

The trend of changes in chlorophyll fluorescence parameters in lentil genotypes before and after freezing stress

Jafar Nabati^{*1}, Ahmad Nezami², Seyedeh Mahbubeh Mirmiran³,
Alireza Hasanfard⁴, Zahra Nemati⁵

1. Corresponding Author, Department of Agrotechnology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: jafarnabati@um.ac.ir
2. Professor in Crop Physiology, Dept. of Agrotechnology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: nezami@um.ac.ir
3. Assistant Prof., Khorasan-e-Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Mashhad, Iran. E-mail: mmirmiran@yahoo.com
4. Ph.D. in Weed Science, Dept. of Agrotechnology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: alireza.hasanfard@yahoo.com
5. Ph.D. in Horticulture Science, Dept. of Horticulture Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: zahranematish@gmail.com

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 05.22.2023
Revised: 07.13.2023
Accepted: 08.02.2023

Keywords:
Fall planting,
Photochemical quenching,
PSII,
Reaction centers,
Recovery period

ABSTRACT

Background and Objectives: One of the reasons for the low seed yield of lentils is the use of landraces, the lack of mechanized harvesting, and spring cultivation. Despite the advantages of fall planting, freezing stress is one of the most important abiotic factors influencing the growth and yield of lentils. Freezing stress increases photoinhibition and the loss of maximum efficiency of PSII photochemistry. Chlorophyll fluorescence is a non-destructive and rapid technique used to screen for abiotic stress tolerance plants. Considering the advantages of fall planting of lentils, this study was conducted to identify lentil genotypes to freezing stress-tolerant by chlorophyll fluorescence technique.

Materials and Methods: The experiment was conducted under controlled conditions in the fall and winter of 2018 at Ferdowsi University of Mashhad. The investigated factors included 18 lentil genotypes and four freezing temperatures (0, -15, -18, and -20 °C). Freezing temperatures were applied in the middle of February in the thermogradient freezer. The chlorophyll fluorescence trends in time points include before stress, 24, 48, 72, 120, and 144 hours after freezing by using a fluorometer were determined. The survival was evaluated visually three weeks after rewarming. The lethal temperature of 50% of plants according to survival percentage ($LT_{50_{su}}$), the reduced temperature of 50% of plants according to dry matter ($RDMT_{50}$), and the reduced temperature of 50% of plants according to plant height (RHT_{50}) were determined by fitting the graph of the mentioned traits against the freezing temperatures.

Results: Between zero and -18 °C, the decreasing trend of the maximum efficiency of PSII photochemistry in the light if all reaction centers were open ($F'v/F'm$) was very low, but with decreasing temperature from -18 to -20 °C, the decreasing trend of $F'v/F'm$ it became intense. At temperatures of zero, -15, and -18 °C, 24 hours after applying the freezing stress, the recovery of $F'v/F'm$ was observed. MLC407 has the highest ability to recover freezing stress damage to PSII at -18°C. Among the studied genotypes, MLC103 had the lowest, and MLC286 and MLC454

had the highest PSII operating efficiency in the light ($F'q/F'm$). Improvement in $F'q/F'm$ was observed during the recovery period at zero, -15, and -18 °C. As the temperature decreased from -18 to -20 °C, a downward and irreversible process was observed in the value of $F'q/F'm$. Freezing stress decreases the photochemical quenching ($F'q/F'v$) at the end of the recovery period in MLC13, MLC33, MLC38, MLC84, MLC103, MLC334, MLC407 and MLC409. Decreasing the temperature from zero to -15 °C decreased the estimates of the fraction of open PSII reaction centers (qL) in MLC334 and MLC407. MLC8, MLC11, MLC13, MLC17, MLC33, MLC47, MLC70, MLC286, MLC303, MLC334, MLC407, MLC409, MLC454 and MLC472 at -15 °C and MLC11 and MLC47 at -18 °C had a survival rate over 50%. The lowest $RDMT_{50}$ was observed in the MLC47 genotype (-18.9 °C), and MLC47 and MLC11 had the highest ability to maintain dry weight. The cluster analysis results showed the relative superiority of the third group of genotypes, including MLC8, MLC11, MLC47, MLC70, MLC334, MLC407, MLC409, and MLC454 in the studied traits. Standardized canonical coefficient of traits RHT_{50} , $RDMT_{50}$, $F'0$, $F'm$, $F'v$, $F'v/F'm$, $F'q/F'm$, $F'q/F'v$ and qL in the first canonical functions was significant.

Conclusion: In general, there was a significant variation between genotypes regarding the ability of the photosynthetic apparatus during the recovery after freezing stress. The lowest changes in chlorophyll fluorescence were observed at zero, -15, and -18 °C, and the greatest at -20 °C. In most of the genotypes, 24 hours after freezing stress, a suitable recovery was observed, which indicates the high freezing stress tolerance of these genotypes. The results showed the relative superiority of the third group of genotypes in the studied traits.

Cite this article: Nabati, Jafar, Nezami, Ahmad, Mirmiran, Seyedeh Mahbubeh, Hasanfard, Alireza, Nemati, Zahra. 2024. The trend of changes in chlorophyll fluorescence parameters in lentil genotypes before and after freezing stress. *Journal of Plant Production Research*, 31 (2), 121-150.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/JOPP.2024.21372.3042

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

روند تغییرات مؤلفه‌های کلروفیل فلورسانس در ژنوتیپ‌های عدس پیش و پس از تنش یخ‌زدگی

جعفر نباتی^{۱*}، احمد نظامی^۲، سیده محبوبه میرمیران^۳، علیرضا حسن‌فرد^۴، زهرا نعمتی^۵

۱. نویسنده مسئول، گروه آگروتکنولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: jafarnabati@um.ac.ir
۲. استاد فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه آگروتکنولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: nezami@um.ac.ir
۳. استادیار پژوهشی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران. رایانامه: mmirmiran@yahoo.com
۴. دکتری علوم علف‌های هرز، گروه آگروتکنولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: alireza.hasanfard@yahoo.com
۵. دکتری علوم باغبانی، گروه باغبانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: zahranematish@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی-پژوهشی	سابقه و هدف: از دلایل کم بودن عملکرد عدس استفاده از توده‌های محلی، عدم برداشت مکانیزه و کشت بهاره می‌باشد. با وجود مزایای کشت پاییزه، تنش یخ‌زدگی از عوامل عمده منفی تأثیرگذار بر رشد و عملکرد عدس است. تنش یخ‌زدگی باعث افزایش مهار نوری و از دست رفتن عملکرد فتوسیستم II می‌شود. روش فلورسانس کلروفیل یکی از روش‌های سریع، مؤثر و غیرتخریبی به منظور غربالگری ارقام در شرایط تنش سرمایی است. با توجه به مزایای کشت پاییزه عدس این مطالعه با هدف شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به یخ‌زدگی عدس با روش فلورسانس کلروفیل انجام شد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۱	
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۲	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۱	
واژه‌های کلیدی: دوره بازیابی، فتوسیستم II، فروود فتوشیمیایی، کشت پاییزه، مراکز واکنش	مواد و روش‌ها: این پژوهش در پاییز و زمستان ۱۳۹۸ در شرایط کنترل‌شده در دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. عوامل موردبررسی شامل ۱۸ ژنوتیپ عدس و چهار دمای یخ‌زدگی (صفر، -۱۵، -۱۸ و -۲۰ درجه سانتی‌گراد) بودند. اعمال دماهای یخ‌زدگی در اواسط بهمن‌ماه در فریزر ترموگرادیان انجام شد. روند تغییرات فلورسانس کلروفیل قبل از تنش و با فواصل ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۱۲۰ و ۱۴۴ ساعت پس از اعمال تنش یخ‌زدگی با استفاده از دستگاه فلورومتر انجام شد. سه هفته پس از اعمال تنش یخ‌زدگی، درصد بقاء و ترمیم نمونه‌ها ارزیابی شد. دمای ۵۰ درصد کشنده گیاهان بر اساس درصد بقاء (LT_{50su})، دمای ۵۰ درصد کاهش وزن خشک ($RDMT_{50}$) و دمای ۵۰ درصد کاهش ارتفاع بوته (RHT_{50}^R) با استفاده از رسم نمودار صفات مذکور در مقابل دماهای یخ‌زدگی تعیین شدند.

یافته‌ها: بین دماهای صفر و ۱۸- درجه سانتی‌گراد، روند کاهش بیشینه کارایی پتانسیل فتوسیستم II ($F'v/F'm$) بسیار کم بود، اما با کاهش دما از ۱۸- به ۲۰- درجه سانتی‌گراد روند کاهش $F'v/F'm$ شدید شد. در دماهای صفر، ۱۵- و ۱۸- درجه سانتی‌گراد با گذشت ۲۴ ساعت پس از اعمال تنش یخ‌زدگی روند مطلوب ترمیم $F'v/F'm$ مشاهده شد. بیش‌ترین توانایی در بازیابی آسیب حاصل از تنش یخ‌زدگی به فتوسیستم II در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد متعلق به MLC407 بود. در بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی، MLC103 از کم‌ترین و ژنوتیپ‌های MLC286 و MLC454 از بیش‌ترین کارایی عملیاتی فتوسیستم II ($F'q/F'm$) برخوردار بودند. در دماهای صفر، ۱۵- و ۱۸- درجه سانتی‌گراد در طی دوران بازیابی روند بهبود در میزان $F'q/F'm$ مشاهده شد. با کاهش دما از ۱۸- به ۲۰- درجه سانتی‌گراد روند کاهش و غیرقابل‌برگشت در مقدار $F'q/F'm$ مشاهده شد. اعمال تنش سبب کاهش فرود فتوشیمیایی ($F'q/F'v$) در پایان دوره بازیابی در ژنوتیپ‌های MLC13، MLC33، MLC38، MLC84، MLC103، MLC334، MLC407 و MLC409 شد. کاهش دما از صفر به ۱۵- درجه سانتی‌گراد سبب کاهش ضریب باز بودن مراکز واکنش فتوسیستم II (qL) در ژنوتیپ‌های MLC334 و MLC407 شد. ژنوتیپ‌های MLC8، MLC11، MLC13، MLC17، MLC33، MLC47، MLC70، MLC286، MLC303، MLC334، MLC407، MLC409، MLC454 و MLC472 در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد و دو ژنوتیپ MLC11 و MLC47 در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد از بقای بالای ۵۰ درصد برخوردار بودند. پایین‌ترین $RDMT_{50}$ در MLC47 (۱۸/۹- درجه سانتی‌گراد) مشاهده شد و MLC47 و MLC11 دارای بیش‌ترین توان حفظ وزن خشک بودند. تجزیه خوشه‌ای نشان‌دهنده برتری نسبی ژنوتیپ‌های گروه سوم شامل MLC8، MLC11، MLC47، MLC70، MLC334، MLC407، MLC409 و MLC454 در صفات مورد مطالعه بود. ضرایب استاندارد شده کانونیکی صفات $RDMT_{50}$ ، RHT_{50} ، $F'0$ ، $F'm$ ، $F'v$ ، $F'v/F'm$ ، $F'q/F'm$ ، $F'q/F'v$ و qL در اولین معادله تشخیصی کانونیکی قابل توجه بود.

نتیجه‌گیری: به‌طورکلی بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه از نظر توانایی دستگاه فتوسنتزی در ترمیم اثرات تنش یخ‌زدگی تنوع وجود داشت. نتایج بیانگر کم‌ترین تغییرات کلروفیل فلورسانس در دماهای صفر، ۱۵- و ۱۸- درجه سانتی‌گراد و بیش‌ترین تغییرات آن در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد بود. در بیش‌تر ژنوتیپ‌ها با گذشت ۲۴ ساعت از تنش یخ‌زدگی، توانایی بازیابی مناسبی مشاهده شد که نشان‌دهنده تحمل بالای این ژنوتیپ‌ها در مواجهه با تنش یخ‌زدگی است. به‌طورکلی نتایج نشان‌دهنده برتری نسبی ژنوتیپ‌های گروه سوم شامل MLC8، MLC11، MLC47، MLC70، MLC334، MLC407، MLC409 و MLC454 در صفات مورد مطالعه بود.

استناد: نباتی، جعفر، نظامی، احمد، میرمیران، سیده محبوبه، حسن‌فرد، علیرضا، نعمتی، زهرا (۱۴۰۳). روند تغییرات مؤلفه‌های کلروفیل فلورسانس در ژنوتیپ‌های عدس پیش و پس از تنش یخ‌زدگی. نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی، ۳۱ (۲)، ۱۵۰-۱۲۱.

DOI: 10.22069/JOPP.2024.21372.3042



© نویسندگان

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

حبوبات دومین خانواده مهم گیاهان زراعی بعد از غلات هستند که در حدود ۲۷ درصد از تولیدات گیاهی جهان مربوط به این دسته گیاهان است (۱). عدس (*Lens culinaris Medikus*) یکی از گیاهان سرمادوست و از خانواده حبوبات بوده (۲) و منبع غنی از پروتئین (۳۶-۲۰ درصد)، کربوهیدرات، مواد معدنی، ویتامین‌ها، آمینواسیدها و آنتی‌اکسیدان‌ها دارد (۳). طبق آمار سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (فائو) در سال ۲۰۲۱، سطح زیر کشت این محصول در ایران ۱۳۲۷۴۴ هکتار و میزان عملکرد عدس حدود ۵۳۴ کیلوگرم در هکتار گزارش شده است. متوسط عملکرد عدس در این سال در ایران ۲/۴۴ برابر کم‌تر از متوسط جهانی و سهم ایران از کل تولیدات جهانی این گیاه تنها حدود ۶۹ هزار تن بود (۴).

در بیش‌تر نقاط دنیا میزان عملکرد واقعی عدس از عملکرد پتانسیل آن پایین‌تر است (۵). از دلایل کم بودن عملکرد عدس استفاده از ارقام و توده‌های محلی، عدم برداشت مکانیزه (۶) و کشت معمول بهاره این گیاه است که مراحل گلدهی و پر شدن دانه گیاه با خشکی و درجه حرارت بالا برخورد کرده و به‌شدت عملکرد دانه را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (۷ و ۸). تاریخ‌های کشت پاییزه سبب بهره‌برداری بهتر گیاه از بارندگی‌ها در طول فصل زراعی و فرار گیاه از تنش خشکی انتهای فصل می‌شود (۹). اما علی‌رغم مزایای کشت پاییزه، بروز تنش‌های محیطی از جمله تنش یخ‌زدگی از عوامل عمده تأثیرگذار بر رشد و عملکرد گیاهان از جمله عدس محسوب می‌شوند (۱۰ و ۱۱).

یخ‌زدگی عمده‌تاً باعث افزایش مهار نوری و از دست رفتن عملکرد فتوسیستم II می‌شود (۱۲). تنش سرما سبب از بین رفتن سلامت غشا و نشت الکترولیت‌ها (۱۳ و ۱۴) و بازدارندگی یا کاهش شدید در زنجیره انتقال الکترون شده و عمده انرژی نورانی دریافت شده به‌صورت گرما یا فلورسانس به هدر

می‌رود. تنش سرما قسمت‌های مختلف سیستم فتوستزی گیاه مانند تنظیم قطر منافذ روزنه‌ها (۱۵)، بیوستتزر رنگ‌دانه‌های فتوستزی (۱۶)، فعالیت فتوسیستم‌های I و II، فعالیت آنزیم‌های مرتبط با چرخه کلورین و تثبیت دی‌اکسید کربن را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. هم‌چنین تنش سرما سبب تخریب و کاهش نرخ جایگزینی پروتئین D1 در مرکز فتوسیستم II شده و در نهایت کل ظرفیت دستگاه فتوستزی و کارایی عملکرد کوانتومی فتوسیستم II کاهش می‌یابد (۱۷ و ۱۸).

پژوهش‌گران به‌منظور تأمین غذای جمعیت در حال افزایش کره زمین، به دنبال استفاده از روش‌های دقیق و سریع به‌منظور شناسایی ارقام متحمل در برنامه‌های اصلاحی هستند (۱۹). روش مطالعه فلورسانس کلروفیل، یکی از روش‌های سریع، مؤثر و غیرتخریبی به‌منظور غربالگری ارقام در مواجهه با تنش سرمایی است (۲۰ و ۷). در مطالعات انجام شده، پارامترهای فلورسانس کلروفیل، مانند بیشینه کارایی پتانسیل فتوسیستم II (F_v/F_m)، NPQ (فرود فتوشیمیایی) و ضریب باز بودن مراکز واکنش فتوسیستم II (q_L) به‌منظور غربالگری میزان تحمل گیاهان به تنش سرما مورد استفاده قرار گرفته است (۲۱ و ۲۲). بنابراین ارزیابی فلورسانس کلروفیل اطلاعات قابل‌اعتمادی را در ارتباط با آسیب ناشی از تنش به دستگاه فتوستزی گیاه ارائه می‌نماید (۲۳). طی پژوهشی اثر دمای یخ‌زدگی (۵- درجه سانتی‌گراد) بر فلورسانس کلروفیل گیاهچه دوساله چای (*Camellia sinensis* L.) به‌مدت ۳، ۶ و ۱۲ ساعت (به‌عنوان تنش یخ‌زدگی ملایم، متوسط و شدید) مورد بررسی قرار گرفت. پس از یک دوره ۱۵ روزه دوره ترمیم ارزیابی کیفی F_v/F_m نشان داد که فراوانی نکروز در برگ با افزایش تنش بیش‌تر بود که نشان‌دهنده آسیب ناشی از تنش به فتوسیستم II بود. از نظر کمی نیز قرارگیری گیاهان در معرض

در برخی از گزارش‌ها شده است که عدس قادر به تحمل سرمای شدید نمی‌باشد (۲۷). از طرفی مطالعات دیگر بیانگر این است که در مناطق مدیترانه‌ای کشت پاییزه عدس موفقیت‌آمیز بوده است (۲۸). نتایج پژوهش‌های مختلف روی تحمل به سرما و یخ‌زدگی عدس در ایران بیانگر وجود لاین‌های متحمل به سرما در عدس می‌باشد (۲۹ و ۳۰). با کشت پاییزه عدس امکان استفاده از بارندگی‌های فصلی افزایش یافت و امکان مواجهه گیاه با تنش خشکی انتهای فصل کاهش می‌یابد.

بنابراین با توجه به مزایای کشت پاییزه عدس و تولید آن به‌عنوان یک منبع پروتئینی ارزان، این آزمایش با هدف شناسایی ژنوتیپ‌های منتخب عدس به‌منظور انجام کشت پاییزه با روش فلورسانس کلروفیل انجام شد.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی و کاشت: این پژوهش در پاییزه زمستان ۱۳۹۸ در شرایط کنترل‌شده پژوهشکده علوم گیاهی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. عوامل موردبررسی شامل ۱۸ ژنوتیپ که در مطالعات قبل مورد ارزیابی قرار گرفته بودند (۲۴) (جدول ۱) و چهار دمای یخ‌زدگی شامل صفر، ۱۵-، ۱۸- و ۲۰- درجه سانتی‌گراد بودند.

یخ‌زدگی به مدت ۳، ۶ و ۱۲ ساعت به‌طور قابل‌توجهی میزان Fv/Fm را کاهش داد به‌طوری‌که به‌ترتیب ۱۸/۴، ۴۶/۷ و ۸۱/۵ درصد کاهش داشت. این پژوهش‌گران بیان نمودند که تجمع گونه‌های فعال اکسیژن ممکن است باعث آسیب به فتوسیستم II شود (۳). در گیاه جاتروفا (*Jatropha curcas*) در طی مراحل اولیه رشد رویشی تنش یخ‌زدگی (۱-، ۲- و ۳- درجه سانتی‌گراد) به مدت دو ساعت اعمال گردید و با کاهش دما به ۲- درجه سانتی‌گراد qp و NPQ افزایش و سپس با کاهش بیش‌تر دما کاهش یافتند. باین‌حال مقادیر Fv/Fm و F'v/F'm از همان ابتدا با کاهش دما کاهش یافت و در دمای ۳- درجه سانتی‌گراد دارای افت شدید بود (۲۴). در طی پژوهش دیگری دو گونه گیاه کاملیا (*Camellia weiningensis* و *C. oleifera*) به مدت ۲۴ ساعت، در شرایط تنش سرمایی و یخ‌زدگی (۲، ۴ و ۴- درجه سانتی‌گراد) قرار گرفتند. نتایج این مطالعه، بیانگر کاهش معنی‌دار مقدار Fv/Fm در گونه *C. weiningensis* در دمای ۴- درجه سانتی‌گراد و گونه *C. oleifera* در دماهای ۴ و ۴- درجه سانتی‌گراد بود (۲۵). بررسی مقدار F₀ در نهال دوساله لیمو مکزیکی (*Citrus aurantifolia*) (Swingle) تحت تأثیر دمای یخ‌زدگی (۶- درجه سانتی‌گراد) نشان داد که این ویژگی شش درصد به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (۲۶).

جدول ۱- ژنوتیپ‌های عدس مورد استفاده در آزمایش.

Table 1. Used lentil genotypes in experiment.

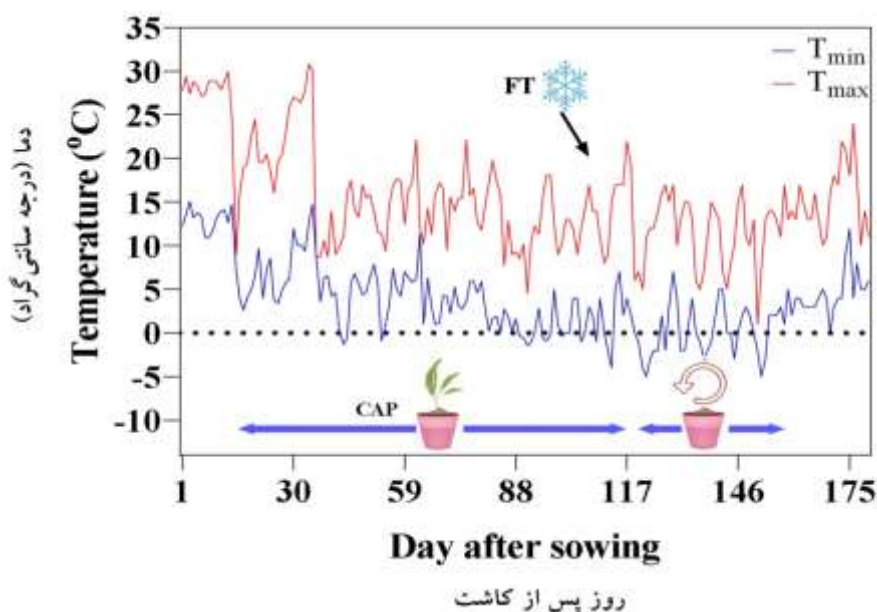
منشأ	ژنوتیپ	شماره	منشأ	ژنوتیپ	شماره
Origin	Genotype	No.	Origin	Genotype	No.
ILL5698	MLC103	10.	Iran	MLC8 ¹	1.
Iran	MLC286	11.	Iran	MLC11	2.
Iran	MLC303	12.	Iran	MLC13	3.
Iran	MLC334	13.	Iran	MLC17	4.
Iran	MLC407	14.	Iran	MLC33	5.
Iran	MLC409	15.	Iran	MLC38	6.
Iran	MLC454	16.	Iran	MLC47	7.
Iran	MLC469	17.	ILL7681	MLC70	8.
Iran	MLC472	18.	ILL7723	MLC84	9.

MLC: کلکسیون عدس پژوهشکده علوم گیاهی دانشگاه فردوسی مشهد، ILL: عدس لگوم بین‌المللی

MLC: Mashhad Lentil Collection, ILL: International Legume Lentil

شدند. آبیاری گلدان‌ها هر دو روز یکبار انجام شد و به‌منظور اعمال خو سرمایی گیاهان در شرایط طبیعی بیرون از گلخانه در هوای آزاد (شکل ۱) تا مرحله گیاهچه‌ای رشد کردند.

بذور پس از ضدعفونی در دهه دوم مهرماه به تعداد ۱۰ عدد در عمق یک سانتی‌متری گلدان‌های پلاستیکی با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۱ سانتی‌متر حاوی ۲۵ درصد شن و ۷۵ درصد خاک مزرعه کشت



شکل ۱- حداقل و حداکثر روزانه در طول فصل رشد ژنوتیپ‌های عدس در شرایط کنترل‌شده در سال ۱۳۹۸.

FT: اعمال تیمار یخ‌زدگی، CAP: دوره خو سرمایی و RP (In): دوره ترمیم.

Fig. 1. Minimum and maximum daily air temperatures during lentil genotypes growing season under controlled condition in 2019.

FT: Freezing treatment; CAP: Cold acclimation period; RP (In): Recovery period (Indoor).

Active Bacteria) روی گیاه انجام شد (۳۲). به‌منظور ایجاد تعادل در دمای محیط، گیاهچه‌ها در هر تیمار دمایی به مدت یک ساعت نگهداری و سپس به مدت ۱۲ ساعت در اتاقک سرد با دمای 5 ± 2 درجه سانتی‌گراد بدون نور نگهداری شدند.

قبل از قرارگیری نمونه‌ها در معرض دماهای یخ‌زدگی عوامل فلورسانس کلروفیل برگ از ساعت ۱۰ صبح تا ۱۴ بعدازظهر در حالت روشنایی اندازه‌گیری شد. روند تغییرات عوامل فلورسانس کلروفیل در هر تیمار دمایی بر اساس زمان خارج

اعمال تیمار یخ‌زدگی: گلدان‌ها ۲۴ ساعت قبل از اعمال تنش یخ‌زدگی آبیاری شده و سپس برای اعمال دماهای یخ‌زدگی در اواسط بهمن‌ماه به فریزر ترموگرادیان بدون نور منتقل شدند. دمای فریزر در ابتدای آزمایش پنج درجه سانتی‌گراد بود و پس از قرار دادن نمونه‌ها با سرعت دو درجه سانتی‌گراد در ساعت دما کاهش یافت (۳۱). به‌منظور ایجاد هستک یخ در گیاه و اجتناب از بروز پدیده فرا سرما، در دمای -3 درجه سانتی‌گراد، پاشش باکتری‌های ایجادکننده هستک یخ (INAB) (Ice Nucleation)

تیمار بررسی شد. صفات اندازه‌گیری شده شامل کلروفیل فلورسانس لحظه‌ای (F'), کمینه بازتاب فلورسانس از برگ سازگار شده به نور (F'0)، بیشینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور (F'm) و فلورسانس متغیر (F'v) بودند. همچنین با استفاده از این عوامل شاخص‌های F'q/F'm، F'v/F'm، F'q/F'v و qL محاسبه شدند (جدول ۲).

شدن آن‌ها از فریزر ترموگرادیان با فواصل ۲۴، ۴۸، ۷۲، ۱۲۰ و ۱۴۴ ساعت پس از اعمال تنش یخ‌زدگی در هر تیمار دمایی با استفاده از دستگاه فلورومتر (مدل OptiScience, Inc) و روی جوان‌ترین برگ کاملاً توسعه یافته در تمام ژنوتیپ‌ها، دماهای یخ‌زدگی، قبل از تنش و در هر پنج دوره پس از تنش یخ‌زدگی در تمام تکرارها با استفاده از سه بوته از هر تکرار و

جدول ۲- صفات، معادلات و تعاریف عوامل فلورسانس کلروفیل اندازه‌گیری شده در آزمایش (۳۳).

Table 2. List of commonly used abbreviations, equations and identify (33).

توضیح	فرمول Formula	عامل Parameter
بیشینه کارایی پتانسیل فتوسنتز II در شرایط سازگار شده با نور	$(F'm - F'0) / F'm$	F'v/F'm
کارایی عملیاتی فتوسنتز II در شرایط سازگار شده با نور	$(F'm - F') / F'm$	F'q/F'm = ϕ PSII
فرود فتوشیمیایی	$(F'm - F') / (F'm - F'0)$	F'q/F'v
ضریب باز بودن مراکز واکنش فتوسنتز II	$(F'q / F'v) / (F'0 / F')$	qL

فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و برای صفات Lethal temperature 50% of plants (LT_{50su}) RDMT₅₀ (according to survival percentage Reduced temperature 50% plants according to dry matter) و ^RHT₅₀ (to dry matter 50% plants according to plant height) به صورت طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. LT_{50su}، RDMT₅₀ و ^RHT₅₀ با استفاده از رسم نمودار صفات مذکور در مقابل دماهای یخ‌زدگی تعیین شدند مقایسه میانگین‌ها نیز با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. برای تجزیه خوشه‌ای تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و ترسیم نمودارهای دوبعدی از نرم‌افزارهای SPSS19 و STATISTICA استفاده گردید. برای تأیید صحت گروه‌بندی انجام شده، از تجزیه واریانس چندمتغیره، تجزیه تابع تشخیص،

سه هفته پس از انتقال نمونه‌ها به گلخانه، درصد بقاء و درصد ترمیم نمونه‌ها (SU%) محاسبه شد (رابطه ۱).

درصد بقای گیاهان از طریق شمارش تعداد بوته زنده پیش از تنش یخ‌زدگی در هر گلدان (B)، درصد بقای گیاهان از طریق شمارش تعداد بوته زنده پس از تنش یخ‌زدگی در هر گلدان (A).

$$SU\% = \frac{A}{B} \times 100 \quad (1)$$

در انتها ارتفاع بوته و وزن خشک گیاهان (۴۸ ساعت پس از قرار گرفتن در آون ۷۰ درجه سانتی‌گراد) اندازه‌گیری شد.

تجزیه و تحلیل آماری: تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها توسط نرم‌افزار MSTATC انجام گرفت. تجزیه و تحلیل برای صفات عوامل فلورسانس کلروفیل به صورت

یخزدگی کم‌تر از ۲۴ ساعت پس از تنش یخزدگی بود. ژنوتیپ MLC70 با ۸۶ درصد کاهش و ژنوتیپ MLC33 با کاهش ۲/۷ برابر به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین کاهش F'_0 را داشتند. تفاوت کم‌تر F'_0 در ۱۲ و ۱۴۴ ساعت پس از اعمال تنش یخزدگی در ژنوتیپ MLC70 در مقایسه با سایر ژنوتیپ‌ها نشان‌دهنده توانایی بالای این ژنوتیپ در حفظ فلورسانس کمینه در روشنایی و هم‌چنین ترمیم مطلوب آن است. وجود روند کاهشی در F'_0 نشان‌دهنده ادامه فعالیت‌های فتوسنتزی به نحو مطلوب است. به‌عبارتی دیگر هرچه شاخص یاد شده کم‌تر باشد نشان‌دهنده ادامه روند تثبیت کربن و وجود اختلال کم‌تر در زنجیره انتقال الکترون فتوسیستم II و آمادگی بیش‌تر مراکز واکنش برای دریافت نور است (جدول ۵).

بررسی روند تغییرات F'_0 نشان داد که در ساعات اولیه پس از تنش یخزدگی این متغیر در دماهای ۱۸- و ۲۰- درجه سانتی‌گراد با افزایش، اما در دمای صفر و ۱۵- درجه با کاهش مواجه شد. اما در تمامی تیمارهای دمایی کمینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور روندی کاهشی را نشان داد و مقدار این شاخص ۷۲ ساعت پس از تنش یخزدگی به کم‌ترین مقدار خود رسید. به‌طوری‌که این شاخص در ۷۲ ساعت پس از تنش یخزدگی در مقایسه با ۲۴ ساعت پس از اعمال تنش در دماهای صفر، ۱۵-، ۱۸- و ۲۰- درجه سانتی‌گراد به ترتیب از کاهش ۲/۳۴، ۲/۵۴، ۲/۶۷ و ۲/۶۴ برابری برخوردار بود (جدول ۶).

استفاده شد. هم‌چنین برای بررسی تفاوت گروه‌ها از لحاظ صفات مختلف، مقایسه میانگین گروه‌ها برای صفات موردبررسی انجام شد. مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد انجام گرفت.

نتایج و بحث

کمینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور (F'_0): کمینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور تحت‌تأثیر ژنوتیپ، تنش یخزدگی، دوره بازیابی و برهمکنش آن‌ها قرار گرفت (جدول ۳). در تمام ژنوتیپ‌ها به‌جز ژنوتیپ MLC103 اعمال تنش دمایی ۲۰- درجه سانتی‌گراد سبب افزایش کمینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور شد. کم‌ترین میزان افزایش در نتیجه اعمال تنش دمایی ۲۰- درجه سانتی‌گراد در مقایسه با شاهد در ژنوتیپ MLC469 با دو درصد افزایش بود. در تمامی ژنوتیپ‌ها هرچند اعمال تنش سبب افزایش مقدار F'_0 در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد در مقایسه با دمای صفر درجه سانتی‌گراد شد، اما این تفاوت از لحاظ آماری معنی‌دار نبود (جدول ۴).

در ژنوتیپ‌های MLC8، MLC11، MLC13، MLC17، MLC33، MLC38 و MLC47 تفاوت معنی‌داری از نظر F'_0 قبل از اعمال تنش یخزدگی با ساعات اولیه تنش مشاهده نشد. روند کاهشی در مقادیر F'_0 در نتیجه اعمال تنش یخزدگی در تمام ژنوتیپ‌ها ۲۴ ساعت پس از تنش یخزدگی مشاهده شد به‌طوری‌که مقدار F'_0 در ۱۴۴ ساعت پس از تنش

جدول ۳- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) عوامل فلورسانس کلروفیل ژنوتیپ‌های عدس در سطوح مختلف تنش یخ‌زدگی و زمان اندازه‌گیری در دوره بازیایی.

Table 3. Analysis of variance (Mean square) Chlorophyll fluorescence parameters of Lentil genotypes under freezing stress, time measurement in time points.

qL	F'q/F'v	F'q/F'm	F'v/F'm	F'v	F'm	F'o	df	منابع تغییرات Source of variation
0.128**	0.064 ^{BS}	0.248**	0.238**	526890**	593130**	109644**	17	ژنوتیپ (G)
0.263**	0.037 ^{BS}	10.9**	11.3**	22880345**	19771386**	131995**	3	دما (T)
0.245**	0.059 ^{BS}	0.080**	0.119**	6944009**	19095479**	4271395**	5	زمان (TP)
0.160**	0.049 ^{BS}	0.091**	0.084**	195264**	185122**	12960**	51	G×T
0.156**	0.071**	0.043**	0.040**	85661**	147933**	73558**	85	G×TP
0.314**	0.042 ^{BS}	0.598**	0.622**	1530067**	1597302**	44657**	15	T×TP
0.143**	0.041 ^{BS}	0.017**	0.016**	74185**	94944**	8918**	255	G×TP×T
0.018	0.045	0.012	0.010	22634	31526	3679	864	خطا
13.5	21.0	18.9	17.2	24.3	18.3	17.4	-	ضریب تغییرات C.V%

df: درجه آزادی، F'o: کمینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور، F'm: بیشینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور، F'v: فلورسانس متغیر، F'v/F'm: بیشینه کارایی پتانسیل فتوسینتیم II در شرایط سازگار شده با نور، F'q/F'm: کارایی عملیاتی فتوسینتیم II در شرایط سازگار شده با نور، F'q/F'v: فرود فتوشیمیایی و qL: ضریب باز بودن مراکز واکنش فتوسینتیم III و** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد و غیرمعنی‌دار. CV: ضریب تغییرات

Df: degree of freedom, F'o: minimum value for chlorophyll fluorescence in the light, F'm: maximal value for chlorophyll fluorescence in the light, F'v: Variable fluorescence, F'v/F'm: maximum efficiency of PSII photochemistry in the light if all reaction centers were open, F'q/F'm: highest PSII operating efficiency in the light, F'q/F'v: photochemical quenching, qL: fraction of open PSII reaction centers, **: Significant at probability level of 1% and ^{BS}: no significant, CV: Coefficient Variation

جدول ۴- مقایسه میانگین کمینه و بیشینه فلورسانس سازگار شده به نور ژنوتیپ‌های عدس در دماهای یخ‌زدگی.

Table 4. Comparison of mean F'o and F'm parameter in lentil genotypes in freezing temperature.

F'm				F'o				ژنوتیپ Genotype
دمای یخ‌زدگی (درجه سانتی‌گراد) Freezing temperature (°C)				دمای یخ‌زدگی (درجه سانتی‌گراد) Freezing temperature (°C)				
-20	-18	-15	0	-20	-18	-15	0	
730 ^{m-q}	1091 ^{a-i}	1194 ^{a-f}	1206 ^{a-d}	413 ^{a-g}	423 ^{a-f}	347 ^{c-s}	337 ^{f-s}	MLC8 ¹
547 ^{o-r}	1184 ^{a-g}	1049 ^{c-j}	1164 ^{a-g}	376 ^{b-o}	337 ^{f-s}	321 ^{i-t}	305 ^{m-t}	MLC11
506 ^{p-r}	991 ^{d-l}	1093 ^{a-i}	1106 ^{a-h}	344 ^{d-s}	359 ^{c-p}	328 ^{g-s}	330 ^{e-s}	MLC13
647 ^{n-r}	1108 ^{a-h}	1178 ^{a-g}	1132 ^{a-g}	406 ^{a-i}	458 ^{ab}	426 ^{a-d}	338 ^{e-s}	MLC17
562 ^{o-r}	849 ^{j-n}	1212 ^{a-d}	1159 ^{a-g}	373 ^{b-o}	432 ^{a-c}	339 ^{e-s}	318 ^{j-t}	MLC33
644 ^{n-r}	830 ^{j-n}	940 ^{e-m}	1283 ^{a-c}	453 ^{ab}	479 ^a	412 ^{a-h}	392 ^{b-l}	MLC38
750 ^{l-p}	1188 ^{a-g}	1156 ^{a-g}	1312 ^{ab}	381 ^{b-n}	339 ^{e-s}	329 ^{g-s}	330 ^{e-s}	MLC47
781 ^{k-o}	943 ^{e-m}	1149 ^{a-g}	1272 ^{a-c}	384 ^{b-n}	356 ^{c-q}	320 ^{j-t}	336 ^{f-s}	MLC70
488 ^{q-r}	860 ^{h-n}	776 ^{l-o}	1094 ^{a-i}	303 ^{m-t}	308 ^{k-t}	344 ^{d-s}	270 ^{q-y}	MLC84
415 ^r	698 ^{m-q}	947 ^{e-m}	1159 ^{a-g}	306 ^{l-t}	320 ^{i-t}	355 ^{c-r}	336 ^{e-s}	MLC103
680 ^{n-q}	725 ^{m-q}	1124 ^{a-g}	1152 ^{a-g}	283 ^{p-t}	298 ^{n-t}	291 ^{o-t}	266 st	MLC286
547 ^{o-r}	943 ^{f-m}	1096 ^{a-i}	1113 ^{a-h}	364 ^{c-p}	394 ^{a-k}	336 ^{f-s}	352 ^{c-s}	MLC303
610 ^{n-r}	999 ^{d-l}	1032 ^{c-k}	1245 ^{a-d}	325 ^{i-t}	270 ^{q-t}	326 ^{h-t}	270 ^t	MLC334
718 ^{m-q}	1063 ^{b-j}	1153 ^{a-g}	1337 ^a	345 ^{d-s}	357 ^{c-p}	290 ^{o-t}	314 ^{j-t}	MLC407
669 ^{n-q}	1050 ^{c-j}	1164 ^{a-g}	1197 ^{a-e}	347 ^{c-s}	353 ^{c-s}	336 ^{f-s}	332 ^{e-s}	MLC409
782 ^{k-o}	1180 ^{a-g}	1207 ^{a-d}	1262 ^{a-c}	424 ^{a-e}	389 ^{b-m}	376 ^{b-o}	379 ^{b-n}	MLC454
626 ^{n-r}	1127 ^{a-g}	792 ^{k-o}	1270 ^{a-c}	395 ^{a-j}	394 ^{a-k}	348 ^{c-s}	389 ^{b-m}	MLC469
561 ^{o-r}	635 ^{n-r}	1033 ^{c-k}	1186 ^{a-g}	374 ^{b-o}	340 ^{d-s}	239 ^t	311 ^{j-t}	MLC472

F'o: کمینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور، F'm: بیشینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور، MLC-۱: کلکسیون عدس پژوهشگاه علوم گیاهی دانشگاه فردوسی مشهد، برای هر صفت میانگین‌های دارای یک حرف مشترک بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند

F'o: minimum value for chlorophyll fluorescence in the light, F'm: maximal value for chlorophyll fluorescence in the light, 1- MLC: Mashhad Lentil Collection, Means followed by the same letter for each trait is not significantly different at 5% of probability level based on LSD test

جدول ۵- مقایسه میانگین عوامل فلورسانس کلروفیل زئوتیپ‌های عدس در دوره بازیایی.

Table 5. Comparison of mean Chlorophyll fluorescence parameters of Lentile genotypes during time point.

qL	F'0/F'v	Fq/F'm	F'v/F'm	F'v	F'm	F'0	دوره بازیایی (ساعت)	ژنوتیپ
							Time Point (hour)	Genotype
0.920 ^{de}	1.10 ^{ab}	0.610 ^{a-o}	0.550 ^{a-u}	759 ^{d-s}	1378 ^{a-g}	619 ^{b-e}	BS	MLC8 ¹
0.970 ^d	0.970 ^{bc}	0.630 ^{a-n}	0.652 ^{a-k}	1038 ^{a-c}	1527 ^{ab}	525 ^{d-h}	24	
0.990 ^{cd}	1.00 ^{a-c}	0.560 ^{a-p}	0.560 ^{a-u}	705 ^{g-w}	1123 ^{e-v}	411 ^{i-q}	48	
1.00 ^{cd}	1.00 ^{a-c}	0.682 ^{a-d}	0.680 ^{a-f}	519 ^{r-ad}	722 ^{z-ak}	203 ^{ag-ak}	72	
0.900 ^{de}	0.880 ^{bc}	0.610 ^{a-o}	0.630 ^{a-n}	593 ^{m-ab}	872 ^{r-ag}	279 ^{t-aj}	120	
1.06 ^{cd}	1.07 ^{a-c}	0.550 ^{a-p}	0.550 ^{a-u}	477 ^{t-ad}	711 ^{aa-ak}	243 ^{aa-ak}	144	
1.00 ^{cd}	1.00 ^{a-c}	0.550 ^{a-p}	0.550 ^{a-u}	664 ^{i-y}	1175 ^{d-s}	511 ^{e-i}	BS	MLC11
0.943 ^d	1.00 ^{a-c}	0.610 ^{a-o}	0.610 ^{a-r}	946 ^{a-h}	1406 ^{a-e}	462 ^{b-m}	24	
1.00 ^{cd}	1.01 ^{a-c}	0.570 ^{a-p}	0.560 ^{a-u}	721 ^{f-u}	1050 ^{h-y}	328 ^{o-ac}	48	
1.05 ^{cd}	1.15 ^{ab}	0.600 ^{a-p}	0.601 ^{a-s}	486 ^{s-ad}	705 ^{aa-ak}	219 ^{ac-ak}	72	
0.980 ^{cd}	0.990 ^{bc}	0.590 ^{a-p}	0.590 ^{a-t}	575 ^{n-ac}	845 ^{t-ah}	270 ^{u-ak}	120	
1.03 ^{cd}	1.05 ^{a-c}	0.590 ^{a-p}	0.580 ^{a-u}	519 ^{r-ad}	737 ^{y-ak}	218 ^{ac-ak}	144	
1.00 ^{cd}	1.02 ^{a-c}	0.500 ^{c-p}	0.490 ^{t-v}	565 ^{o-ac}	1150 ^{d-u}	584 ^{c-g}	BS	MLC13
0.990 ^{cd}	1.00 ^{a-c}	0.570 ^{a-p}	0.570 ^{a-u}	856 ^{a-m}	1314 ^{a-j}	467 ^{h-m}	24	
1.07 ^{cd}	1.07 ^{a-c}	0.570 ^{a-p}	0.540 ^{a-u}	577 ^{n-ac}	933 ^{n-ad}	324 ^{p-ad}	48	
0.943 ^d	0.930 ^{bc}	0.619 ^{a-o}	0.640 ^{a-m}	432 ^{w-ad}	617 ^{ad-ak}	185 ^{ai-ak}	72	
0.972 ^{cd}	0.970 ^{bc}	0.560 ^{a-p}	0.570 ^{a-u}	553 ^{p-ac}	829 ^{u-ai}	277 ^{t-aj}	120	
0.950 ^d	0.940 ^{bc}	0.580 ^{a-p}	0.600 ^{a-t}	498 ^{r-ad}	703 ^{aa-ak}	205 ^{ag-ak}	144	
1.00 ^{cd}	0.991 ^{a-c}	0.430 ^{b-q}	0.430 ^{b-v}	539 ^{p-ac}	1241 ^{b-o}	702 ^{ab}	BS	MLC17
0.950 ^d	1.00 ^{a-c}	0.590 ^{a-p}	0.601 ^{a-r}	979 ^{a-g}	1572 ^a	621 ^{b-e}	24	
1.02 ^{cd}	1.03 ^{a-c}	0.600 ^{a-p}	0.580 ^{a-u}	802 ^{b-q}	1252 ^{a-n}	420 ^{b-p}	48	
1.01 ^{cd}	1.01 ^{a-c}	0.610 ^{a-o}	0.610 ^{a-r}	428 ^{x-ad}	634 ^{ad-ak}	206 ^{ag-ak}	72	
0.940 ^{de}	0.870 ^{bc}	0.510 ^{a-p}	0.540 ^{a-u}	477 ^{t-ad}	737 ^{y-ak}	256 ^{x-ak}	120	
1.03 ^{cd}	1.09 ^{ab}	0.530 ^{a-p}	0.530 ^{b-v}	424 ^{x-ad}	662 ^{ac-ak}	238 ^{aa-ak}	144	
0.990 ^{cd}	1.06 ^{a-c}	0.610 ^{a-o}	0.580 ^{a-u}	720 ^{i-u}	1233 ^{b-o}	514 ^{e-i}	BS	MLC33
0.990 ^{cd}	1.04 ^{a-c}	0.570 ^{a-p}	0.560 ^{a-u}	921 ^{a-i}	1517 ^{a-c}	596 ^{b-g}	24	
1.00 ^{cd}	1.00 ^{a-c}	0.510 ^{b-p}	0.510 ^{e-v}	585 ^{m-ac}	965 ^{l-ac}	380 ^u	48	
0.990 ^{cd}	0.990 ^{bc}	0.520 ^{a-p}	0.520 ^{e-v}	397 ^{y-ad}	605 ^{ae-ak}	208 ^{af-ak}	72	
0.890 ^{de}	0.900 ^{bc}	0.460 ^{i-q}	0.460 ^{m-v}	421 ^{x-ad}	695 ^{aa-ak}	274 ^{t-ak}	120	
0.980 ^{cd}	0.970 ^{bc}	0.500 ^{c-p}	0.530 ^{b-v}	435 ^{w-ad}	657 ^{ac-ak}	222 ^{ac-ak}	144	
0.960 ^d	1.05 ^{a-c}	0.520 ^{a-p}	0.500 ^{t-v}	619 ^{l-aa}	1226 ^{b-o}	608 ^{b-f}	BS	MLC38
1.04 ^{cd}	1.21 ^{ab}	0.480 ^{f-q}	0.420 ^{s-v}	584 ^{m-ac}	1274 ^{a-l}	690 ^{a-c}	24	
1.04 ^{cd}	1.02 ^{a-c}	0.462 ^{h-q}	0.470 ^{t-v}	663 ^{i-y}	1173 ^{d-s}	498 ^{f-j}	48	
0.970 ^d	0.960 ^{bc}	0.431 ^{m-q}	0.440 ^{b-v}	263 ^{ad}	482 ^k	219 ^{ac-ak}	72	
1.02 ^{cd}	1.06 ^{a-c}	0.455 ^{j-q}	0.471 ^{k-v}	388 ^{z-ad}	676 ^{ab-ak}	288 ^{s-ai}	120	
1.05 ^{cd}	1.05 ^{a-c}	0.490 ^{d-p}	0.490 ^{b-v}	412 ^{x-ad}	713 ^{z-ak}	301 ^{q-aj}	144	
0.980 ^{cd}	1.03 ^{a-c}	0.660 ^{a-i}	0.640 ^{a-m}	810 ^{b-p}	1259 ^{a-m}	449 ^{b-n}	BS	MLC47
0.930 ^{de}	0.970 ^{bc}	0.652 ^{a-i}	0.680 ^{a-h}	1053 ^{ab}	1524 ^{a-c}	504 ^{f-i}	24	
1.03 ^{cd}	1.07 ^{a-c}	0.671 ^{a-f}	0.660 ^{a-j}	957 ^{a-g}	1336 ^{a-i}	379 ^{l-u}	48	
1.04 ^{cd}	1.11 ^{ab}	0.660 ^{a-i}	0.620 ^{a-o}	505 ^{r-ad}	755 ^{x-ak}	219 ^{ac-ak}	72	
1.02 ^{cd}	1.04 ^{a-c}	0.610 ^{a-o}	0.602 ^{a-r}	594 ^{m-ab}	856 ^{s-ah}	258 ^{x-ak}	120	
1.02 ^{cd}	1.04 ^{a-c}	0.651 ^{a-j}	0.651 ^{a-l}	618 ^{l-aa}	878 ^{q-ag}	259 ^{x-ak}	144	
1.00 ^{cd}	1.02 ^{a-c}	0.550 ^{a-p}	0.540 ^{a-u}	738 ^{e-t}	1380 ^{a-g}	643 ^{bc}	BS	MLC70
1.00 ^{cd}	1.00 ^{a-c}	0.690 ^{a-d}	0.690 ^{a-e}	970 ^{a-g}	1403 ^{a-f}	436 ^{h-o}	24	
0.980 ^{cd}	0.990 ^{bc}	0.640 ^{a-l}	0.640 ^{a-m}	909 ^{a-j}	1249 ^{a-o}	347 ^{m-aa}	48	
1.00 ^{cd}	1.00 ^{a-c}	0.670 ^{a-g}	0.670 ^{a-i}	469 ^{t-ad}	655 ^{ac-ak}	186 ^{ai-ak}	72	
1.01 ^{cd}	1.10 ^{ab}	0.630 ^{a-n}	0.600 ^{a-t}	503 ^{r-ad}	784 ^{w-ak}	251 ^{y-ak}	120	
1.02 ^{cd}	1.03 ^{a-c}	0.610 ^{a-o}	0.602 ^{a-r}	513 ^{r-ad}	747 ^{y-ak}	235 ^{ab-ak}	144	
0.960 ^d	0.960 ^{bc}	0.619 ^{a-o}	0.650 ^{a-m}	467 ^{t-ad}	720 ^{z-ak}	278 ^{t-aj}	BS	MLC84
0.990 ^{cd}	0.970 ^{bc}	0.520 ^{a-p}	0.540 ^{a-u}	680 ^{h-x}	1177 ^{d-s}	498 ^{f-j}	24	
1.01 ^{cd}	1.02 ^{a-c}	0.530 ^{a-p}	0.540 ^{a-u}	628 ^{k-z}	1002 ^{j-aa}	381 ^{l-u}	48	
1.00 ^{cd}	1.00 ^{a-c}	0.590 ^{a-p}	0.590 ^{a-u}	369 ^{z-ad}	558 ^{ag-ak}	189 ^{ab-ak}	72	
1.00 ^{cd}	1.01 ^{a-c}	0.510 ^{a-p}	0.510 ^{e-v}	408 ^{x-ad}	660 ^{ac-ak}	251 ^{y-ak}	120	
0.910 ^{de}	0.930 ^{bc}	0.570 ^{a-p}	0.570 ^{a-u}	469 ^{t-ad}	710 ^{aa-ak}	241 ^{aa-ak}	144	
1.00 ^{cd}	1.03 ^{a-c}	0.410 ^{o-q}	0.410 ^{uv}	522 ^{r-ad}	1201 ^{c-q}	679 ^{a-c}	BS	MLC103
1.02 ^{cd}	0.950 ^{bc}	0.500 ^{c-p}	0.560 ^{a-u}	555 ^{p-ac}	890 ^{p-af}	361 ^{l-y}	24	
0.970 ^d	0.980 ^{bc}	0.520 ^{a-p}	0.511 ^{d-v}	715 ^{g-u}	1077 ^{g-x}	357 ^{m-z}	48	
0.930 ^{de}	0.930 ^{bc}	0.500 ^{c-p}	0.500 ^{g-v}	323 ^{ab-ad}	503 ^{aj-ak}	180 ^{af-ak}	72	
0.990 ^{cd}	0.990 ^{bc}	0.480 ^{f-q}	0.480 ^{t-v}	369 ^{z-ad}	579 ^{af-ak}	211 ^{af-ak}	120	
0.880 ^{de}	0.900 ^{bc}	0.470 ^{g-q}	0.550 ^{a-u}	398 ^{y-ad}	579 ^{af-ak}	187 ^{af-ak}	144	
1.00 ^{cd}	1.00 ^{a-c}	0.700 ^{a-c}	0.700 ^{a-c}	670 ^{i-y}	927 ^{o-ae}	257 ^{x-ak}	BS	MLC286
0.990 ^{cd}	0.990 ^{bc}	0.620 ^{a-n}	0.630 ^{a-o}	895 ^{a-k}	1354 ^{a-i}	470 ^{h-l}	24	
1.00 ^{cd}	1.00 ^{a-c}	0.620 ^{a-n}	0.620 ^{a-p}	713 ^{g-v}	1035 ^z	322 ^{p-ae}	48	
1.01 ^{cd}	1.00 ^{a-c}	0.641 ^{a-k}	0.651 ^{a-l}	479 ^{t-ad}	670 ^{ac-ak}	191 ^{ag-ak}	72	
0.990 ^{cd}	1.00 ^{a-c}	0.620 ^{a-n}	0.621 ^{a-o}	502 ^{r-ad}	746 ^{y-ak}	243 ^{aa-ak}	120	
1.02 ^{cd}	1.12 ^{ab}	0.671 ^{a-f}	0.660 ^{a-j}	565 ^{o-ac}	789 ^{w-ak}	223 ^{ac-ak}	144	

ادامه جدول ۵-

Continue Table 5.

qL	F'0/F'v	Fq/F'm	F'v/F'm	F'v	F'm	F'0	دوره بازایی (ساعت) Time Point (hour)	ژنوتیپ Genotype
0.690 ^e	0.690 ^c	0.290 ^q	0.350 ^v	346 ^{aa-ad}	972 ^{k-ac}	627 ^{b-d}	BS	MLC303
0.990 ^{cd}	0.950 ^{bc}	0.570 ^{a-p}	0.601 ^{a-s}	719 ^{g-u}	1181 ^{d-r}	467 ^{h-m}	24	
1.03 ^{cd}	1.06 ^{a-c}	0.580 ^{a-p}	0.580 ^{a-u}	905 ^{a-j}	1278 ^{a-l}	373 ^{l-w}	48	
0.950 ^d	0.950 ^{bc}	0.580 ^{a-p}	0.580 ^{a-u}	470 ^{t-ad}	684 ^{aa-ak}	214 ^{ad-ak}	72	
1.01 ^{cd}	1.02 ^{a-c}	0.560 ^{a-p}	0.560 ^{a-u}	434 ^{w-ad}	682 ^{aa-ak}	247 ^{z-ak}	120	
1.22 ^c	1.38 ^a	0.640 ^{a-l}	0.570 ^{a-u}	481 ^{t-ad}	751 ^{y-ak}	239 ^{aa-ak}	144	
0.990 ^{cd}	1.00 ^{a-c}	0.711 ^a	0.710 ^{ab}	579 ^{n-ac}	817 ^{v-aj}	238 ^{aa-ak}	BS	MLC334
0.980 ^{cd}	0.980 ^{bc}	0.661 ^{a-h}	0.670 ^{a-h}	1031 ^{a-d}	1508 ^{a-c}	494 ^{g-k}	24	
0.950 ^d	0.960 ^{bc}	0.600 ^{a-p}	0.640 ^{a-m}	936 ^{a-i}	1296 ^{a-k}	391 ^{j-s}	48	
1.87 ^a	0.930 ^{bc}	0.630 ^{a-n}	0.720 ^a	523 ^{r-ad}	673 ^{ab-ak}	185 ^{ai-ak}	72	
1.00 ^{cd}	0.991 ^{a-c}	0.610 ^{a-o}	0.610 ^{a-q}	482 ^{t-ad}	724 ^{z-ak}	242 ^{aa-ak}	120	
0.970 ^d	0.960 ^{bc}	0.641 ^{a-k}	0.651 ^{a-l}	576 ^{n-ac}	811 ^{v-aj}	236 ^{ab-ak}	144	
1.00 ^{cd}	1.00 ^{a-c}	0.680 ^{a-e}	0.680 ^{a-g}	736 ^{e-t}	1080 ^{f-w}	344 ^{n-ab}	BS	MLC407
0.970 ^d	1.04 ^{a-c}	0.640 ^{a-l}	0.620 ^{a-p}	994 ^{a-f}	1521 ^{a-c}	528 ^{d-h}	24	
1.02 ^{cd}	1.10 ^{ab}	0.651 ^{a-j}	0.651 ^{a-l}	932 ^{a-i}	1283 ^{a-l}	364 ^{l-x}	48	
1.56 ^b	0.991 ^{a-c}	0.671 ^{a-f}	0.681 ^{a-f}	514 ^{r-ad}	684 ^{aa-ak}	170 ^{aj-ak}	72	
1.00 ^{cd}	1.01 ^{a-c}	0.681 ^{a-e}	0.670 ^{a-h}	666 ^{i-y}	968 ^{l-ac}	298 ^{r-ab}	120	
0.943 ^d	0.960 ^{bc}	0.650 ^{a-k}	0.640 ^{a-m}	616 ^{l-aa}	871 ^{r-ag}	255 ^{x-ak}	144	
0.960 ^d	1.11 ^{ab}	0.481 ^{e-q}	0.450 ^{a-v}	552 ^{p-ac}	1223 ^{b-o}	671 ^{a-c}	BS	MLC409
1.00 ^{cd}	1.00 ^{a-c}	0.710 ^{ab}	0.700 ^{a-c}	1119 ^a	1566 ^a	447 ^{h-n}	24	
1.01 ^{cd}	1.02 ^{a-c}	0.670 ^{a-g}	0.660 ^{a-j}	838 ^{b-o}	1156 ^{d-t}	318 ^{p-af}	48	
1.00 ^{cd}	1.00 ^{a-c}	0.700 ^{a-c}	0.690 ^{a-d}	440 ^{v-ad}	606 ^{ae-ak}	166 ^{ak}	72	
0.990 ^{cd}	1.00 ^{a-c}	0.620 ^{a-n}	0.620 ^{a-p}	519 ^{r-ad}	734 ^{y-ak}	215 ^{ad-ak}	120	
0.950 ^d	0.960 ^{bc}	0.632 ^{a-m}	0.630 ^{a-o}	602 ^{l-aa}	837 ^{t-ai}	235 ^{ab-ak}	144	
1.00 ^{cd}	1.01 ^{a-c}	0.400 ^{pq}	0.410 ^{a-v}	571 ^{n-ac}	1346 ^{a-i}	776 ^a	BS	MLC454
0.990 ^{cd}	0.990 ^{bc}	0.670 ^{a-g}	0.680 ^{a-h}	999 ^{a-e}	1465 ^{a-d}	468 ^{h-l}	24	
1.01 ^{cd}	1.01 ^{a-c}	0.650 ^{a-k}	0.651 ^{a-l}	976 ^{a-g}	1380 ^{a-g}	404 ^{i-r}	48	
1.03 ^{cd}	1.10 ^{ab}	0.680 ^{a-f}	0.650 ^{a-m}	473 ^{t-ad}	695 ^{aa-ak}	193 ^{ag-ak}	72	
1.00 ^{cd}	1.01 ^{a-c}	0.632 ^{a-m}	0.630 ^{a-n}	668 ^{i-y}	936 ^{m-ad}	267 ^{w-ak}	120	
1.02 ^{cd}	1.03 ^{a-c}	0.651 ^{a-j}	0.620 ^{a-p}	543 ^{p-ac}	822 ^{y-aj}	245 ^{aa-ak}	144	
1.06 ^{cd}	1.19 ^{ab}	0.485 ^{d-q}	0.430 ^{a-v}	532 ^{q-ad}	1207 ^{b-p}	675 ^{a-c}	BS	MLC469
0.980 ^{cd}	1.00 ^{a-c}	0.570 ^{a-p}	0.570 ^{a-u}	765 ^{c-r}	1270 ^{a-l}	505 ^{f-i}	24	
1.00 ^{cd}	1.02 ^{a-c}	0.620 ^{a-n}	0.620 ^{a-q}	870 ^{a-l}	1248 ^{a-o}	378 ^{l-v}	48	
0.990 ^{cd}	0.980 ^{bc}	0.520 ^{a-p}	0.530 ^{a-v}	318 ^{ac-ad}	515 ^{ai-ak}	197 ^{ag-ak}	72	
0.970 ^d	0.980 ^{bc}	0.540 ^{a-p}	0.540 ^{a-u}	448 ^{u-ad}	719 ^{z-ak}	273 ^{w-ak}	120	
1.07 ^{cd}	1.09 ^{ab}	0.570 ^{a-p}	0.560 ^{a-u}	503 ^{r-ad}	764 ^{w-ak}	261 ^{x-ak}	144	
1.00 ^{cd}	1.00 ^{a-c}	0.701 ^{ab}	0.710 ^{a-c}	635 ^{j-z}	898 ^{p-af}	262 ^{x-ak}	BS	MLC472
0.990 ^{cd}	0.991 ^{a-c}	0.570 ^{a-p}	0.570 ^{a-u}	845 ^{a-n}	1370 ^{a-h}	528 ^{d-h}	24	
0.900 ^{de}	0.900 ^{bc}	0.450 ^{k-q}	0.450 ^{a-v}	612 ^{l-aa}	996 ^{j-ab}	384 ^{k-t}	48	
0.840 ^{de}	0.830 ^{bc}	0.440 ^{l-q}	0.440 ^{a-v}	320 ^{ab-ad}	534 ^{ah-ak}	213 ^{ae-ak}	72	
0.940 ^{de}	0.940 ^{bc}	0.502 ^{b-p}	0.510 ^{e-v}	421 ^{x-ad}	688 ^{aa-ak}	268 ^{v-ak}	120	
0.980 ^{cd}	1.02 ^{a-c}	0.540 ^{a-p}	0.540 ^{a-u}	397 ^{y-ad}	636 ^{ad-ak}	239 ^{aa-ak}	144	

F'0: کمینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور، F'm: بیشینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور، F'v: فلورسانس متغیر، F'v/F'm: بیشینه کارایی پتانسیل فتوسنتز II در شرایط سازگار شده با نور، F'q/F'm: کارایی عملیاتی فتوسنتز II در شرایط سازگار شده با نور، F'q/F'v: فرود فتوشیمیایی و qL: ضریب باز بودن مراکز واکنش فتوسنتز II، BS: قبل از تنش، ۱- MLC: کلکسیون عدس پژوهشکده علوم گیاهی دانشگاه فردوسی مشهد. برای هر صفت میانگین‌های دارای یک حرف مشترک بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند

F'0: minimum value for chlorophyll fluorescence in the light, F'm: maximal value for chlorophyll fluorescence in the light, F'v: Variable fluorescence, F'v/F'm: maximum efficiency of PSII photochemistry in the light if all reaction centers were open, F'q/F'm: highest PSII operating efficiency in the light, F'q/F'v: photochemical quenching, qL: fraction of open PSII reaction centers, BS: Before stress 1- MLC: Mashhad Lentil Collection, Means followed by the same letter for each trait is not significantly different at 5% of probability level based on LSD test

جدول ۶- مقایسه میانگین عوامل فلورسانس کلروفیل در دماهای یخ‌زدگی و دوره بازیابی.

Table 6. Comparison of mean chlorophyll fluorescence parameter in freezing temperature and during time points.

qL	F'q/F'm	F'v/F'm	F'v	F'm	F'0	دوره بازیابی (ساعت) Time Point (hour)	دمای یخ‌زدگی (درجه سانتی‌گراد) Freezing temperature (°C)
0.970 ^{bc}	0.550 ^d	0.540 ^g	611 ^{fg}	1135 ^{ef}	525 ^{ab}	BS	0
0.980 ^{bc}	0.740 ^a	0.750 ^{ab}	1249 ^a	1659 ^a	417 ^c	24	
0.990 ^{bc}	0.760 ^a	0.766 ^{ab}	1290 ^a	1691 ^a	401 ^c	48	
1.330 ^a	0.770 ^a	0.770 ^{ab}	617 ^{fg}	795 ^{hi}	178 ⁱ	72	
0.990 ^{bc}	0.760 ^a	0.760 ^{ab}	743 ^{de}	978 ^g	235 ^{f-h}	120	
0.990 ^{bc}	0.780 ^a	0.780 ^a	747 ^{de}	959 ^g	211 ^{hi}	144	
0.970 ^{bc}	0.550 ^d	0.540 ^g	611 ^{fg}	1135 ^{ef}	525 ^{ab}	BS	-15
0.990 ^{bc}	0.650 ^{bc}	0.660 ^{c-e}	1026 ^b	1503 ^b	496 ^b	24	
0.990 ^{bc}	0.700 ^{ab}	0.700 ^{b-d}	835 ^{cd}	1174 ^{de}	345 ^d	48	
0.990 ^{bc}	0.710 ^{ab}	0.730 ^{ab}	576 ^{gh}	763 ⁱ	195 ^{hi}	72	
1.000 ^{bc}	0.720 ^{ab}	0.729 ^{a-c}	680 ^{e-g}	919 ^{gh}	238 ^{f-h}	120	
0.990 ^{bc}	0.760 ^a	0.760 ^{ab}	714 ^{ef}	936 ^g	222 ^{g-i}	144	
0.970 ^{bc}	0.550 ^d	0.550 ^g	615 ^{fg}	1135 ^{ef}	522 ^{ab}	BS	-18
0.990 ^{bc}	0.590 ^{cd}	0.580 ^{fg}	777 ^{c-e}	1313 ^c	540 ^a	24	
1.010 ^{bc}	0.650 ^{bc}	0.640 ^{d-f}	872 ^c	1288 ^{cd}	404 ^c	48	
0.990 ^{bc}	0.610 ^{cd}	0.610 ^{e-g}	404 ⁱ	606 ^j	202 ^{hi}	72	
1.000 ^{bc}	0.570 ^{cd}	0.580 ^{fg}	465 ⁱ	744 ⁱ	277 ^{ef}	120	
0.980 ^{bc}	0.600 ^{cd}	0.610 ^{e-g}	468 ^{hi}	736 ⁱ	258 ^{e-g}	144	
0.970 ^{bc}	0.550 ^d	0.540 ^g	611 ^{fg}	1135 ^{ef}	525 ^{ab}	BS	-20
0.980 ^{bc}	0.430 ^e	0.440 ^h	493 ^{hi}	1045 ^{fg}	562 ^a	24	
1.002 ^{bc}	0.220 ^{fg}	0.210 ^j	124 ^j	477 ^k	353 ^d	48	
0.950 ^c	0.290 ^f	0.290 ⁱ	120 ^j	346 ^l	213 ^{hi}	72	
0.930 ^c	0.210 ^g	0.210 ^j	117 ^j	410 ^{kl}	287 ^e	120	
1.005 ^b	0.200 ^g	0.190 ^j	81 ^j	341 ^l	260 ^{e-j}	144	

F'0: کمینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور، F'm: بیشینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور، F'v: فلورسانس متغیر، F'v/F'm: بیشینه کارایی پتانسیل فتوسنتز II در شرایط سازگار شده با نور، F'q/F'm: کارایی عملیاتی فتوسنتز II در شرایط سازگار شده با نور، F'q/F'v: فرود فتوشیمیایی و qL: ضریب باز بودن مراکز واکنش فتوسنتز II، BS: قبل از تنش، MLC: کلکسیون عدس پژوهشکده علوم گیاهی دانشگاه فردوسی مشهد. برای هر صفت میانگین‌های دارای یک حرف مشترک بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

F'0: minimum value for chlorophyll fluorescence in the light, F'm: maximal value for chlorophyll fluorescence in the light, F'v: Variable fluorescence, F'v/F'm: maximum efficiency of PSII photochemistry in the light if all reaction centers were open, F'q/F'm: highest PSII operating efficiency in the light, F'q/F'v: photochemical quenching, qL: fraction of open PSII reaction centers, BS: Before stress 1- MLC: Mashhad Lentil Collection, Means followed by the same letter for each trait is not significantly different at 5% of probability level based on LSD test

دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد در مقایسه با شاهد حفظ کند. کم‌ترین کاهش در بیشینه فلورسانس سازگار شده به نور همراه با کم‌ترین افزایش در مقدار کمینه فلورسانس نشان‌دهنده مقاومت بالای ژنوتیپ‌ها به تنش می‌باشد (جدول ۴). هم‌چنین دمای کاهنده ۵۰ درصد بقاء و دمای کاهنده ۵۰ درصد وزن خشک در این ژنوتیپ برابر ۱۶/۹- درجه سانتی‌گراد بود که نشان‌دهنده تحمل مناسب این ژنوتیپ در تحمل دماهای یخ‌زدگی است (جدول ۹).

بیشینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور (F'm):
این مؤلفه تحت‌تأثیر برهمکنش ژنوتیپ و دمای یخ‌زدگی قرار گرفت (جدول ۳). در تمام ژنوتیپ‌ها اعمال تنش یخ‌زدگی سبب کاهش بیشینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور شد. بیش‌ترین و کم‌ترین میزان این کاهش به‌ترتیب در MLC103 (۲/۷۹ برابر) و MLC454 (۶۱ درصد) مشاهده شد. هم‌چنین ژنوتیپ MLC454 توانست مقادیر کمینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور خود را با کم‌ترین تغییر در

مؤلفه $F'm$ تحت تأثیر برهمکنش ژنوتیپ و دوره بازیابی قرار گرفت (جدول ۳). تنش یخزدگی در تمام ژنوتیپ‌ها (به جز ژنوتیپ MLC103) سبب افزایش $F'm$ تا ۲۴ پس از تنش یخزدگی در مقایسه با $F'm$ قبل از اعمال تنش یخزدگی شد. اما به تدریج روند کاهش در مقدار $F'm$ مشاهده شد. به طوری که در ۷۲ ساعت پس از اعمال تنش یخزدگی مقدار $F'm$ به کمترین مقدار خود رسید. هرچند با گذشت زمان روند افزایشی در مقدار $F'm$ در تمام ژنوتیپ‌ها مشاهده شد اما مقدار آن به زمان قبل از اعمال تنش و ساعات اولیه بعد از اعمال تنش نرسید. بیشترین بهبود در این مؤلفه در پایان دوره بازیابی در مقایسه با ۷۲ ساعت بعد از اعمال تنش در ژنوتیپ‌های MLC38 و MLC469 با ۴۸ درصد افزایش مشاهده شد (جدول ۵). این امر نشان‌دهنده توانایی بالایی این ژنوتیپ‌ها در ترمیم مناسب $F'm$ پس از تنش یخزدگی است.

مؤلفه $F'm$ تحت تأثیر برهمکنش دمای یخزدگی و دوره بازیابی قرار گرفت (جدول ۳). این متغیر ابتدا در دماهای صفر، ۱۵- و ۱۸- درجه سانتی‌گراد با کاهش مواجه شد. به طوری که در ۷۲ ساعت بعد از اعمال تنش به حداقل مقدار خود رسید اما سپس به تدریج مقدار آن در دوره ترمیم افزایش یافت، به طوری که مقدار این مؤلفه، ۱۴۴ ساعت بعد از اعمال تنش در دماهای صفر، ۱۵- و ۱۸- درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۲۱، ۲۳ و ۲۱ درصد بیش‌تر از مقدار آن در مقایسه با ۷۲ ساعت بعد از اعمال تنش بود. در دمای

۲۰- درجه سانتی‌گراد با اعمال تنش یخزدگی روند کاهش در $F'm$ مشاهده شد. به عبارتی افزایش شدت تنش یخزدگی سبب اختلال و کاهش در بیشینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور شد، به حدی که گیاهان قادر به بازیابی و ترمیم این ویژگی نبودند (جدول ۶).

فلورسانس متغیر ($F'v$): برهمکنش ژنوتیپ، دمای یخزدگی و دوره بازیابی بر $F'v$ معنی‌دار بود (جدول ۳). به جز در ژنوتیپ MLC38 در سایر ژنوتیپ‌ها اعمال تنش در ۲۴ ساعت اولیه بازیابی سبب افزایش و پس‌از آن سبب کاهش در مقدار فلورسانس متغیر شد. به طوری که در پایان دوره بازیابی به حداقل مقدار خود رسید (جدول ۵). تنش یخزدگی تا ۲۴ ساعت بعد اعمال تنش سبب افزایش و پس‌از آن موجب کاهش در مقدار $F'v$ شد. بیشترین کاهش در مقدار فلورسانس متغیر در پایان دوره بازیابی در مقایسه با ساعات اولیه تنش در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد (کاهش بیش‌تر از ۶ برابر) مشاهده شد (جدول ۶). کاهش دما به ۲۰- درجه سانتی‌گراد در تمام ژنوتیپ‌ها سبب کاهش این مؤلفه شد. بیش‌ترین و کم‌ترین کاهش در نتیجه کاهش دما از صفر به ۲۰- درجه سانتی‌گراد به ترتیب در ژنوتیپ‌های MLC103 (۵/۸۴ برابر) و MLC286 (۴۱ درصد) مشاهده شد (جدول ۷). نتایج حاصل از دمای کشندگی بر اساس درصد بقاء نیز نشان‌دهنده بالا بودن دمای کشندگی و عدم تحمل دماهای کم‌تر از ۱۰- درجه سانتی‌گراد در ژنوتیپ MLC103 بود (جدول ۹).

جدول ۷- اثر دماهای یخ‌زدگی بر فلورسانس متغیر و بیشینه کارایی پتانسیل فتوسیستم II ژنوتیپ‌های عدس.

Table 7. Effect of freezing temperature on F'v and maximum efficiency of PSII photochemistry in the light (F'v/F'm) parameter in lentil genotypes.

F'v/F'm				F'v				ژنوتیپ Genotype
دمای یخ‌زدگی (درجه سانتی‌گراد)				دمای یخ‌زدگی (درجه سانتی‌گراد)				
Freezing temperature (°C)				Freezing temperature (°C)				
-20	-18	-15	0	-20	-18	-15	0	
0.330 ^{p-s}	0.620 ^{d-i}	0.730 ^{a-e}	0.730 ^{a-e}	318 ^{p-u}	670 ^{f-k}	870 ^{a-f}	869 ^{a-f}	MLC8 ¹
0.200 st	0.700 ^{a-f}	0.690 ^{a-g}	0.730 ^{a-e}	171 ^{s-u}	848 ^{a-f}	729 ^{d-k}	859 ^{a-f}	MLC11
0.240 ^t	0.620 ^{e-i}	0.701 ^{a-e}	0.710 ^{a-e}	162 ^{tu}	611 ^{h-m}	765 ^{c-j}	782 ^{b-i}	MLC13
0.290 ^{q-s}	0.540 ⁱ⁻ⁿ	0.670 ^{a-i}	0.700 ^{a-f}	241 ^{q-u}	627 ^{g-l}	770 ^{b-j}	794 ^{b-i}	MLC17
0.200 st	0.450 ^{j-p}	0.720 ^{a-e}	0.730 ^{a-e}	189 ^{r-u}	416 ^{l-q}	873 ^{a-f}	841 ^{a-g}	MLC33
0.220 st	0.390 ^{o-q}	0.550 ^{g-k}	0.690 ^{a-g}	191 ^{r-u}	350 ^{o-t}	521 ^{k-p}	890 ^{a-e}	MLC38
0.400 ^{l-q}	0.710 ^{a-e}	0.720 ^{a-e}	0.740 ^{a-e}	370 ^{o-t}	849 ^{a-f}	824 ^{a-h}	983 ^{ab}	MLC47
0.390 ^{n-q}	0.620 ^{c-i}	0.730 ^{a-e}	0.740 ^{a-e}	376 ^{o-t}	592 ⁱ⁻ⁿ	830 ^{a-g}	936 ^{a-d}	MLC70
0.300 ^{q-s}	0.650 ^{a-i}	0.550 ^{h-l}	0.750 ^{a-e}	190 ^{r-u}	561 ^{j-o}	435 ^{l-q}	829 ^{a-g}	MLC84
0.120 ^f	0.530 ^{i-o}	0.640 ^{b-i}	0.720 ^{a-e}	109 ^u	385 ^{n-s}	595 ⁱ⁻ⁿ	832 ^{a-g}	MLC103
0.540 ^{i-o}	0.550 ^{i-m}	0.740 ^{a-e}	0.770 ^{ab}	397 ^{m-r}	427 ^{l-q}	833 ^{a-g}	893 ^{a-e}	MLC286
0.240 ^t	0.560 ^{f-j}	0.690 ^{a-h}	0.660 ^{a-i}	183 ^{r-u}	529 ^{k-p}	764 ^{c-j}	761 ^{c-j}	MLC303
0.400 ^{n-q}	0.730 ^{a-e}	0.750 ^{a-e}	0.780 ^a	285 ^{q-u}	736 ^{d-k}	754 ^{d-j}	975 ^{a-c}	MLC334
0.450 ^{j-p}	0.660 ^{a-i}	0.750 ^{a-e}	0.760 ^{a-d}	376 ^{o-t}	706 ^{e-k}	869 ^{a-f}	1020 ^a	MLC407
0.400 ^{m-q}	0.660 ^{a-i}	0.710 ^{a-e}	0.720 ^{a-e}	322 ^{p-u}	698 ^{e-k}	828 ^{a-g}	866 ^{a-f}	MLC409
0.370 ^{p-r}	0.650 ^{a-i}	0.700 ^{a-g}	0.700 ^{a-e}	340 ^{p-t}	767 ^{c-j}	831 ^{a-g}	883 ^{a-f}	MLC454
0.290 ^{q-s}	0.630 ^{b-i}	0.540 ⁱ⁻ⁿ	0.700 ^{a-e}	231 ^{q-u}	733 ^{d-k}	445 ^{l-q}	881 ^{a-f}	MLC469
0.230 ^t	0.410 ^{k-q}	0.770 ^{a-c}	0.730 ^{a-e}	187 ^{r-u}	296 ^{q-u}	794 ^{b-i}	877 ^{a-f}	MLC472

F'v: فلورسانس متغیر، F'v/F'm: بیشینه کارایی پتانسیل فتوسیستم II در شرایط سازگار شده با نور، ۱- MLC: کلکسیون عدس پژوهشکده علوم گیاهی دانشگاه فردوسی مشهد. برای هر صفت میانگین‌های دارای یک حرف مشترک بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند

F'v: Variable fluorescence, F'v/F'm: maximum efficiency of PSII photochemistry in the light if all reaction centers were open, 1- MLC: Mashhad Lentil Collection, Means followed by the same letter for each trait is not significantly different at 5% of probability level based on LSD test

بر اساس گروه‌بندی نیز، از میانگین درصد بقای بالاتری در مقایسه با میانگین کل و سایر گروه‌ها برخوردار بودند (جدول‌های ۱۱ و ۱۲).

در اکثر ژنوتیپ‌ها تا ۲۴ ساعت بعد از اعمال تنش روند افزایشی در F'v/F'm مشاهده شد اما با گذشت زمان مقدار آن کاهش یافت. هرچند در بیش‌تر ژنوتیپ‌ها مقدار F'v/F'm در پایان دوره بازیابی بیش‌تر از مقدار آن در شرایط قبل از تنش بود (جدول ۵).

بررسی تغییرات این شاخص نشان داد که کم‌ترین میزان تغییرات آن در دماهای صفر، ۱۵- و ۱۸- درجه سانتی‌گراد و بیش‌ترین تغییرات در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. کم‌ترین مقدار F'v/F'm در دماهای صفر، ۱۵- و ۱۸- درجه سانتی‌گراد در شرایط

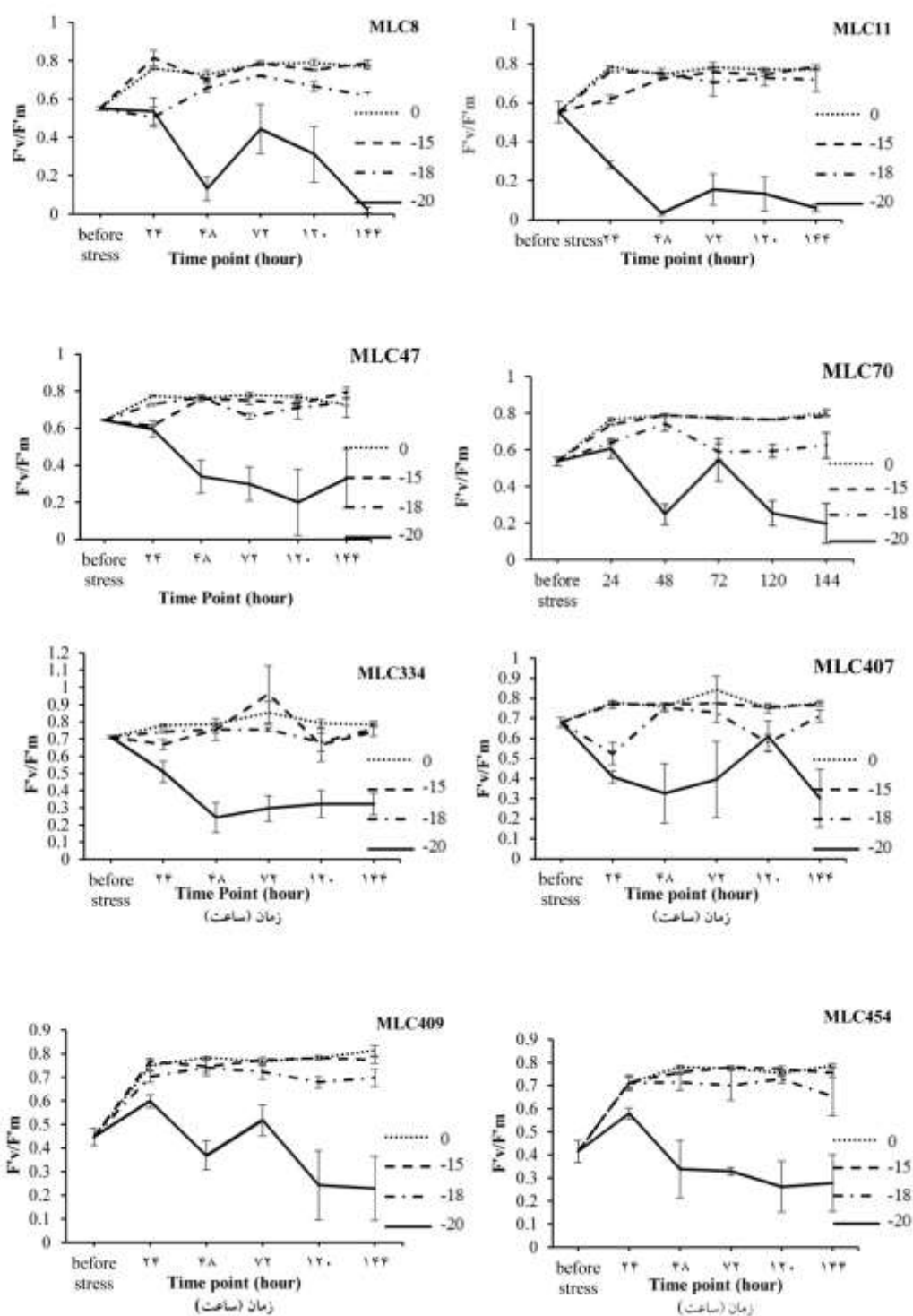
بیشینه کارایی پتانسیل فتوسیستم II (F'v/F'm):
روند تغییرات F'v/F'm در ژنوتیپ‌های عدس تحت تأثیر دماهای یخ‌زدگی معنی‌دار بود (جدول ۳). کاهش دما در تمامی ژنوتیپ‌های مورد مطالعه سبب کاهش این ویژگی شد. هرچند در اکثر ژنوتیپ‌ها بین دماهای صفر و ۱۸- درجه سانتی‌گراد تفاوت معنی‌داری از لحاظ میزان F'v/F'm مشاهده نشد، اما با کاهش دما از ۱۸- به ۲۰- درجه سانتی‌گراد روند کاهش در مقدار F'v/F'm شدید بود. کم‌ترین میزان تغییرات در نتیجه کاهش دما از ۱۸- به ۲۰- درجه سانتی‌گراد در ژنوتیپ MLC103 (متعلق به گروه اول) و با کاهش ۴/۴۲ برابر مشاهده شد. کم‌ترین تغییرات نیز در ژنوتیپ‌های MLC70، MLC286، MLC407، MLC409 و MLC454 به‌دست آمد که

قبل از تنش بود. در این دماها با گذشت ۲۴ ساعت پس از اعمال تنش یخ‌زدگی روند مطلوب ترمیم در هر سه دمای یخ‌زدگی رخ داد. در ۱۴۴ ساعت پس از اعمال تنش یخ‌زدگی در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد این شاخص به حداقل مقدار خود رسید. در نتیجه اعمال تنش دمایی ۲۰- درجه سانتی‌گراد روند کاهش در میزان این ویژگی مشاهده شد؛ بنابراین به تدریج با گذشت زمان میزان $F'v/F'm$ افزایش یافت و جز در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد در سه دمای دیگر به بیش از میزان اولیه خود رسید. به عبارتی ژنوتیپ‌هایی که در معرض دماهای ۱۵- و ۱۸- درجه سانتی‌گراد قرار گرفته بودند، پس از گذشت ۲۴ ساعت از توانایی بازیابی مناسبی برخوردار بودند که این مسأله نشان‌دهنده تحمل بالای آن‌ها در مواجهه با تنش یخ‌زدگی بود (جدول ۶).

بیشینه کارایی پتانسیل فتوسیستم II در ژنوتیپ‌های عدس تحت تأثیر دما و دوره بازیابی معنی‌دار بود (جدول ۳). بررسی روند تغییرات این ویژگی، در بین ژنوتیپ‌هایی که بر اساس نتایج خوشه‌بندی و جدول مقایسه میانگین گروه‌ها در گروه سوم قرار گرفته و از میانگین درصد بقای بالاتری در مقایسه با سایر گروه‌ها برخوردار بودند (شکل ۴ و جدول ۱۲)، نشان داد که در این ژنوتیپ‌ها تفاوت زیادی بین این ویژگی در دماهای صفر، ۱۵- و ۱۸- درجه سانتی‌گراد در طی دوره بازیابی مشاهده نشد. بیش‌ترین توانایی در بازیابی آسیب حاصل از تنش یخ‌زدگی به فتوسیستم II را در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد متعلق به ژنوتیپ MLC407 بود به طوری که در نتیجه بهبود این ویژگی در دمای مذکور در طول دوران بازیابی، مقدار $F'v/F'm$ در اتمام دوران بازیابی در حدود ۳۶ درصد بیش‌تر از ۲۴ ساعت بعد از اعمال تنش بود (شکل ۲). در تمامی ژنوتیپ‌ها قرارگیری در معرض دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد سبب کاهش این ویژگی شد. هرچند برخی

ژنوتیپ‌ها توانستند در طول دوره بازیابی مقدار $F'v/F'm$ را بهبود بخشند اما مقدار آن در بیش‌تر ژنوتیپ‌ها به مقدار اولیه قبل از تنش و ساعات اولیه پس از اعمال تنش نرسید. هم‌چنین با بررسی روند تغییرات بیشینه کارایی پتانسیل فتوسیستم II مشخص شد که به ترتیب ژنوتیپ‌های MLC334 و MLC454 از کم‌ترین میزان نوسان پس از تنش یخ‌زدگی در دماهای ۱۸- و ۲۰- درجه سانتی‌گراد نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها برخوردار بودند. به طوری که مقدار $F'v/F'm$ در ژنوتیپ MLC334 در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد، ۱۴۴ ساعت پس از تنش یخ‌زدگی در مقایسه با قبل از تنش یخ‌زدگی هفت درصد افزایش داشت. هم‌چنین ژنوتیپ MLC454 علی‌رغم کاهش در $F'v/F'm$ تا ۱۴۴ ساعت بعد از اعمال تنش دمایی ۲۰- درجه سانتی‌گراد، تنها از ۴۸ درصد کاهش در این ویژگی در مقایسه با شرایط قبل تنش برخوردار بود. به عبارتی این ژنوتیپ‌ها از توانایی بالاتری در حفظ ساختارهای فتوسنتزی در مواجهه با تنش یخ‌زدگی برخوردار بودند.

گیاهانی که در مناطق معتدله رشد می‌کنند می‌توانند تحمل خود به یخ‌زدگی را به دنبال مواجهه قبلی با دمای پایین اما بالاتر از دماهای یخ‌زدگی از طریق فرایندی تحت عنوان خو سرمایه افزایش دهند (۳۴). پارامترهای فلورسانس کلروفیل می‌توانند برای درک تأثیر خو سرمایه بر فرآیندهای فتوسنتزی گیاه مورد استفاده قرار گیرند. کاهش در پارامترهای فلورسانس کلروفیل در ارقام متحمل کم‌تر از ارقام حساس است (۳۵)؛ بنابراین شاید بتوان یکی از دلایل افزایش $F'v/F'm$ در طول دوره بازیابی را خو سرمایه مناسب ژنوتیپ‌های مورد مطالعه دانست. بررسی دمای کاهنده ۵۰ درصد بقاء، وزن خشک و ارتفاع بوته نیز نشان‌دهنده توانایی مناسب این ژنوتیپ‌ها در تحمل دماهای بیش‌تر از ۲۰- درجه سانتی‌گراد است (جدول ۹).



شکل ۲- روند تغییرات بیشینه کارایی پتانسیل فتوسنتز II در شرایط سازگار شده با نور (F_v/F_m) ژنوتیپ‌های عدس در دماهای یخ‌زدگی و دوره بازیابی.

بارها نشان‌دهنده خطای استاندارد هستند. MLC: کلکسیون عدس پژوهشکده علوم گیاهی دانشگاه فردوسی مشهد.

Fig. 2. Trends of maximum efficiency of PSII photochemistry in the light (F_v/F_m) lentil genotypes in freezing temperature and during recovery period.

Vertical bars indicate standard error, MLC: Mashhad Lentil Collection.

بالای آن‌ها در واکنش به ترمیم پس از تنش را نشان می‌دهد (جدول ۶).

در بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی، ژنوتیپ MLC103 از کم‌ترین و ژنوتیپ‌های MLC286 و MLC454 از بیش‌ترین کارایی عملیاتی فتوسیستم II در مقایسه با سایر ژنوتیپ‌ها دارا بودند. نتایج حاصل از گروه‌بندی خوشه‌ای و مقایسه میانگین گروه‌ها نیز نشان‌دهنده قرارگیری ژنوتیپ MLC103 در گروه اول است که از میانگین درصد بقای کم‌تری در مقایسه با میانگین کل برخوردار هستند (جدول ۱۲)؛ بنابراین با توجه به مقدار کم‌تر $F'q/F'm$ در پایان دوره بازیابی، احتمالاً این ژنوتیپ از ظرفیت فتوسنتزی کم‌تری در مقایسه با سایر ژنوتیپ‌ها برخوردار می‌باشد که این امر نشان‌دهنده وجود تنوع بالا در بین ژنوتیپ‌های عدس است.

در دماهای صفر، ۱۵- و ۱۸- درجه سانتی‌گراد در طی دوران بازیابی روند بهبود در میزان $F'q/F'm$ مشاهده شد. به طوری که مقدار این ویژگی در پایان دوره بازیابی بالاتر از مقدار آن در شرایط قبل از تنش بود. اما با کاهش دما از ۱۸- به ۲۰- درجه سانتی‌گراد روندی کاهشی و غیرقابل برگشت در مقدار $F'q/F'm$ مشاهده شد که نشان‌دهنده عدم توانایی ژنوتیپ‌ها در بهبود این ویژگی در اثر تنش یخ‌زدگی بود.

کارایی عملیاتی فتوسیستم II در شرایط سازگار شده با نور ($\Phi PSII = F'q/F'm$): برهمکنش ژنوتیپ و دمای یخ‌زدگی تأثیر معنی‌داری بر کارایی عملیاتی فتوسیستم II داشت (جدول ۳). به جز ژنوتیپ MLC84 در سایر ژنوتیپ‌ها از لحاظ میزان این ویژگی بین دماهای صفر و ۱۵- درجه سانتی‌گراد تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد اما کاهش بیش‌تر دما به ۲۰- درجه سانتی‌گراد سبب کاهش شدید در میزان $F'q/F'm$ شد. بیش‌ترین و کم‌ترین میزان این کاهش در نتیجه کاهش ۲۰ درجه‌ای دما به ترتیب در ژنوتیپ‌های MLC103 (کاهش ۵/۸۴ برابری) و MLC286 (کاهش ۴۱ درصد) مشاهده شد (جدول ۸).

کارایی عملیاتی فتوسیستم II تحت تأثیر ژنوتیپ و دوره بازیابی قرار گرفت (جدول ۳). در اکثر ژنوتیپ‌های مورد مطالعه میزان این ویژگی در ساعات اولیه تنش بیش‌تر از مقدار آن در شرایط قبل از تنش بود. ولی با گذشت زمان به دلیل اثرات منفی ناشی از تنش یخ‌زدگی، در اکثر ژنوتیپ‌ها روندی کاهشی مشاهده شد. اما با وجود کاهش در $F'q/F'm$ ، تغییرات شاخص مذکور در ژنوتیپ‌های مورد بررسی به گونه‌ای بود که تفاوت معنی‌داری بین ۲۴ و ۱۴۴ ساعت پس از تنش یخ‌زدگی مشاهده نشد و این مسأله توانایی

جدول ۸- تأثیر دمای یخ‌زدگی بر کارایی عملیاتی فتوسیستم II در شرایط سازگار شده با نور و ضریب باز بودن مراکز واکنش فتوسیستم II ژنوتیپ‌های عدس.

Table 8. Effect of freezing temperature on F'q/F'm and qL parameter in lentil genotypes.

qL				F'q/F'm				ژنوتیپ Genotype
دمای یخ‌زدگی (درجه سانتی‌گراد) Freezing temperature (°C)				دمای یخ‌زدگی (درجه سانتی‌گراد) Freezing temperature (°C)				
-20	-18	-15	0	-20	-18	-15	0	
0.970 ^{cd}	0.980 ^{cd}	0.970 ^{cd}	0.980 ^{cd}	0.330 ^{0-s}	0.631 ^{a-i}	0.730 ^{ab}	0.740 ^a	MLC8 ¹
1.06 ^c	1.00 ^{cd}	0.960 ^{cd}	0.990 ^{cd}	0.210 st	0.701 ^{a-g}	0.700 ^{ab}	0.739 ^{ab}	MLC11
0.930 ^{cd}	1.02 ^c	1.00 ^{cd}	0.990 ^{cd}	0.220 st	0.630 ^{a-h}	0.710 ^{a-e}	0.711 ^{a-d}	MLC13
0.970 ^{cd}	1.01 ^c	0.990 ^{cd}	1.00 ^{cd}	0.290 ^{0-s}	0.550 ^{e-m}	0.640 ^{a-h}	0.702 ^{a-f}	MLC17
0.920 ^{cd}	0.980 ^{cd}	1.00 ^{cd}	1.00 ^{cd}	0.200 st	0.450 ^{k-p}	0.730 ^{ab}	0.730 ^{ab}	MLC33
1.05 ^c	0.970 ^{cd}	1.04 ^c	0.980 ^{cd}	0.230 st	0.390 ^{n-r}	0.580 ^{b-k}	0.700 ^{a-h}	MLC38
1.04 ^c	0.990 ^{cd}	0.990 ^{cd}	0.990 ^{cd}	0.420 ^{l-q}	0.710 ^{a-c}	0.730 ^{ab}	0.750 ^a	MLC47
1.03 ^c	0.990 ^{cd}	0.990 ^{cd}	0.990 ^{cd}	0.421 ^{k-q}	0.620 ^{a-j}	0.730 ^{ab}	0.740 ^a	MLC70
0.960 ^{cd}	0.980 ^{cd}	0.980 ^{cd}	0.990 ^{cd}	0.290 ^{0-s}	0.650 ^{a-h}	0.540 ^{l-n}	0.750 ^a	MLC84
0.910 ^{cd}	0.940 ^{cd}	1.02 ^c	0.990 ^{cd}	0.120 ^t	0.470 ^{i-o}	0.620 ^{a-j}	0.701 ^{a-g}	MLC103
1.02 ^c	1.00 ^{cd}	1.00 ^{cd}	0.990 ^{cd}	0.540 ^{h-n}	0.540 ^{f-n}	0.740 ^a	0.760 ^a	MLC286
1.07 ^c	0.990 ^{cd}	0.940 ^{cd}	0.930 ^{cd}	0.260 ^{0-t}	0.570 ^{c-l}	0.680 ^{a-h}	0.640 ^{a-h}	MLC303
0.980 ^{cd}	0.990 ^{cd}	0.930 ^{cd}	1.61 ^a	0.390 ^{m-q}	0.730 ^{ab}	0.680 ^{a-h}	0.770 ^a	MLC334
0.980 ^{cd}	0.990 ^{cd}	0.990 ^{cd}	1.37 ^b	0.470 ^{0-p}	0.670 ^{a-h}	0.750 ^a	0.760 ^a	MLC407
0.970 ^{cd}	0.990 ^{cd}	0.990 ^{cd}	0.980 ^{cd}	0.410 ^{l-q}	0.670 ^{a-h}	0.720 ^{a-c}	0.730 ^{ab}	MLC409
1.01 ^c	1.04 ^c	1.00 ^{cd}	0.990 ^{cd}	0.390 ^{n-r}	0.670 ^{a-h}	0.700 ^{a-h}	0.700 ^{a-h}	MLC454
1.04 ^c	1.00 ^{cd}	1.01 ^c	1.00 ^{cd}	0.310 ^{0-s}	0.630 ^{a-h}	0.550 ^{d-m}	0.711 ^{a-d}	MLC469
0.810 ^d	0.960 ^{cd}	1.00 ^{cd}	0.990 ^{cd}	0.230 ^{0-t}	0.410 ^{l-q}	0.770 ^a	0.730 ^{ab}	MLC472

F'q/F'm: کارایی عملیاتی فتوسیستم II در شرایط سازگار شده با نور و qL: ضریب باز بودن مراکز واکنش فتوسیستم II. 1- MLC: کلکسیون عدس پژوهشکده علوم گیاهی دانشگاه فردوسی مشهد. برای هر صفت میانگین‌های دارای یک حرف مشترک بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند

F'q/F'm: highest PSII operating efficiency in the light, qL: fraction of open PSII reaction centers, 1- MLC: Mashhad Lentil Collection, Means followed by the same letter for each trait is not significantly different at 5% of probability level based on LSD test

کاهش دما از صفر به ۱۵- درجه سانتی‌گراد سبب کاهش qL شد. اما در سایر ژنوتیپ‌ها بین دماهای یخ‌زدگی تفاوت معنی‌داری از لحاظ ضریب باز بودن مراکز واکنش مشاهده نشد (جدول ۸).

در بیش‌تر ژنوتیپ‌های مورد مطالعه تا ۴۸ ساعت بعد از اعمال تنش، روند افزایشی و سپس کاهش‌ی در ضریب باز بودن مراکز واکنش فتوسیستم II مشاهده شد. در بیش‌تر ژنوتیپ‌ها میزان این ویژگی در پایان دوره بازیابی بیش‌تر از مقدار آن در شرایط قبل از تنش بود. کم‌ترین میزان کاهش در ژنوتیپ MLC103 با ۱۴ درصد کاهش به‌دست آمد.

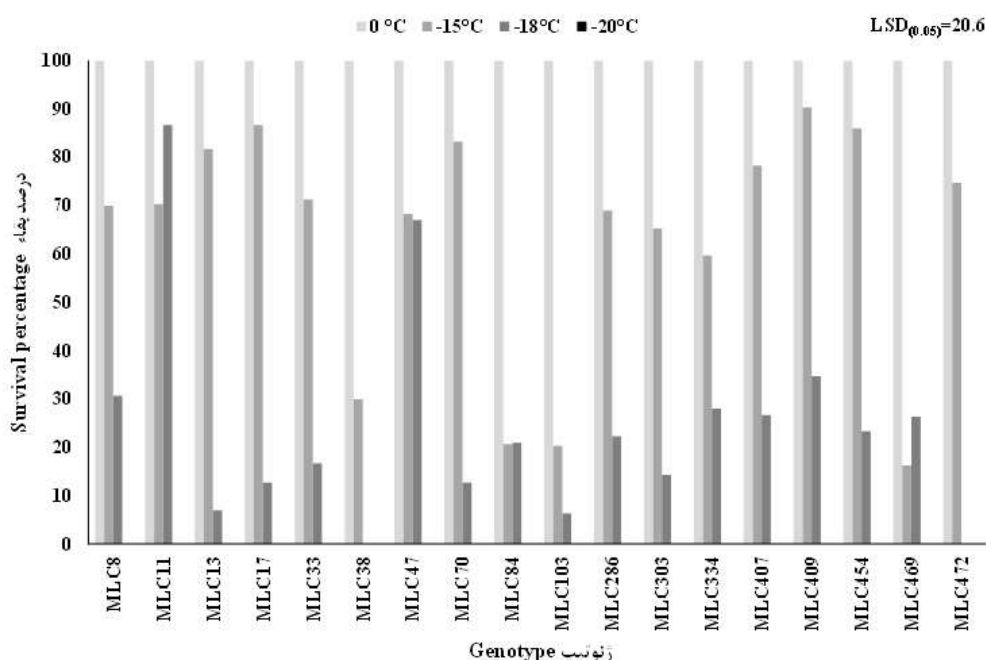
برهمکنش دماهای یخ‌زدگی و دوره بازیابی بر ضریب باز بودن مراکز واکنش فتوسیستم II معنی‌دار

فروند فتوشیمیایی (F'q/F'v): فروند فتوشیمیایی تنها تحت تأثیر ژنوتیپ و دوره بازیابی قرار گرفت (جدول ۳). در ژنوتیپ‌های MLC38, MLC33, MLC13 و MLC84, MLC334, MLC103, MLC407 و MLC409 اعمال تنش سبب کاهش این ویژگی در پایان دوره بازیابی در مقایسه با ۲۴ ساعت بعد از اعمال تنش شد. اما در سایر ژنوتیپ‌ها روند بهبود در F'q/F'v در پایان دوره بازیابی در مقایسه با ساعات اولیه بعد از اعمال تنش مشاهده شد (جدول ۵).

ضریب باز بودن مراکز واکنش فتوسیستم II (qL): برهمکنش ژنوتیپ و دماهای یخ‌زدگی بر ضریب باز بودن مراکز واکنش فتوسیستم II معنی‌دار بود (جدول ۳). تنها در ژنوتیپ‌های MLC334 و MLC407

ژنوتیپ‌های MLC8، MLC11، MLC13، MLC17، MLC33، MLC47، MLC70، MLC286، MLC303، MLC334، MLC407، MLC409، MLC454 و MLC472 در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد و دو ژنوتیپ MLC11 و MLC47 در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد از بقای بالای ۵۰ درصد برخوردار بودند. هیچ‌یک از ژنوتیپ‌ها قادر به تحمل دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد نبود (شکل ۳).

بود (جدول ۳). کاهش دما سبب افزایش و سپس کاهش این شاخص در تمامی دوره‌های بازیابی شد. در تمامی دماهای یخ‌زدگی تفاوت معنی‌داری از لحاظ این ویژگی در ۱۴۴ ساعت بعد از اعمال تنش با مقدار آن در شرایط قبل از تنش مشاهده نشد که نشان‌دهنده توانایی مناسب ژنوتیپ‌ها در حفظ و بازیابی مناسب qL بعد از اعمال تنش است. درصد بقاء: در دمای صفر درجه سانتی‌گراد تمامی ژنوتیپ‌ها از بقای ۱۰۰ درصدی برخوردار بودند.



شکل ۳- تأثیر دمای یخ‌زدگی بر درصد بقاء ژنوتیپ‌های عدس در شرایط کنترل‌شده.

Fig. 3. Effect of freezing temperature on survival percentage of lentil genotypes under controlled conditions.

MLC: کلکسیون عدس مشهد. LSD حداقل تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد.

MLC: Mashhad Lentil Collection. LSD: Least significant difference, at level of 0.05.

پایین‌ترین RDMT₅₀ در ژنوتیپ MLC47 (۱۸/۹- درجه سانتی‌گراد) و بیش‌ترین آن در ژنوتیپ MLC103 (۹/۷- درجه سانتی‌گراد) مشاهده شد (جدول ۹). دو ژنوتیپ MLC47 و MLC11 از بیش‌ترین توان برای حفظ وزن خشک خود برخوردار بودند. بالاترین دماهای کاهنده از لحاظ درصد بقاء و

صفات رشد مجدد: بین ژنوتیپ‌ها از نظر LT_{50su} و RDMT₅₀ تفاوت معنی‌داری مشاهده شد. بالاترین دمای ۵۰ درصد کشندگی گیاهان بر اساس درصد بقاء در ژنوتیپ MLC469 مشاهده شد و ۵۶ درصد ژنوتیپ‌ها (۱۰ ژنوتیپ) از LT_{50su} کم‌تر از ۱۶- درجه سانتی‌گراد برخوردار بودند (جدول ۹).

وزن خشک در ژنوتیپ‌های MLC103, MLC84 و نیز نشان‌دهنده توانایی پایین این ژنوتیپ در تحمل دماهای یخ‌زدگی است (جدول ۹).

جدول ۹- دمای کاهنده ۵۰ درصد کشندگی، بقاء (LT50su)، کاهش ماده خشک (RDMT50) و ارتفاع بوته (RHT50) در ژنوتیپ‌های عدس.

Table 9. Lethal temperature 50% of plants according to survival percentage (LT50su), reduced temperature 50% plants according to dry matter (RDMT50) and reduced temperature 50% plants according to plant height (RHT50) of Lentil genotypes.

صفات			ژنوتیپ
RDMT50	RHT50	LT50su	Genotype
-16.2 ^{bc}	-16.0 ^{bc}	-16.9 ^b	MLC8 ¹
-17.5 ^d	-18.7 ^c	-16.8 ^b	MLC11
-12.7 ^{ab}	-16.5 ^{bc}	-17.0 ^b	MLC13
-16.5 ^{bc}	-16.1 ^{bc}	-16.3 ^b	MLC17
-16.4 ^{bc}	-16.1 ^{bc}	-16.0 ^b	MLC33
-12.8 ^{ac}	-13.2 ^{ab}	-11.2 ^a	MLC38
-18.9 ^d	-18.2 ^c	-18.1 ^b	MLC47
-16.4 ^{bc}	-16.3 ^{bc}	-16.5 ^b	MLC70
-10.5 ^a	-12.1 ^a	-9.10 ^a	MLC84
-9.17 ^a	-13.1 ^{ab}	-9.17 ^a	MLC103
-16.7 ^{cd}	-16.1 ^{bc}	-16.0 ^b	MLC286
-16.4 ^{bc}	-16.5 ^{bc}	-16.0 ^b	MLC303
-15.0 ^{bc}	-16.9 ^{bc}	-16.1 ^b	MLC334
-16.2 ^{bc}	-16.8 ^{bc}	-16.5 ^b	MLC407
-16.6 ^{bc}	-17.4 ^c	-17.2 ^b	MLC409
-16.9 ^d	-16.6 ^{bc}	-16.9 ^b	MLC454
-10.8 ^a	-13.1 ^{ab}	-8.70 ^a	MLC469
-16.7 ^{cd}	-16.3 ^{bc}	-15.8 ^b	MLC472
میانگین مربعات			S.O.V
22.2 ^{**}	9.95 ^{ns}	28.8 ^{**}	ژنوتیپ (G) Genotype
5.68	5.39	2.48	خطا Error
15.8	14.6	10.5	ضریب تغییرات C.V%

۱- MLC: Mashhad Lentil Collection، برای هر صفت میانگین‌های دارای یک حرف مشترک بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

1- MLC: Mashhad Lentil Collection, Means followed by the same letter for each trait is not significantly different at 5% of probability level based on LSD test

شامل درصد بقاء، $F'm$ ، $F'v$ ، $F'q/F'm$ و $F'v/F'm$ با بار منفی و دماهای کاهنده ۵۰ درصد بقاء، ارتفاع بوته و وزن خشک با بار مثبت بود. عامل دوم حدود ۱۷/۷ درصد تغییرات را توجیه کرد که شامل $F'0$ و $F'q/F'v$ با بار مثبت بود (جدول ۱۰)؛ بنابراین این دو عامل را می‌توان به‌عنوان عامل‌های مؤثر در تحمل به تنش سرما معرفی کرد که با توجه به ضرایب عاملی عامل‌ها ژنوتیپ‌های انتخاب شده براساس این عامل‌ها تحمل بالایی به تنش یخ‌زدگی خواهند داشت. عامل سوم ۱۳/۳ درصد از تغییرات را توجیه کرد که شامل qL با بار مثبت بود (جدول ۱۰).

تجزیه به عامل‌ها: تجزیه به عامل‌ها قبل از تجزیه خوشه‌ای، به‌منظور دسته‌بندی صفات، تعیین میزان اهمیت و ارتباط هر یک از آن‌ها در ایجاد تغییرات کل داده‌ها و همچنین تعیین اهمیت متغیرهایی که در گروه‌ها نقش دارند انجام گردید. از طریق این تجزیه و تحلیل می‌توان به تأثیر شرایط محیطی بر اهمیت و گروه‌بندی صفات پی برد. بر اساس تجزیه به عامل‌ها در شرایط تنش یخ‌زدگی، به‌طور کلی سه عامل انتخاب شدند که جمعاً ۸۹/۹ درصد از کل تغییرات داده‌ها را توجیه کردند (جدول ۱۰). عامل اول حدود ۵۸/۸ درصد از تغییرات را توجیه کرد که

جدول ۱۰- تجزیه به عامل‌ها برای ژنوتیپ‌های عدس تحت تنش یخ‌زدگی در شرایط کنترل شده.

Table 10. Factor analysis for lentil genotypes under freezing stress in control condition.

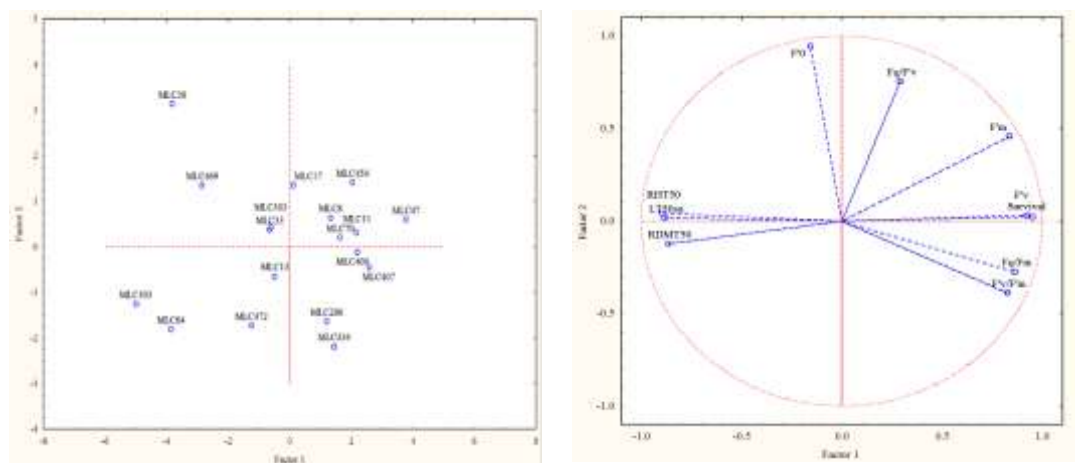
عامل ۳ Factor 3	عامل ۲ Factor 2	عامل ۱ Factor 1	صفات	Traits
-0.281	0.083	<u>-0.907</u>	بقاء	Survival
0.408	-0.049	<u>0.868</u>	دمای کاهنده ۵۰ درصد بقاء	LT50su
0.369	-0.017	<u>0.885</u>	دمای کاهنده ۵۰ درصد ارتفاع بوته	RHT50
0.375	-0.186	<u>0.847</u>	دمای کاهنده ۵۰ درصد ماده خشک	RDMT50
0.068	<u>0.941</u>	0.167	کمینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور	F'0
0.203	0.441	<u>-0.837</u>	بیشینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور	F'm
0.200	0.003	<u>-0.959</u>	فلورسانس متغیر	F'v
0.270	-0.423	<u>-0.844</u>	بیشینه کارایی پتانسیل فتوسنتز II در شرایط سازگار شده با نور	F'v/F'm
0.272	-0.304	<u>-0.878</u>	کارایی عملیاتی فتوسنتز II در شرایط سازگار شده با نور	F'q/F'm
0.452	<u>0.706</u>	-0.298	فرود فتوشیمیایی	F'q/F'v
<u>0.718</u>	-0.219	-0.419	ضریب باز بودن مراکز واکنش فتوسنتز	qL
1.475	1.941	6.472	مقادیر ویژه	Eigen value
89.9	76.5	58.8	درصد سهم تجمعی	Cumulative variance (%)

ژنوتیپ‌های برتر در دستگاه مختصات استفاده شد. موقعیت ژنوتیپ‌ها و صفات بر اساس دو عامل اصلی و دوم بررسی شد (شکل ۴) و ژنوتیپ‌های MLC8، MLC11، MLC17، MLC47، MLC70 و MLC454 دارای عامل اول و دوم مثبت و بالاتری

با توجه به این‌که دو عامل اصلی اول و دوم بیش‌ترین تغییرات واریانس داده‌ها را توجیه کردند، از طرفی بقاء و صفات مؤثر در بقای گیاه در شرایط تنش سرما در این عامل‌ها قرار گرفتند، از این دو عامل به‌منظور به‌دست آوردن پراکنش و شناسایی

نتایج احتمالاً بتوان عنوان کرد که این ژنوتیپ‌ها قادر به حفظ بقای خود در شرایط تنش یخ‌زدگی بوده و از توانایی بالاتری در حفظ بیشینه کارایی پتانسیل فتوسنتز II در مواجهه با تنش یخ‌زدگی برخوردار بودند که از این ویژگی‌ها می‌توان در به‌گزینی ژنوتیپ‌های متحمل به یخ‌زدگی عدس استفاده نمود.

بودند و بقاء، $F'v$ ، $F'm$ و $F'q/F'v$ بیش‌تری نیز نشان دادند از نظر تنش یخ‌زدگی تحمل بالاتری خواهند داشت. در واقع این بُعد نمودار ویژگی‌های مربوط به درصد بقاء و توانایی گیاه برای حفظ بیشینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور پس از اعمال تنش یخ‌زدگی را در بر دارد (شکل ۴). با توجه به این

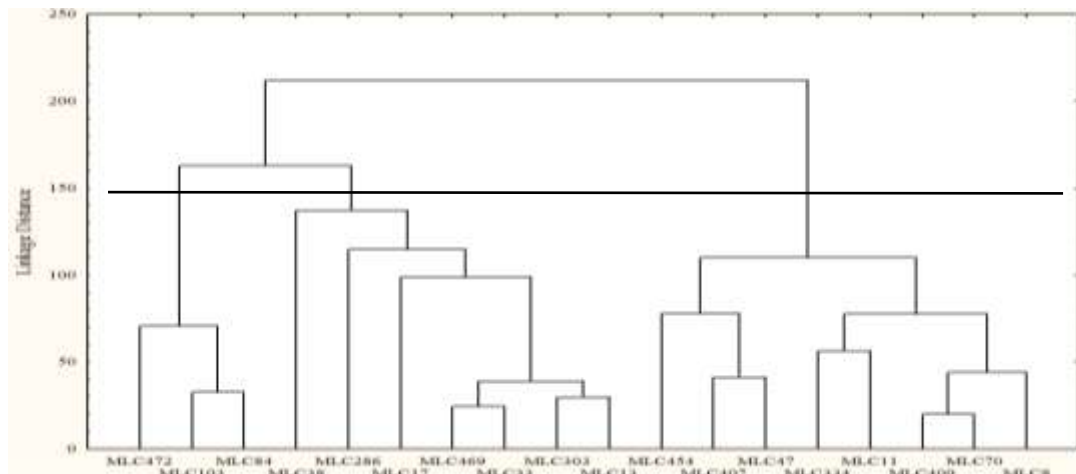


شکل ۴- پراکنش ژنوتیپ‌های عدس بر اساس دو عامل اصلی اول و دوم.

Fig. 4. Distribution of lentil genotypes on the basis of the first and the second components.

ژنوتیپ‌های گروه سوم شامل MLC8، MLC11، MLC47، MLC70، MLC334، MLC407، MLC409 و MLC454 در صفات مورد مطالعه بود (جدول‌های ۱۱ و ۱۲). با توجه به این‌که پایین‌ترین بودن شاخص $F'0$ نشان‌دهنده انجام مطلوب فعالیت‌های فتوسنتزی بوده و هم‌چنین این ژنوتیپ‌ها از بیشینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور ($F'm$) و بیشینه کارایی پتانسیل فتوسنتز II ($F'v/F'm$) بالاتری در مقایسه با سایر گروه‌ها و میانگین کل برخوردارند، می‌توان از ژنوتیپ‌های متعلق به این گروه به‌منظور استفاده از صفات برتر آن‌ها در کشت پاییزه و تحمل به یخ‌بندان زمستان استفاده نمود.

به‌منظور تعیین قرابت ژنوتیپ‌ها و گروه‌بندی آن‌ها بر مبنای صفات مورد بررسی، تجزیه خوشه‌ای به روش UPGMA و با استفاده از فواصل اقلیدسی انجام شد. نتایج تجزیه خوشه‌ای ژنوتیپ‌های مورد مطالعه عدس نشان‌دهنده قرارگیری آن‌ها در سه گروه مجزا بود. به‌ترتیب ۳، ۷ و ۸ ژنوتیپ در گروه‌های اول تا سوم قرار گرفتند (شکل ۵). مقایسه میانگین گروه‌ها نشان داد که ژنوتیپ‌های متعلق به گروه سوم در تمامی صفات مورد مطالعه از جمله درصد بقاء و دماهای کاهشدهنده ۵۰ درصد بقاء، ارتفاع بوته و وزن خشک نسبت به سایر گروه‌ها برتری بودند. به‌طور کلی نتایج نشان‌دهنده برتری نسبی



شکل ۵- گروه‌بندی خوشه‌ای ژنوتیپ‌های عدس بر اساس صفات مورد مطالعه تحت شرایط کنترل شده.

Fig. 5. Cluster grouping of lentil genotypes based on studied characteristic under controlled conditions.

MLC: کلکسیون بذر عدس پژوهشکده علوم گیاهی دانشگاه فردوسی مشهد.

MLC: Mashhad Lentil Collection.

جدول ۱۱- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) گروه‌ها بر اساس صفات مورد مطالعه عدس تحت تنش یخ‌زدگی در شرایط کنترل شده.

Table 11. Analysis of variance (mean square) based on measured groups in lentil genotypes under freezing stress in control condition.

داخل گروه‌ها	بین گروه‌ها	صفات	Traits
Within Groups	Between Groups		
15	2	درجه آزادی	df
38.5**	370**	بقاء	Survival
6.24**	34.5**	دمای کاهنده ۵۰ درصد بقاء	LT50su
1.95**	13.2**	دمای کاهنده ۵۰ درصد ارتفاع بوته	RHT50
5.13*	24.4*	دمای کاهنده ۵۰ درصد ماده خشک	RDMT50
1353 ^{ns}	2758 ^{ns}	کمینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور	F' ₀
1715**	56833**	بیشینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور	F' _m
1540**	50840**	فلورسانس متغیر	F' _v
0.002**	0.015**	بیشینه کارایی پتانسیل فتوسنتز II در شرایط سازگار شده با نور	F' _v /F' _m
0.002**	0.017**	کارایی عملیاتی فتوسنتز II در شرایط سازگار شده با نور	F' _q /F' _m
0.001**	0.004**	فرود فتوشیمیایی	F' _q /F' _v
0.001*	0.004*	ضریب باز بودن مراکز واکنش فتوسنتز	qL

^{ns}، * و ** به ترتیب غیرمعنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد و معنی‌دار سطح احتمال پنج و یک درصد

^{ns}، * and ** No significant at probability level of 5% and probability levels of 5% and 1%, respectively

جدول ۱۲- میانگین و انحراف معیار گروه‌های حاصل از تجزیه خوشه‌ای برای صفات مورد مطالعه در ژنوتیپ‌های عدس تحت شرایط کنترل شده.

Table 12. Mean and deviation from mean of groups in cluster analysis for traits in Lentil genotypes under controlled conditions.

Total	گروه ۳	گروه ۲	گروه ۱	صفات	Traits
	Group 3	Group 2	Group 1		
	MLC8, MLC11, MLC47, MLC70, MLC334, MLC407, MLC409, MLC454	MLC13, MLC17, MLC33, MLC38, MLC286, MLC303, MLC469	MLC84, MLC103, MLC472		
46.9±8.80	53.6 ^a ±5.78	43.6 ^b ±6.68	36.9 ^b ±6.15	بقاء	Survival (%)
-15.0±3.09	-16.9 ^b ±0.597	-14.5 ^{ab} ±3.18	-11.4 ^a ±3.90	دمای کاهنده ۵۰ درصد بقاء	LT50su (°C)
-15.9±1.81	-17.1 ^b ±0.933	-15.4 ^{ab} ±1.50	-13.8 ^a ±2.19	دمای کاهنده ۵۰ درصد ارتفاع بوته	RHT50 (°C)
-15.1±2.72	-16.7 ^b ±1.13	-14.6 ^{ab} ±2.44	-12.1 ^a ±4.01	دمای کاهنده ۵۰ درصد ماده خشک	RDMT50 (°C)
350±39.0	346 ^a ±29.5	367 ^a ±48.2	317 ^a ±11.5	کمینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور	F'₀
968±90.6	1043 ^a ±49.4	944 ^b ±34.2	821 ^c ±28.3	بیشینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور	F'm
619±85.7	699 ^a ±34.8	575 ^b ±46.4	507 ^c ±29.1	فلورسانس متغیر	F'v
0.580±0.057	0.626 ^a ±0.028	0.547 ^b ±0.054	0.534 ^b ±0.031	بیشینه کارایی پتانسیل فتوسنتز II در شرایط سازگار شده با نور	F'v/F'm
0.580±0.059	0.628 ^a ±0.025	0.550 ^b ±0.052	0.524 ^b ±0.040	کارایی عملیاتی فتوسنتز II در شرایط سازگار شده با نور	F'q/F'm
1.008±0.030	1.017 ^a ±0.021	1.016 ^a ±0.027	0.963 ^b ±0.017	فرود فتوشیمیایی	F'q/F'v
1.002±0.042	1.023 ^a ±0.053	0.994 ^{ab} ±0.015	0.961 ^b ±0.018	ضریب باز بودن مراکز واکنش فتوسنتز	qL

حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میان گروه‌های مختلف است

Means with the same letter are significantly differences

گروه‌بندی شده‌اند و میزان موفقیت تابع تشخیص، در تمامی گروه‌ها، ۱۰۰ درصد بود که این مقدار را میزان موفقیت کل تابع تشخیص گویند. میزان موفقیت نشان می‌دهد که تابع تشخیص بین گروه‌ها موفق بوده است.

به‌منظور بررسی صحت گروه‌بندی‌های به‌دست آمده از روش تجزیه خوشه‌ای، از تابع تشخیص استفاده گردید (جدول ۱۳). نتایج تجزیه تابع تشخیص نشان داد که تمامی ژنوتیپ‌ها به‌طور صحیح

جدول ۱۳- نتایج تابع تشخیص برای صحت گروه‌بندی ژنوتیپ‌های عدس تحت تنش یخ‌زدگی.

Table 13. The results of discriminant function for clustering validity of lentil genotypes under freezing stress.

کل Total	اعضای گروه Group Membership			گروه Group	
	3	2	1		
3	0	0	3	1	
7	0	7	0	2	کل Total
8	8	0	0	3	
100	0.0	0.0	100	1	
100	0	100	0	2	درصد Percent
100	100	0	0	3	

را محاسبه می‌کند. از این رو ضرایب تشخیصی استاندارد شده کانونیکی بیان‌کننده واریانس مشترکی است که متغیرهای اندازه‌گیری شده با متغیرهای کانونیک دارند و می‌تواند در ارزیابی توجیه نسبی هر متغیر در هر معادله کانونیک مورد تفسیر قرار گیرد (جدول ۱۴).

ضرایب استاندارد شده کانونیکی صفات RHT50، $F'q/F'm$ ، $F'v/F'm$ ، $F'v$ ، $F'm$ ، $F'0$ ، RDMT50 و $F'q/F'v$ در اولین معادله تشخیصی کانونیکی قابل توجه است (جدول ۱۴). همچنین ضرایب صفات بقا و LT50su در دومین معادله تشخیصی کانونیکی زیاد است (جدول ۱۴). که این نتایج بیانگر این است که این صفات بیش‌ترین تأثیر را در تنوع بین ژنوتیپ‌ها دارند.

در تجزیه تابع تشخیصی کانونیکی دو متغیر کانونیک اول که مقادیر ویژه بالاتر از یک داشتند و در مجموع ۱۰۰ درصد واریانس موجود را تبیین نمودند که می‌تواند به عنوان معیاری مطمئن به منظور انتساب ژنوتیپ‌های جدید به گروه صحیح مورد استفاده قرار گیرند (۳۶). هر متغیر کانونیکی، ترکیبی خطی مجموعه متغیرهای پیش‌بینی‌کننده و متغیرهای مجموعه اندازه‌گیری شده را محاسبه می‌کند (۱۹). همبستگی کانونیکی معنی‌داری بین ژنوتیپ‌ها با اولین متغیر کانونیک ($R_c=0/975$) و دومین متغیر کانونیک ($R_c=0/745$) نشان‌دهنده این است که متغیرهای کانونیک تفاوت بین ارقام را به خوبی توجیه می‌کنند (جدول ۱۴).

ضرایب تشخیصی استاندارد شده کانونیکی همبستگی خطی ساده بین متغیرهای اصلی و متغیرهای کانونیکی

جدول ۱۴- ضرایب استاندارد کانونیکی صفات اندازه‌گیری شده در ژنوتیپ‌های عدس تحت تنش یخ‌زدگی.

Table 14. Standardized canonical discriminant function coefficients measured groups in lentil genotypes under freezing stress.

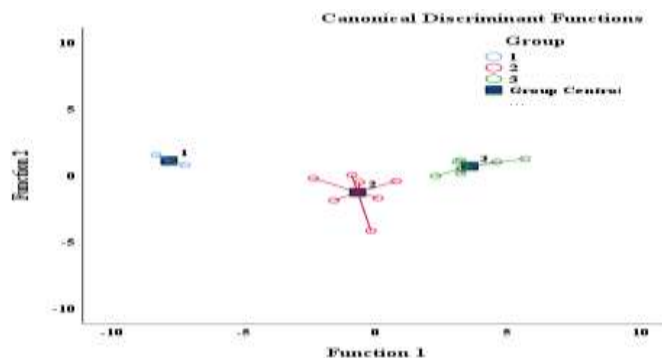
متغیرهای کانونیکی Canonical Function		صفات	Traits
2	1		
0.414*	-0.087	بقاء	Survival
1.655*	-1.084	دمای کاهنده ۵۰ درصد بقاء	LT50su
-0.101	-1.427*	دمای کاهنده ۵۰ درصد ارتفاع بوته	RHT50
-0.248	1.301*	دمای کاهنده ۵۰ درصد ماده خشک	RDMT50
0.605	6.925*	کمینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور	F' ₀
-1.003	-6.031*	بیشینه فلورسانس برگ سازگار شده به نور	F'm
2.115	6.037*	فلورسانس متغیر	F'v
0.046	0.248*	بیشینه کارایی پتانسیل فتوسیستم II در شرایط سازگار شده با نور	F'v/F'm
-0.560	0.692*	کارایی عملیاتی فتوسیستم II در شرایط سازگار شده با نور	F'q/F'm
-0.847	1.224*	فرود فتوشیمیایی	F'q/F'v
-0.442	0.456*	ضریب باز بودن مراکز واکنش فتوسیستم	qL
1.25	19.24	مقادیر ویژه	Eigenvalue
100	93.9	درصد سهم جمعی	Cumulative %
0.745**	0.975**	همبستگی کانونیکی	Canonical Correlation

* بالاترین همبستگی مشاهده شده بین هر صفت و متغیر کانونیکی

** Largest absolute correlation between each variable and any discriminant function

سوم بیش‌ترین فاصله ژنتیکی را از هم دارند. با توجه به این‌که گروه‌های دوم و سوم دارای درصد بقای بالا و RHT50, RDMT50 پایین‌تری داشتند درعین حال فاصله ژنتیکی کمی با یکدیگر دارند می‌توان از آن‌ها در برنامه‌های به‌نژادی به‌منظور ایجاد ژنوتیپ‌های جدید و به‌گزینی برای تحمل به شوری استفاده کرد.

با توجه به قرارگیری بقا و صفات مرتبط با بقا در متغیرهای کانونیکی معنی‌دار اول و دوم، از این متغیرها برای گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها استفاده شد (شکل ۶). به‌منظور تطبیق فاصله بین گروه‌ها استفاده شد. درواقع ژنوتیپ‌های هر گروه فاصله ژنتیکی کمی با یکدیگر دارند. بر این اساس ژنوتیپ‌های گروه اول و



شکل ۶- گروه‌بندی ژنوتیپ‌های عدس بر اساس متغیرهای کانونیک معنی‌دار تحت تنش یخ‌زدگی در شرایط کنترل شده.

Fig. 6. Cluster grouping of lentil genotypes based on significant canonical variable under freezing stress in control condition.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج نشان داد بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه از نظر توانایی دستگاه فتوسنتزی در ترمیم اثرات تنش یخ‌زدگی تنوع معنی‌داری وجود داشت. کاهش دما در تمامی ژنوتیپ‌های مورد مطالعه سبب کاهش فعالیت دستگاه فتوسنتزی شد. بررسی ویژگی‌های کلروفیل فلورسانس نشان داد که کم‌ترین میزان تغییرات آن در دماهای صفر، ۱۵- و ۱۸- درجه سانتی‌گراد و بیش‌ترین تغییرات در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد مشاهده شد. در اکثر ژنوتیپ‌ها پس از گذشت ۲۴ ساعت پس از تنش یخ‌زدگی توانایی بازیابی مناسبی مشاهده شد که این مسئله نشان‌دهنده تحمل بالای این ژنوتیپ‌ها در مواجهه با تنش یخ‌زدگی است. بررسی صفات مربوط به رشد مجدد پس از تنش یخ‌زدگی نشان داد که پایین‌ترین RDMT₅₀ در ژنوتیپ MLC47 (۱۸/۹- درجه سانتی‌گراد) مشاهده شد و سه ژنوتیپ MLC47 و

MLC11 از بیش‌ترین توان برای حفظ وزن خشک برخوردار بودند. مقایسه میانگین گروه‌ها نشان داد که ژنوتیپ‌های متعلق به گروه سوم در تمامی صفات مورد مطالعه از جمله درصد بقاء و دماهای کاهشنده ۵۰ درصد بقاء، ارتفاع بوته و وزن خشک نسبت به سایر گروه‌ها برتری بودند. به‌طور کلی نتایج نشان‌دهنده برتری نسبی ژنوتیپ‌های گروه سوم شامل MLC8، MLC11، MLC47، MLC70، MLC334، MLC407 و MLC409 در صفات مورد مطالعه بود.

تشکر و قدردانی

از معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد بابت حمایت مالی از این طرح پژوهشی نهایت تشکر و قدردانی را داریم.

منابع

- Coyne, C. J., Kumar, S., von Wettberg, E. J., Marques, E., Berger, J. D., Redden, R. J., Ellis, T. N., Brus, J., Zablitzká, L., & Smýkal, P. (2020). Potential and limits of exploitation of crop wild relatives for pea, lentil, and chickpea improvement. *Legume Science*, 2 (2), 36.
- Choukri, H., Hejjaoui, K., El-Baouchi, A., El haddad, N., Smouni, A., Maalouf, F., Thavarajah, D., & Kumar, S. (2020). Heat and drought stress impact on phenology, grain yield, and nutritional quality of lentil (*Lens culinaris* Medikus). *Frontiers in Nutrition*, 7, 596307, 1-15.
- Li, X., Ahammed, G. J., Li, Z. X., Zhang, L., Wei, J. P., Yan, P., & Han, W. Y. (2018). Freezing stress deteriorates tea quality of new flush by inducing photosynthetic inhibition and oxidative stress in mature leaves. *Scientia Horticulturae*, 230, 155-160.
- FAOSTAT. (2021). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/faostat/en/#compare> (Accessed: 23 December 2020).
- Erskine, W., Sarker, A., & Kumar, S. (2011). Crops that feed the world 3. Investing in lentil improvement toward a food secure world. *Food Security*, 3 (2), 127-139.
- Karimi Alvije, M., Abadi, A., Musavi, S. A., & Salami, S. A. (2015). Investigation of changes in catalase, peroxidase and total protein enzymes in response to cold stress in some grape cultivars. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 1, 103-110. [In Persian]
- Singh, A., Dikshit, H. K., Mishra, G. P., Aski, M., Kumar, S., & Sarker, A. (2022). Breeding for Abiotic Stress Tolerance in Lentil in Genomic Era. In: Kole, C. (eds) *Genomic Designing for Abiotic Stress Resistant Pulse Crops*. Springer, Cham. 145-167.
- Wisniewski, M., Glenn, D. M., & Fuller, M. P. (2002). Use of a hydrophobic

- particle film as a barrier to extrinsic ice nucleation in tomato plants. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 127 (3), 358-364.
9. Amiri, S. R., Deihimfard, R., & Soltani, A. (2016). A single supplementary irrigation can boost chickpea grain yield and water use efficiency in arid and semiarid conditions: a modeling study. *Agronomy Journal*, 108, 2406-2416.
 10. Kumar, S., Choudhary, A., Rana, K., Sarker, A., & Singh, M. (2018). Bio-fortification potential of global wild annual lentil core collection. *PLoS ONE*, 13 (1), e0191122.
 11. Mishra, A., Heyer, A. G., & Mishra, K. B. (2014). Chlorophyll fluorescence emission can screen cold tolerance of cold acclimated *Arabidopsis thaliana* accessions. *Plant Methods*, 10 (1), 1-10.
 12. Foyer, C. H., Ruban, A. V., & Noctor, G. (2017). Viewing oxidative stress through the lens of oxidative signalling rather than damage. *Biochemical Journal*, 474 (6), 877-883.
 13. Chai, F., Liu, W., Xiang, Y., Meng, X., Sun, X., Cheng, C., Liu, G., Duan, L., Xin, H., & Li, S. (2019). Comparative metabolic profiling of *Vitis amurensis* and *Vitis vinifera* during cold acclimation. *Horticulture Research*, 6, 8. DOI 10.1038/s41438-018-0083-5.
 14. Sehgal, A., Sita, K., Bhandari, K., Kumar, S., Kumar, J., Vara Prasad, P. V., Siddique, K. H. M., & Nayyar, H. (2019). Influence of drought and heat stress, applied independently or in combination during seed development, on qualitative and quantitative aspects of seeds of lentil (*Lens culinaris* Medikus) genotypes, differing in drought sensitivity. *Plant Cell and Environment*, 42 (1), 198-211.
 15. Xu, H., Huang, C., Jiang, X., Zhu, J., Gao, X., & Yu, C. (2022). Impact of cold stress on leaf structure, photosynthesis, and metabolites in *Camellia weiningensis* and *C. oleifera* seedlings. *Horticulturae*, 8 (6), 494.
 16. Zhao, Y., Han, Q., Ding, C., Huang, Y., Liao, J., Chen, T., Feng, S., Zhou, L., Zhang, Z., Chen, Y., Yuan, Sh., & Yuan, M. (2020). Effect of low temperature on chlorophyll biosynthesis and chloroplast biogenesis of rice seedlings during greening. *International Journal of Molecular Sciences*, 21 (4), 1390.
 17. Hajhashemi, S., Noedoost, F., Geuns, J. M. C., Djalovic, L., & Siddique, K. H. M. (2018). Effect of cold stress on photosynthetic traits, carbohydrates, morphology, and anatomy in nine cultivars of *Stevia rebaudiana*. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1430.
 18. Sita, K., Sehgal, A., Kumar, J., Kumar, S., Singh, S., Siddique, K. H. M., & Nayyar, H. (2017). Identification of high-temperature tolerant lentil (*Lens culinaris* Medik.) genotypes through leaf and pollen traits. *Frontiers in Plant Science*, 8, 744.
 19. Vaylay, R., & van Santen, E. (2002). Application of canonical discriminant analysis for the assessment of genetic variation in tall fescue. *Crop Science*, 42 (2), 534-539.
 20. Aazami, M. A., Asghari-Aruq, M., Hassanpouraghdam, M. B., Ercisli, S., Baron, M., & Sochor, J. (2021). Low temperature stress mediates the antioxidants pool and chlorophyll fluorescence in *Vitis vinifera* L. cultivars. *Plants*, 10 (9), 1877.
 21. Dong, Z., Men, Y., Liu, Z., Li, J., & Ji, J. (2020). Application of chlorophyll fluorescence imaging technique in analysis and detection of chilling injury of tomato seedlings. *Computers and Electronics in Agriculture*, 168, 105-109.
 22. Mayr, S., & Ameglio, T. (2016). Freezing stress in tree xylem. *Progress in Botany*, 77, 381-414.
 23. Ahmed, N. U., Park, J. I., Jung, H. J., Hur, Y., & Nou, I. S. (2015). Anthocyanin biosynthesis for cold and freezing stress tolerance and desirable color in *Brassica rapa*. *Functional & Integrative Genomics*, 15, 383-394.
 24. Ploschuk, E. L., Bado, L. A., Salinas, M., Wassner, D. F., Windauer, L. B., & Insausti, P. (2014). Photosynthesis and fluorescence responses of *Jatropha curcas* to chilling and freezing stress during early vegetative stages.

- Environmental and Experimental Botany*, 102, 18-26.
25. Zhang, G. X., Liu, Y. F., Ni, Y., Meng, Z. J., Lu, T., & Li, T. L. (2014). Exogenous calcium alleviates low night temperature stress on the photosynthetic apparatus of tomato leaves. *PLoS ONE*, 9 (5), e97322.
 26. Shi, Y. L., Cai, Z. Y., Li, D., Lu, J. L., Ye, J. H., Liang, Y. R., & Zheng, X. Q. (2019). Effect of freezing on photosystem ii and assessment of freezing tolerance of tea cultivar. *Plants* 8 (10), 434.
 27. Summerfield, R. J. (1981). Adaptation to environment, in lentils. pp. 91. In: Webb, C., and Hatwin, G. (Eds.) Common Wealth Agricultural Bureau. Farnhan Royal, UK.
 28. Murray, G. A., Eser, D. L., Gusta, V., & Eteve, G. (1988). Winter hardiness in pea, lentil, faba bean and chickpea. In Summer field R.J., (ed.) World crops: Cool season food legumes. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands. 831-843.
 29. Nezami, A., Khazaei, H. R., Hosseinpanahi, F., & Fazeli Kakhki, S. F. (2013). Assessment of freezing tolerance in lentil genotypes (*Lens culinaris*) by electrolyte leakage index. *Iranian Journal of Field Crops Research* 11 (1), 23-30.
 30. Gholami Rezvani, N., Nezami, A., & Kafi, M. (2019). Evaluation of lentil (*Lens culinaris*) genotypes for autumn sowing in cold temperate regions under field conditions. *Journal of Crop Production*, 11 (4), 142-147.
 31. Nabati, J., Nezami, A., Mirmiran, S. M., & Hojjat, S. S. (2020). Evaluation of freezing tolerance of selected lentil (*Lens culinaris* Medik.) genotypes in feild conditions. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 51 (3), 89-101. [in Persian with English abstract]
 32. Zhan, X., Zhu, J. K., & Lang, Z. (2015). Increasing freezing tolerance: kinase regulation of ICE1. *Developmental Cell*, 32 (9), 257-258.
 33. Baker, N. R. (2008). Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis *in vivo*. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 89-113.
 34. Ritonga, F. N., & Chen, S. (2020). Physiological and molecular mechanism involved in cold stress tolerance in plants. *Plants*, 9 (5), 560.
 35. Sanie Khatama, A., Rastegar, S., Aboutalebi Jahromi, A., Hassanzadeh Khankahdani, H., & Bagherian, S. A. A. (2022). Effects of bioactive compounds on chlorophyll fluorescence parameters of Mexican lime seedlings (*Citrus aurantifolia* Swingle) under cold stress. *Journal of Plant Process and Function*, 11 (49), 19-31.
 36. Cruz-Castillo, J. G., Ganeshanandam, S., MacKay, B. R., Lawes, G. S., Lawoko, C. R. O. & Woolley, D. J. (1994). Applications of canonical discriminant analysis in horticultural research. *HortScience*, 29 (10), 1115-1119.