M., Lee, Y.B., 2014. Freezing and frost damage of potato plants: a case study on growth recovery, yield response, and quality changes. *Potato Research*, 57, 99-110. <https://doi.org/10.1007/s11540-014-9253-5>
- Che, Y., Zhang, N., Zhu, X., Li, S., Wang, S., Si, H., 2020. Enhanced tolerance of the transgenic potato plants overexpressing Cu/Zn superoxide dismutase to low temperature. *Scientia Horticulturae*, 261, 108949. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108949>
- Chen, T.H., Gusta, L., Fowler, D.B., 1983. Freezing injury and root development in winter cereals. *Plant Physiology*, 73: 773-777. <https://doi.org/10.1104/pp.73.3.773>
- Cyril, J., Duncan, R.R., and Baird, W.V., 1998. Changes in membrane fatty acids in cold-acclimated turf grass. *Journal of Horticultural Science*, 33: 453-465. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.33.3.453C>

- de Freitas, G.M., Thomas, J., Liyanage, R., Lay, J.O., Basu, S., Ramegowda, V., do Amaral, M.N., Benitez, L.C., Braga, E.J., Pereira, A., 2019. Cold tolerance response mechanisms revealed through comparative analysis of gene and protein expression in multiple rice genotypes. *PLoS ONE*, 14, e0218019. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218019>
- Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., Smith, F., 1956. Calorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry Acta*, 28, 350-356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
- Fridovich, I., 1986. Biological effects of the superoxide radical. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 247, 1-11. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(86\)90526-6](https://doi.org/10.1016/0003-9861(86)90526-6)
- Fry, J.D., Lang, N.S., Clifton, R.G.P., Maier, F.P., 1993. Freezing tolerance and carbohydrate content of low temperature-acclimated and non-acclimated centipede grass. *Crop Science*, 33, 1051-1055. <https://doi.org/10.2135/cropsci1993.0011183X003300050035x>
- Fu, J., Miao, Y., Shao, L., Hu, T., Yang, P., 2016. De novo transcriptome sequencing and gene expression profiling of *Elymus nutans* under cold stress. *BMC Genomics* 17, 870. <https://doi.org/10.1186/s12864-016-3222-0>
- Fürtauer, L., Weiszmann, J., Weckwerth, W., Nägele, T., 2019. Dynamics of plant metabolism during cold acclimation. *International Journal of Molecular Sciences*, 20, 5411. <https://doi.org/10.3390/ijms20215411>
- Fuyi, M., Mengyun, L., 1995. *Potato Cultivation Physiology*. Beijing: China Agriculture Press, 65-80.
- Giannopolitis, C. N., Ries, S. K., 1977. Superoxide dismutase. I. occurrence in higher plants. *Plant Physiology*, 59, 309-314. <https://doi.org/10.1104/pp.59.2.309>
- Gültekin, R., Ertek, A., 2018. Effects of deficit irrigation on the potato tuber development and quality. *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences*, 2, 93-98. <https://doi.org/10.31015/jaefs.18015>
- Gusta, L. V., Wisniewski, M., 2013. Understanding plant cold hardiness: an opinion. *Physiologia Plantarum*, 147, 4-14. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2012.01611.x>
- Hijmans R.J., Spooner D.M., 2001. Geographic distribution of wild potato species. *American Journal of Botany*, 88, 2101-2112. <https://doi.org/10.2307/3558435>
- Huang, X., Shi, H., Hu, Z., Liu, A., Amombo, E., Chen, L., Fu, J., 2017. ABA is involved in regulation of cold stress response in bermudagrass. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1613. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01613>
- Li F., Liu J., Duan S.G., Jin L.P. 2008. Physico-biochemical changes related to the freezing tolerance during cold acclimation in potato seedling. *Chinese Potato Journal*, 22, 257-260. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-3635.2008.05.001>
- Lin, Q., Xie, Y., Liu, W., Zhang, J., Cheng, S., Xie, X., Guan, W., Wang, Z., 2017. UV-C treatment on physiological response of potato (*Solanum tuberosum* L.) during low temperature storage. *Journal of Food Science and Technology*, 54, 55-61. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2433-3>
- Liu, H., Ouyang, B., Zhang, J., Wang, T., Li, H., 2012. Differential modulation of photosynthesis, signaling, and transcriptional regulation between tolerant and sensitive tomato genotypes under cold stress. *PLoS One*, 7, 1-16.
- Luo, Z., Wu, X., Xie, Y., Chen, C., 2012. Alleviation of chilling injury and browning of postharvest bamboo shoot by salicylic acid treatment. *Food Chemistry*, 131, 456-461. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.09.007>
- Mittler R., Vanderauwera S., Gollery M., Van Breusegem F., 2004. Reactive oxygen gene network of plants. *Trends in Plant Science*, 9, 490-498.
- Moieni-Korbekandi, Z., Karimzadeh, G., Sharifi, M., 2014. Cold-induced changes of proline, malondialdehyde and chlorophyll in spring canola cultivars. *Journal of Plant Physiology and Breeding*, 4, 1-11.
- Nezami, A., Ahmadi Lahijani, M.J., Shojaei Noferest, K., Rezaei, J., Fazeli, F., 2016. Freezing tolerance of grass species under controlled conditions. *Journal of Plant Production Research*, 23, 89-106. [In Persian].
- Nezami, A., Khaninejad, S., Bahrami, M. R., Zarif Ketab, H., 2018. Maximum efficiency of photosystem II as a freezing stress index in perennial ecotypes of rye (*Secale Montanum*). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 16, 1-

14. [In Persian with English Summary]
<https://doi.org/10.22067/gsc.v16i1.43975>
- Nezami, A., Khazaei, H.R., Azizi, H., Najibnia, S., 2009. Effects of acclimation on wheat (*Triticum aestivum* L.) cold tolerance under laboratory conditions. *Journal of Crop Production*, 2, 55-70. [In Persian with English Summary].
- Nezami, A., Nabati, J., Borzooei, A., Kamandi, A., Masomi, A., and Salehi, M., 2010. Evaluation of freezing tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars at seedling stage under controlled conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 3, 9-22. [In Persian with English Summary].
<https://doi.org/10.22077/escs.2010.79>
- Phukan, U.J., Jeena, G.S., Shukla, R.K., 2016. WRKY transcription factors: molecular regulation and stress responses in plants. *Frontiers in Plant Science*, 7, 60.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00760>
- Prasad, T.K., Anderson, M.D., Martin, B.A., Stewart, C.R. 1994. Evidence for chilling-induced oxidative stress in maize seedlings and a regulatory role for hydrogen peroxide. *Plant Cell*, 6, 65-74.
<https://doi.org/10.1105/tpc.6.1.65>
- Rihan, H.Z., Al-Issawi, M., Fuller, M.P., 2017. Advances in physiological and molecular aspects of plant cold tolerance. *Journal of Plant Interactions*, 12, 143-157.
<https://doi.org/10.1080/17429145.2017.1308568>
- Siahmerghouie, A., Azizi, G., Nezami, A., Jahani-Kandari, M. 2011. Investigation of laboratory freeze tolerance of field grown fennel (*Foeniculum vulgare*) ecotypes. *Journal of Horticultural Science*, 25, 64-72. [In Persian with English Summary].
<https://doi.org/10.22067/jhorts4.v1390i1.9758>
- Singh, R.P., Prasad, P.V., Sharma, A.K., Reddy, K.R., 2011. Impacts of high-temperature stress and potential opportunities for breeding. Wiley-Blackwell, Chichester, UK. p. 166- 185.
<https://doi.org/10.1002/9780470960929.ch13>
- Singleton, V.L., Rossi, J.A., 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16, 144-158.
<https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144>
- Soliman, M.H., Alayafi, A.A., El Kelish, A.A., Abu-Elsaoud, A.M., 2018. Acetylsalicylic acid enhance tolerance of *Phaseolus vulgaris* L. to chilling stress, improving photosynthesis, antioxidants and expression of cold stress responsive genes. *Botanical Studies*, 59, 1-17.
<https://doi.org/10.1186/s40529-018-0222-1>
- Srinivas, N.D., Rashmi, K.R., Raghavarao, K.S.M.S., 1999. Extraction and purification of a plant peroxidase by aqueous two-phase extraction coupled with gel filtration. *Process Biochemistry*, 35, 43-48.
[https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(99\)00030-8](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(99)00030-8)
- Stewart, R.R., Bewley, J.D., 1980. Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes. *Plant Physiology*, 65, 245-248. <https://doi.org/10.1104/pp.65.2.245>
- Van Harsselaar, J.K., Lorenz, J., Senning, M., Sonnewald, U., Sonnewald, S., 2017. Genome-wide analysis of starch metabolism genes in potato (*Solanum tuberosum* L.). *BMC Genomics*, 18, 1-18.
<https://doi.org/10.1186/s12864-016-3381-z>
- Velikova, V., Yordanov, I., Edreva, A., 2000. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants: Protective role of exogenous polyamines. *Plant Science*, 151, 59-66. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(99\)00197-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(99)00197-1)
- Willekens, H., Chamnongpol, S., Davey, M., Schraudner, M., Langebartels, C., Van Montagu, M., Inzé, D., Van Camp, W., 1997. Catalase is a sink for H₂O₂ and is indispensable for stress defence in C3 plants. *The EMBO Journal*, 16, 4806-4816.
<https://doi.org/10.1093/emboj/16.16.4806>
- Willick, I.R., Takahashi, D., Fowler, D.B., Uemura, M., Tanino, K.K., 2018. Tissue-specific changes in apoplastic proteins and cell wall structure during cold acclimation of winter wheat crowns. *Journal of Experimental Botany*, 69, 1221-1234.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erx450>
- Wu, Q., He, T., Liu, H., Luo, X., Yin, W., Chen, E., Li, F., 2019. Cell ultrastructure and physiological changes of potato during cold acclimation. *Canadian Journal of Plant Science*, 99, 873-884. doi: 10.1139/cjps-2019-0092.
- Yadav, S.K., 2010. Cold stress tolerance mechanisms in plants. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30, 515-527.
<https://doi.org/10.1051/agro/2009050>

Yamaguchi-Shinozaki, K., Shinozaki, K., 2006. Transcriptional regulatory networks in cellular responses and tolerance to dehydration and cold stresses. Annual Review Plant Physiology

and Plant Molecular Biology, 57, 781-803.
<https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.57.032905.105444>