

Evaluation of the effect of endophytic fungus *Piriformospora indica* symbiosis on improving of growth characteristics of tall fescue (*Festuca arundinacea* cv. Tomahawk) under drought stress

Mahdieh Mirzaei Mashhood¹, Javad Rezapour Fard^{*2}, Mohsen Barin³,
Hadi Alipour⁴, Zohre Jabbarzadeh⁵

1. Ph.D. Student, Dept. of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: mahdiehmirzaei68@gmail.com
2. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: j.rezapourfard@urmia.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: mbarin2002@yahoo.com
4. Assistant Prof., Dept. of Plant Production and Genetic, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: ha.alipour@urmia.ac.ir
5. Associate Prof., Dept. of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: z.jabbarzadeh@urmia.ac.ir

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 02.01.2022
Revised: 02.16.2022
Accepted: 04.11.2022

Keywords:

Antioxidant enzymes,
Microbial inoculation,
Nitrogen,
Phosphorus,
Water deficit stress

ABSTRACT

Background and Objectives: Environmental stresses including drought stress are one of the most important factors reducing performance and growth and development of plants. The use of soil microorganisms is a promising technique to increase plant resistance to water stress. This study was carried out in order to evaluate tall fescue (*Festuca arundinacea* cv. Tomahawk) drought stress tolerance potential under drought stress and inoculation of microbial treatment with root fungus *Piriformospora indica*.

Materials and Methods: The research was performed in the research site of the Department of Horticultural Sciences, Urmia University, during the years 2020-2021 as factorial-split plot in time based on randomized complete blocks design with three replications that experimental factors included inoculation and non-inoculation with *P. indica* and drought stress (30, 70 and 100% FC). After exerting drought stress, harvesting (sampling) was performed four times with an interval of 10 days. The measured traits included fresh and dry weight of shoot and root, relative water content, chlorophyll a and b content, activity of catalase and ascorbate peroxidase enzymes, potassium, phosphorus, and nitrogen amount in shoot and root tissue.

Results: The shoot fresh, dry weight, and the relative water content decreased with drought stress and the lowest amount was recorded in 40% of field capacity. *P. indica* inoculation caused the preservation of these traits. *P. indica* treatment caused an increment of 20.27, 37.21, 16.32, 13.02, 11.1% in root length, chlorophyll a content, amount of shoot potassium, phosphorus, and nitrogen, respectively. *P. In addition, P. indica* with increasing the activity of antioxidant enzymes including catalase and ascorbate peroxidase causes preservation of the chlorophyll a, b content, and the shoot fresh and dry weight that reduced the effects of drought stress.

Conclusion: It is inferred that microbial inoculation with *P. indica* by improving the growth and biochemical characteristics of plants plays an

important role in increasing the resistance to water deficit stress in *Festuca arundinacea*. Therefore, *P. indica* can be used as an effective environmentally friendly compatible in drought stress conditions in *Festuca arundinacea* cv. Tomahawk in the urmia weather conditions.

Cite this article: Mirzaei Mashhood, Mahdieh, Rezapour Fard, Javad, Barin, Mohsen, Alipour, Hadi, Jabbarzadeh, Zohre. 2023. Evaluation of the effect of endophytic fungus *Piriformospora indica* symbiosis on improving of growth characteristics of tall fescue (*Festuca arundinacea* cv. Tomahawk) under drought stress. *Journal of Plant Production Research*, 29 (4), 141-164.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/JOPP.2022.19904.2913

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

بررسی اثر همزیستی قارچ اندوفیت *Piriformospora indica* بر بهبود خصوصیات رشدی گونه چمنی فستوکای پابلند (*Festuca arundinacea*) رقم Tomahawk در شرایط تنش خشکی

مهديه ميرزايي مشهود^۱، جواد رضاپور فرد^{۲*}، محسن برين^۳، هادي عليپور^۴، زهره جبارزاده^۵

۱. دانشجوی دکتری علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: mahdiehmirzaei68@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: j.rezapourfard@urmia.ac.ir
۳. دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: mbarin2002@yahoo.com
۴. استادیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: ha.alipour@urmia.ac.ir
۵. دانشیار گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: z.jabbarzadeh@urmia.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: تنش‌های محیطی از جمله خشکی از مهم‌ترین عوامل کاهش عملکرد و رشد و نمو گیاهان محسوب می‌شوند. استفاده از میکروپ‌های خاک روشی نویدبخش برای افزایش تحمل گیاهان در برابر تنش کم‌آبی می‌باشد. مطالعه حاضر به منظور ارزیابی پتانسیل تحمل به خشکی گونه چمنی فستوکای پابلند (<i>Festuca arundinacea</i>) رقم Tomahawk مایه‌کوبی شده با قارچ <i>Piriformospora indica</i> در شرایط تنش خشکی انجام شد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۲ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۰/۱۱/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۲	مواد و روش‌ها: پژوهش در مکان تحقیقاتی گروه علوم باغبانی دانشگاه ارومیه طی سال‌های ۱۳۹۹-۱۴۰۰ به صورت طرح فاکتوریل- خرد شده در زمان در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. که عامل‌های آزمایش شامل مایه‌کوبی و عدم مایه‌کوبی با قارچ <i>Piriformospora indica</i> (<i>P. indica</i>) و تنش خشکی در سه سطح ۱۰۰، ۷۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی بودند. پس از اعمال تنش خشکی، در چهار دوره زمانی به فاصله ۱۰ روز، نمونه‌برداری انجام شد. صفات مورد اندازه‌گیری شامل وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه، محتوای نسبی آب برگ، میزان کلروفیل a و b، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز و عناصر پتاسیم، فسفر و نیتروژن اندام‌های هوایی و بافت ریشه بودند.
واژه‌های کلیدی: آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، تنش کم‌آبی، فسفر، مایه‌زنی میکروبی، نیتروژن	یافته‌ها: میزان وزن تر و خشک اندام هوایی و محتوای نسبی آب برگ با افزایش تنش خشکی کاهش یافتند و کم‌ترین مقدار این صفات در ظرفیت زراعی ۴۰ درصد مشاهده شد. مایه‌کوبی با قارچ موجب تعدیل اثر تنش خشکی در صفات مذکور شد. تیمار قارچ موجب افزایش

۲۰/۲۷، ۳۷/۲۱، ۱۶/۳۲، ۱۳/۰۲، ۱۱/۱ درصد به ترتیب در میزان طول ریشه، کلروفیل a، پتاسیم، فسفر و نیتروژن اندام هوایی شد. هم‌چنین حضور قارچ *P. indica* با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز موجب حفظ محتوای کلروفیل a، b، وزن تر و خشک اندام هوایی شده و در نتیجه اثرات تنش خشکی را کاهش داد.

نتیجه‌گیری: چنین استنباط می‌گردد که مایه‌زنی میکروبی با قارچ اندوفیت *P. indica*، با بهبود ویژگی‌های رشدی و زیست شیمیایی گیاه در افزایش مقاومت به تنش کم‌آبی در گیاه چمن فستوکای پابلند نقش مهمی ایفا می‌کند. بنابراین قارچ اندوفیت *P. indica* می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر سازگار با محیط‌زیست در شرایط تنش خشکی در گیاه چمن فستوکا (*Festuca arundinacea*) در شرایط آب و هوایی ارومیه استفاده گردد.

استناد: میرزایی مشهود، مهدیه، رضاپور فرد، جواد، برین، محسن، علیپور، هادی، جبارزاده، زهره (۱۴۰۱). بررسی اثر همزیستی قارچ اندوفیت *Piriformospora indica* بر بهبود خصوصیات رشدی گونه چمنی فستوکای پابلند (*Festuca arundinacea*) رقم Tomahawk در شرایط تنش خشکی. نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی، ۲۹ (۴)، ۱۶۴-۱۴۱.

DOI: 10.22069/JOPP.2022.19904.2913



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

نیاز جوامع برای نگهداری فضاهاى سبز از یک سو و کمبود آب از سوی دیگر، لزوم تغییر در مدیریت استفاده از منابع آبی در این بخش را موجب شده است (۱). از اهمیت چمن‌ها می‌توان به نقش آن‌ها در کنترل فرسایش بادی و آبی خاک، جذب گرد و غبار و افزایش اکسیژن هوا اشاره کرد. استفاده از چمن در زمین‌های ورزشی کاربرد آن‌ها را افزایش داده است ولی مهم‌ترین نقش چمن‌ها در طراحی و احداث فضای سبز است (۲). چمن فستوکای پابلند، چمن چند ساله سردسیری است که در فضای سبز به عنوان گیاه پوششی کشت می‌شود. این گونه از چمن، مقاوم به گرما، خشکی و بیماری است و تحت شرایط متنوع محیطی به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد (۳). رقم Tomahawk استقرار سریع و پایداری بالایی دارد. با داشتن رنگ سبز تیره در طول سال، در مکان‌هایی که رنگ چمن اهمیت دارد، می‌تواند استفاده شود. عملکرد خوبی هم در زمین‌های ورزشی و هم فضاهاى سبز دارد. مقاومت عالی در برابر بیماری‌ها دارد. امکان استفاده در مخلوط‌های چمن را داراست (۴). محدودیت منابع آب و هزینه نیروی انسانی جهت آبیاری روزانه، از جمله مشکلات توسعه و نگهداری چمن‌ها است (۵). به خسارت وارده بر رشد کمی یا کیفی گیاه بر اثر تغییر عوامل محیطی خارج از دامنه مطلوب، تنش گفته می‌شود. تنش‌ها به دو گروه تنش‌های محیطی و تنش‌های غیرمحیطی تقسیم‌بندی می‌شوند. تنش‌های محیطی از مهم‌ترین عوامل کاهش‌دهنده عملکرد در سطح جهان هستند و به‌خصوص خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد و نمو گیاهان محسوب می‌شود. با کاهش میزان آب در خاک، پتانسیل آب در منطقه توسعه ریشه کم می‌شود و به دنبال آن پتانسیل آب برگ در گیاه کاهش می‌یابد در نتیجه افت شدید در فتوسنتز، مختل شدن فرآیندهای فیزیولوژیک و سرانجام خشک شدن و

مرگ گیاه رخ خواهد داد (۶). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که برخی از میکروارگانیسم‌ها قادرند علائم تنش را کاهش دهند. به دلیل نقش مؤثر این ریزجانداران در جذب عناصر، امروزه تلاش‌های گسترده‌ای به‌منظور یافتن راهکارهای مناسب برای بهبود کیفیت خاک، محصولات کشاورزی و حفظ پایداری اکوسیستم‌های طبیعی آغاز شده است. یکی از این راهکارها استفاده از کودهای زیستی است (۷). قارچ‌های میکوریزا یکی از انواع کودهای زیستی هستند که با بیش از ۸۰ درصد از ریشه گیاهان ارتباط همزیستی برقرار می‌کنند. این رابطه همزیستی می‌تواند در مقابل کربوهیدراتی که گیاه در اختیار قارچ قرار می‌دهد، عناصر غذایی مورد نیاز گیاه را فراهم کند (۸). از دیگر نقش‌های میکوریزا، تولید هورمون‌های محرک رشد مانند اکسین‌ها، سایتوکینین‌ها است (۹). این همزیستی میکوریزی باعث افزایش رشد گیاه میزبان و افزایش تحمل به تنش‌ها از جمله تنش خشکی می‌شود (۱۰). قارچ *Piriformospora indica*، قارچی شبه میکوریزا از راسته *Sebacinales* است که در سال ۱۹۹۹ توسط وارما و همکاران از خاک ریزوسفری گیاهان خشکی پسند کنار^۱ و گز^۲ از صحرای تاهار^۳ ایالت راجستان در کشور هندوستان جداسازی شد (۱۱). قارچ *P. indica* در طیف گسترده‌ای از گونه‌های گیاهی شامل گیاهان زراعی، باغی، گیاهان دارویی و زینتی در کورتکس ریشه و لایه‌های اپیدرمی مایه‌کوبی و کلونیزه می‌شود. علاوه بر توان تحریک‌کنندگی رشد گیاه، گزارش‌هایی مبنی بر نقش مؤثر این قارچ در بهبود رشد و عملکرد گیاه در شرایط نامساعد محیطی و نیز افزایش مقاومت گیاه نسبت به عوامل بیماری‌زای گیاهی موجود است (۱۲).

1- *Prosopis juliflora*

2- *Zizyphus nummularia*

3- Thar

نسبی آب برگ، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گایاکول پراکسیداز و کاتالاز در گیاهان مایه‌کوبی شده نسبت به گیاهان مایه‌کوبی نشده مشاهده شد (۱۶). همزیستی قارچ *P. indica* با گیاه ذرت^۳ در شرایط تنش خشکی منجر به افزایش رشد اندام هوایی و ریشه هم در تنش خشکی و هم در شرایط بدون تنش شد (۱۷). قارچ *P. indica* در گیاه برنج^۴ با تنظیم عملکرد روزنه‌ها منجر به افزایش مقاومت در برابر تنش خشکی شد (۱۸). بنابراین پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر همزیستی قارچ اندوفیت *Piriformospora indica* بر بهبود ویژگی‌های رشدی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گونه چمنی فستوکای پابلند رقم Tomahawk تحت تنش خشکی انجام شد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در سایت تحقیقاتی گروه علوم باغبانی دانشگاه ارومیه با مشخصات جغرافیایی ۳۷ درجه، ۳۹ دقیقه و ۳۸/۲ ثانیه شمالی و ۴۴ درجه، ۵۹ دقیقه و ۲۲/۹ ثانیه شرقی با ارتفاع ۱۳۵۴ از سطح دریا در سال‌های ۱۴۰۰-۱۳۹۹ انجام گرفت. مشخصات خاک مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ آمده است.

در مطالعه‌ای تغییرات مورفوفیزیولوژیکی و زیست‌شیمیایی چمن فستوکای پابلند در تیمارهای ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی در کشت مزرعه‌ای، طی دو سال بررسی شد. نتایج نشان داد با اعمال تنش‌های خشکی ۵۰ و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی، افزایش در نشت یونی، تجمع قندهای محلول و پرولین و کاهش در کیفیت ظاهری، طول اندام هوایی، سطح برگ و وزن تر و خشک اندام هوایی، محتوای نسبی آب برگ، محتوای کلروفیل و میزان فتوسنتز و محتوای نشاسته مشاهده شد (۱۳). کاهش وزن تر و خشک در برخی از ارقام برموداگراس تحت تنش خشکی گزارش شده است (۱۴). عکس‌العمل گیاه گندم^۱ مایه‌کوبی شده با قارچ *P. indica* تحت تنش خشکی بررسی شد. در گیاهان مایه‌کوبی شده با قارچ *P. indica* در شرایط تنش خشکی، مقدار هیدروژن پراکسید و سرعت پراکسیداسیون لیپید کاهش یافته و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز افزایش یافتند و در نتیجه مقاومت بیش‌تر به خشکی مشاهده شد (۱۵). افزایش در طول ریشه، طول شاخه و برگ و زیست‌توده در گیاه بادنجان^۲ مایه‌کوبی شده با قارچ *P. indica* تحت تنش خشکی گزارش شد. هم‌چنین افزایش میزان پرولین، محتوای کلروفیل کل، محتوای

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در این پژوهش.

Table 1. The physical and chemical properties of soil used in this research.

بافت خاک Soil texture	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی (dsm^{-1}) EC	پتاسیم قابل جذب Kava (ppm)	فسفر قابل جذب Pava (ppm)	ماده آلی Organic matter (g kg^{-1})	کربن آلی Organic carbon (%)	کلسیم کربنات معادل Calcium carbonate equivalent (CCE) (%)	ازت کل Total nitrogen (%)
شنی لومی Sandy Lomy	7.32	0.883	306	10	0.65	0.38	15.5	0.08

- 1- *Triticum aestivum*
- 2- *Solanum melongena*
- 3- *Zea mays*
- 4- *Oryza sativa*

داده شد. سپس بذرها، در گلدان‌های ۱۰ لیتری حاوی بستر خاک و ماسه به نسبت ۴۰:۶۰ کشت شدند. آبیاری گلدان‌ها بر اساس توزین گلدان‌ها و تعیین ظرفیت زراعی و به‌صورت روزانه انجام گرفت. بعد از سپری شدن هشت ماه از کشت و پس از استقرار چمن‌ها، تنش خشکی بر اساس ظرفیت زراعی بستر کشت انجام شد.

برای تعیین آلودگی ریشه‌ها با قارچ، رنگ‌آمیزی ریشه‌ها بعد از ۴۰ روز از کشت با تریپان بلو صورت گرفت. جهت محاسبه وزن تر و خشک اندام هوایی پس از هر سربرداری، وزن تر هر نمونه بلافاصله توسط ترازوی دیجیتالی (METTLER, PJ300) و با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. برای محاسبه وزن خشک نمونه‌ها، نمونه‌ها در پاکت کاغذی، به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۲ درجه در آون قرار گرفتند و پس از خارج کردن نمونه‌ها از آون، وزن آن‌ها به کمک ترازوی دیجیتالی اندازه‌گیری و ثبت شد. برای اندازه‌گیری وزن تر و خشک ریشه، ریشه‌ها در انتهای آزمایش از محل طوقه قطع و خاک متصل به ریشه‌ها شسته شده و پس از گرفتن آب اضافی سطح ریشه‌ها، وزن تر ریشه‌ها توسط ترازوی دیجیتالی ثبت و برای محاسبه وزن خشک به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۲ درجه در آون قرار داده شد و وزن آن‌ها مجدداً توسط ترازوی حساس اندازه‌گیری و ثبت شد. برای اندازه‌گیری طول بلندترین ریشه، پس از قطع ریشه‌ها از محل طوقه و شستن آن‌ها در انتهای آزمایش، طول بلندترین انشعاب توسط خط‌کش اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ‌ها: محتوای نسبی آب برگ‌ها (RWC¹) بر طبق روش بارس و ودرلی (۱۹۶۲) اندازه‌گیری شد. به این منظور، قطعات برگ‌ها ابتدا با ترازوی حساس وزن شدند و وزن آن‌ها به عنوان وزن تر در نظر گرفته شد. سپس برگ‌ها

این آزمایش با چمن گونه *Festuca arundinaceae* رقم Tomahawk انجام شد. پژوهش به صورت طرح فاکتوریل- خردشده در زمان در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد که عامل‌های آزمایش شامل مایه‌کوبی و عدم مایه‌کوبی با قارچ *Priphormospora indica* و تنش خشکی در سه سطح ۴۰، ۷۰، ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی بودند. پس از اعمال تنش خشکی، در چهار دوره زمانی به فاصله ۱۰ روز، برداشت (نمونه‌برداری) انجام گرفت. جهت کشت و تهیه مایه تلقیح قارچ *P. indica*، جدایه قارچ *P. indica* از گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه تهیه و در تعداد کافی پتری‌دیش محتوی محیط کشت کفر (۱۹) (شامل عناصر ماکرو، میکرو، نمک‌ها، پیتون و عصاره مخمر) و به مدت چهار هفته در دمای ۲۴ درجه سانتی‌گراد کشت شدند. تا جمعیت به حدود ۱۰^۵ اسپور در میلی‌لیتر برسد. پس از اتمام این مدت، اسپورهای قارچی با استفاده از محلول آب توئین و با کمک کاردک جمع‌آوری شدند و جهت تلقیح بذرها، جوانه‌دار استفاده شدند.

جهت کشت گیاه، ابتدا بذرها چمن گونه *Festuca arundinaceae* رقم Tomahawk تهیه شده از شرکت پیشگامان صنعت و بذر کرج، پس از ضدعفونی با الکل ۹۵ درصد (۳۰ ثانیه) و هیپوکلریت سدیم ۷ درصد (۳-۵ دقیقه) در ظرف‌های استریل پلاستیکی روی کاغذ صافی جوانه‌دار شدند. بذرها چمن پس از جوانه دارشدن به مدت ۲ ساعت به‌صورت غوطه‌ور در داخل سوسپانسیون حاوی اسپور قارچ روی شیکر تکان داده شدند تا امکان اتصال اسپورهای قارچ به سطح ریشه‌چه فراهم شود (۲۰). هم‌چنین به‌منظور یکنواخت بودن شرایط آزمایش، بذرها جوانه‌دار شده بدون تلقیح قارچ نیز ۲ ساعت درون محلول آب- توئین (استریل) تکان

1- Relative water content

۷۲ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و وزن حاصل از آن‌ها به عنوان وزن خشک در نظر گرفته شد. میزان محتوای نسبی آب بر حسب درصد و از طریق رابطه زیر به دست آمد (۲۱):

$$(۱) \text{ محتوای نسبی آب برگ } (\%) = \frac{(\text{وزن خشک} - \text{وزن آماس})}{(\text{وزن خشک} - \text{وزن تر})} \times ۱۰۰$$

پراکسیداز به صورت کاهش در جذب طی یک دقیقه در طول موج ۲۹۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر محاسبه شد (۲۴).

اندازه‌گیری غلظت فسفر، پتاسیم و نیتروژن اندام هوایی و ریشه: اندازه‌گیری غلظت فسفر اندام هوایی و ریشه به روش هضم خشک و رنگ‌سنجی (رنگ زرد مولیبدات وانادات) و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۷۰ نانومتر انجام شد (۲۵). غلظت پتاسیم اندام هوایی و ریشه به روش هضم خشک و توسط دستگاه شعله‌سنج (فلیم‌فوتومتر، فاطر ۴۰۵، Flame photometer) اندازه‌گیری شد (۲۶). غلظت نیتروژن اندام هوایی و ریشه به روش هضم تر توسط اسید سولفوریک، اسید سالیسیلیک و آب اکسیژنه و با استفاده از دستگاه کج‌دال مورد اندازه‌گیری قرار گرفت (۲۷).

پس از بررسی آزمون نرمال بودن توزیع خطاها با استفاده از PROC UNIVARIATE، تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از PROC GLM در نرم‌افزار SAS 9.4 انجام شد. برای مقایسه میانگین داده‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد. ترسیم نمودارهای مقایسه میانگین در نرم‌افزار Excel انجام شد.

به مدت ۲۴ ساعت درون پتری‌دیش حاوی آب مقطر قرار داده شدند و وزن نمونه‌ها به عنوان وزن تورژسانس (آماس) در نظر گرفته شد. در مرحله بعدی، نمونه‌ها، به مدت ۴۸ ساعت درون آون با دمای

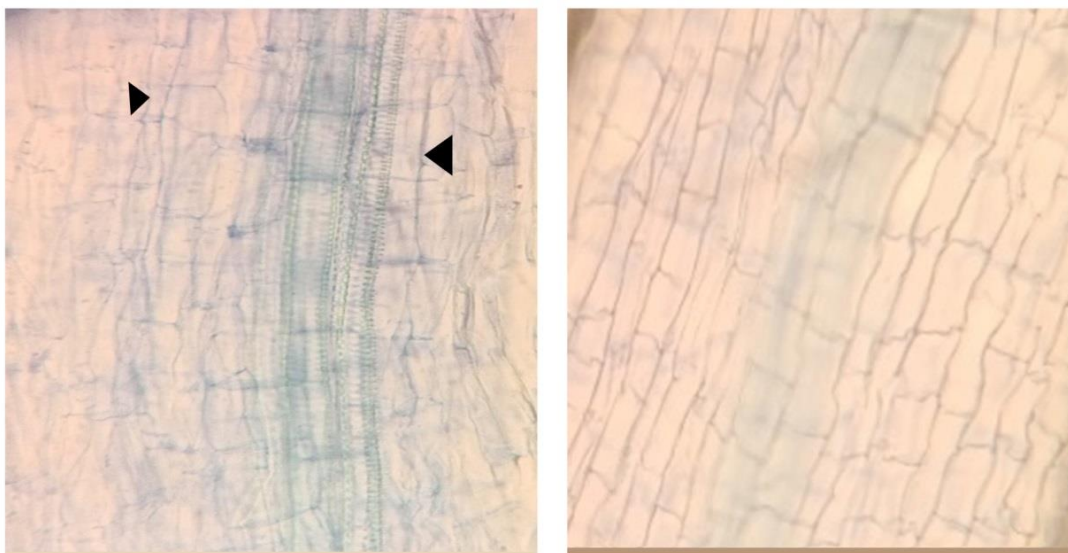
اندازه‌گیری محتوای کلروفیل a, b: اندازه‌گیری محتوای کلروفیل a, b به روش لیجنتتالر (۱۹۸۷) انجام گرفت. ۰/۱ گرم از بافت اندام‌های هوایی با ۵ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد توسط ازت مایع پودر گردید. پس از سانتریفیوژ کردن، میزان جذب فاز محلول رویی در طول موج‌های ۶۶۳ نانومتر، ۶۴۵ نانومتر و ۴۷۰ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر قرائت و بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تر نمونه به دست آمد (۲۲).

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز: فعالیت آنزیم کاتالاز با استفاده از روش آیبی (۱۹۸۴) اندازه‌گیری شد. مخلوط واکنش شامل ۲/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات سنجش ۵۰ میلی‌مولار pH = ۷/۵، ۰/۲ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن ۱ درصد و ۰/۳ میلی‌لیتر عصاره استخراجی بود. سپس فعالیت آنزیم کاتالاز به صورت کاهش در جذب طی ۱ دقیقه در طول موج ۲۴۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر محاسبه شد (۲۳). فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز با استفاده از روش ناکانو و آسادا (۱۹۸۱) اندازه‌گیری شد. محلول استخراج شامل ۲/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات ۵۰ میلی‌مولار با pH=۷، EDTA ۰/۱ میلی‌مولار، آسکوربات سدیم ۱ میلی‌مولار، ۰/۲ میلی‌لیتر (۲۰۰ میکرولیتر) H₂O₂ ۱ درصد و ۰/۱ میلی‌لیتر (۱۰۰ میکرولیتر) عصاره استخراجی بود. سپس فعالیت آنزیم آسکوربات

نتایج و بحث

با توجه به نتایج جدول ۳ تیمارهای قارچ و خشکی و اثرات متقابل این تیمارها در سطح احتمال یک درصد بر صفات طول ریشه، وزن تر و خشک ریشه معنی‌دار شدند. اثرات اصلی تیمارهای قارچ، خشکی، زمان و اثر متقابل زمان در خشکی، زمان در قارچ بر میزان وزن تر اندام هوایی، محتوای کلروفیل a و فعالیت آنزیم کاتالاز معنی‌دار شدند. تیمارهای قارچ، زمان و خشکی و اثرات متقابل تیمار خشکی در زمان در صفات وزن خشک اندام هوایی، محتوای نسبی آب برگ، کلروفیل b معنی‌دار شدند. اثرات

اصلی تیمارهای خشکی و قارچ اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد بر میزان فعالیت آسکوربات پراکسیداز داشتند (جدول ۲). با توجه به نتایج جدول ۳ اثرات اصلی و متقابل قارچ و خشکی در صفات غلظت فسفر و پتاسیم ریشه اختلاف معنی‌داری داشتند. اثرات اصلی تیمارهای قارچ و خشکی در صفات فسفر اندام هوایی، نیتروژن اندام هوایی و نیتروژن ریشه اختلاف معنی‌داری داشتند. اثر اصلی تیمار قارچ اختلاف معنی‌داری در غلظت پتاسیم اندام هوایی داشت (جدول ۳).



شکل ۱- ریشه چمن فستوکای پابلند رقم Tomahawk مایه‌کوبی نشده (الف). ریشه چمن فستوکای پابلند رقم Tomahawk مایه‌کوبی شده با قارچ *Priphormospora indica* (ب).

Fig. 1. Root of *Festuca arundinacea* cv. Tomahawk no inoculation (a). Root of *Festuca arundinacea* cv. Tomahawk inoculation with *Priphormospora indica* (b).

جدول ۲- تجزیه واریانس ویژگی‌های چمن فستوکای پابند رقم Tomahawk تحت تأثیر تنش خشکی و قارچ *P. indica* طی زمان‌های مختلف نمونه‌برداری.

Table 2. Analysis of variance of *Festuca arundinacea* cv. Tomahawk characteristics under drought stress and *P. indica* during different sampling times.

درجه آزادی	وزن تر اندام هوایی	وزن خشک اندام هوایی	محتوای نسبی آب برگ	کلروفیل a	کلروفیل b	فعالیت آنزیم کاتالاز	فعالیت آنزیم آپاکس	df	منبع تغییر
df	Shoot fresh weight	Shoot dry weight	Relative water content	Chlorophyll a	Chlorophyll b	CAT activity	APX activity		
تکرار Rep	0.05 ^{ns}	0.15 ^{ns}	5.356 ^{ns}	0.0064 ^{ns}	0.0019 ^{ns}	0.00054 ^{ns}	0.128 ^{ns}	2	تکرار Rep
خشکی Drought	2.33 ^{**}	2.226 ^{**}	38.847 ^{**}	19.389 ^{**}	1.632 ^{**}	0.06 ^{**}	1.985 ^{**}	2	خشکی Drought
<i>P. indica</i>	10.595 ^{**}	1.364 [*]	133.562 ^{**}	42.556 ^{**}	0.364 ^{**}	0.0068 ^{**}	5.727 ^{**}	1	<i>P. indica</i>
<i>P. indica</i> × خشکی	0.049 ^{ns}	0.725 ^{ns}	7.284 ^{ns}	0.616 ^{ns}	0.011 ^{ns}	0.0015 ^{ns}	0.271 ^{ns}	2	<i>P. indica</i> × خشکی
<i>P. indica</i> × Drought	0.118 ^{ns}	0.103 ^{ns}	3.276 ^{ns}	0.282 ^{ns}	0.032 ^{ns}	0.00044 ^{ns}	0.119 ^{ns}	10	<i>P. indica</i> × Drought
تکرار × <i>P. indica</i> × خشکی	1.572 ^{**}	5.461 ^{**}	40.764 ^{**}	8.426 ^{**}	1.472 ^{**}	0.027 ^{**}	0.209 ^{ns}	3	تکرار × <i>P. indica</i> × Drought
زمان Time	0.193 [*]	0.667 [*]	10.361 [*]	2.673 ^{**}	0.239 ^{**}	0.0076 ^{**}	0.256 ^{ns}	6	زمان Time
زمان × خشکی	0.192 [*]	0.088 ^{ns}	0.431 ^{ns}	0.502 ^{**}	0.035 ^{ns}	0.0019 [*]	0.135 ^{ns}	3	زمان × خشکی
<i>P. indica</i> × زمان	0.092 ^{ns}	0.255 ^{ns}	1.377 ^{ns}	0.318 ^{ns}	0.0032 ^{ns}	0.0011 ^{ns}	0.086 ^{ns}	6	<i>P. indica</i> × زمان
Time × <i>P. indica</i>	0.097 ^{ns}	0.162 ^{ns}	3.323 ^{ns}	0.188 ^{ns}	0.027 ^{ns}	0.0004 ^{ns}	0.069 ^{ns}	6	Time × <i>P. indica</i>
زمان × قارچ <i>P. indica</i> × خشکی	0.062	0.232	3.459	0.172	0.041	0.0007	0.188	36	زمان × قارچ <i>P. indica</i> × Drought
Time × <i>P. indica</i> × Drought									
تکرار × زمان									تکرار × زمان
Rep × Time									Rep × Time
خطا Error									خطا Error
ضریب تغییرات (درصد) CV%	5.088	16.891	4.756	6.602	11.589	16.086	19.853		ضریب تغییرات (درصد) CV%

^{ns}، ^{**}، ^{*} به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد، ۱ درصد و غیرمعنی‌دار

^{ns}، ^{**} and ^{*} respectively significant at 5%, 1% and non significant

جدول ۳- تجزیه واریانس ویژگی‌های چمن فسفوکای پا بلند رقم Tomahawk تحت تأثیر تنش خشکی و قارچ خشکی *P. indica*

Table 3. Analysis of variance of *Festuca arundinacea* cv. Tomahawk characteristics under drought stress and *P. indica*.

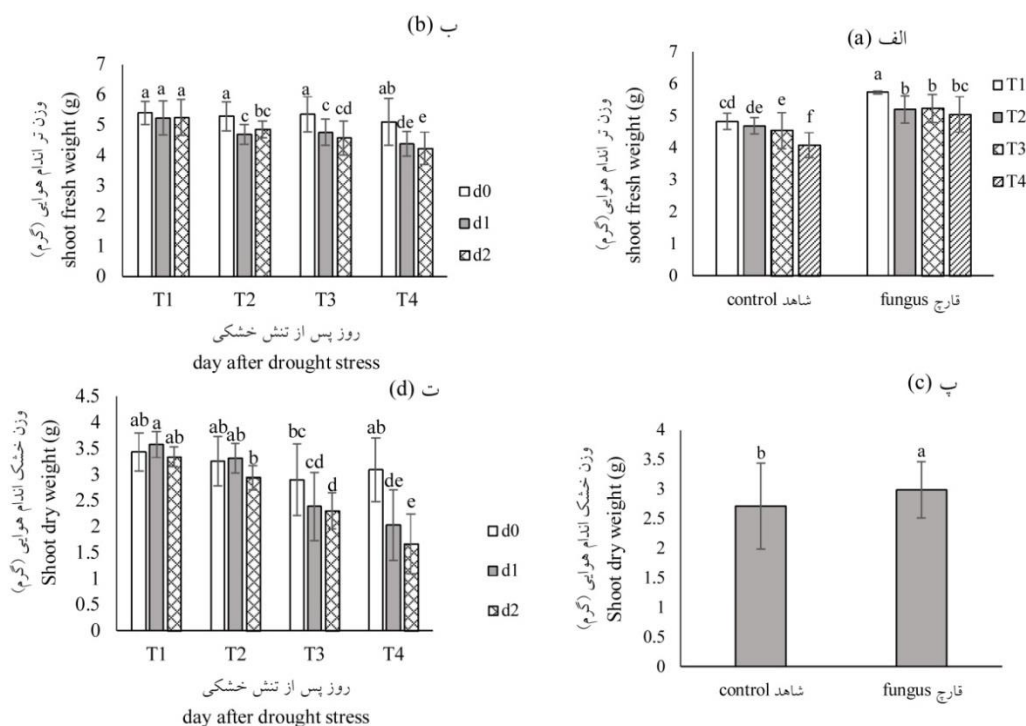
منبع تغییر	درجه آزادی df	طول ریشه Root length	وزن تر ریشه Root fresh weight	وزن خشک ریشه Root dry weight	غلظت پتاسیم برگ Leaf potassium concentration	غلظت پتاسیم ریشه Root potassium concentration	غلظت فسفر برگ Leaf phosphorus concentration	غلظت فسفر ریشه Root phosphorus concentration	غلظت نیترژن برگ Leaf nitrogen concentration	غلظت نیترژن ریشه Root nitrogen concentration
تکرار Rep	2	0.097 ^{ns}	12.376 ^{ns}	0.025 ^{ns}	0.0000184 ^{ns}	0.002 ^{ns}	0.00089 ^{ns}	0.00038 ^{ns}	0.0079 ^{ns}	0.009 ^{ns}
<i>P. indica</i>	1	21.125 ^{**}	561.605 ^{**}	120.668 ^{**}	0.0049 ^{**}	0.0624 ^{**}	0.0298 ^{**}	0.0023 ^{**}	0.057 ^{**}	0.033 ^{**}
خشکی Drought	2	9.763 ^{**}	70.218 ^{**}	11.563 ^{**}	0.00018 ^{ns}	0.054 ^{**}	0.0091 [*]	0.0067 ^{**}	0.154 ^{**}	0.01 ^{**}
خشکی × <i>P. indica</i> <i>P. indica</i> × Drought	2	3.791 ^{**}	61.077 ^{**}	19.032 ^{**}	0.00025 ^{ns}	0.023 ^{**}	0.00046 ^{ns}	0.0008 [*]	0.0074 ^{**}	0.0008 ^{ns}
خطا Error	10	0.497	5.241	0.24	0.00014	0.0015	0.0014	0.00013	0.004	0.0006
ضریب تغییرات (درصد) CV%		2.55	8.699	6.364	0.429	7.529	5.742	2.028	6.257	3.176

ns، *، **، *** به ترتیب معنی دار در سطح احتمال 5 درصد، 1 درصد و غیر معنی دار

ns، *، ** and *** respectively significant at 5%, 1% and non significant

گرم) بود. تیمار قارچ موجب افزایش ۱۰/۱۵ درصدی وزن خشک اندام هوایی نسبت به تیمار بدون قارچ شد (شکل ۱- پ). با گذشت زمان، وزن خشک اندام هوایی کاهش یافت و کم‌ترین وزن خشک در روز سی‌ام نمونه‌برداری در شرایط ظرفیت زراعی ۴۰ درصد (میانگین ۱/۶۷ گرم) به دست آمد (شکل ۲- ت).

وزن تر و خشک اندام هوایی: تیمار مایه‌کوبی با قارچ نسبت به تیمار بدون مایه‌کوبی موجب افزایش ۲۳/۶۲ درصد وزن تر در روز سی‌ام نمونه‌برداری شد (شکل ۲- الف). شکل ۲- ب نشان می‌دهد که با گذشت زمان میزان وزن تر اندام هوایی طی دوره‌های تنش خشکی کاهش یافته که کم‌ترین میزان در روز سی‌ام و ظرفیت زراعی ۴۰ درصد (میانگین ۴/۲۲



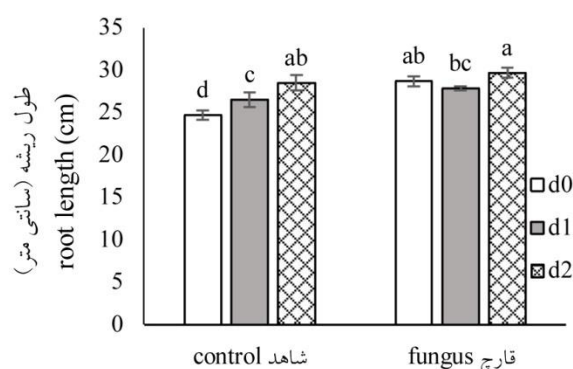
شکل ۲- میزان وزن تر و خشک اندام هوایی چمن فستوکای پا بلند رقم Tomahawk تحت تأثیر اثر متقابل قارچ *P. indica* در زمان خشکی در زمان، اثر اصلی قارچ *P. indica* و اثر متقابل خشکی در زمان (به ترتیب الف، ب، پ و ت). شاهد و قارچ، نشان‌دهنده عدم مایه‌کوبی و مایه‌کوبی با قارچ *Prizophospora indica* هستند. d0، d1 و d2 به ترتیب نشان‌دهنده سطوح ظرفیت زراعی ۱۰۰، ۷۰ و ۴۰ درصد هستند. T1، T2، T3 و T4 به ترتیب نشان‌دهنده روز صفر، دهم، بیستم و سی‌ام پس از اعمال تنش خشکی می‌باشند.

Fig. 2. Shoot fresh and dry weight of *Festuca arundinacea* cv. Tomahawk under interaction effect of *P. indica* × time, drought × time, the main effect of *P. indica* and drought × time (a, b, c and d respectively).

Control and fungus indicate non inoculation and inoculation with *Prizophospora indica*. d0, d1, d2 indicate levels of field capacity at 100, 70 and 40% respectively. T1, T2, T3 and T4 show zero, tenth, twentieth and thirtieth days after drought stress.

خشکی موجب افزایش طول ریشه نسبت به گیاهان مایه‌کوبی نشده شد ولی این افزایش از نظر آماری معنی‌دار نبود (شکل ۳).

طول ریشه: مایه‌کوبی با قارچ نسبت به تیمار بدون مایه‌کوبی با قارچ در شرایط بدون تنش موجب افزایش طول ریشه شد. قارچ در هر دو سطح تنش

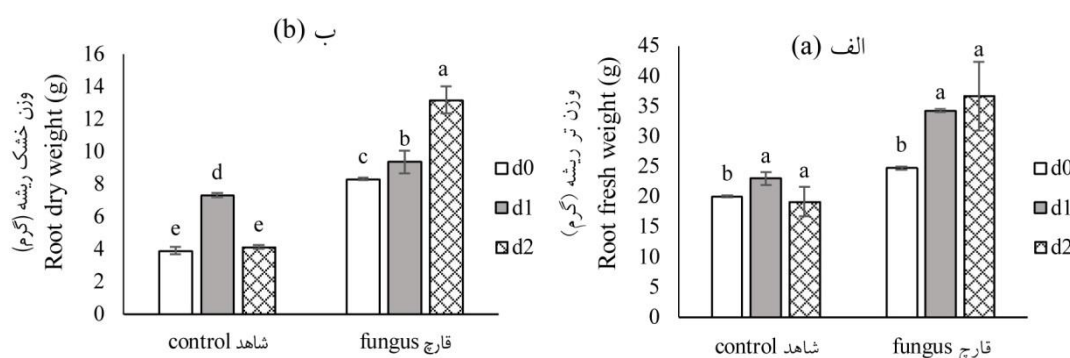


شکل ۳- میزان طول ریشه چمن فستوکای پا بلند رقم Tomahawk تحت تأثیر اثر متقابل قارچ *P. indica* در خشکی. شاهد و قارچ، نشان‌دهنده عدم مایه‌کوبی و مایه‌کوبی با قارچ *Prishormospora indica* هستند. d0، d1 و d2 به ترتیب نشان‌دهنده سطوح ظرفیت زراعی ۱۰۰، ۷۰ و ۴۰ درصد هستند.

Fig. 3. Root length of *Festuca arundinacea* cv. Tomahawk under interaction effect of *P. indica* × drought. Control and fungus indicate non inoculation and inoculation with *Prishormospora indica*. d0, d1, d2 indicate levels of field capacity at 100, 70 and 40% respectively.

باعث افزایش وزن خشک ریشه در تمامی سطوح تنش خشکی نسبت به تیمار بدون اعمال قارچ شد. بیش‌ترین میزان وزن خشک ریشه در تیمار قارچ در ظرفیت زراعی ۴۰ درصد (میانگین ۱۳/۱۸۵ گرم) و کم‌ترین میزان در شاهد بدون تنش خشکی (میانگین ۳/۹۱۲ گرم) ثبت شد.

وزن تر خشک ریشه: تیمار قارچ باعث افزایش وزن تر ریشه در تمامی سطوح تنش خشکی نسبت به تیمار شاهد شد. بیش‌ترین میزان وزن تر ریشه در ظرفیت زراعی ۴۰ درصد (میانگین ۳۶/۶۶ گرم) و کم‌ترین میزان وزن تر ریشه در شاهد در ظرفیت زراعی ۴۰ درصد (میانگین ۱۹/۱۶۵ گرم) مشاهده شد (شکل ۴- الف). با توجه به شکل ۴- ب تیمار قارچ



شکل ۴- میزان وزن تر و خشک ریشه چمن فستوکای پا بلند رقم Tomahawk تحت تأثیر اثر متقابل خشکی در قارچ *P. indica* (الف و ب). شاهد و قارچ، نشان‌دهنده عدم مایه‌کوبی و مایه‌کوبی با قارچ *Prishormospora indica* هستند. d0، d1 و d2 به ترتیب نشان‌دهنده سطوح ظرفیت زراعی ۱۰۰، ۷۰ و ۴۰ درصد هستند.

Fig. 4. Root fresh and dry weight of *Festuca arundinacea* cv. Tomahawk under interaction effect of drought × *P. indica* (a and b). Control and fungus indicate non inoculation and inoculation with *Prishormospora indica*. d0, d1, d2 indicate levels of field capacity at 100, 70 and 40% respectively.

صفات رشدی در این مطالعه گردید، بنابراین می‌توان استناد کرد که تنظیم‌کننده‌های مختلف رشد گیاهی ممکن است به عنوان مولکول‌های سیگنالی جهت انتقال اطلاعات از ریشه به سمت شاخه و برگ عمل کنند و موجب ایجاد مقاومت به خشکی بعد از کلونیزه شدن با قارچ *P. indica* شوند (۳۴). در تأیید نتایج پژوهش حاضر، نتایج مشابهی در گیاه بادمجان (۱۶) و ذرت (۱۷) گزارش شده است.

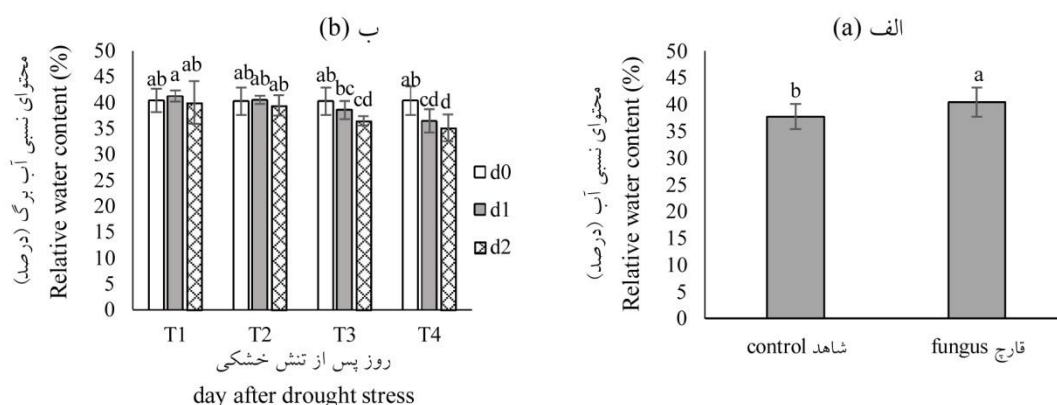
محتوای نسبی آب برگ: با توجه به شکل ۵- الف، تیمار قارچ موجب افزایش ۷/۲۳۸ درصدی محتوای نسبی آب برگ نسبت به شرایط تیمار بدون قارچ شد. شکل ۵- ب نشان داد که میزان محتوای نسبی آب برگ طی دوره‌های اعمال تنش خشکی کاهش یافت و بیش‌ترین کاهش در روز سی‌ام نمونه‌برداری و در ظرفیت زراعی ۴۰ درصد (میانگین ۳۵/۱۲۶ درصد) به‌دست آمد. در این مطالعه مایه کوبی با قارچ میزان محتوای نسبی آب برگ را افزایش داد که ممکن است به علت توانایی هیف‌های قارچ *P. indica* جهت نفوذ به بخش‌های عمیق‌تر خاک و فراهم‌آوری آب برای گیاه باشد (۱۶). بر اساس نتایج حسینی و همکاران (۲۰۱۲)، گیاهان توت‌فرنگی تلقیح شده با قارچ‌های *P. indica* و *Sebacina vermifera* بیش‌ترین مقاومت به تنش خشکی را به علت افزایش محتوای نسبی آب برگ داشتند (۳۵). هم‌چنین افزایش محتوای نسبی آب در گیاهان بادمجان (۱۶) و مریم‌گلی (۳۶) مایه‌کوبی شده با قارچ *P. indica* نسبت به گیاهان تلقیح نشده گزارش شده است که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد.

از عوامل محدودکننده رشد شاخساره طی تنش خشکی می‌توان به کاهش مواد نور ساختی اشاره کرد (۲۸). در این پژوهش میزان کلروفیل *a* و *b* تحت شرایط تنش خشکی کاهش یافت (شکل ۶- ب و د). در مطالعه تاتاری و همکاران (۲۰۱۴) با بروز تنش خشکی، کلروفیل برگ در هر سه گونه چمن پوآ پراتنسیس^۱، آگروپایرون دزرتوروم^۲ و بروموس اینرمیس^۳ کاهش یافت (۲۹). هم‌چنین کاهش تقسیم و توسعه سلولی در طوقه و قاعده برگ‌ها در تنش کم‌آبی، منجر به کاهش رشد سلولی و در نهایت کاهش وزن و ارتفاع چمن‌ها می‌شود (۳۰). مطابق با نتایج ما کاهش میزان وزن تر و خشک اندام هوایی طی تنش خشکی در مطالعات مداح و همکاران (۲۰۱۹) در گیاه چمن فستوکای پابلند مشاهده گردید. هم‌چنین مطابق با نتایج پژوهش حاضر نشان داد که با افزایش میزان طول ریشه، وزن تر و خشک و در نتیجه زیست‌توده ریشه افزایش یافت (۶). کاهش سطح برگ و در پی آن افزایش وزن ریشه در چمن‌ها در شرایط کم‌آبی یکی از مهم‌ترین سازوکارهای سازگاری برای بهبود کارایی جذب آب است. هنگامی که جذب آب کم باشد، توسعه برگ نخستین فرآیندی است که تحت تأثیر قرار می‌گیرد. جلوگیری از توسعه برگ، باعث کاهش مصرف کربوهیدرات‌ها و انرژی شده و بخش بیش‌تر مواد نور ساختی تولید شده به‌سمت ریشه‌ها هدایت شده که می‌تواند تضمین‌کننده رشد بیش‌تر ریشه باشد (۳۱). گزارش شده است که قارچ *P. indica* با افزایش تولید هورمون اکسین باعث افزایش طول ریشه و تغییر ساختار ریشه در کلم چینی و آرابیدوپسیس گردیده است (۳۲ و ۳۳). با توجه به این‌که مایه‌کوبی با قارچ موجب افزایش

1- *Poa pratensis* L.

2- *Agropyron desertorum*

3- *Bromus inermis*

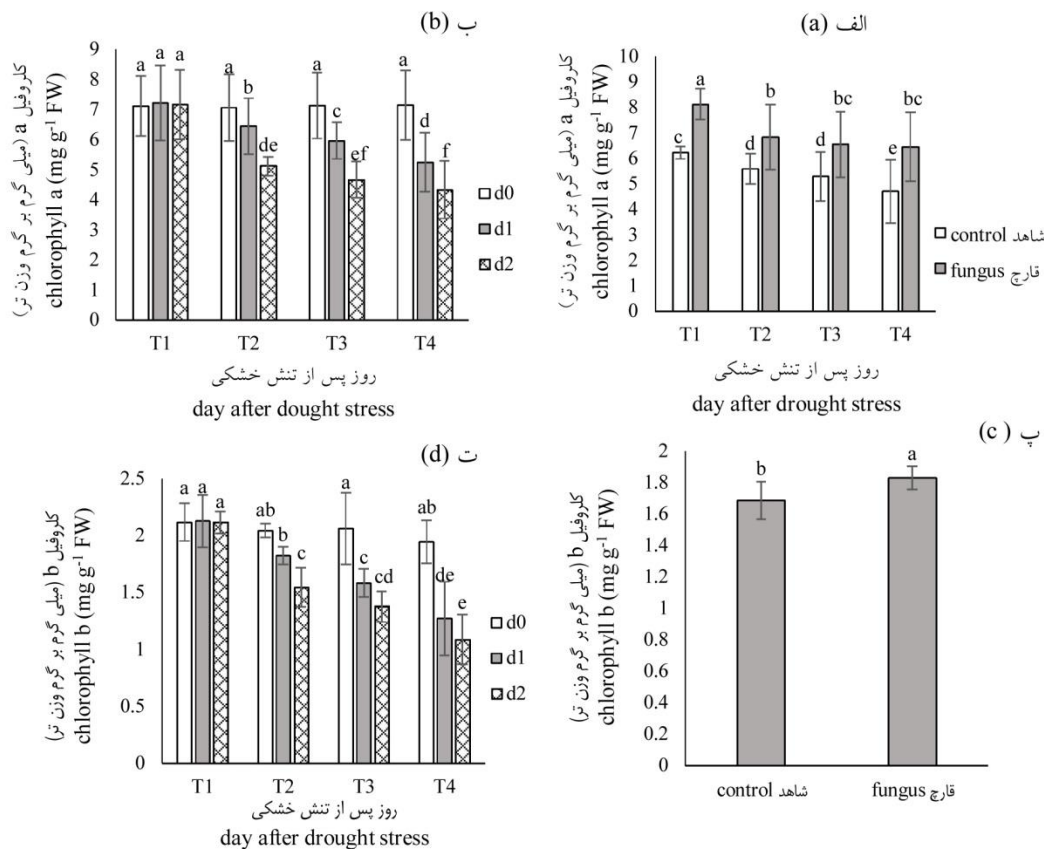


شکل ۵- محتوای نسبی آب برگ چمن فستوکای پابلند رقم Tomahawk تحت تأثیر قارچ *P. indica* و اثر متقابل زمان در خشکی (الف و ب). شاهد و قارچ، نشان‌دهنده عدم مایه‌کوبی و مایه‌کوبی با قارچ *Prishormospora indica* هستند. d0، d1 و d2 به ترتیب نشان‌دهنده سطوح ظرفیت زراعی ۱۰۰، ۷۰ و ۴۰ درصد هستند. T1، T2، T3 و T4 به ترتیب نشان‌دهنده روز صفر، دهم، بیستم و سیام پس از اعمال تنش خشکی می‌باشند.

Fig. 5. Relative water content of *Festuca arundinacea* cv. Tomahawk *P. indica* and under interaction effect of time × drought (a and b). Control and fungus indicate non inoculation and inoculation with *Prishormospora indica*. d0, d1, d2 indicate levels of field capacity at 100, 70 and 40% respectively. T1, T2, T3 and T4 show zero, tenth, twentieth and thirtieth days after drought stress respectively.

افزایش ۳۷/۲۱ درصدی در محتوای کلروفیل a نسبت به شاهد شد (شکل ۶- ب). تیمار قارچ نسبت به شاهد موجب افزایش ۸/۴۱۲ درصد در محتوای کلروفیل b شد (شکل ۶- پ). تنش خشکی باعث کاهش محتوای کلروفیل b شد و کم‌ترین میزان کلروفیل b در شرایط ظرفیت زراعی ۴۰ درصد در روز سیام نمونه‌برداری (میانگین ۱/۰۸۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) به دست آمد (شکل ۶- ت).

کلروفیل a و b: در طی زمان، میزان کلروفیل a کاهش یافت. تیمار قارچ در چهار زمان نمونه‌برداری بیش‌ترین میزان کلروفیل a را در مقایسه با شاهد نشان داد (شکل ۶- الف). شکل ۶- ب نشان می‌دهد که تنش خشکی موجب کاهش میزان کلروفیل a شد و کم‌ترین مقدار آن در ظرفیت زراعی ۴۰ درصد و در روز سیام (میانگین ۴/۳۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) به دست آمد. تیمار قارچ در روز سیام موجب



شکل ۶- محتوای کلروفیل a و b چمن فستوکای پابلند رقم Tomahawk تحت تأثیر اثر متقابل خشکی در قارچ *P. indica* (الف و ب) و اثر متقابل زمان در خشکی (ب و ت). شاهد و قارچ، نشان‌دهنده عدم مایه‌کوبی و مایه‌کوبی با قارچ *Priphormospora indica* هستند. T1، T2، T3 و T4 به ترتیب نشان‌دهنده روز صفر، دهم، بیستم و سی‌ام پس از اعمال تنش خشکی می‌باشند.

Fig. 6. Chlorophyll a and b content of *Festuca arundinacea* cv. Tomahawk under interaction effect of drought × *P. indica* (a and b) and time × drought (c and d). Control and fungus indicate non inoculation and inoculation with *Priphormospora indica*. d0, d1, d2 indicate levels of field capacity at 100, 70 and 40% respectively. T1, T2, T3 and T4 show zero, tenth, twentieth and thirtieth days after drought stress respectively.

انتقال الکترونی و در نتیجه باعث ایجاد اختلال در کارایی سیستم فتوسنتزی می‌شود (۱۸). هم‌چنین خشکی زیاد مانع از تشکیل آمینول لوولونیک اسید^۲ می‌گردد. این ماده پیش‌ماده پروتوکلروفیل^۳ است که در معرض نور تبدیل به کلروفیل می‌شود (۳۸). اثر قارچ *P. indica* در تنش خشکی در این بررسی مانع از کاهش در مقایسه با گیاهان مایه‌کوبی نشده در محتوای کلروفیل شد که با گزارش‌های تسی و همکاران (۲۰۲۰) در گیاه برنج مطابقت دارد (۱۸).

در این مطالعه طی دوره‌های تنش خشکی میزان کلروفیل a و b کاهش یافت. مطالعات قبلی بیانگر این است که کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی تحت تنش‌های مختلف ممکن است به‌علت تخریب کلروپلاست یا تغییر در ساختار غشای تیلاکوئید باشد (۳۷). بسته شدن روزنه‌ها در تنش کم‌آبی و کاهش تثبیت دی‌اکسیدکربن منجر به ایجاد ممانعت نوری^۱ و در ادامه تولید گونه‌های اکسیژن فعال در کلروپلاست باعث می‌شود، در نتیجه تنش کم‌آبی از طریق تولید گونه‌های اکسیژن فعال باعث ایجاد آسیب در چرخه

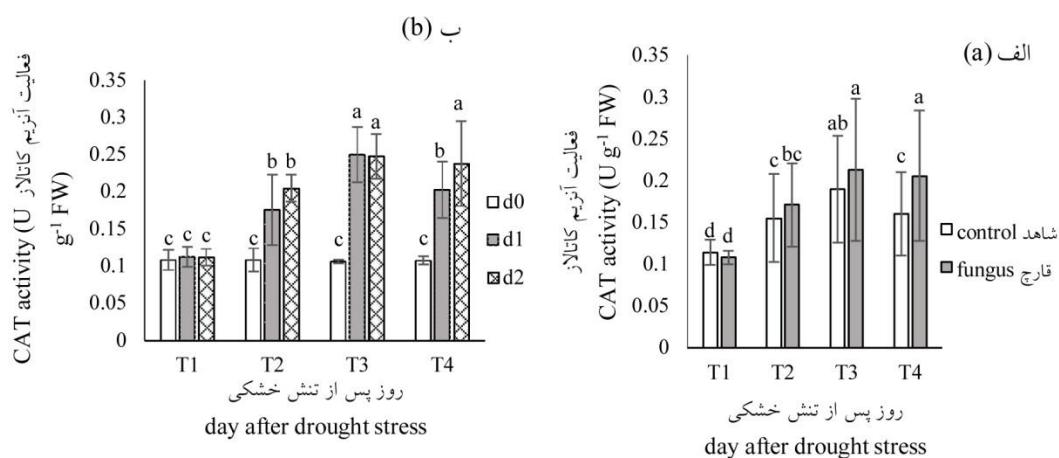
2- Amino laevulinic acid
3- Protochlorophyll

1- Photoinhibition

(۲۰۱۴) دلیل افت میزان فتوستنز در تنش شوری را کاهش انتقال منبع کربن از گیاه به قارچ عنوان کردند (۴۱).

فعالیت آنزیم کاتالاز: میزان فعالیت آنزیم کاتالاز با گذشت زمان افزایش یافت (اشکال ۷- الف و ب). بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز در تیمار قارچ در زمانهای سوم و چهارم (میانگین به ترتیب ۰/۲۱۳ و ۰/۲۰۵ واحد بر گرم وزن تر) به دست آمد (شکل ۷- الف). ظرفیت زراعی ۷۰ و ۴۰ درصد در روز بیستم نمونه برداری (میانگین به ترتیب ۰/۲۴۸ و ۰/۲۳۸ واحد بر گرم وزن تر) و ظرفیت زراعی ۴۰ درصد در روز سیام نمونه برداری (میانگین ۰/۲۳۸ واحد بر گرم وزن تر) بیشترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز را نشان دادند (شکل ۷- ب).

سان و همکاران (۲۰۱۰) علت این افزایش را مشارکت قارچ *P. indica* در افزایش ظرفیت آنتی اکسیدانی و از بین بردن گونه های اکسیژن فعال و ممانعت از تجزیه غشاهای فتوستنزی، پروتئین کلروفیل و تیلاکوئید در گیاه کلم چینی عنوان کردند (۳۹). همچنین در ارقام بادمجان تحت تنش خشکی مایه کوبی شده با قارچ *P. indica* افزایش در محتوای کلروفیل a و b به علت افزایش قابلیت جذب آب در پتانسیل آبی کمتر دیده شد (۱۶). کاهش عملکرد قارچ در بهبود میزان کلروفیل با افزایش میزان تنش خشکی در مقایسه با شرایط بدون تنش خشکی، می تواند به علت گزارش شده در بررسی ام سی میلن و همکاران (۱۹۹۸) باشد که آنها دریافتند که کلونیزاسیون ریشه های در تنش شوری به علت کاهش رشد هیفها و کلایدسپوره های قارچ *P. indica* کمتر می شود (۴۰). همچنین یادگاری و شاکریان

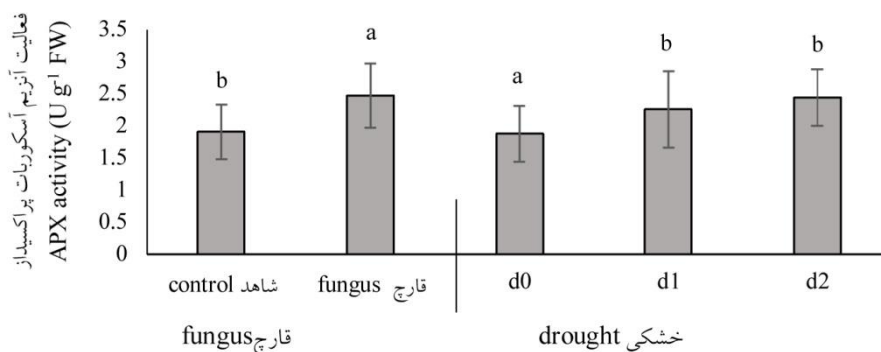


شکل ۷- میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در چمن فستوکای پابلند رقم Tomahawk تحت تأثیر اثر متقابل قارچ *P. indica* در زمان (الف) و خشکی در زمان (ب). شاهد و قارچ، نشان دهنده عدم مایه کوبی و مایه کوبی با قارچ *Prishormospora indica* هستند. d0، d1، d2 به ترتیب نشان دهنده سطوح ظرفیت زراعی ۱۰۰، ۷۰ و ۴۰ درصد هستند. T1، T2، T3 و T4 به ترتیب نشان دهنده روز صفر، دهم، بیستم و سیام پس از اعمال تنش خشکی می باشند.

Fig. 7. CAT activity of *Festuca arundinacea* cv. Tomahawk under interaction effect of *P. indica* × time (a) and drought × time (b). Control and fungus indicate non inoculation and inoculation with *Prishormospora indica*. d0, d1, d2 indicate levels of field capacity at 100, 70 and 40% respectively. T1, T2, T3 and T4 show zero, tenth, twentieth and thirtieth days after drought stress respectively.

۳۰/۱۱ درصد نسبت به شرایط بدون تنش خشکی در فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز شد (شکل ۸).

میزان فعالیت آسکوربات پراکسیداز: تیمار قارچ موجب افزایش ۲۹/۶ درصد نسبت به تیمار بدون قارچ شد. ظرفیت زراعی ۴۰ درصد موجب افزایش



شکل ۸- میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در چمن فستوکای پابلند رقم Tomahawk تحت تأثیر اثر اصلی قارچ *P. indica* و خشکی. شاهد و قارچ، نشان‌دهنده عدم مایه‌کوبی و مایه‌کوبی با قارچ *Prishormospora indica* هستند. d0، d1 و d2 به ترتیب نشان‌دهنده سطوح ظرفیت زراعی ۱۰۰، ۷۰ و ۴۰ درصد هستند.

Fig. 8. APX activity of *Festuca arundinacea* cv. Tomahawk in the main effect of *P. indica* and drought. Control and fungus indicate non inoculation and inoculation with *Prishormospora indica*. d0, d1, d2 indicate levels of field capacity at 100, 70 and 40% respectively.

(۲۰۱۰) پیشنهاد کردند که افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاهان مایه‌کوبی شده با قارچ منجر به افزایش جاروب H_2O_2 و در نتیجه کاهش سرعت پراکسیداسیون سلولی می‌شود (۳۴).

نتایج این پژوهش نشان داد که مایه‌کوبی با قارچ سبب افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز می‌شود که این نتایج با گزارش‌های یعقوبیان و همکاران (۲۰۱۴) و زو و همکاران (۲۰۱۷) به ترتیب در گیاهان گندم و ذرت تحت تنش خشکی یکسان بود (۱۵ و ۱۷).

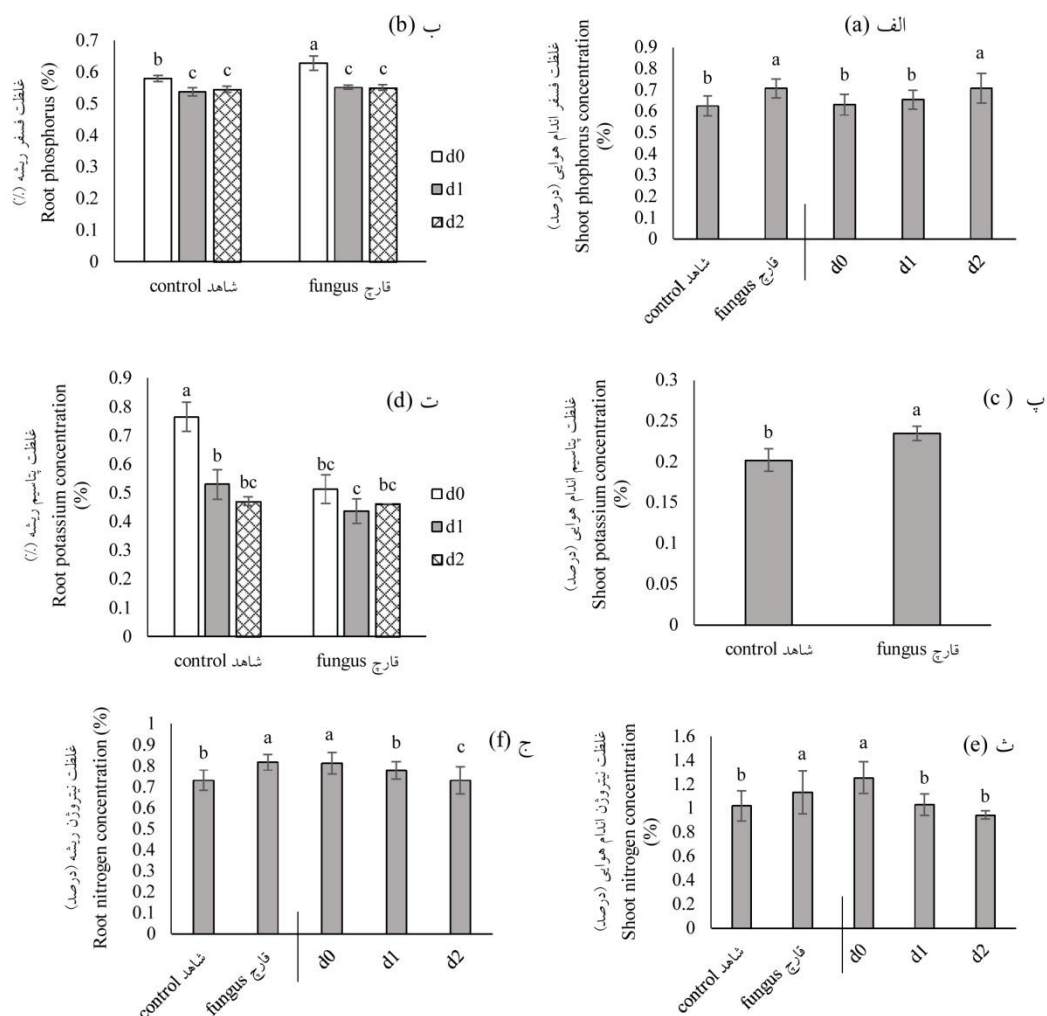
غلظت پتاسیم، فسفر و نیتروژن اندام هوایی و ریشه: بیش‌ترین غلظت فسفر اندام هوایی در تیمار با قارچ (میانگین ۰/۷۰۶ درصد) ثبت شد. تیمار قارچ توانست به میزان ۱۳/۰۲ درصد جذب فسفر را افزایش دهد. با افزایش تنش خشکی، جذب بیش‌تری در فسفر رخ داد. بیش‌ترین غلظت فسفر در ظرفیت زراعی ۴۰ درصد با میانگین ۰/۷۰۸ درصد و کم‌ترین میزان در

تنش‌های محیطی با افزایش سطوح گونه‌های اکسیژن فعال در سلول‌های گیاهی منجر به ایجاد آسیب اکسیداتیوی می‌شوند. از عوامل ایجاد گونه‌های اکسیژن فعال در تنش خشکی می‌توان به بسته شدن روزنه‌ها و در ادامه کاهش تثبیت کربن‌دی‌اکسید و ایجاد واکنش ممانعت نوری اشاره کرد. گیاهان جهت سازگاری با این شرایط نامساعد محیطی مکانیسم‌های فیزیولوژیکی مختلفی از جمله افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را به کار می‌برند (۱۸). مشابه نتایج پژوهش حاضر، یعقوبیان و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز با افزایش میزان تنش خشکی افزایش می‌یابد (۱۵). تولید ترکیبات چاپرونی علیه گونه‌های اکسیژن فعال و به‌کارگیری آن‌ها در مکانیسم‌های مختلف از جمله حفاظت فتوسنتز مورد هدف قارچ‌های اندوفیت است (۱۵). سان و همکاران

(۲۰۲۲) مشابهت داشت (۳۹ و ۴۲). در این پژوهش در شرایط تنش خشکی غلظت فسفر ریشه نسبت به شرایط بدون تنش خشکی کم شد که مشابه نتیجه این پژوهش، ام‌سی‌بت و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که با کاهش رطوبت خاک، میزان انتشار فسفر به سطح ریشه کم‌تر شده و در نتیجه میزان فسفر ریشه کاهش می‌یابد (۴۳). سازوکارهای جذب و انتقال عناصر غذایی در گیاهان، مانند جریان توده‌ای، انتشار و یا جذب و انتقال به‌وسیله پدیده اسمز همگی، تابعی از مقدار رطوبت، شدت و مقدار جذب عناصر غذایی دستخوش تغییر و تحول می‌گردد. هرچه مقدار رطوبت خاک افزایش یابد، نیتروژن بیش‌تری به وسیله گیاه جذب شده و هم‌چنین جذب سایر عناصر مانند فسفر و پتاسیم ارتباط نزدیکی با میزان رطوبت قابل‌دسترس گیاه دارد (۳۱). گیاهان با همکاری با ریزجانداران مختلف توانسته‌اند سامانه‌های انتقال برای مصرف پتاسیم توسط ریشه از خاک را توسعه دهند. گیاهان غنی از پتاسیم در همزیست با قارچ‌های مختلف مایکوریزی در ریشه‌های ذرت گزارش شده است (۴۴) که با نتایج این پژوهش مطابقت داشت که تحت تیمار قارچ غلظت پتاسیم برگ و ریشه افزایش نشان داد. در پژوهش حاضر، پتاسیم ریشه در گیاهان مایه‌کوبی شده با قارچ در تنش خشکی کاهش یافت که مطابق نتایج یان و همکاران (۲۰۱۸) بود که گزارش کردند، گیاهان ذرت تلقیح شده با قارچ *P. indica* دارای انتشار کم یون پتاسیم از ریشه‌ها و محتوای بیش‌تر پتاسیم در شاخه و برگ‌ها تحت تنش شوری بودند (۴۵).

شرایط بدون تنش میانگین ۰/۶۳۲ درصد ثبت شد (شکل ۹- الف). غلظت فسفر ریشه در تیمار قارچ افزایش ۸/۴۴ درصدی نسبت به تیمار بدون قارچ در شرایط بدون تنش خشکی داشت (شکل ۹- ب). بیش‌ترین غلظت پتاسیم اندام هوایی در تیمار قارچ با میانگین ۰/۲۳۵ درصد به‌دست آمد. تیمار قارچ باعث افزایش ۱۶/۳۳ درصد غلظت پتاسیم شد (شکل ۹- پ). تیمار شاهد بدون اعمال تنش خشکی بیش‌ترین غلظت پتاسیم ریشه (میانگین ۰/۷۶۵ درصد) داشت. با اعمال تیمارهای قارچ و تنش خشکی در هر دو سطح غلظت پتاسیم ریشه کاهش یافت (شکل ۹- ت). تیمار قارچ باعث افزایش غلظت نیتروژن بافت اندام هوایی به میزان ۱۱/۱ درصد نسبت به تیمار بدون قارچ شد. در شرایط ظرفیت زراعی ۴۰ درصد، نیتروژن اندام هوایی به میزان ۳۲/۸۷۳ درصد نسبت به شرایط بدون تنش خشکی کاهش نشان داد (شکل ۹- ث). نتایج شکل ۹- ج نشان داد تیمار قارچ باعث افزایش ۱۱/۷۸ درصدی در غلظت نیتروژن ریشه نسبت به تیمار بدون مایه‌کوبی قارچ شد. ظرفیت زراعی ۴۰ درصد موجب کاهش ۱۱/۰۹۵ درصدی غلظت نیتروژن ریشه نسبت به شرایط بدون تنش خشکی شد.

غلظت پتاسیم ریشه در این پژوهش با افزایش میزان تنش خشکی کاهش یافته است. کاهش تعرق در شرایط تنش خشکی منجر به اختلال در انتشار و حرکت عناصر غذایی در خاک شده و محدودیت در جذب عناصر غذایی از جمله پتاسیم می‌شود (۳۹). در این پژوهش، در شرایط تنش خشکی میزان غلظت نیتروژن اندام هوایی و ریشه کاهش یافت که با نتایج سودایی‌زاده و منصور (۲۰۱۵) و یان و همکاران



شکل ۹- میزان فسفر، پتاسیم و نیتروژن اندام هوایی و ریشه چمن فستوکای پابلند رقم Tomahawk تحت تأثیر اثر اصلی قارچ *P. indica* خشکی و اثر متقابل قارچ *P. indica* در خشکی (الف، ب، پ، ت، ث و ج). شاهد و شاهد و قارچ، نشان‌دهنده عدم مایه‌کوبی و مایه‌کوبی با قارچ *Prizophormospora indica* هستند. d0، d1 و d2 به ترتیب نشان‌دهنده سطوح ظرفیت زراعی ۱۰۰، ۷۰ و ۴۰ درصد هستند. T1، T2، T3 و T4 به ترتیب نشان‌دهنده روز صفر، دهم، بیستم و سیام پس از اعمال تنش خشکی می‌باشند.

Fig. 9. Root potassium and phosphorus of *Festuca arundinacea* cv. Tomahawk under the main effect of *P. indica*, drought and interaction effect of *P. indica* × drought (a, b, c, d, e, and f). Control and fungus indicate non inoculation and inoculation with *Prizophormospora indica*. d0, d1, d2 indicate levels of field capacity at 100, 70 and 40% respectively. T1, T2, T3 and T4 show zero, tenth, twentieth and thirtieth days after drought stress respectively.

فسفر، باعث افزایش حلالیت فسفر از منابع غیر آلی و موجب جذب فسفر توسط ریشه‌های گیاه کلزا^۲ شد (۵۱). تلقیح قارچ *P. indica* در گیاهان عدس و نخود، به‌طور قابل توجهی غلظت‌های عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم را افزایش داد (۵۲). در این پژوهش قارچ *P. indica* غلظت نیتروژن را در بافت‌های اندام هوایی و ریشه افزایش داد که با مطالعات چن و همکاران (۲۰۱۳) در گیاه کلزا مطابقت داشت (۵۳).

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به بحران کمبود آب در کشور و خشکسالی‌هایی که هر ساله به خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک کشور صورت می‌گیرد، با گزینش گونه‌های مقاوم و مدیریت صحیح می‌توان نقش چمن‌ها را در سطوح سبز حفظ کرد. مایه‌زنی میکروبی با قارچ اندوفیت *P. indica* با کاهش اثرات مضر ناشی از تنش خشکی در نتیجه افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و افزایش فراهمی عناصر پتاسیم، فسفر و نیتروژن باعث بهبود خصوصیات رشدی و زیست شیمیایی گیاه چمن فستوکای پابلند (*Festuca arundinacea* cv. Tomahawk) شد. بنابراین قارچ اندوفیت *P. indica* می‌تواند به عنوان یک راهکار مؤثر سازگار با محیط زیست در شرایط تنش خشکی در گیاه چمن فستوکای پابلند (*Festuca arundinacea* cv. Tomahawk) استفاده گردد.

در این پژوهش مشاهده شد همزیستی با قارچ، موجب افزایش فسفر برگ و ریشه می‌شود. همزیستی با قارچ‌ها، ذخیره مواد مغذی را در گیاهان بهبود می‌دهد به‌خصوص مواد مغذی که به ریشه منتقل می‌شوند (۴۶) که ممکن است افزایش جذب فسفر در شرایط کمبود فسفر با ایجاد تغییرات در ساختمان ریشه توسط گیاه مانند تغییر انشعابات و افزایش رشد ریشه‌های مویی و افزایش ترشحات ریشه باشد (۴۷). سیرنبرگ و همکاران (۲۰۰۷) مشاهده کردند که قارچ *P. indica* موجب تحریک رشد و افزایش انشعابات ریشه در آرابیدوپسیس از طریق افزایش تولید اکسین می‌شود (۳۳). در مطالعه‌ای روی گیاهان سویا ثابت شد که کاربرد خارجی اکسین موجب افزایش جذب فسفات‌ها شد (۴۸) که در پژوهش حاضر نیز افزایش طول ریشه جهت فراهمی عناصر غذایی از بخش‌های عمیق‌تر خاک مشاهده گردید. همچنین قارچ *P. indica* ممکن است به عنوان منبع فسفر عمل کند (۴۹). قارچ *P. indica* از طریق افزایش بیان انتقال‌دهنده‌های فسفر، میزان فسفر را در آرابیدوپسیس افزایش داد (۵۰). گانم و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند تیمار قارچ *P. indica* در گل سیکلامن^۱ تحت منبع کافی فسفات، جذب فسفر را افزایش می‌دهد و اثرات مثبتی بر صفات رویشی و زایشی دارد (۴۶). همچنین قارچ *P. indica* با بهبود فعالیت ریزجانداران ریزوسفر از طریق افزایش فعالیت فسفاتاز و تولید اسیدهای آلی تحت شرایط کمبود

1- *Cyclamen persicum* Melody

2- *Brassica napus*

منابع

- Sisser, J.M., Nelson, K.C., Larson, K.L., Ogden, L.A., Polsky, C. and Chowdhury, R.R. 2016. Lawn enforcement: How municipal policies and neighborhood norms influence homeowner residential landscape management. *Land. Urban. Plan.* 150: 16-25.
- Kafi, M. and Kavyani, Sh. 2002. Management of establishment and maintenance of turfgrass. Iran, Shaghayeg-e-Roosta. Press. 232p. (In Persian)
- Hu, Z., Xie, Y., Jin, G., Fu, J. and Li, H. 2015. Growth responses of two tall fescue cultivars to Pb stress and their metal accumulation characteristics. *Ecotoxicol.* 24: 3. 563-572.
- <https://www.dsv-seeds.com/sorte/5114>.
- Kheirabi, J., Tavakoli, A.R., Entesari, M.R. and Salamat, A.R. 1996. Low irrigation manual. Iran. Natl. Comm. Irrig. Drain. Press. 288p. (In Persian)
- Madah, A., Hatamzadeh, A., Yamchi, A. and Mohammadi, R. 2019. Investigation of endophyte symbiosis on morphological and biochemical traits in tall Fescue species under drought stress. *Iran J. Plant Prod. Res.* 4: 25. 1-13. (In Persian)
- Khazavi, K., Malakooti, V.M. and Asadi Rahmani, H. 2006. The necessity of produce biological fertilizers in the country. second edition. Publ. Agric. Educ. 411p. (In Persian)
- Harrison, M.J. 2005. Signaling in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Ann. Rev. Microbiol.* 59: 19-42.
- Vadassery, J., Ritter, C., Venus, Y., Camehl, I., Varma, A., Shahollari, B. and Oelmüller, R. 2008. The role of auxins and cytokinins in the mutualistic interaction between *Arabidopsis* and *Piriformospora indica*. *Mol. Plant-Microbe Interact.* 21: 10. 1371-1383.
- Aslani, Z., Hassani, A., Rasouli Sadaghiani, M.H., Sefidkan, F. and Brin, M. 2011. The effects of two species of arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus mosseae* and *Glomus intraradices*) on the growth, chlorophyll content and phosphorus uptake of basil (*Ocimum basilicum* L.) under drought conditions. *Iran J. Med. Arom. Plants Res.* 53: 3. 486-471. (In Persian)
- Varma, A., Verma, S., Sahay, N., Bütehorn, B. and Franken, P. 1999. *Piriformospora indica*, a cultivable plant-growth-promoting root endophyte. *Appl. Environ. Microbiol.* 65: 6. 2741-2744.
- Qiang, X., Weiss, M., Kogel, K.H. and Schäfer, P. 2012. *Piriformospora indica*-a mutualistic basidiomycete with an exceptionally large plant host range. *Mol. Plant Pathol.* 13: 5. 508-518.
- Manuchehri, R. and Salehi, H. 2015. Morphophysiological and biochemical changes in tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) under combined salinity and deficit irrigation stresses. *Desert.* 20: 1. 29-38.
- Riaz, A., Younis, A., Hameed, M. and Kiran, S. 2010. Morphological and biochemical responses of turf grasses to water deficit conditions. *Pak. J. Bot.* 42: 5. 3441-3448.
- Yaghoubian, Y., Goltapeh, E.M., Pirdashti, H., Esfandiari, E., Feiziasl, V., Dolatabadi, H.K. and Hassim, M.H. 2014. Effect of *Glomus mosseae* and *Piriformospora indica* on growth and antioxidant defense responses of wheat plants under drought stress. *Agric. Res.* 3: 3. 239-245.
- Swetha, S. and Padmavathi, T. 2020. Mitigation of Drought Stress by *Piriformospora indica* in *Solanum melongena* L. cultivars. *Proc. Natl. Acad. Sci., India Sect. B: Biol. Sci.* 90: 3. 585-593.
- Xu, L., Wang, A., Wang, J., Wei, Q. and Zhang, W. 2017. *Piriformospora indica* confers drought tolerance on *Zea mays* L. through enhancement of antioxidant activity and expression of drought-related genes. *Crop J.* 5: 3. 251-258.
- Tsai, H.J., Shao, K.H., Chan, M.T., Cheng, C.P., Yeh, K.W., Oelmüller, R. and Wang, S.J. 2020. *Piriformospora indica* symbiosis improves water stress tolerance of rice through regulating stomata behavior and ROS scavenging systems. *Plant Signaling Behav.* 15: 2. 1-10.
- Käfer, E. 1977. Meiotic and mitotic recombination in *Aspergillus* and its chromosomal aberrations. *Adv. Genet.* 19: 33-131.

20. Khodabandehloo, M., Mohseni Fard, E. and Askari, M.S. 2019. Evaluation of symbiotic efficiency of Rhizophagus intraradices and *Piriformospora indica* under salinity stress in *Glycyrrhiza glabra*. Iran J. Soil Appl. Res. 7: 3. 40-53. (In Persian)
21. Barrs, H.D. and Weatherley, P.E. 1962. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. Aust. J. Biol. Sci. 15: 3. 413-428.
22. Lichtenthaler, H.K. 1987. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. Methods Enzymol. 148: 350-382.
23. Aebi, H. 1984. Catalase in vitro. Methods in enzymology. 105: 121-126.
24. Nakano, Y. and Asada, K. 1981. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. Plant Cell Physiol. 22: 5. 867-880.
25. Cotteni, A. 1980. Methods of plant analysis: P 64-100. In: Westerman, R.L. (Ed.). Soil and Plant Testing. FAO Soil Bull.
26. Emami, A. 1996. Plant Analysis Methods. Soil. Water Res. Inst. Public. Tehran. 1: 982p. (In Persian)
27. Mulvaney, R.L. 1996. Nitrogen-inorganic forms. P 1123-1184. In: Sparks D.L., (Ed.). Methods of soil Analysis- Part 3. Chemical Methods-SSSA Book Series No. 5. Soil Sci. Soc. Am. Am. Soc. Agron. Madison. 1390p.
28. Bhatt, R.M. and Rao, N.S. 2005. Influence of pod load on response of okra to water stress. Indian J. Plant Physiol. 10: 1. 54-59.
29. Tatari, M., Fotoohi Ghazvini, R., Etemadi, N.A., Ahadi, A.M. and Moosavi, S.A. 2014. Investigation of some physiological responses of three types of grass in drought stress conditions. Iran. J. Plant Prod. Res. 20: 1. 63-87. (In Persian)
30. Kafi, M. and Mahdavi Damghani, A. 2007. Resistance mechanisms of plants to environmental stresses (Translation). Mashhad Univ. 472p.
31. Taiz, L. and Zeiger, E. 2006. Plant Physiology. (4th Ed.). Sinauer Assoc, Inc, Publishers Sunderland, Massachusetts. 764p.
32. Lee, Y.C., Johnson, J.M., Chien, C.T., Sun, C., Cai, D., Lou, B., Oelmüller, R. and Yeh, K.W. 2011. Growth promotion of Chinese cabbage and Arabidopsis by *Piriformospora indica* is not stimulated by mycelium-synthesized auxin. Mol. Plant-Microbe Interac. 24: 4. 421-431.
33. Sirrenberg, A., Göbel, C., Grond, S., Cempinski, N., Feussner, I. and Pawlowski, K. 2007. *Piriformospora indica* induces increased root branching in Arabidopsis through IAA production. Abstr. Meet. Rep. Res. Group. 546p.
34. Sun, C., Johnson, J.M., Cai, D., Sherameti, I., Oelmüller, R. and Lou, B. 2010. *Piriformospora indica* confers drought tolerance in Chinese cabbage leaves by stimulating antioxidant enzymes, the expression of drought-related genes and the plastid-localized CAS protein. J. Plant Physiol. 167: 12. 1009-1017.
35. Husaini, A.M., Abdin, M.Z., Khan, S., Xu, Y.W., Aquil, S. and Anis, M. 2012. Modifying strawberry for better adaptability to adverse impact of climate change. Curr. Sci. 1660-1673.
36. Aslani, Z., Hassani, A., Abdolahi Mandolekani, B., Barin, M. and Maleki, R. 2021. The effect of inoculation with growth-promoting microorganisms on some growth characteristics, physiological and nutrient content of *Salvia officinalis* under salinity stress conditions. Iran J. Soil Appl. Res. 9: 3. 104-122. (In Persian)
37. Iyengar, E.R.R. and Reddy, M.P. 1996. Photosynthesis in highly salt tolerant plants. Handb. photosynth. Marshal Dekar. Baten Rose, USA. 909p.
38. Santos, C.V. 2004. Regulation of chlorophyll biosynthesis and degradation by salt stress in sunflower leaves. Sci. Hort. 103: 1. 93-99.
39. McMillen, B.G., Juniper, S. and Abbott, L.K. 1998. Inhibition of hyphal growth of a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus in soil containing sodium

- chloride limits the spread of infection from spores. *Soil Biol. Biochem.* 30: 13. 1639-1646.
40. Yadegari, M. and Shakerian, A. 2014. The effect salicylic acid and jasmonic acid foliar applications on essence and essential oil of salvia (*Salvia officinalis* L.). *J. Appl. Sci. Agric.* 9: 4. 1578-1584.
41. Yan, S., Wu, Y., Fan, J., Zhang, F., Guo, J., Zheng, J. and Wu, L. 2022. Quantifying grain yield, protein, nutrient uptake and utilization of winter wheat under various drip fertigation regimes. *Agric. Water Manage.* 261: 1-10.
42. Sodaei Zadeh, H. and Mansoori, F. 2015. Effect of drought stress on dry matter accumulation, nutrient concentrations and soluble sugars in *Salvia macrosiphon* Boiss. *Iran J. Dry Canvas.* 4: 1. 1-9. (In Persian)
43. Yun, P., Xu, L., Wang, S.S., Shabala, L., Shabala, S. and Zhang, W.Y. 2018. *Piriformospora indica* improves salinity stress tolerance in *Zea mays* L. plants by regulating Na⁺ and K⁺ loading in root and allocating K⁺ in shoot. *Plant Growth Regul.* 86: 2. 323-331.
44. McBeath, T.M., McLaughlin, M.J., Kirby, J.K. and Armstrong, R.D. 2012. The effect of soil water status on fertiliser, topsoil and subsoil phosphorus utilisation by wheat. *Plant Soil.* 358: 1. 337-348.
45. Kaldorf, M., Kuhn, A.J., Schröder, W.H., Hildebrandt, U. and Bothe, H. 1999. Selective element deposits in maize colonized by a heavy metal tolerance conferring arbuscular mycorrhizal fungus. *J. Plant Physiol.* 154: 5-6. 718-728.
46. Ghanem, G., Ewald, A., Zerche, S. and Hennig, F. 2014. Effect of root colonization with *Piriformospora indica* and phosphate availability on the growth and reproductive biology of a *Cyclamen persicum* cultivar. *Sci. Hort.* 172: 233-241.
47. Vance, C.P., Uhde-Stone, C. and Allan, D. L. 2003. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New phytol.* 157: 3. 423-447.
48. Shen, H., Chen, J., Wang, Z., Yang, C., Sasaki, T., Yamamoto, Y., Matsumoto, H. and Yan, X. 2006. Root plasma membrane H⁺-ATPase is involved in the adaptation of soybean to phosphorus starvation. *J. Exo. Bot.* 57: 6. 1353-1362.
49. Oelmüller, R., Sherameti, I., Tripathi, S. and Varma, A. 2009. *Piriformospora indica*, a cultivable root endophyte with multiple biotechnological applications. *Symbiosis.* 49: 1. 1-17.
50. Sherameti, I., Venus, Y., Drzewiecki, C., Tripathi, S., Dan, V.M., Nitz, I. and Oelmüller, R. 2008. PYK10, a β-glucosidase located in the endoplasmatic reticulum, is crucial for the beneficial interaction between *Arabidopsis thaliana* and the endophytic fungus *Piriformospora indica*. *Plant J.* 54: 3. 428-439.
51. Wu, M., Wei, Q., Xu, L., Li, H., Oelmüller, R. and Zhang, W. 2018. *Piriformospora indica* enhances phosphorus absorption by stimulating acid phosphatase activities and organic acid accumulation in *Brassica napus*. *Plant Soil.* 432: 1. 333-344.
52. Nautiyal, C.S., Chauhan, P.S., DasGupta, S.M., Seem, K., Varma, A. and Staddon, W.J. 2010. Tripartite interactions among *Paenibacillus lentimorbus* NRRL B-30488, *Piriformospora indica* DSM 11827, and *Cicer arietinum* L. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 26: 8. 1393-1399.
53. Chen, Y.Y., Lou, B.G., Gao, Q.K. and Lin, F.C. 2013. Preliminary study on mechanisms of drought resistance in *Brassica napus* L. conferred by *Piriformospora indica*. *J. Agric. Biotechnol.* 21: 3. 272-281.