

Response of Winter Barley (*Hordeum vulgare* L.) Genotypes to Water Withhold at Tillering Stage Concerning Physiological and Root Traits Under Greenhouse Conditions

Soheila Shayan¹, Fahimeh Sadeghpour², Mohammad Moghaddam ^{3,4*}, Seyed Abolghasem Mohammadi^{3,5}, Kazem Ghassemi-Golezani⁶, Ahmad Yousefi⁷

Received: February 3, 2024

Accepted: April 15, 2024

1- Former Ph.D. student, Dept. of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
2- Former MSc. student, Dept. of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
3- Prof., Dept. of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
4,5- Member and Director, respectively, Center of Excellence for Cereal Molecular Breeding, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
6- Prof., Dept. of Plant Ecophysiology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
7- Researcher, Seed and Plant Improvement Institute, AREEO, Karaj, Iran.

*Corresponding Author: E-mail: mmoghaddam@tabrizu.ac.ir

Abstract

Background and Objective: Knowledge of the role of roots and physiological traits in response to water-deficit stress can help breeders in choosing appropriate approaches for producing tolerant cultivars. This study aimed to investigate physiological traits and root characteristics in winter barley genotypes under water-deficit stress and normal conditions.

Materials and Methods: The experiment was conducted in a factorial arrangement based on a randomized complete block design with two replications. Water deficit stress (full irrigation and water deficit stress with irrigation interruption at tillering stage) and 28 winter barley genotypes constituted the factors studied. After 14 days of water deficit stress, root dry weight, root volume, shoot dry weight, root to shoot dry weight ratio, leaf relative water content, osmotic potential, leaf temperature, leaf chlorophyll index, and proline content were measured. After analysis of variance and comparison of means, cluster analysis was performed on the standardized data using Ward's method and Euclidean distance measure, under normal and water deficit stress conditions. Additionally, a sequential path analysis of traits affecting biomass (dry weight of aerial part) under normal and water-deficit stress conditions was conducted using structural equation modeling.

Results: There were significant differences between the genotypes concerning all traits except leaf temperature. The genotype by irrigation interaction was significant for all traits except leaf temperature. The Ward clustering method resulted in four clusters at both normal and water-deficit-stress conditions. The favorable genotypes were included in groups in both conditions. The results of hierarchical path analysis of traits related to the shoot dry weight under normal conditions showed that the direct effects of root dry weight and root volume on shoot dry weight were positive and significant and the direct effects of leaf chlorophyll index, proline, and osmotic potential on this characteristic were negative and significant. At the water-deficit-stress conditions, root volume and leaf chlorophyll index had positive and significant direct effects on shoot dry weight and proline, and root dry weight and osmotic potential had negative and significant direct effects on this trait.

Conclusion: The barley genotypes with the codes of EC83-5, EC83-17, EC81-13, EC79-18, and A2C84-14 had a higher mean concerning most root and physiological characteristics at both normal and drought stress conditions, which can be considered as suitable genotypes for both conditions.

Keywords: Drought stress, Physiological traits, Root characters, Sequential path analysis, Winter barley

واکنش ژنوتیپ‌های جو پاییزه (*Hordeum vulgare* L.) به قطع آبیاری در مرحله پنجه‌زنی از نظر صفات فیزیولوژیک و ویژگی‌های ریشه

سهیلا شایان^۱، فهیمه صادق‌پور^۲، محمد مقدم^{۳*}، سید ابوالقاسم محمدی^۴،
کاظم قاسمی گل‌عذانی^۵، احمد یوسفی^۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۴

- ۱- دانشجوی سابق دکتری، گروه به‌نژادی و بیوتکنولوژی گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
۲- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه به‌نژادی و بیوتکنولوژی گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
۳- استاد گروه به‌نژادی و بیوتکنولوژی گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
۴- به ترتیب عضو و مدیر قطب علمی اصلاح مولکولی غلات، دانشگاه تبریز.
۵- استاد گروه اکوفیزیولوژی گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
۶- محقق موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج.
*مسئول مکاتبه: E-mail: mmoghaddam@tabrizu.ac.ir

چکیده

مقدمه و اهداف: آگاهی از نقش ریشه و صفات فیزیولوژیک در پاسخ به تنش کمبود آب می‌تواند به‌نژادگران را در انتخاب رویکردهای مناسب برای تولید ارقام متحمل یاری کند. هدف این تحقیق بررسی صفات فیزیولوژیک و ویژگی‌های ریشه در ژنوتیپ‌های جو پاییزه در شرایط تنش کم‌آبی و عادی بود.

مواد و روش‌ها: آزمایش در قالب فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو تکرار انجام شد. تنش کمبود آب (آبیاری کامل و تنش کم‌آبی با قطع آبیاری در مرحله پنجه‌زنی) و ۲۸ ژنوتیپ جو پاییزه، فاکتورهای مورد مطالعه را تشکیل دادند. بعد از ۱۴ روز از اعمال تنش کم‌آبی، صفات وزن خشک ریشه، حجم ریشه، وزن خشک بخش هوایی، نسبت وزن خشک ریشه به بخش هوایی، محتوای آب نسبی برگ، پتانسیل اسمزی، دمای برگ، شاخص کلروفیل برگ و میزان پرولین اندازه‌گیری شد. پس از انجام تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها، تجزیه خوشه‌ای با استفاده از داده‌های استاندارد شده به روش Ward و مقیاس فاصله اقلیدسی، در دو شرایط عادی و تنش کم‌آبی انجام شد. افزون بر این، تجزیه علیت سلسله مراتبی صفات تاثیرگذار روی بیوماس (وزن خشک بخش هوایی) در شرایط عادی و تنش کم‌آبی بر مبنای مدل معادلات ساختاری صورت گرفت.

یافته‌ها: بین ژنوتیپ‌های جو از نظر تمامی صفات به جز دمای برگ اختلاف معنی‌داری مشاهده شد. اثر متقابل ژنوتیپ با شرایط آبیاری برای کلیه صفات به جز دمای برگ معنی‌دار بود. تجزیه خوشه‌ای با استفاده از روش Ward ژنوتیپ‌ها را در هر دو شرایط عادی و تنش کم‌آبی در چهار گروه قرار داد که ژنوتیپ‌های مطلوب در هر دو شرایط در گروه‌های جداگانه قرار گرفتند. نتایج تجزیه علیت سلسله مراتبی صفات مرتبط با وزن خشک بخش هوایی در ژنوتیپ‌های جو در شرایط عادی نشان داد که اثر مستقیم وزن خشک ریشه و حجم ریشه بر وزن خشک بخش هوایی مثبت و اثر مستقیم شاخص کلروفیل برگ، میزان پرولین و پتانسیل اسمزی بر آن منفی بودند. در شرایط تنش کم‌آبی حجم ریشه و شاخص کلروفیل برگ دارای اثر مستقیم مثبت و صفات میزان پرولین، وزن خشک ریشه و پتانسیل اسمزی دارای اثر مستقیم منفی بر وزن خشک بخش هوایی بودند.

نتیجه گیری: ژنوتیپ‌های جو با کدهای EC83-5، EC83-17، EC81-13، EC79-18 و A2C84-14 در هر دو شرایط عادی و تنش کم‌آبی دارای میانگین بیش‌تری از نظر اکثر صفات ریشه و فیزیولوژیک بودند که می‌توان آن‌ها را در زمره ژنوتیپ‌های مطلوب در هر دو شرایط به شمار آورد.

واژه‌های کلیدی: تجزیه علیت سلسله مراتبی، تنش خشکی، جو پاییزه، صفات ریشه، صفات فیزیولوژیک

مقدمه

جو (*Hordeum vulgare* L.) با تولید ۱۵۰/۴۸ میلیون تن در سال زراعی ۲۰۲۲-۲۰۲۳ چهارمین غله مهم در دنیا است که در تولید محصولات غذایی و نوشیدنی‌های مختلف اهمیت ویژه‌ای دارد ولی بیشتر به عنوان علوفه برای دام‌ها استفاده می‌شود. جو در برابر تنش‌های محیطی از جمله تنش کم‌آبی سازگاری بالایی دارد (شاه‌بند ۲۰۲۳).

گیاهان به طور معمول در معرض انواع تنش‌های محیطی قرار می‌گیرند که ماندگاری، رشد و تولیدمثل گیاهان را در اکوسیستم‌های طبیعی تهدید می‌کنند (کرامر-والتر و همکاران ۲۰۱۶) و بر عملکرد و کیفیت محصول (مقبول و همکاران ۲۰۲۲) تأثیر می‌گذارند. یکی از تنش‌های محیطی تنش کم‌آبی است. به دلیل این که فرایندهای فیزیولوژیک در گیاهان تابع آب در گیاه بوده و به طور غیرمستقیم تحت تأثیر تنش آب در خاک قرار دارند، مطالعه این ویژگی‌ها در شرایط تنش کم‌آبی اهمیت زیادی در گزینش برای تحمل به این تنش دارد. یکی از ویژگی‌های فیزیولوژیک مهم، محتوای نسبی آب برگ است. محتوای نسبی آب بیش‌تر، افزایش فتوسنتز را در شرایط تنش خشکی به همراه دارد (فاروق و همکاران ۲۰۰۹). بر اساس اظهار واعظی و همکاران (۲۰۱۰)، از این صفت می‌توان به عنوان یکی از شاخص‌های ترانزمندی آب در گیاه در گزینش ارقام در شرایط تنش بهره برد. افزون بر این، پتانسیل آب نیز علاوه بر اهمیت آن در انتقال آب، معیار مفیدی از وضعیت آبی گیاهان محسوب می‌شود. بر اساس نظر تاز و زایگر (۲۰۰۲)، غلظت مواد محلول و فشار هیدرواستاتیک دو عامل اصلی مؤثر بر پتانسیل آب به حساب می‌آیند. همچنین، دمای تاج پوشش

گیاه برای ارزیابی وضعیت رطوبتی گیاه و نیز به عنوان یک شیوه غربال آسان در گزینش برای تحمل به تنش کم‌آبی مورد استفاده قرار گرفته‌است. بلام و همکاران (۱۹۸۲) اظهار داشتند که لاین‌های برخورددار از پوشش گیاهی خنک‌تر، دارای سیستم ریشه‌ای قوی‌تر و کارایی بالا در استفاده از اشعه خورشیدی هستند. میزان کلروفیل نیز به عنوان یک معیار ارزیابی تحمل به تنش کم‌آبی برای گزینش پیشنهاد شده‌است (سید ۲۰۰۳).

لیانگ و همکاران (۲۰۱۳) عنوان کردند که افزایش محتوای پرولین در شرایط تنش سبب محافظت غشای سلولی، پروتئین‌ها، آنزیم‌های سیتوپلاسمی و مهار گونه‌های فعال اکسیژن و حذف رادیکال‌های آزاد می‌شود. بر اساس امینی و همکاران (۲۰۱۵)، در شرایط تنش کم‌آبی، میزان پرولین در حفظ پتانسیل اسمزی و حفاظت ماکرومولکول‌ها از واسرشته شدن و تنظیم pH سلولی نقش دارد. همچنین، پرولین می‌تواند اثر منفی تنش کم‌آبی را بر تثبیت کربن کاهش دهد.

ریشه‌ها در جذب آب و مواد مغذی، ذخیره متابولیت‌ها و نگه داشتن (استقرار) گیاه در خاک، نقش دارند. ریشه اولین اندام در گیاه است که تغییرات رطوبت خاک را حس کرده و در مقیاس‌های مورفولوژیکی و مولکولی با آن سازگار می‌شود (آمتن و همکاران ۲۰۲۲). ثابت شده است که کانوپی خنک‌تر با ریشه‌های عمیق‌تر در ارتباط است (مقبول و همکاران ۲۰۲۲). بر اساس سدیکی و همکاران (۲۰۲۱)، معماری سیستم ریشه با مجموعه‌ای از صفات از جمله عمق ریشه زایی، نسبت ریشه به بخش هوایی، قطر ریشه، مساحت ریشه، حجم ریشه و توسعه ریشه‌های مویی تعیین می‌شود. ریشه‌ها از توانایی تغییر سیستم ریشه در پاسخ به تنش آبی

برخورد دارند و بهبود سیستم ریشه می‌تواند در افزایش تحمل به تنش کم‌آبی نقش ایفا کند.

کلاوس و همکاران (۲۰۲۴) گزارش کردند که طول ریشه و سرعت رشد ریشه پس از تنش کم‌آبی با استفاده از پلی اتیلن گلیکول ۸۰۰۰ به طور معنی‌داری در جو کاهش می‌یابد. در عین حال پس از پنج روز از اعمال تنش، گیاهان در دو شرایط نرمال و تنش کم‌آبی سرعت رشد مشابهی نشان دادند. این نتایج نشان داد که گیاهان به‌طور دینامیکی به تنش کم‌آبی در طول زمان با به کارگیری سیگنال‌های پس‌خوردی پیچیده و مراحل مختلف پاسخ سازگار می‌شوند. عطا و همکاران (۲۰۱۳) اظهار داشتند که در شرایط تنش کم‌آبی، جذب آب توسط گیاه به توزیع ریشه بستگی دارد. واسون و همکاران (۲۰۱۲) سیستم ریشه عمیق، افزایش تراکم ریشه در عمق، کاهش تراکم ریشه در سطح و کاهش مقاومت به حرکت آب از خاک به ریشه از راه افزایش تارهای ریشه و قطر آوندهای چوبی را برای بهبود عملکرد و بهره‌وری تحت شرایط تنش کم‌آبی پیشنهاد کردند. استردا و همکاران (۲۰۱۲) اعلام کردند که یک سوم ارقام دارای اندازه ریشه بزرگ نسبت به یک سوم دارای اندازه ریشه کوچک، پنج درصد عملکرد بیشتری دارند. همچنین آنان همبستگی مثبت و معنی‌داری بین اندازه سیستم ریشه و عملکرد گزارش کردند. از طرف دیگر پالتا و همکاران (۲۰۱۱) در گندم بیان کردند که با وجود اهمیت افزایش صفات مورفولوژیک ریشه و پیامدهای عملکردی آن برای جذب آب در شرایط تنش کم‌آبی، توافق کلی برای نقش سیستم ریشه‌ای بزرگ‌تر در سازگاری گندم به تنش وجود ندارد.

به طور کلی، شناخت نقش ویژگی‌های ریشه و صفات فیزیولوژیکی در پاسخ به تنش کم‌آبی می‌تواند به- نژادگران را در اتخاذ راهبرد مناسب برای تولید ارقام متحمل به تنش کم‌آبی یاری کند. از آنجا که تحقیقات محدودی درباره صفات ریشه جو صورت گرفته‌است و بهبود صفات ریشه می‌تواند در بهبود عملکرد دانه در محیط‌های واجد تنش کمبود آب مفید واقع شود، بنابراین،

هدف این تحقیق، بررسی صفات فیزیولوژیک، ویژگی‌های ریشه و نیز توزیع ماده خشک بین ریشه و بخش هوایی جو در دو شرایط رطوبتی عادی و تنش کم‌آبی در مرحله پنجه‌زنی بود.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی و مشخصات طرح آزمایشی

مواد گیاهی مورد استفاده در این مطالعه شامل ۲۸ ژنوتیپ جو پاییزه بودند که اسامی و شجره آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. این مواد به وسیله موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال بذر، کرج تأمین شدند. آزمایش در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز با متوسط دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد در طول شبانه روز اجرا شد. تنظیم دما با کولرهای آبی انجام شد و تنظیم نور به کمک روشنایی طبیعی و لامپ‌های فلورسنت و التهابی صورت گرفت. ژنوتیپ‌های جو پاییزه در دو تکرار در قالب آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی مورد بررسی قرار گرفتند. تنش رطوبتی با دو سطح (آبیاری کامل و تنش کم‌آبی به صورت قطع آبیاری در مرحله پنجه زنی) و ۲۸ ژنوتیپ، فاکتورهای مورد مطالعه را تشکیل دادند. آزمایش در گلدان‌های ۴ کیلویی (قطر ۲۲ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۳ سانتی‌متر) و با خاک زراعی مناسب انجام گرفت. بذرها قبل از کشت با مانکوزب به نسبت ۱/۵ در هزار ضدعفونی شدند و سپس در یخچال در دمای دو درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۰ روز نگهداری شدند تا ورنالیزه شوند. پیش از کشت ظرفیت مزرعه‌ای خاک گلدان‌ها اندازه‌گیری شد تا رطوبت خاک گلدان‌ها در حدود ۸۰-۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه‌ای نگه داشته شود. کنترل رطوبت با توزین کردن روزانه گلدان‌ها و افزودن میزان آب مورد نیاز، انجام گرفت. تنش در مرحله پنجه زنی با قطع آبیاری اعمال شد. آبیاری در کلیه واحدهای آزمایشی تا پیش از مرحله پنجه زنی انجام و پس از آن، آبیاری در واحدهای واجد تنش کم‌آبی به مدت ۱۴ روز قطع شد. هر واحد آزمایشی (گلدان) شامل ۶ بوته بود که صفات مورد ارزیابی روی این بوته‌ها اندازه‌گیری شدند.

صفات مورد ارزیابی

بعد از سپری شدن ۱۴ روز از تنش کم‌آبی، صفات وزن خشک ریشه، حجم ریشه، وزن خشک بخش هوایی، نسبت وزن خشک ریشه به بخش هوایی، دمای برگ، شاخص کلروفیل برگ، محتوای آب نسبی برگ، پتانسیل اسمزی و میزان پرولین اندازه‌گیری شدند. اندازه‌گیری دمای برگ با دماسنج مادون قرمز در ساعات میانی روز (۱۴-۱۲) صورت گرفت (رینولدز و همکاران ۱۹۹۸). اندازه‌گیری شاخص کلروفیل برگ در سه نقطه تصادفی از پهنک برگ به وسیله دستگاه SPAD به صورت غیر-تخریبی برای بوته‌ها انجام شد (جیمز و همکاران ۲۰۰۲). پتانسیل اسمزی نمونه‌ها به وسیله دستگاه اسمومتر (مدل

Osmomat Gonotec; 010) تعیین شد (چیمنتی و همکاران ۲۰۰۲ و موقایب و همکاران ۲۰۰۴). دستگاه پیش از استفاده، کالیبره شده و اعداد قرائت شده با استفاده از رابطه وانت هوف ($\Pi = -CRT$) به واحد مگاپاسکال تبدیل شد. در این معادله C عبارت از اسمولالیت به حسب میلی اسمول بر کیلوگرم، R ثابت گازها و T دما است. RT در 20°C برابر $2/43$ است. غلظت پرولین در بافت-های برگ کاملاً گسترده و منجمد شده در -80°C درجه سانتی‌گراد به روش نین هیدرین اندازه‌گیری شد (مک مانوس و همکاران ۲۰۰۰). محتوای آب نسبی برگ براساس رابطه زیر محاسبه شد (بارس و ویلی ۱۹۶۲):

$$RWC = \frac{\text{وزن خشک برگ} - \text{وزن تر برگ}}{\text{وزن خشک برگ} - \text{وزن اشباع برگ}} \times 100$$

V20 در دو شرایط عادی و تنش کم‌آبی به دست آمد. تجزیه علیت سلسله مراتبی صفات مرتبط با وزن خشک بخش هوایی در ارقام جو تحت شرایط عادی و تنش کم-آبی بر اساس مدل معادلات ساختاری با استفاده از نرم افزار Amos ویرایش ۲۴ انجام شد. نیکویی برازش مدل به کمک آماره کای اسکور مورد آزمون واقع شد.

نتایج و بحث

نتایج آزمون نرمال بودن داده‌ها و یکنواختی واریانس‌ها برای صفات مورد اندازه‌گیری نشان دادند که شرط‌های نرمال بودن و یکنواختی واریانس‌های درون گروهی در مورد همه صفات صادق هستند. نتایج تجزیه واریانس چند متغیره نشان داد که بین تکرارها و نیز بین ژنوتیپ‌ها از نظر مجموع متغیرهای مورد استفاده تفاوت معنی‌دار وجود دارد. این امر نشان می‌دهد که حداقل از نظر یکی از صفات مورد مطالعه تفاوت معنی‌دار بین تکرارها و ژنوتیپ‌های جو مورد مطالعه وجود دارد. بین تکرارها از نظر صفات مورد مطالعه اختلاف معنی‌دار وجود داشت که یکی از دلایل اختلاف بین تکرارها از نظر صفات مورد مطالعه می‌تواند انجام سنجش‌های مربوط

تجزیه و تحلیل آماری

هم‌زمان با تجزیه واریانس، صادق بودن فرض-های تجزیه واریانس شامل نرمال بودن خطاها توسط آزمون شاپیرو-ویلک، مستقل بودن خطاها به وسیله معیار دوربین-واتسون و یکنواختی واریانس‌های درون تیماری به کمک آزمون بارتلت مورد بررسی قرار گرفت. پیش از تجزیه واریانس برای هر متغیر، ابتدا تجزیه واریانس چند متغیره به منظور تثبیت خطای نوع اول انجام شد. مقایسه میانگین برای ژنوتیپ‌ها با استفاده از آزمون ^{1}LSD در سطح احتمال پنج درصد با استفاده از نرم افزار MSTAT-C (۱۹۹۱) انجام شد و همچنین مقایسه میانگین شرایط عادی و تنش کم‌آبی انجام گرفت. برای گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها، تجزیه خوشه‌ای بر اساس میانگین صفات مورد مطالعه با استفاده از داده‌های استاندارد شده به روش Ward و مقیاس فاصله اقلیدسی، در دو شرایط عادی و تنش کم‌آبی به وسیله نرم افزار SPSS ویرایش ۲۰ انجام شد. تعداد خوشه‌ها با انجام تجزیه تابع تشخیص مشخص شد. ضرایب همبستگی بین تمامی صفات مورد مطالعه با استفاده از نرم افزار SPSS

¹ -Least Significant Difference

به هر تکرار در روزهای جداگانه باشد. بین ژنوتیپ‌ها از نظر کلیه صفات مورد مطالعه به جز دمای برگ تفاوت معنی‌داری مشاهده شد که نشانگر تنوع موجود بین آن‌ها از نظر صفات مورد بررسی بود. از این تنوع می‌توان در تولید جمعیت‌های حاصل از دورگ‌گیری در برنامه‌های اصلاحی و نیز مکان‌یابی ژن‌های کنترل‌کننده صفات مختلف و تولید لاین‌های جدید استفاده کرد. اختلاف بین

شرایط عادی و تنش کم‌آبی برای کلیه صفات مورد مطالعه معنی‌دار بود. اثر متقابل بین ژنوتیپ و آبیاری برای کلیه صفات به غیر از دمای برگ معنی‌دار شد (جدول مکمل ۱) که بیان‌کننده متفاوت بودن تأثیر هر تیمار آبیاری بر ژنوتیپ‌ها در رابطه با این صفات بود. بنابراین مقایسه ارقام در مورد صفات با در نظر گرفتن سطوح آبیاری انجام شد.

جدول ۱- مشخصات ژنوتیپ‌های جو مورد استفاده در آزمایش

شماره	کد ژنوتیپ	شجره
۱	EC79-10	Walfajre/Miraj 1
۲	EC79-13	Kmk//Rbr/Wa2196-68/3/EBC(A)
۳	EC79-18	Lignee 131//4341 N/Ortolan
۴	EC80-7	YEA389.3/YEA475.4
۵	EC81-11	Coss/OWB 71080-44-Lh
۶	EC81-13	Comp 89-9Cr-79-07/Atem//((Alpha/HC1905//Robur)/3/...
۷	EC82-5	Alger/(Cl10117/Choyo..
۸	EC82-11	Np 106/Minn 14133-Gvaxduois//Gi10143
۹	EC83-4	L. 131/Gerbel//Ager-Ceres/3/(Scotia/Wa...)
۱۰	EC83-5	Arar/L. 1242
۱۱	EC83-12	K-096M3
۱۲	EC83-17	Makouee//Zarjow/80-5151
۱۳	A1C84-7	Star/Dundy
۱۴	A1C84-9	F2//Radical/Karat/3/Radical/4/Xemus
۱۵	A1C84-15	Monolit/Plaisant
۱۶	A2C84-5	CWB117-77-9-7/Teran 78
۱۷	A2C84-6	CWB117-77-9-7/Teran 78
۱۸	A2C84-11	Roho/Mazurka//Dyton
۱۹	A2C84-12	Boyer(F356)126//Cem 1413/Kt2085
۲۰	A2C84-14	Cyclone/Arar
۲۱	A2C84-18	Mal/OWB753328-5H//11840-76/3/Radical
۲۲	Makouee	Makouee
۲۳	Rihaneh	Rihane
۲۴	KAVIR	Kavir
۲۵	73M4-C	73M4-30
۲۶	Schulyer	Schulyer
۲۷	L.1242	L.1242
۲۸	EM80-9	LB. Iran/Una 8271//Gloria"S"/Come"s"-11M/3/Kavir

جدول ۲- میانگین دو شرایط عادی و تنش کم آبی برای صفات مورد مطالعه جو

شرایط آبیاری	وزن خشک ریشه (g)	حجم ریشه (ml)	وزن خشک بخش هوایی (g)	نسبت وزن خشک ریشه به بخش هوایی	دمای برگ ($^{\circ}\text{C}$)	شاخص کلروفیل برگ	محتوای آب نسبی برگ (%)	پتانسیل اسمزی (MPa)	میزان پرولین (mg.g^{-1})
نرمال	۰/۱۳۴a	۲/۵۳۵a	۱/۰۶۱a	۰/۱۲۱b	۲۵/۳۸۹b	۸/۶۷۱a	۶۷/۸۶۳a	-۰/۵۷۳a	۰/۱۴۳b
تنش کم آبی	۰/۰۷۸b	۱/۲۷۸b	۰/۵۹۳b	۰/۱۴۹a	۲۷/۴۴۸a	۶/۴۸۵b	۴۷/۷۸۵b	-۱/۶۸۹b	۲/۸۸۹a

- حروف غیر مشابه در هر ستون بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار بین شرایط عادی و تنش کم آبی در سطح احتمال یک درصد بر اساس آزمون F است.

مقایسه میانگین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه از نظر صفات اندازه‌گیری شده

نتایج مقایسه میانگین صفات در شرایط عادی و تنش کم آبی نشان داد که ژنوتیپ‌های ۲۰، ۳، ۵، ۶، ۱۲، ۱۰، ۹، ۲۷ و ۱۹ نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها در شرایط عادی از نظر اکثر صفات مورد بررسی میانگین بالاتری داشتند. از طرف دیگر، ژنوتیپ‌های ۱۴، ۱۲، ۱۰، ۳، ۶، ۲۰، ۱۳ و ۲۳ نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها در شرایط تنش کم آبی از نظر اکثر صفات دارای میانگین بالاتری بودند که می‌توان آن‌ها را در زمره ژنوتیپ‌های متحمل به تنش کم آبی از نظر صفات فیزیولوژیک و ریشه به شمار آورد. در مقابل، ژنوتیپ‌های ۱۹، ۱۷، ۱، ۱۸، ۱۱ و ۱۵ میانگین پایین‌تری از خود نشان دادند که به عنوان ژنوتیپ‌های حساس به تنش کم آبی محسوب می‌شوند.

گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها از نظر صفات اندازه‌گیری شده

گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس میانگین صفات مورد مطالعه در شرایط عادی (شکل ۱-آ) و تنش کم آبی (شکل ۱-ب)، ژنوتیپ‌ها را در چهار گروه قرار داد. در شرایط عادی، ژنوتیپ‌های گروه سوم از نظر اکثر صفات مورد مطالعه بیشترین درصد انحراف مثبت از میانگین کل را داشتند. در شرایط تنش کم آبی، ژنوتیپ‌های گروه دوم از نظر اکثر صفات مورد مطالعه بیشترین درصد انحراف مثبت از میانگین کل صفات را دارا بودند که از ژنوتیپ‌های متحمل‌تر به کم آبی به شمار می‌روند. در

مقابل ژنوتیپ‌های گروه سوم از نظر اکثر صفات مورد مطالعه بیشترین درصد انحراف منفی از میانگین کل صفات را داشتند که از ژنوتیپ‌های حساس‌تر به کم آبی به حساب می‌آیند.

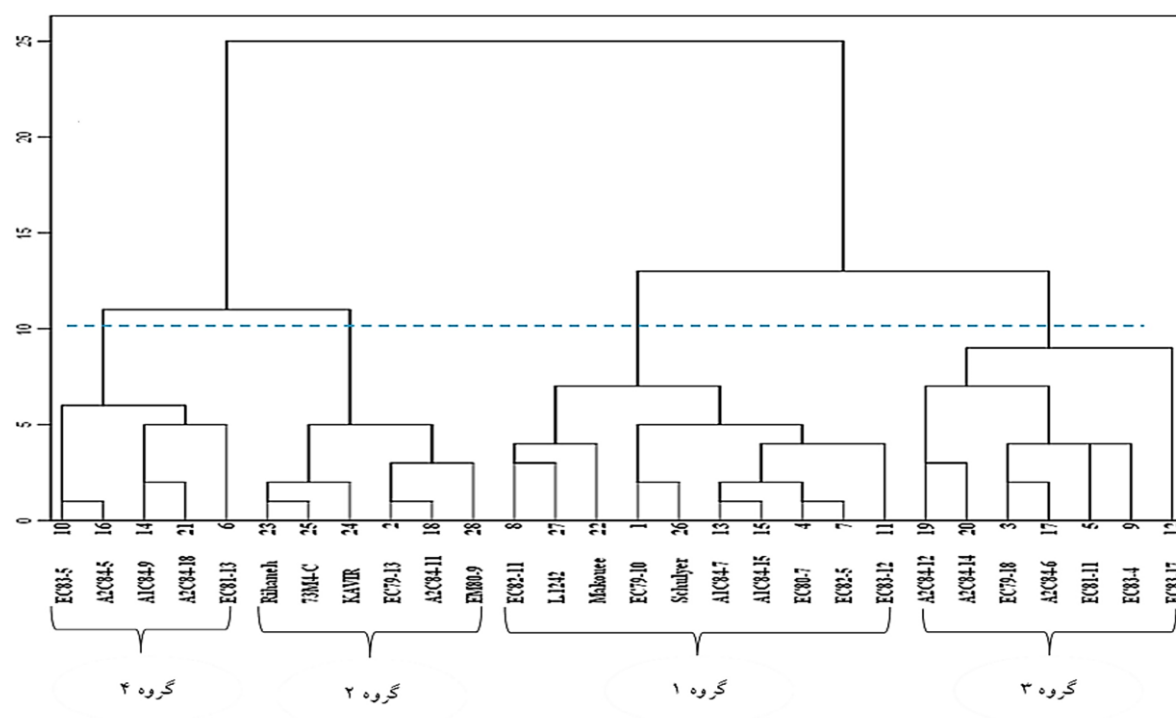
نتایج حاصل از تجزیه واریانس بین خوشه‌ها و مقایسه میانگین‌های صفات مورد مطالعه گویای وجود تفاوت معنی‌دار میان خوشه‌ها بود (داده‌ها درج نشده‌اند). بر اساس مقایسات میانگین انجام شده ژنوتیپ‌های خوشه متحمل‌تر به کم آبی میانگین بالایی از نظر صفات مورد مطالعه و ژنوتیپ‌های خوشه حساس‌تر به کم آبی میانگین پایینی از نظر صفات مورد مطالعه داشتند. در این شرایط از بین ژنوتیپ‌های متحمل، ژنوتیپ‌های ۱۲، ۳، ۶، ۲۰ و ۱۳ در خوشه دوم و ژنوتیپ‌های ۱۴، ۱۰ و ۲۳ در خوشه اول قرار گرفتند. از آنجایی که صفت تحمل به تنش کم آبی توسط مکان‌های ژنی زیادی به صورت کمی کنترل می‌شود، حتی در بین ژنوتیپ‌های متحمل برای این صفت نیز تنوع زیادی دیده می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که در واقع ژنوتیپ‌های موجود دارای درجات مختلفی از تحمل هستند. بنابراین، با انجام تلاقی‌های مرکب می‌توان ژنوتیپ‌هایی با میزان تحمل بیشتر به تنش کم آبی تولید کرد که واجد تعداد بیشتری از ژن‌های تحمل به تنش کم آبی باشند.

همبستگی بین صفات مورد مطالعه

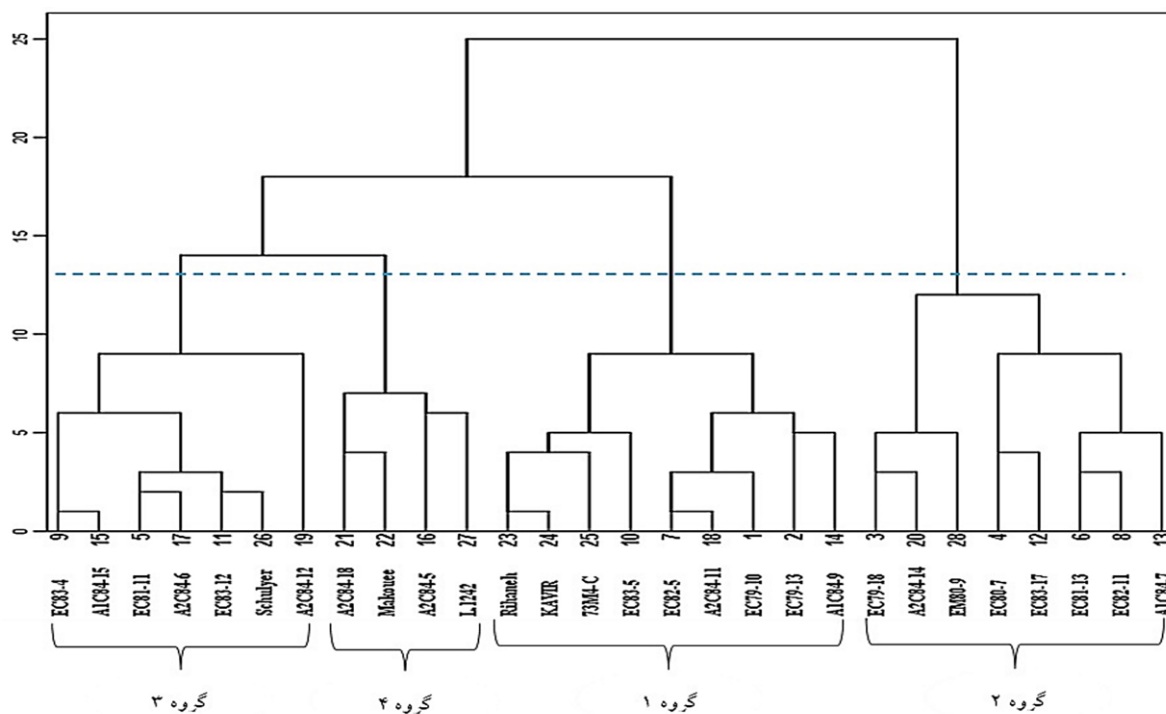
ضرایب همبستگی ساده برخی از صفات اندازه‌گیری شده در شرایط عادی و تنش کم آبی معنی‌دار شد (جدول

۳). علت تغییر ضرایب همبستگی بین صفات مختلف در شرایط عادی و تنش کم آبی را شاید بتوان ناشی از تفاوت ژنوتیپ‌ها در واکنش به محیط دانست، زیرا ژنوتیپ‌ها از این نظر به سه دسته تقسیم می‌شوند، اول آن‌هایی که در همه محیط‌ها برتری یکنواختی دارند، دوم آن‌هایی که در محیط نامناسب تا حدودی بهتر عمل می‌کنند و دسته آخر آن‌هایی که در محیط مطلوب عملکرد مناسب دارند. وزن خشک ریشه با صفات حجم ریشه، وزن خشک بخش هوایی، نسبت وزن خشک ریشه به بخش هوایی، محتوای آب نسبی برگ و پتانسیل اسمزی در دو شرایط عادی و تنش کم آبی همبستگی مثبت و معنی‌دار داشت. در شرایط آبیاری عادی، وزن خشک بخش هوایی با صفات وزن خشک ریشه، حجم ریشه، نسبت وزن خشک ریشه به بخش هوایی، شاخص کلروفیل برگ و محتوای آب نسبی برگ همبستگی مثبت و معنی‌داری داشت. در شرایط تنش کم آبی وزن خشک بخش هوایی با صفات وزن خشک ریشه، حجم ریشه، شاخص کلروفیل برگ و محتوای آب نسبی برگ همبستگی مثبت و معنی‌دار و با نسبت وزن خشک ریشه به بخش هوایی همبستگی منفی و معنی‌دار داشت. وجود همبستگی منفی و معنی‌دار بین وزن خشک بخش هوایی و نسبت وزن خشک ریشه به بخش هوایی در شرایط تنش کم آبی می‌تواند نشانگر آن باشد که رشد ریشه نسبت به اندام هوایی کم‌تر تحت تأثیر تنش کم آبی قرار می‌گیرد. محتوای آب نسبی برگ، یک صفت مهم برای بیان وضعیت آبی گیاه در شرایط تنش کم آبی به شمار می‌رود. محتوای آب نسبی برگ با صفات وزن خشک ریشه، حجم ریشه، وزن خشک بخش هوایی و شاخص کلروفیل برگ همبستگی مثبت و معنی‌دار و با دمای برگ و میزان پرولین همبستگی منفی و معنی‌دار در دوشرایط عادی و تنش کم آبی داشت. هر چه محتوای آب نسب برگ کاهش می‌یابد، دمای برگ در اثر آسیب وارده به آن افزایش یافته و سبب تولید بیش‌تر پرولین می‌شود. بنابراین، گیاه جو در شرایط تنش کم آبی با افزایش تجمع اسمولیت‌های سازگارکننده‌ای مانند پرولین موجب تنظیم اسمزی درون سلولی، حفظ تورژسانس سلولی و کاهش

خسارت به غشای سلولی و نیز جلوگیری از تخریب آنزیم‌ها می‌شود و تحمل به تنش کم آبی افزایش می‌یابد. افزون براین، هرچه دمای تاج پوشش گیاه کم‌تر باشد، نشان از ترازبندی بهتر آب به وسیله گیاه دارد که ناشی از جذب بیش‌تر آب توسط ریشه‌ها است. در نتیجه، نگهداری آب در برگ‌ها خنک شدن گیاه را در پی دارد (حسینی سالکده و همکاران ۲۰۰۹). همبستگی منفی دمای برگ با همه صفات و نیز همبستگی مثبت این صفت با میزان پرولین نشان می‌دهد که گیاه متحمل در روبرو شدن با تنش کم آبی آسیب کم‌تری خواهد دید. نقوی و همکاران (۲۰۱۶) همبستگی مثبت و معنی‌داری بین محتوای آب نسبی برگ و صفات فلورسانس کلروفیل و میزان پرولین در شرایط آبیاری عادی در گندم به دست آوردند. با این حال، در شرایط تنش کم آبی همبستگی این صفت با میزان پرولین منفی و معنی‌دار بود. موالثو-نگانگوئه (۲۰۲۰) در مطالعه ژنوتیپ‌های جو در شرایط تنش کم آبی همبستگی منفی ضعیف بین میزان پرولین و وزن خشک گیاه گزارش کردند. این نتایج نشان داد که تولید پرولین در شرایط کم آبی منجر به تولید ماده خشک بالا نمی‌شود. از این‌رو، تولید پرولین ممکن است با چندین پاسخ فیزیولوژیک دیگر که منجر به سازگاری به کم آبی می‌شود، مرتبط باشد. افشاری بهبهانی‌زاده و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که همبستگی محتوای آب نسبی برگ در جو با صفات بیوماس و تنظیم اسمزی مثبت و معنی‌دار است. افزون بر این، همبستگی نسبت وزن تر ریشه به بخش هوایی با صفات وزن تر ریشه و حجم ریشه و همبستگی بین وزن تر ریشه و حجم ریشه مثبت و معنی‌دار به دست آمد. رینرت و همکاران (۲۰۱۶) همبستگی مثبت و معنی‌داری بین وزن خشک ریشه و صفات طول ریشه، نسبت وزن خشک ریشه به وزن خشک بخش هوایی و تعداد پنجه در شرایط آبیاری عادی و تنش کم آبی در جو گزارش کردند. در عین حال، همبستگی منفی و معنی‌داری بین وزن خشک بخش هوایی و نسبت وزن خشک ریشه به بخش هوایی دیده شد.



(الف)



(ب)

شکل ۱- گروه‌بندی ژنوتیپ‌های جو بر اساس میانگین صفات مورد مطالعه در شرایط عادی (الف) و تنش کم‌آبی (ب).

تجزیه علیت سلسله مراتبی صفات مرتبط با وزن خشک بخش هوایی در ژنوتیپ‌های جو با استفاده از مدل معادلات ساختاری

تجزیه علیت پس از محاسبه همبستگی‌های ساده، می‌تواند تصویر درستی از ارتباط بین صفات را نشان دهد. نتایج تجزیه علیت صفات برای دو شرایط عادی و تنش کم‌آبی در شکل‌های ۲ و ۳ بر اساس مدل معادلات ساختاری با استفاده از نرم افزار Amos ویرایش ۲۴ منعکس شده است. در این شکل‌ها، اعداد روی مسیر یک-طرفه و دو طرفه به ترتیب نشان‌دهنده ضرایب علیت یا اثرهای مستقیم (ضرایب رگرسیون استاندارد شده) و ضرایب همبستگی و اعداد روی مستطیل معرف ضرایب تبیین هستند.

در شرایط عادی (شکل ۲) اثر مستقیم دمای برگ و حجم ریشه بر محتوای آب نسبی برگ منفی (به ترتیب -0.09^* و -0.06^*) و اثر مستقیم وزن خشک ریشه بر آن مثبت (0.02^*) بودند. این سه صفت در مجموع دو درصد از تغییرات محتوای آب نسبی برگ را توجیه کردند. اثر مستقیم دمای برگ و محتوای آب نسبی برگ بر شاخص کلروفیل برگ منفی (به ترتیب -0.12^{**} و -0.02^*) بود. این دو صفت در مجموع دو درصد از تغییرات شاخص کلروفیل برگ را تبیین کردند. محتوای آب نسبی برگ و حجم ریشه دارای اثر مستقیم مثبت (به ترتیب 0.17^{**} و 0.02^*) و شاخص کلروفیل برگ و وزن خشک ریشه دارای اثر مستقیم منفی (به ترتیب -0.10^{**} و -0.26^{**}) بر پتانسیل اسمزی بودند. این چهار صفت نه درصد از تغییرات پتانسیل اسمزی را توجیه کردند. به نظر می‌رسد عوامل دیگری روی تبیین محتوای آب نسبی برگ، شاخص کلروفیل برگ و نیز پتانسیل اسمزی موثر هستند که در این بررسی مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند. پتانسیل اسمزی اثر مستقیم منفی (-0.24^{**}) بر میزان پرولین داشت. شاخص کلروفیل برگ و محتوای آب نسبی برگ دارای اثر مستقیم مثبت (به ترتیب 0.08^* و 0.33^{**}) بر میزان پرولین بودند. این سه صفت ۱۵ درصد از تغییرات

میزان پرولین را تبیین کردند. وزن خشک ریشه و حجم ریشه دارای اثر مستقیم مثبت (به ترتیب 0.71^{**} و 0.12^{**}) و صفات میزان پرولین، شاخص کلروفیل برگ و پتانسیل اسمزی دارای اثر مستقیم منفی (به ترتیب -0.22^{**} ، -0.08^* و -0.12^{**}) بر وزن خشک بخش هوایی بودند. اما، اثر مستقیم شاخص کلروفیل برگ بر وزن خشک بخش هوایی، ناچیز بود. این پنج صفت ۷۲ درصد از تغییرات وزن خشک بخش هوایی را توجیه کردند. غیرمعمولی دار بودن مقدار کای اسکور ($\chi^2 = 11/194^{ns}$) کارآیی خوب مدل را در تبیین عوامل تاثیرگذار بر وزن خشک بخش هوایی نشان داد.

در شرایط تنش کم‌آبی (شکل ۳)، اثر مستقیم حجم ریشه بر محتوای آب نسبی برگ مثبت (0.15^{**}) و اثر مستقیم وزن خشک ریشه و دمای برگ بر آن منفی (به ترتیب -0.41^{**} و -0.11^{**}) بودند. این سه صفت ۱۲ درصد از تغییرات محتوای آب نسبی برگ را توجیه کردند. اثر مستقیم محتوای آب نسبی برگ بر شاخص کلروفیل برگ مثبت (0.20^{**}) بود. این صفت چهار درصد از تغییرات شاخص کلروفیل برگ را توجیه کرد. شاخص کلروفیل برگ و حجم ریشه دارای اثر مستقیم مثبت (به ترتیب 0.17^{**} و 0.28^{**}) و محتوای آب نسبی برگ و وزن خشک ریشه دارای اثر مستقیم منفی (به ترتیب -0.20^{**} و -0.75^{**}) بر پتانسیل اسمزی بودند. این چهار صفت ۳۳ درصد از تغییرات پتانسیل اسمزی را توجیه کردند.

محتوای نسبی آب برگ دارای اثر مستقیم مثبت (0.05^*) بر میزان پرولین بود. شاخص کلروفیل برگ و پتانسیل اسمزی دارای اثر مستقیم منفی (به ترتیب -0.28^{**} و -0.34^{**}) بر میزان پرولین بودند. این سه صفت در مجموع ۱۷ درصد از تغییرات میزان پرولین را تبیین کردند. این نتایج نشان می‌دهند که با کاهش میزان کلروفیل برگ در اثر تنش کم‌آبی، میزان پرولین برگ افزایش پیدا می‌کند. این کاهش می‌تواند به دلیل تغییر متابولیسم نیتروژن در نتیجه ساخت ترکیباتی مانند پرولین باشد که در تنظیم اسمزی نقش دارند (امینی و

همکاران ۲۰۱۵). حجم ریشه و شاخص کلروفیل برگ دارای اثر مستقیم مثبت (به ترتیب $0/39^{**}$ و $0/05^*$) و

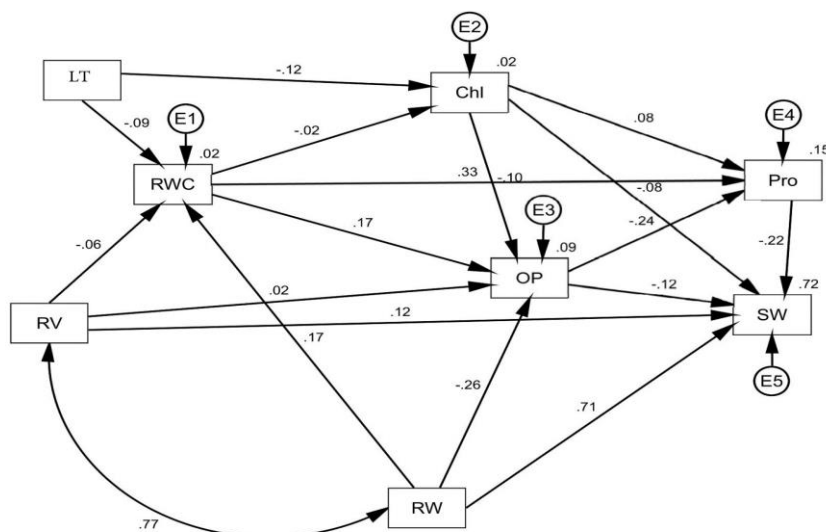
صفات میزان پرولین، وزن خشک ریشه و پتانسیل اسمزی دارای اثر مستقیم منفی (به ترتیب $0/01^*$ ، $0/02^*$ و $0/10^{**}$) بر وزن خشک بخش هوایی بودند. اما، اثر مستقیم شاخص کلروفیل برگ، پرولین و وزن خشک ریشه بر وزن خشک بخش هوایی، ناچیز بود. این پنج صفت در مجموع ۱۷ درصد از تغییرات وزن خشک بخش هوایی را توجیه کردند. به نظر می‌رسد، عوامل دیگری مانند شرایط محیطی در تبیین وزن خشک بخش هوایی دخالت دارند. غیرمعنی‌دار شدن کای اسکور

بیانگر اعتبار مدل کل در تبیین بیوماس است. در دو شرایط عادی و تنش کم آبی اثر مستقیم دمای برگ بر محتوای آب نسبی برگ منفی بود. پس، با افزایش دما، محتوای آب نسبی برگ کاهش و لذا تعرق کم‌تری صورت می‌گیرد. در شرایط عادی وزن خشک ریشه و در شرایط تنش کم آبی حجم ریشه بیش‌ترین اثر مستقیم مثبت را روی وزن خشک بخش هوایی داشتند. چون یکی از راهکارهای گیاه برای مقابله با تنش کم آبی، افزایش توسعه ریشه است. این دو صفت می‌توانند معیارهای مناسبی برای تفکیک ارقام متحمل از حساس باشند.

جدول ۳- ضرایب همبستگی بین صفات مورد مطالعه در ژنوتیپ‌های جو در شرایط عادی (پایین قطر اصلی) و تنش کم آبی (بالای قطر اصلی)

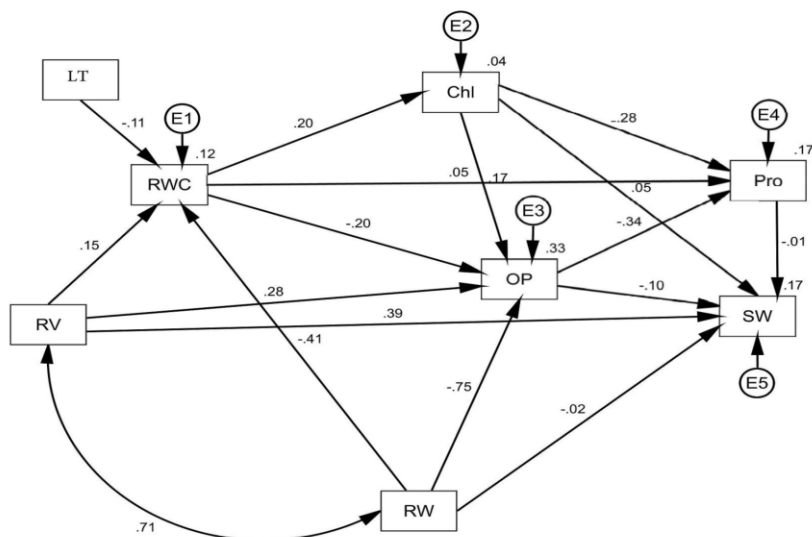
صفت	وزن خشک ریشه	حجم ریشه	وزن خشک بخش هوایی	نسبت وزن خشک ریشه به بخش هوایی	دمای برگ	شاخص کلروفیل	محتوای آب نسبی برگ	پتانسیل اسمزی	میزان پرولین
وزن خشک ریشه	۱	$0/714^{**}$	$0/407^*$	$0/599^{**}$	$0/155^{ns}$	$0/239^{ns}$	$0/425^*$	$0/455^*$	$0/368^{ns}$
حجم ریشه	$0/767^{**}$	۱	$0/400^*$	$0/334^{ns}$	$0/018^{ns}$	$0/188^{ns}$	$0/451^*$	$0/196^{ns}$	$0/316^{ns}$
وزن خشک بخش هوایی	$0/813^{**}$	$0/620^{**}$	۱	$0/428^*$	$0/086^{ns}$	$0/615^{**}$	$0/401^*$	$0/160^{ns}$	$0/149^{ns}$
نسبت وزن خشک ریشه به بخش هوایی	$0/899^{**}$	$0/787^{**}$	$0/539^{**}$	۱	$0/028^{ns}$	$0/101^{ns}$	$0/239^{ns}$	$0/292^{ns}$	$0/128^{ns}$
دمای برگ	$0/150^{ns}$	$0/058^{ns}$	$0/228^{ns}$	$0/040^{ns}$	۱	$0/087^{ns}$	$0/401^*$	$0/652^{**}$	$0/473^*$
شاخص کلروفیل	$0/241^{ns}$	$0/316^{ns}$	$0/758^{**}$	$0/379^*$	$0/123^{ns}$	۱	$0/699^{**}$	$0/004^{ns}$	$0/291^{ns}$
محتوای آب نسبی برگ	$0/665^{**}$	$0/763^{**}$	$0/419^*$	$0/122^{ns}$	$0/466^*$	$0/710^{**}$	۱	$0/037^{ns}$	$0/696^{**}$
پتانسیل اسمزی	$0/645^{**}$	$0/200^{ns}$	$0/274^{ns}$	$0/238^{ns}$	$0/387^*$	$0/157^{ns}$	$0/146^{ns}$	۱	$0/322^{ns}$
میزان پرولین	$0/045^{ns}$	$0/233^{ns}$	$0/132^{ns}$	$0/182^{ns}$	$0/569^{**}$	$0/049^{ns}$	$0/417^*$	$0/176^{ns}$	۱

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



شکل ۲- دیاگرام تجزیه علیت سلسله مراتبی صفات مرتبط با وزن خشک بخش هوایی در ژنوتیپ‌های جو در شرایط عادی بر اساس مدل معادلات ساختاری

LT: دمای برگ، RWC: محتوای آب نسبی برگ، RV: حجم ریشه، RW: وزن خشک ریشه، Chl: شاخص کلروفیل برگ، OP: پتانسیل اسمزی، Pro: میزان پرولین، SW: وزن خشک بخش هوایی؛ اعداد کنار سر پیکان‌ها درصد توجیه تغییرات متغیرهای وابسته (معلول) را توسط متغیرهای مستقل (علت) نشان می‌دهد.



شکل ۳- دیاگرام تجزیه علیت سلسله مراتبی صفات مرتبط با وزن خشک بخش هوایی در ژنوتیپ‌های جو تحت شرایط تنش کم‌آبی بر اساس مدل معادلات ساختاری

LT: دمای برگ، RWC: محتوای آب نسبی برگ، RV: حجم ریشه، RW: وزن خشک ریشه، Chl: شاخص کلروفیل برگ، OP: پتانسیل اسمزی، Pro: میزان پرولین، SW: وزن خشک بخش هوایی؛ اعداد کنار سر پیکان‌ها درصد توجیه تغییرات متغیرهای وابسته (معلول) را توسط متغیرهای مستقل (علت) نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به نتایج این مطالعه، تنوع ژنتیکی بالایی از نظر صفات فیزیولوژیکی و ریشه بین ژنوتیپ‌های جو وجود داشت که می‌تواند در برنامه‌های اصلاحی مورد بهره‌برداری قرار گیرد. تنش کم‌آبی به صورت قطع آبیاری در مرحله پنجه‌زنی برای ژنوتیپ‌های مورد مطالعه موجب کاهش میزان کلیه صفات مورد مطالعه به جز نسبت وزن خشک ریشه به بخش هوایی، دمای برگ و میزان پرولین شد. بر اساس مقایسه میانگین‌ها، ژنوتیپ‌های ۲۰، ۳، ۶، ۱۲ و ۱۰ در دو شرایط عادی و تنش کم‌آبی دارای میانگین بیشتری از نظر اکثر صفات بودند و به عنوان ژنوتیپ‌های مطلوب شناسایی شدند. همچنین این ژنوتیپ‌ها از راه کنترل خسارت اکسیداتیو و جلوگیری از تخریب غشا نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها محتوای آبی نسبی برگ و میزان پرولین بیشتری داشتند. از این ژنوتیپ‌ها می‌توان در برنامه‌های اصلاحی

برای بهبود صفات ریشه و فیزیولوژیک استفاده کرد. افزون بر این، به نظر می‌رسد که محتوای آب نسبی برگ و تجمع پرولین به عنوان شاخص‌های فیزیولوژیک تحمل به تنش کم‌آبی می‌توانند توسط به‌نژادگران برای گزینش ارقام متحمل به تنش کم‌آبی در جو مورد استفاده قرار گیرند. براساس نتایج تجزیه علیت سلسله مراتبی نیز صفات مرتبط با وزن خشک بخش هوایی در ژنوتیپ‌های جو بر اساس مدل معادلات ساختاری در شرایط عادی وزن خشک ریشه و در شرایط تنش کم‌آبی حجم ریشه بیش‌ترین اثر مستقیم مثبت را روی وزن خشک بخش هوایی داشتند.

سپاسگزاری

بدینوسیله از قطب علمی اصلاح مولکولی غلات دانشگاه تبریز برای حمایت از این تحقیق سپاسگزاری می‌شود.

منابع مورد استفاده

- Abdelaal KAA, Attia KA, Alamery SF, El-Afry MM, Ghazy AI, Tantawy DS, Al-Doss AA, El-Shawy ESE, M. Abu-Elsaoud A and Hafez YM. 2020. Exogenous application of proline and salicylic acid can mitigate the injurious impacts of drought stress on barley plants associated with physiological and histological characters. Sustainability, 12(5): 1736. <https://doi.org/10.3390/su12051736>
- Afshari-Behbahanzadeh S, Akbari GA, Shahbazi M and Alahdadi I. 2014. Relations between barley root traits and osmotic adjustment under terminal drought stress. Journal of Agricultural Science, 6(7): 112-119. <https://doi.org/10.5539/jas.v6n7p112>
- Ahmed IM, Dai H, Zheng W, Cao F, Zhang G, Sun D and Wu F. 2013. Genotypic differences in physiological characteristics in the tolerance to drought and salinity combined stress between Tibetan wild and cultivated barley. Plant Physiology and Biochemistry, 63: 49-60. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.11.004>
- Amini S, Ghobadi C and Yamchi A. 2015. Proline accumulation and osmotic stress: an overview of P5CS gene in plants. Journal of Plant Molecular Breeding, 3(2): 44-55. <https://doi.org/10.22058/JPMB.2015.17022>
- Amtmann A, Bennett MJ and Henry A. 2022. Root phenotypes for the future. Plant, Cell & Environment, 45(3): 595-601. <https://doi.org/10.1111/pce.14269>
- Atta BM, Mahmood T and Trethowan RM. 2013. Relationship between root morphology and grain yield of wheat in north-western NSW, Australia. Australian Journal of Crop Science, 7(13): 2108-2115.

- Barrs HD and Weatherley PE. 1962. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. *Australian Journal of Biological Sciences*, 15(3): 413-428. <http://dx.doi.org/10.1071/BI9620413>
- Basal H, Bebeli P, Smith CW and Thaxton P. 2003. Root growth parameters of converted race stocks of upland cotton and two BC2F2 populations. *Crop Science*, 43(6): 1983-1988. <https://doi.org/10.2135/cropsci2003.1983>
- Blum A, Mayer J and Gozlan G. 1982. Infrared thermal sensing of plant canopies as a screening technique for dehydration avoidance in wheat. *Field Crops Research*, 5: 137-146. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(82\)90014-4](https://doi.org/10.1016/0378-4290(82)90014-4)
- Carter Jr JE and Patterson RP. 1985. Use of relative water content as a selection tool for drought tolerance in soybean. In: *Agronomy Abstracts*, CSA, Madison, WI, USA, p. 77.
- Chimenti CA, Pearson J and Hall AJ. 2002. Osmotic adjustment and yield maintenance under drought in sunflower. *Field Crops Research*, 75(2-3): 235-246. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(02\)00029-1](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00029-1)
- Farooq M, Wahid A, Kobayashi N, Fujita D and Basra SMA. 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1): 185-212. <https://doi.org/10.1051/agro:2008021>
- Feroun M, Srhiaou N, Bouhraoua S, El Ghachtouli N and Louahlia S. 2023. Physiological and biochemical changes in Moroccan barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars submitted to drought stress. *Heliyon*, 9(2): e13643. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13643>
- Gupta A, Rico-Medina A and Caño-Delgado AI. 2020. The physiology of plant responses to drought. *Science*, 368(6488): 266-269. <https://doi.org/10.1126/science.aaz7614>
- Hebbache H, Benkherbache N, Mefti M and Bouchakour M. 2021. Effect of water deficit stress on physiological traits of some Algerian barley genotypes. *Journal of Central European Agriculture*, 22(2): 295-304. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/22.2.3073>
- Hosseini Salekdeh G, Reynolds M, Bennett J and Boyer J. 2009. Conceptual framework for drought phenotyping during molecular breeding. *Trends in Plant Science*, 14(9): 488-496. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.07.007>
- Istanbuli T, Baum M, Touchan H and Hamwieh A. 2020. Evaluation of morpho-physiological traits under drought stress conditions in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Photosynthetica*, 58(4): 1059-1067. <https://doi.org/10.32615/ps.2020.041>
- James RA, Rivelli AR, Munns R and von Caemmerer S. 2002. Factors affecting CO₂ assimilation, leaf injury and growth in salt-stressed durum wheat. *Functional Plant Biology*, 29(12): 1393-1403. <https://doi.org/10.1071/FP02069>
- Klaus A, Marcon C and Hochholdinger F. 2024. Spatiotemporal transcriptomic plasticity in barley roots: unravelling water deficit responses in distinct root zones. *BMC Genomics*, 25: 79. <https://doi.org/10.1186/s12864-024-10002-0>
- Kramer-Walter KR, Bellingham PJ, Millar TR, Smissen RD, Richardson SJ and Laughlin DC. 2016. Root traits are multidimensional: specific root length is independent from root tissue density and the plant economic spectrum. *Journal of Ecology*, 104(5): 1299-1310. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12562>
- Top of Form
- Bottom of Form
- Liang X, Zhang L, Natarajan SK and Becker DF. 2013. Proline mechanisms of stress survival. *Antioxidants & Redox Signaling*, 19(9): 998-1011. <https://doi.org/10.1089/ars.2012.5074>

- Liu H-S, Li F-M and Xu H. 2004. Deficiency of water can enhance root respiration rate of drought-sensitive but not drought-tolerant spring wheat. *Agricultural Water Management*, 64(1): 41-48. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(03\)00143-4](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(03)00143-4)
- Maqbool S, Hassan MA, Xia X, York LM, Rasheed A and He Z. 2022. Root system architecture in cereals: progress, challenges and perspective. *The Plant Journal*, 110(1): 23-42. <https://doi.org/10.1111/tpj.15669>
- McManus MT, Bielecki RL, Caradus JR and Barker DJ. 2000. Pinitol accumulation in mature leaves of white clover in response to a water deficit. *Environmental and Experimental Botany*, 43(1): 11-18. [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(99\)00041-6](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(99)00041-6)
- Moghaieb REA, Saneoka H and Fujita K. 2004. Effect of salinity on osmotic adjustment, glycinebetaine accumulation and the betaine aldehyde dehydrogenase gene expression in two halophytic plants, *Salicornia europaea* and *Suaeda maritima*. *Plant Science*, 166(5): 1345-1349. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.01.016>
- Moualeu-Ngangué D, Dolch C, Schneider M, Léon J, Uptmoor R and Stützel H. 2020. Physiological and morphological responses of different spring barley genotypes to water deficit and associated QTLs. *PLoS One*, 15(8): e0237834. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237834>
- MSTAT-C. 1991. A Software program for the design, management and analysis of agronomic research experiments. Michigan State University, East Lansing, USA.
- Naghavi MR, Moghaddam M, Toorchi M and Shakiba MR. 2016. Evaluation of spring wheat cultivars for physiological, morphological and agronomic traits under drought stress. *Journal of Crop Breeding*, 8(18): 64-77. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1010.29252/jcb.8.18.64>
- Palta JA, Chen X, Milroy SP, Rebetzke GJ, Dreccer MF and Watt M. 2011. Large root systems: are they useful in adapting wheat to dry environments? *Functional Plant Biology*, 38(5): 347-354. <https://doi.org/10.1071/FP11031>
- Reinert S, Kortz A, Léon J and Naz AA. 2016. Genome-wide association mapping in the global diversity set reveals new QTL controlling root system and related shoot variation in barley. *Frontiers in Plant Science*, 7: 1061. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01061>
- Reynolds MP, Singh RP, Ibrahim A, Ageeb OAA, Larqué-Saavedra A and Quick JS. 1998. Evaluating physiological traits to complement empirical selection for wheat in warm environments. *Euphytica*, 100: 85-94. <https://doi.org/10.1023/A:1018355906553>
- Saeidi M and Abdoli M. 2015. Effect of drought stress during grain filling on yield and its components, gas exchange variables, and some physiological traits of wheat cultivars. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17(4): 885-898.
- Sayed OH. 2003. Chlorophyll fluorescence as a tool in cereal crop research. *Photosynthetica*, 41(3): 321-330. <https://doi.org/10.1023/B:PHOT.0000015454.36367.e2>
- Shaban M, Mansourifar S, Ghobadi M and Ashrafi Parchin R. 2012. Effect of drought stress and starter nitrogen fertilizer on root characteristics and seed yield of four chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes. *Seed and Plant Production*, 27(4): 451-470. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/SPPJ.2017.110448>
- Shahbandeh M. 2023. World barley production from 2008/2009 to 2022/2023. <https://www.statista.com/statistics/271973/world-barley-production-since-2008/>
- Shanazari M, Golkar P and Mirmohammady Maibody AM. 2018. Effects of drought stress on some agronomic and bio-physiological traits of *Triticum aestivum*, *Triticale*, and *Tritipyrum* genotypes. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(14): 2005-2018. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1472377>

- Siddiqui MN, Léon J, Naz AA and Ballvora A. 2021. Genetics and genomics of root system variation in adaptation to drought stress in cereal crops. *Journal of Experimental Botany*, 72(4): 1007-1019. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa487>
- Středa T, Dostál V, Horáková V and Chloupek O. 2012. Effective use of water by wheat varieties with different root system sizes in rain-fed experiments in Central Europe. *Agricultural Water Management*, 104: 203-209. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.12.018>
- Taiz L and Zeiger E. 2002. *Plant physiology*. 3rd edition. Sinauer Associates, Inc. Publishers, Sunderland, MA, USA.
- Vaezi B, Bavei V and Shiran B. 2010. Screening of barley genotypes for drought tolerance by agro-physiological traits in field condition. *African Journal of Agricultural Research*, 5(9): 881-892. <https://doi.org/10.5897/AJAR09.294>
- Valifard M, Moradshahi A and Kholdebarin B. 2012. Biochemical and physiological responses of two wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars to drought stress applied at seedling stage. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 14(7): 1567-1578.
- Volkmar KM. 1997. Water stressed nodal roots of wheat: effects on leaf growth. *Australian Journal of Plant Physiology*, 24(1): 49-56. <https://doi.org/10.1071/PP96063>
- Wasson AP, Richards RA, Chatrath R, Misra SC, Sai Prasad SV, Rebetzke GJ, Kirkegaard JA, Christopher J and Watt M. 2012. Traits and selection strategies to improve root systems and water uptake in water-limited wheat crops. *Journal of Experimental Botany*, 63(9): 3485-3498. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers111>
- Zhang Z, Guo L, Sun H, Wu J, Liu L, Wang J, Wang B, Wang Q, Sun Z and Li D. 2023. Melatonin increases drought resistance through regulating the fine root and root hair morphology of wheat revealed with RhizoPot. *Agronomy*, 13(7): 1881. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071881>