

Research Paper

Biometric Analysis of Some Physiological Traits Related to Stem Rust Disease Resistance in Elit Wheat Lines

Armin Vahed Rezaei¹, Ali Asghari² , Majid Norouzi³, Saied Aharizad⁴,
Ramin Roohparvar⁵ and Ashkboos Amini⁶

- 1- Ph.D. Candidate of Genetic and Plant Breeding, Department of Agronomy and Plant Breeding, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
2- Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran,
(Corresponding author: a_asghari@uma.ac.ir)
3- Associate Professor, Department of Biotechnology and Plant Breeding, University of Tabriz, Tabriz, Iran
4- Professor, Department of Biotechnology and Plant Breeding, University of Tabriz, Tabriz, Iran
5- Assistant Professor, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran, Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, East Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Tabriz, Iran
6- Associate Professor, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

Received: 4 September, 2023

Accepted: 28 December, 2023

Extended Abstract

Background: Black rust is an important fungal disease that widely affects the quantity and quality of wheat in many regions of the world. The damage caused by black rust disease can be more than other pathogens in wheat, and its importance is such that millions of hectares of healthy fields with high production potential can be destroyed completely in less than one month. Resistance is one of the genetic characteristics of the host that plant breeders use to produce cultivars. Lines that are recognized as resistant in a survey can be used as a source of resistance in another breeding program. Genetic resistance reduces or eliminates the consumption of chemical poisons, and as a result, it is considered the most economical and healthiest method of combating plant diseases. Accordingly, 24 bread wheat genotypes including eight cultivars and 16 promising lines were studied to statistically investigate some physiological markers related to resistance to black rust disease. In this study, two varieties MV-17 (disease-resistant variety) and Morocco (disease susceptible variety) were selected as controls due to their different behaviors in resistance to wheat black rust.

Methods: This experiment was carried out under the conditions of infection and non-infection with the native race TKTTF of wheat black rust disease and in a randomized complete block design with four replications in the greenhouse of the Research Institute of Plant Breeding and Seed Preparation in 2019. The measured and recorded physiological traits were leaf relative water content (RWC), cell membrane stability (MP), electrical conductivity (EC), chlorophyll content (SPAD), and chlorophyll fluorescence.

Results: At the probability level of 1%, the genotypes were significantly different, and the interaction effect of disease x genotype was significant for all traits, which indicates the non-homogeneous difference of the genotypes for the studied traits in two infection and non-infection conditions. For all measured traits, there was a significant difference between two different levels of disease infection, which shows the effect of the black rust pathogen on RWC, membrane permeability, EC, chlorophyll concentration, primary fluorescence, maximum fluorescence, variable fluorescence, and photochemical efficiency of photosystem II. The results showed that pathogen contamination increased RWC, chlorophyll concentration, membrane permeability, initial fluorescence, maximum fluorescence, variable fluorescence, and photochemical efficiency of photosystem II while it decreased EC. Based on all studied physiological traits, MV-17, C-98-17, C-98-11, C-98-5, C-98-12, C-98-18, C-98-16, C-98-3, and CD-94-9 were identified as the genotypes with more resistance to the disease agent. There was a high correlation between initial fluorescence, maximum fluorescence, variable fluorescence, photochemical efficiency of photosystem II, membrane permeability, and EC in response to stem rust. Based on Ward's cluster analysis and detection function analysis, the genotypes 8, 7, 2, and 7 were divided into four separate groups in the conditions of infection with black rust. In the condition of no disease contamination, 6, 9, 4, and 5 genotypes were clustered in four separate groups.

Conclusion: This study showed the effect of East Azerbaijan stem rust TKTTF race on the physiological traits of winter cultivars and lines of wheat. This race caused changes in the studied



physiological traits in both experimental conditions. Therefore, it can be concluded that the resistant lines are more resistant to the disease than the commercial variety and are recommended to be used as selected lines in breeding programs. According to the results of the grouping of genotypes and the placement of valuable genotypes in terms of the traits RWC, membrane permeability index, chlorophyll content, initial fluorescence, maximum fluorescence, variable fluorescence, photochemical efficiency, photosystem II, and EC in the first and second groups in the conditions of disease infection and non- infection, the results of cluster analysis showed a good relationship with the results of variance analysis and comparing the averages of the studied traits. The results showed the diversity of physiological traits measured in response to black rust disease. Therefore, possible genotypes with resistance to this pathogen can be identified by using the changes in these traits. Given the relationship between the results obtained from the evaluation of physiological and pathological traits, the physiological traits may be used as indicators related to resistance to wheat black rust disease. In other words, the physiological indicators used could detect the existence of diversity and response to resistance to black rust disease, and they can be used as physiological indicators related to resistance to black rust disease of wheat. Examining different traits in different environmental conditions has shown the way the genotypes act and respond to the pathogen changes with the change in environmental conditions. For this purpose, these studies should be carried out over several years and in different environments. It is also recommended to carry out similar studies using agricultural traits at the sorghum plant stage and biochemical traits related to the disease.

Keywords: Cluster Analysis, Correlation Analysis, Physiological Traits, Stem Rust, Wheat

How to Cite This Article: Vahed Rezaei, A., Asghari, A., Norouzi, M., Aharizad, S., Roohparvar, R., & Amini, A. (2024). Biometric Analysis of Some Physiological Traits Related to Stem Rust Disease Resistance in Elit Wheat Lines. *J Crop Breed*, 16(1), 140-152. DOI: [10.61186/cb.16.49.140](https://doi.org/10.61186/cb.16.49.140)

مقاله پژوهشی

تجزیه بیومتریکی برخی صفات فیزیولوژیک مرتبط با مقاومت به بیماری زنگ سیاه در
لاین‌های امید بخش گندمآرمین واحدرضائی^۱، علی اصغری^۲، مجید نوروزی^۳، سعید اهری‌زاد^۴، رامین روح‌پرور^۵ و اشکبوس امینی^۶

- ۱- دانشجوی دکتری تخصصی ژنتیک و به‌نژادی گیاهی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی
۲- استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، (نویسنده مسوول: ali_asghari@yahoo.com)
۳- دانشیار، گروه به‌نژادی و بیوتکنولوژی گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
۴- استاد، گروه به‌نژادی و بیوتکنولوژی گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
۵- استادیار، موسسه تحقیقات اصلاح تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران و استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران
۶- دانشیار، موسسه تحقیقات اصلاح تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۶/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۷

صفحه: ۱۴۰ تا ۱۵۲

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: زنگ سیاه یکی از بیماری‌های مهم قارچی می‌باشد که به‌طور گسترده کمیت و کیفیت گندم مناطق متعدد جهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. خسارت‌های ایجاد شده توسط عامل بیماری زنگ سیاه می‌تواند بیش از سایر عوامل بیماری‌زا در گندم باشد و اهمیت آن به‌نحوی است که میلیون‌ها هکتار از مزارع سالم با پتانسیل بالای تولید محصول را می‌تواند در کمتر از یک ماه به‌طور کامل تخریب نماید. مقاومت از خصوصیات ژنتیکی میزبان است که متخصصین اصلاح نباتات از آن برای تولید ارقام استفاده می‌کنند. از لاین‌هایی که در یک بررسی مقاوم تشخیص داده می‌شوند، می‌توان در برنامه به‌نژادی دیگر به‌عنوان منبع مقاومت استفاده کرد. مقاومت ژنتیکی میزان مصرف سموم شیمیایی را کاهش داده و یا حذف می‌کند و در نتیجه به‌عنوان اقتصادی‌ترین و سالم‌ترین روش مبارزه با بیماری‌های گیاهی مطرح است. بر همین اساس به‌منظور بررسی آماری برخی صفات فیزیولوژیک نشانگر و مرتبط با مقاومت به بیماری زنگ سیاه، ۲۴ ژنوتیپ گندم نان شامل ۸ رقم و ۱۶ لاین امید بخش مورد مطالعه قرار گرفتند. در این پژوهش دو رقم MV-17 (رقم مقاوم به بیماری) و Morocco (رقم حساس به بیماری) به‌دلیل رفتار متفاوت در مقاومت به زنگ سیاه گندم به‌عنوان شاهد در این مطالعه انتخاب شدند.

مواد و روش‌ها: این آزمایش در سال ۱۳۹۹ در گلخانه موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر تحت شرایط آلودگی و عدم آلودگی به نژاد بومی TKTTF بیماری زنگ سیاه گندم و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار به اجرا درآمد. صفات فیزیولوژیک شامل محتوای نسبی آب برگ (RWC)، پایداری غشا سلولی (MP)، هدایت الکتریکی (EC)، میزان کلروفیل (SPAD) و فلورسانس کلروفیل مورد اندازه‌گیری و یادداشت‌برداری قرار گرفت.

یافته‌ها: در سطح احتمال ۱٪ تفاوت معنی‌داری بین ژنوتیپ‌ها مشاهده شد و اثر متقابل بیماری × ژنوتیپ برای تمامی صفات معنی‌دار بود که نشان‌دهنده عدم همسانی اختلاف ژنوتیپ‌ها برای صفات مورد مطالعه در دو شرایط آلودگی و عدم آلودگی به بیماری می‌باشد. همچنین، برای تمام صفات اندازه‌گیری شده بین دو سطح مختلف آلودگی به بیماری اختلاف معنی‌دار وجود داشت که نشان از تأثیر پاتوژن زنگ سیاه بر محتوای نسبی آب برگ، میزان نفوذپذیری غشا، هدایت الکتریکی، غلظت کلروفیل، فلورسانس اولیه، فلورسانس بیشینه، فلورسانس متغیر و کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II دارد. نتایج نشان داد که آلودگی به پاتوژن باعث افزایش محتوای نسبی آب، غلظت کلروفیل، میزان نفوذپذیری غشا، فلورسانس اولیه، فلورسانس بیشینه، فلورسانس متغیر، کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II و کاهش هدایت الکتریکی می‌شود. بر اساس تمامی صفات فیزیولوژیک مورد مطالعه ژنوتیپ‌های MV-17، C-98-5، C-98-11، C-98-17، C-98-12، C-98-16، C-98-3 و CD-94-9 به‌عنوان ژنوتیپ‌هایی که مقاومت بیشتری نسبت به عامل بیماری از خود نشان دادند شناسایی شدند. همبستگی بالا بین فلورسانس اولیه، فلورسانس بیشینه، فلورسانس متغیر، کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II، میزان نفوذپذیری غشا و هدایت الکتریکی در پاسخ به زنگ ساقه وجود داشت. براساس تجزیه خوشه‌ای به‌روش Ward و تجزیه تابع تشخیص، در شرایط آلودگی و عدم آلودگی به زنگ سیاه ژنوتیپ‌ها به چهار گروه مجزا تقسیم شدند که در شرایط آلودگی به بیماری به‌ترتیب ۸، ۷، ۲ و ۷ ژنوتیپ در چهار گروه قرار گرفتند. در حالی که، در شرایط عدم آلودگی به بیماری به‌ترتیب ۶، ۹، ۴ و ۵ ژنوتیپ در چهار گروه مجزا خوشه‌بندی شدند.

نتیجه‌گیری: این مطالعه تأثیر نژاد TKTTF زنگ ساقه آذربایجان شرقی بر صفات فیزیولوژیک ارقام زمستانه و لاین‌های امید بخش گندم را نشان داد. این نژاد باعث ایجاد تغییرات در صفات فیزیولوژیک مورد مطالعه در هر دو شرایط آزمایشی شد که از این خروجی می‌توان نتیجه گرفت که لاین‌های مقاوم نسبت به رقم تجاری مقاوم به بیماری بوده و توصیه می‌شود به‌عنوان لاین‌های انتخابی در برنامه‌های اصلاحی استفاده شود. شایان ذکر است با توجه به نتایج گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها و نیز قرار گرفتن ژنوتیپ‌های با ارزش از نظر صفات محتوای نسبی آب، شاخص نفوذپذیری غشا، میزان کلروفیل، فلورسانس اولیه، فلورسانس بیشینه، فلورسانس متغیر، میزان کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II و هدایت الکتریکی در گروه‌های اول و دوم در شرایط آلودگی و عدم آلودگی به بیماری، نتیجه‌گیری شد که نتایج تجزیه خوشه‌ای رابطه خوبی با نتایج تجزیه واریانس و مقایسه میانگین صفات مورد مطالعه داشت. نتایج حاصل نشان داد که صفات فیزیولوژیک اندازه‌گیری شده در پاسخ به بیماری زنگ سیاه دارای تنوع می‌باشند. بنابراین، می‌توان با استفاده از تغییرات این صفات، ژنوتیپ‌های احتمالی با مقاومت در برابر این پاتوژن را شناسایی کرد. همچنین با توجه به ارتباط میان نتایج حاصل از ارزیابی صفات فیزیولوژیک و پاتولوژیک، امکان استفاده از صفات فیزیولوژیک به‌عنوان نشانگرهای مرتبط با مقاومت به بیماری زنگ سیاه گندم بهره‌مند شد. به‌عبارت دیگر، نشانگرهای فیزیولوژیک مورد استفاده قادر به تشخیص وجود تنوع و پاسخ به مقاومت نسبت به بیماری زنگ سیاه بود و می‌توان از آن‌ها به‌عنوان نشانگرهای فیزیولوژیک مرتبط با مقاومت به بیماری زنگ سیاه گندم استفاده نمود. بررسی صفات مختلف در شرایط محیطی مختلف نشان داده است که با تغییر شرایط محیطی، نحوه عمل و پاسخ ژنوتیپ‌ها به پاتوژن تغییر می‌کند. برای این کار باید این مطالعات در چند سال و محیط‌های مختلف انجام شود. همچنین توصیه می‌شود آزمایش فوق با استفاده از صفات زراعی در مرحله گیاه بالغ و نیز صفات بیوشیمیایی مرتبط با بیماری نیز اجرا گردد.

واژه‌های کلیدی: تجزیه همبستگی، تجزیه خوشه‌ای، زنگ سیاه، صفات فیزیولوژیک، گندم

مقدمه

جمعیت جهان را فراهم می‌کند. پیش‌بینی می‌شود که کل مصرف جهانی گندم در سال‌های ۲۰۲۳ تقریباً در ۷۸۰ میلیون تن ثابت بماند که تنها ۰/۱ درصد نسبت به سال‌های ۲۰۲۲

گندم با تولید ۷۷۷ میلیون تن در سال ۲۰۲۲ به‌عنوان یکی از غلات مهم شناخته می‌شود که غذای بیش از یک سوم

آب و عناصر غذایی، کاهش رشد ریشه، ورس و شکستن ساقه وارد می‌شود. زنگ سیاه، بسته به زمان شروع حمله و شدت حمله می‌تواند شدت‌های مختلفی از چروکیدگی دانه‌ها و کاهش عملکرد را ایجاد کند. ورس گیاه در نتیجه زنگ سیاه مشکلاتی را در برداشت محصول به‌بار می‌آورد و آلودگی شدید در مرحله اولیه رشد گیاه می‌تواند کاهش کل محصول را در بر داشته باشد (Knott, 2012). بر اساس نتایج آزمایشات سینگ و همکاران (Singh et al., 2011) زنگ سیاه با ایجاد جوش‌های تاول مانند بر روی ساقه، غلاف برگ، برگ، سنبله و ریشک‌ها ظاهر می‌شود و این جوش‌ها زمانی اهمیت پیدا می‌کنند که محصول به‌ظاهر سالم چند هفته قبل از برداشت در اثر سیاه شدن و شکستگی ساقه و چروکیدگی دانه از بین می‌رود. رولفز و همکاران (Roelfs, 1992) با انجام آزمایشی گزارش کردند که زنگ سیاه گندم باعث ایجاد سنبله‌های عقیم، پوک و فاقد دانه می‌شود و علت گسترش بیماری زنگ ساقه در سال‌های شیوع آن مربوط به باران‌های بهاره و مساعد بودن شرایط جوی است. گیاهان در پاسخ به تنش‌های زیستی، با اتخاذ برخی تغییرات رشدی و فیزیولوژیک، با شرایط نامطلوب انطباق پیدا می‌کنند (Ghosh et al., 2017) و مجموعه‌ای از فرایندهای مولکولی را برای درک سریع شرایط موجود و سازگاری با محیط تکامل می‌دهند (Liu et al., 2019). نقش پروتئین‌ها در پاسخ به این تنش‌های زیستی حیاتی است. چراکه، پروتئین‌ها به‌طور مستقیم با تنظیم خصوصیات فیزیولوژیکی در شکل‌گیری فنوتیپ‌های جدید برای سازگاری با این تغییرات شرکت دارند و نقش مهمی در مکانیسم‌های سلولی و حفظ هموستازی سلولی ایفا می‌کنند (Ingolia, 2014). تنش‌های زیستی به‌عنوان یکی از تنش‌های مهم باعث ایجاد تحولات عمیق در پیام‌رسانی تحت پوشش شبکه پروتئین، ذخیره پروتئین، متابولیسم پروتئین، انتقال پروتئین می‌شوند و تاثیر به‌سزایی بر متابولیسم انرژی (شامل گلیکولیز، چرخه کربس، بیوسنتز ATP و فتوسنتز)، پروتئین‌های درگیر در فعالیت‌های چارپون‌ها و تاخوردگی‌ها و سایر پروتئین‌های محافظ (از جمله LEA و PR)، آنزیم‌های مهار کننده ROS و پروتئین‌های موثر بر تنظیم رشد و نمو گیاه دارند (Kosová et al., 2014). بر همین اساس، از آنجایی که پروتئین‌ها تنظیم‌کننده اصلی پاسخ سلولی هستند، تحقیقات در مورد تغییرات پروتئوم در هنگام القای تنش و همچنین بازیابی آن، می‌تواند اطلاعات مهمی در واکنش گیاهان با عوامل ایجاد کننده تنش ارائه دهد (Ghosh et al., 2017). بر همین اساس، با توجه به عدم اطلاعات کافی در رابطه با مقاومت ارقام گندم کشور نسبت به زنگ سیاه و تاثیر آن بر صفات فیزیولوژیک، این پژوهش با هدف دستیابی به اطلاعاتی درباره تاثیر بیماری زنگ سیاه بر روی صفات فیزیولوژیک گندم، تعیین روابط بین صفات مورد مطالعه، ارزیابی تنوع ژنتیکی و گروه‌بندی ارقام و شناسایی منابع ژنتیکی مقاوم در شرایط آلودگی و عدم آلودگی به زنگ سیاه انجام گردید.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در سال ۱۳۹۹ در گلخانه تحقیقاتی موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر اجرا گردید. در این پژوهش ۲۴ ژنوتیپ گندم نان پاییزه شامل ۸ رقم و ۱۶ لاین امیدبخش

افزایش یافته و اندکی کمتر از روند ۱۰ ساله است (Christoforidou et al., 2023). بنابراین، تخمین زده شده است که برای تأمین نیاز غذایی ۹/۶ بیلیون نفر از جمعیت جهان در سال ۲۰۵۰ (I. J. Hak, 2018)، اصلاح‌گران گندم با چالش عظیمی در جهت افزایش عملکرد و پایداری آن، بهبود کیفیت، مقاومت به تنش‌های زیستی و غیرزیستی و در نهایت افزایش بهره‌وری ژنتیکی روبرو خواهند بود (Winfield et al., 2018). در این راستا، برای دستیابی به افزایش تولید جهانی گندم مورد نیاز برای تغذیه جمعیت در حال رشد، یکی از عوامل مهمی که نیازمند توجه می‌باشد، کاهش تلفات حاصل از پاتوژن‌های قارچی است که به‌طور گسترده‌ای در حال گسترش می‌باشند (Singh et al., 2015) و تاثیر بسزایی در کاهش عملکرد گندم دارند (Figueroa et al., 2018). در بین این پاتوژن‌های قارچی، زنگ سیاه یا زنگ ساقه با عامل قارچی *Puccinia graminis* f. sp. *Tritici* از بیماری‌های مهم و خسارت‌زا در گندم به‌شمار می‌رود که به کرات سبب بروز اپیدمی و کاهش شدید تولید جهانی گندم شده است (Nazari et al., 2009). بیماری زنگ سیاه دارای گسترش جغرافیایی بسیار وسیعی است و به‌طور تاریخی یکی از مشکلات عمده گندم‌کاران در آفریقا، خاورمیانه، مناطق جنوب و جنوب شرق آسیا، استرالیا، اروپا و اکثر مناطق آمریکای شمالی و جنوبی بوده است (Bhattacharya, 2017; Lewis et al., 2018; Olivera et al., 2015; Firpo et al., 2017). مقاومت از خصوصیات ژنتیکی میزبان است که متخصصین اصلاح نباتات از آن برای تولید ارقام استفاده می‌کنند. از لاین‌هایی که در یک بررسی مقاوم تشخیص داده می‌شوند، می‌توان در برنامه به‌نژادی دیگر به‌عنوان منبع مقاومت استفاده کرد. مقاومت ژنتیکی میزان مصرف سموم شیمیایی را کاهش داده و یا حذف می‌کند و در نتیجه به‌عنوان اقتصادی‌ترین و سالم‌ترین روش مبارزه با بیماری‌های گیاهی مطرح است (Roelfs, 1992). در طی چند دهه اخیر، مشکل زنگ سیاه گندم به‌علت استفاده از منابع مقاومت ژنتیکی کاهش یافته است و این امر به‌ویژه از طریق شناسایی و نقشه‌یابی پنجاه ژن مقاومت به زنگ سیاه در گندم محقق شده است (McIntosh et al., 2013). با این وجود، قارچ‌های عامل زنگ سیاه دارای نژادهای فیزیولوژیکی مختلفی است که در طی زمان با تغییر در بیماری‌زایی توانایی آلوده‌سازی ارقام جدید را کسب می‌کنند. UG99 نمونه‌ای از نژادهای مخرب زنگ سیاه است که برای اولین بار از کشور اوگاندا گزارش شد که برای ژن مقاومت *Sr31* که بیش از ۴۰ سال مقاومت گندم به این بیماری را حفظ کرده بود، بیماری‌زایی داشت (Pretorius et al., 2000). در سال‌های ۲۰۰۶ فقط ۵ درصد ارقام کشت شده در ۱۸ کشور آفریقایی و آسیایی ارقام مقاوم بودند و ۵۴ درصد از ارقام کشت شده عدم مقاومت به این نژاد از زنگ سیاه را از خود نشان دادند (Singh et al., 2008). از این‌رو، تهیه مداوم ارقام جدید پر محصول و مقاوم به زنگ سیاه ضروری است و بر همین اساس نیز سالانه ژنوتیپ‌های زیادی برای ارزیابی مقاومت نسبت به زنگ سیاه مورد بررسی قرار می‌گیرد. خسارت به گیاهان توسط زنگ سیاه به‌وسیله از دست رفتن بخش‌های فتوسنتز کننده، بازداری انتقال

گذشت دو هفته از آلودگی ژنوتیپ‌ها توسط عامل بیماری، ارزیابی صفات فیزیولوژیک شامل محتوای نسبی آب برگ (RWC)، نفوذپذیری نسبی غشاء (MP)، هدایت الکتریکی (EC)، غلظت کلروفیل و فلورسانس کلروفیل صورت گرفت. محتوای نسبی آب برگ به‌روش ریچ (Ritchie et al., 1990) اندازه‌گیری شد. در این روش انتهایی‌ترین و جوان‌ترین بافت توسعه یافته انتخاب و نمونه‌برداری شد و نمونه‌های انتخابی در درون یخ قرار داده شد و سریعاً به آزمایشگاه منتقل گردید. از هر نمونه به تعداد ۵ دیسک برگی با استفاده از پانچ تهیه شد و بلافاصله توزین گردید. سپس، دیسک‌های برگی در داخل لوله آزمایش حاوی آب مقطر قرار داده شد و به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. پس از ۲۴ ساعت اندازه‌گیری وزن اشباع دیسک‌های برگی صورت گرفت. بعد از اندازه‌گیری وزن اشباع، دیسک‌های برگی به‌مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و سپس نمونه‌ها از آون خارج و وزن خشک دیسک‌ها اندازه‌گیری شد. با قرار دادن مقادیر وزن تر برگ (FW)، وزن اشباع (SW) و وزن خشک (DW) در معادله زیر مقدار محتوای نسبی آب برگ اندازه‌گیری شد:

$$RWC = \left(\frac{F_w - D_w}{S_w - D_w} \right) \times 100$$

برای بررسی نفوذپذیری نسبی غشا و هدایت الکتریکی از روش ژائو و همکاران (Zhao et al., 1992) استفاده شد. برای ارزیابی این صفت انتهایی‌ترین و جوان‌ترین بافت توسعه یافته انتخاب و به قطعات ۱ الی ۲ سانتی‌متری برش داده شد. سپس قطعات برگی هر نمونه در لوله آزمایش قرار داده شد و ۲۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه اضافه گردید. لوله آزمایش به‌مدت ۳ ثانیه ورتکس شد و هدایت الکتریکی اولیه (EC_0) با استفاده از EC سنج اندازه‌گیری شد. در ادامه لوله‌های آزمایش به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و پس از گذشت ۲۴ ساعت هدایت الکتریکی ثانویه (EC_1) با استفاده از EC سنج اندازه‌گیری شد. پس از اندازه‌گیری هدایت الکتریکی ثانویه لوله‌های آزمایش به‌مدت ۱۵ دقیقه اتوکلاو گردید و پس از اتمام آن، نمونه‌ها به دمای اتاق انتقال و سرد شد. با سرد نمودن نمونه‌ها، هدایت الکتریکی ثالثیه (EC_2) با استفاده از EC سنج اندازه‌گیری گردید و با استفاده از اعداد حاصل از EC سنج و معادلات زیر میزان نفوذپذیری نسبی غشاء (MP) و هدایت الکتریکی (EC) محاسبه شد:

$$MP = \left(\frac{EC_1 - EC_0}{EC_2 - EC_0} \right) \times 100$$

$$EC = \frac{EC_1}{EC_2} \times 100$$

در این ارزیابی فلورسانس کلروفیل با استفاده از روش مورچای و لائوسون (Murchie and Lawson, 2013) مورد مطالعه قرار گرفت. به‌همین منظور انتهایی‌ترین و جوان‌ترین بافت توسعه یافته انتخاب و گیره‌های مخصوص دستگاه فلورومتر OPTI-SCIENCES مدل OS-30 به بافت مورد نظر متصل شد. بعد از ۲۰ دقیقه بافت موردنظر با تاریکی سازگار شد و پس از آن میزان فلورسانس برگ‌ها در شدت نور ۱۰۰۰

منتج از برنامه به‌نژادی اقلیم سرد بخش تحقیقات غلات موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر در طی سال‌های ۱۳۷۱ تا ۱۳۹۷ مورد استفاده قرار گرفت. خصوصیات، خاستگاه، سال معرفی و شجره این ژنوتیپ‌ها در جدول شماره ۱ نشان داده شده است. شایان ذکر است که دو رقم MV-17 (رقم مقاوم به بیماری) و Morocco (رقم حساس به بیماری) به‌دلیل رفتار متفاوت در مقاومت به زنگ سیاه گندم به‌عنوان شاهد در این مطالعه انتخاب شدند. مواد گیاهی مورد آزمایش در دو شرایط آلودگی و عدم آلودگی و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۴ تکرار مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای این منظور، مخلوطی از خاک مزرعه و پیت ماس با نسبت‌های ۱:۲ به‌عنوان بستر کشت بذر در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت پاستوریزه شد و در گلدان‌های پلاستیکی به قطر ۶ و عمق ۸ سانتی‌متر حاوی این مخلوط به‌صورت فشرده ریخته شد و به تعداد ۱۰ عدد بذر با آرایش خاص آن‌ها کشت گردید. آبیاری به‌طریقه نشتی بعد از کاشت و در هر دو شرایط آلودگی و عدم آلودگی به‌منظور تسریع در سبز شدن و رشد صورت گرفت و تا مرحله ارزیابی ادامه یافت. گلدان‌ها در دمای 22 ± 2 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 60 ± 5 درصد نگهداری شد. در طی مراحل ارزیابی عملیات داشت شامل کوددهی، کنترل دمای گلخانه و کنترل عدم آلودگی به سایر پاتوژن‌ها به‌صورت مرتب صورت گرفت. برای مایه‌زنی گیاهچه‌های کشت شده از اسپورهای جدایه جمع‌آوری شده، تعیین نژاد شده و نگهداری شده در دمای ۸۰- درجه سانتی‌گراد با نام TKTTF استفاده شد. به‌منظور فعال نمودن این اسپورها قبل از انجام عمل مایه‌زنی، اوردیوسپورها تحت تأثیر یک شوک حرارتی ۴۲ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲ دقیقه قرار گرفتند. مایه‌زنی به‌روش سوسپانسیون و با استفاده از روغن سالت‌رول ۱۷۰ با غلظت ۱ به ۲۰ انجام شد. بدین‌منظور، اسپورها بر روی کاغذ آلومینیومی با این روغن مخلوط شد و بر روی برگ‌های گیاهچه‌های هفت روزه مایه‌زنی شدند. به‌دلیل این‌که اسپورها برای جوانه‌زنی نیاز به آب آزاد دارند، لذا گیاهچه‌های آماده ابتدا به‌وسیله آب مقطر مه‌پاشی شدند. مایه‌زنی با استفاده از قلم مو و به‌آرامی انجام شد و پوشش ظریف و یکنواختی از مخلوط اسپور بر روی سطح برگ قرار گرفت و دوباره مه‌پاشی با محلول قبلی و به ملایمت انجام شد. برای حفظ رطوبت اشباع و هم‌چنین جلوگیری از اختلاط نژادها در گلخانه، گلدان‌ها داخل سرپوش‌های شیشه‌ای شفاف (دارای تهویه) قرار داده شد. به‌منظور ایجاد شرایط مطلوب برای مراحل جوانه‌زنی و نفوذ پاتوژن گلدان‌های کشت شده بر اساس دستورالعمل مطالعه بیماری زنگ سیاه سازمان تحقیقات کشاورزی اتیوپی به‌مدت ۱۶ ساعت در تاریک‌خانه، ۴ ساعت در شرایط روشنایی و رطوبت نسبی در حد اشباع (بیش از ۹۵ درصد) نگهداری شدند. برای گذراندن دوره نهان بیماری و اسپوردهی مناسب، گلدان‌ها به‌مدت سه روز به سالن‌های تکثیر با دمای ۷ تا ۱۲ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی 70 ± 5 درصد، دوره نوری ۱۶ ساعت روشنایی طبیعی و مصنوعی با شدت بالا (۱۶۰۰۰ لوکس) و ۸ ساعت تاریکی منتقل گردیدند. حدود دو هفته پس از مایه‌زنی و قرار گرفتن در دمای ۱۸ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد جوش‌ها ظاهر و اسپورزایی آغاز شد. پس از

صفت محتوی نسبی آب، تحت شرایط عدم آلودگی به بیماری به‌ترتیب مربوط به ژنوتیپ‌های C-98-13، C-98-12 و C-98-17، کمترین مقدار مربوط به ژنوتیپ‌های MV-17، CD-94-9، C-98-17، زارع و زرینه بود. ژنوتیپ‌های MV-17 و C-98-12 در شرایط آلودگی به‌ترتیب بیشترین و ژنوتیپ‌های زرینه، زارع، C-98-7، C-98-9 و CD-94-9 کمترین مقدار صفت میزان نفوذپذیری غشا سلولی را نشان دادند. این در حالی است که، در شرایط عدم آلودگی برای صفت فوق، ژنوتیپ‌هایی که دارای بیشترین مقدار بودند، شامل موروکو و C-98-10 و کمترین مقادیر نیز متعلق به ژنوتیپ‌های C-98-9 و C-98-17 بود. بیشترین هدایت الکتریکی در شرایط آلودگی به بیماری به‌ترتیب برای ژنوتیپ‌های C-98-7، C-98-9، زارع و CD-94-9 و کمترین آن تحت همین شرایط، مربوط به MV-17 و C-98-10 بود. در شرایط عدم آلودگی نیز ژنوتیپ‌های موروکو، MV-17 و C-98-8 دارای کمترین هدایت الکتریکی بودند. از لحاظ مقدار کلروفیل در شرایط آلودگی به بیماری، ژنوتیپ‌های C-98-10، C-98-7 و میهن برتر بودند و کمترین مقدار کلروفیل در ژنوتیپ‌های C-98-6، C-98-13، C-98-16، C-98-17 و CD-94-9 مشاهده شد. این در حالی است که، ژنوتیپ‌های برتر از نظر این صفت در شرایط عدم آلودگی به‌ترتیب، C-98-13، C-98-14، C-98-18 و CD-94-5 بودند و موروکو، MV-17 و C-98-8 کمترین میانگین را داشتند. در شرایط آلودگی به بیماری ژنوتیپ‌هایی که دارای بیشترین فلورسانس اولیه بودند عبارت بودند از: زارع، C-98-17، C-98-7 و C-98-8 و کمترین آن‌ها از این نظر در همین شرایط، موروکو و C-98-14 بودند. با این‌وجود، برترین ژنوتیپ‌ها از نظر فلورسانس اولیه در شرایط عدم آلودگی به‌ترتیب زارع، C-98-7، C-98-9 و میهن و ژنوتیپ‌های با کمترین فلورسانس اولیه در همین شرایط C-98-13، C-98-14، C-98-17 و CD-94-5 شناسایی شدند. ژنوتیپ‌های C-98-10، C-98-7، C-98-9 و میهن در شرایط آلودگی دارای بیشترین فلورسانس بیشینه و ژنوتیپ‌های C-98-17، C-98-9 و بولانی نیز به‌ترتیب در همین شرایط کمترین فلورسانس بیشینه را داشتند. بیشترین فلورسانس بیشینه، در بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه در شرایط عدم آلودگی مربوط به میهن، زرینه و C-98-5 و همین‌طور کمترین مقدار آن تحت همین شرایط، مربوط به ژنوتیپ‌های C-98-18، C-98-17، MV-17، CD-94-9 بود. در شرایط آلودگی به بیماری، ژنوتیپ‌های C-98-10 و C-98-7 بیشترین فلورسانس متغیر را نشان دادند و در مقابل کمترین فلورسانس متغیر در همین شرایط را C-98-17، C-98-18 و حیران داشتند. تحت شرایط عدم آلودگی نیز از لحاظ صفت فلورسانس متغیر، بیشترین مقدار آن مربوط به میهن، زرینه و C-98-6 و کمترین مقدار آن متعلق به ژنوتیپ‌های D-94-9، C-98-17، C-98-18 و MV-17 بود. بیشترین کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II در شرایط آلودگی را ژنوتیپ‌های CD-94-9، موروکو و C-98-14 و همین‌طور کمترین مقدار آن را این شرایط C-98-17، زارع و C-98-6 نشان دادند. در شرایط عدم

میکرومول (فوتون) بر مترمربع در ثانیه ارزیابی شد. پارامترهای میزان فلورسانس حداکثر پس از تابیدن یک پالس نور اشباع بر روی بافت سازگار شده به تاریکی (F_m)، میزان فلورسانس بعد از آن که روی بافت سازگار شده به تاریکی یک پرتو تعدیل شده و ضعیف تابیده شد (F_0)، فلورسانس متغیر که برابر تفاوت بیشترین و کمترین حد فلورسانس می‌باشد (F_v) و میزان عملکرد کوآنزیمی فتوسیستم II (F_v/F_m) از طریق آزمایش فوق برآورد شد. با قرارگیری مقادیر پارامترها در معادله زیر فلورسانس کلروفیل اندازه‌گیری گردید:

$$\Phi_{II} = (F_m - F_0)/F_m = F_v/F_m$$

برای اندازه‌گیری میزان غلظت کلروفیل از دستگاه SPAD استفاده شد. پس از جمع‌آوری داده‌ها، تجزیه واریانس مرکب بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی، مقایسه میانگین متناسب با طرح آزمایشی، تجزیه خوشه‌ای برای گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها از نظر پاسخ به بیماری و تعیین ژنوتیپ‌های مقاوم و حساس به زنگ سیاه، تجزیه همبستگی بررسی روابط بین صفات با استفاده از نرم‌افزارهای SPSS و MSTAT-C انجام گرفت.

نتایج و بحث

با توجه به نتایج تجزیه واریانس مرکب برای صفات فیزیولوژیک (جدول ۱) مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی از نظر تمام صفات موردنظر در سطح احتمال ۱٪ وجود دارد که گویای تنوع ژنتیکی فراوان بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه است. هم‌چنین، برای تمام صفات اندازه‌گیری شده بین دو سطح مختلف آلودگی به بیماری اختلاف معنی‌دار وجود داشت که نشان از تاثیر پاتوژن زنگ سیاه بر محتوی نسبی برگ، میزان نفوذپذیری غشا، هدایت الکتریکی، غلظت کلروفیل، فلورسانس اولیه، فلورسانس بیشینه، فلورسانس متغیر و کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II دارد. اثر متقابل ژنوتیپ $\times$ شرایط بیماری برای کلیه صفات مذکور در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار شد که نشان‌دهنده عدم همسانی اختلاف ژنوتیپ‌ها برای صفات مورد مطالعه در دو شرایط آلودگی و عدم آلودگی به بیماری می‌باشد. واحدرضائی و همکاران (Sorensen, 2018) نیز با استفاده از شاخص‌های پاتولوژیک مرتبط با زنگ سیاه، تفاوت معنی‌داری را بین ژنوتیپ‌ها در شرایط گلخانه‌ای (گیاهچه) و مزرعه‌ای (گیاه بالغ) گزارش کردند. بالاترین ضریب تغییرات مربوط به فلورسانس اولیه (۳۴/۴۴) بود که نشان می‌دهد این صفت بیشتر تحت‌تأثیر آلودگی به بیماری بوده است و کمترین ضریب تغییرات متعلق به غلظت کلروفیل (۱۵/۲۹ درصد) بود. نتایج مقایسه میانگین برای تمام صفات مورد مطالعه در دو شرایط آلودگی و عدم آلودگی به بیماری در جدول شماره ۲ ارائه شده است. با توجه به معنی‌دار شدن اثر متقابل بیماری $\times$ ژنوتیپ برای تمام صفات مورد ارزیابی، ژنوتیپ‌ها در دو شرایط آلودگی و عدم آلودگی مقایسه شدند. از نظر صفت محتوی نسبی آب ژنوتیپ‌های C-98-12، C-98-16، C-98-18، C-98-9 و رقم حیران به‌ترتیب بیشترین و ژنوتیپ‌های MV-17، C-98-17، C-98-9، C-98-6، C-98-8 و C-98-5، میهن و زرینه کمترین مقدار را در شرایط آلودگی به‌خود اختصاص دادند. بیشترین مقدار

بیماری زنگ سیاه وجود داشت. براساس مطالعه انجام شده توسط هاگ و همکاران (R. Hak et al., 1993) تنش با اثر سوئی که بر همانندسازی کربن دارد، ظرفیت پذیرش و انتقال کربن را کاهش داده و در نتیجه باعث کاهش فلورسانس متغیر و بیشینه می‌شود که نتیجه آن کاهش میزان کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II در شرایط تنش است. وجود همبستگی بین فلورسانس بیشینه، متغیر و میزان کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II در مطالعه ما نیز مشاهده شد. در شرایط عدم آلودگی به بیماری همبستگی مثبت، قوی و معنی‌داری بین فلورسانس متغیر با فلورسانس بیشینه و میزان کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II، فلورسانس بیشینه با میزان کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II و هدایت الکتریکی با میزان نفوذپذیری غشا مشاهده شد. این در حالی است که در این شرایط همبستگی منفی و معنی‌دار تنها بین صفت فلورسانس اولیه و میزان کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II وجود داشت. وجود همبستگی بین صفات مختلف فیزیولوژیک در شرایط آلودگی و عدم آلودگی در مطالعات دگت و چالا (Degete and Chala, 2019) نیز گزارش شده است.

نتایج تجزیه خوشه‌ای در قالب نمودار درختی و با استفاده از صفات فیزیولوژیک مورد مطالعه در دو شرایط آلودگی و عدم آلودگی به زنگ سیاه در شکل ۱ و ۲ ارائه شده است. بر اساس نتایج این تجزیه ژنوتیپ‌های گندم مورد مطالعه در این پژوهش در شرایط آلودگی و عدم آلودگی به زنگ سیاه به چهار گروه مجزا تقسیم شدند که در شرایط آلودگی به بیماری به ترتیب ۸، ۷، ۲ و ۱ ژنوتیپ در چهار گروه قرار گرفتند. در حالی که، در شرایط عدم آلودگی به بیماری به ترتیب ۶، ۹، ۴ و ۵ ژنوتیپ در چهار گروه مجزا خوشه‌بندی شدند. شایان ذکر است با توجه به نتایج گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها و نیز قرار گرفتن ژنوتیپ‌های با ارزش از نظر صفات محتوای نسبی آب، شاخص نفوذپذیری غشا، میزان کلروفیل، فلورسانس اولیه، فلورسانس بیشینه، فلورسانس متغیر، میزان کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II و هدایت الکتریکی در گروه‌های اول و دوم در شرایط آلودگی و عدم آلودگی به بیماری، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج تجزیه خوشه‌ای رابطه خوبی با نتایج تجزیه واریانس و مقایسه میانگین صفات مورد مطالعه داشت. نتایج تجزیه تابع تشخیص (جدول ۸ و ۹) گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها به چهار خوشه مجزا در شرایط آلودگی و عدم آلودگی را تأیید کرد. میانگین گروه‌ها و درصد انحراف از میانگین کل در شرایط آلودگی به بیماری برای صفات مورد مطالعه (جدول ۶) نشان داد که ارقام و لاین‌های مقاوم و نیمه‌مقاوم با استناد به صفات محتوای نسبی آب برگ، نفوذپذیری نسبی غشاء، هدایت الکتریکی، غلظت کلروفیل، فلورسانس اولیه، فلورسانس بیشینه، فلورسانس متغیر و کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II در گروه‌های اول و دوم قرار گرفتند. همچنین، بر اساس میانگین گروه‌ها و درصد انحراف از میانگین در شرایط عدم آلودگی (جدول ۷) ارقام و لاین‌های با ارزش بیشتر به ترتیب در گروه اول و دوم قرار داشتند.

آلودگی C-98-6، CD-94-5 و C-98-14 به ترتیب دارای بیشترین کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II و C-98-17، C-98-18 و C-98-12 ژنوتیپ‌هایی با کمترین میزان کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II بودند. نتایج نشان داد که آلودگی به بیماری زنگ ساقه در مقایسه با شرایط عدم آلودگی باعث کاهش فلورسانس اولیه، فلورسانس بیشینه، فلورسانس متغیر، میزان کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II و غلظت کلروفیل شد. بر اساس مطالعات بولهار و همکاران (Bolhar-Nordenkamp et al., 1991) تنش‌های محیطی باعث ایجاد تغییرات و کاهش در میزان فلورسانس اولیه، فلورسانس بیشینه، فلورسانس متغیر، میزان کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II می‌شود که علت آن دگرگونی و تغییر ساختار در رنگدانه‌های فتوسیستم II می‌باشد. همچنین، تنش‌های محیطی نتایج افزایش محتوای نسبی آب، نفوذپذیری غشاء و هدایت الکتریکی در شرایط تنش را به دنبال داشت. محتوای نسبی آب شاخص مناسبی از وضعیت آب برگ‌ها می‌باشد. به طوری که، در صورت پیشرفت تنش کاهش یافته و سبب تغییرهایی در غشای سلولی و در نتیجه افزایش نشت الکترولیتی از سلول می‌شود (Fu et al., 2004). به عبارت دیگر، براساس مطالعات گسترده انجام شده توسط پژوهشگران، پاسخ ژنوتیپ‌ها در برابر تنش به گونه‌ای است که با افزایش محتوای نسبی آب (Yang et al., 2007)، شاخص نفوذپذیری غشا (Levitt, 1980)، میزان کلروفیل (Gregersen and Holm, 2007)، فلورسانس اولیه (Fracheboud, 2006)، فلورسانس بیشینه (R. Hak et al., 1993)، فلورسانس متغیر (R. Hak et al., 1993)، میزان کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II (Fracheboud, 2006) و نیز کاهش هدایت الکتریکی (Najafi Babady et al., 2018) می‌توان مقاومت یا تحمل یک ژنوتیپ در برابر تنش را نتیجه‌گیری کرد. بر همین اساس، در این تحقیق ژنوتیپ‌هایی مانند MV-17، C-98-17، C-98-11، C-98-5، C-98-12، C-98-18، C-98-16، C-98-3 و CD-94-9 دارای بیشترین میانگین برای صفات محتوای نسبی آب، شاخص نفوذپذیری غشا، میزان کلروفیل، فلورسانس اولیه، فلورسانس بیشینه، فلورسانس متغیر، میزان کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II و کمترین میانگین برای صفت هدایت الکتریکی بودند. واحدرضائی و همکاران (Vahed Rezaei et al., 2023) ژنوتیپ‌های مذکور را از نظر شدت آلودگی، نوع آلودگی، ضریب آلودگی، AUDPC و rAUDPC بررسی و گروه‌بندی کرده و گزارش نمودند که این ژنوتیپ‌ها مقاومت بالایی نسبت به عامل بیماری زنگ ساقه دارند و ممکن است حاوی ژن Sr مقاومت باشند که واکنش مقاومت در گیاه را کنترل می‌کند.

نتایج حاصل از تجزیه همبستگی صفات فیزیولوژیک مختلف در شرایط آلودگی به بیماری (جدول ۴) نشان داد که همبستگی مثبت، قوی و معنی‌داری بین صفت فلورسانس متغیر و صفات فلورسانس بیشینه و میزان کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II و نیز همبستگی منفی، قوی و معنی‌داری بین صفات هدایت الکتریکی با میزان نفوذپذیری غشا و فلورسانس اولیه با میزان کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II در پاسخ به

جدول ۱- مشخصات ژنوتیپ‌های گندم مورد استفاده در آزمایش

Table 1. Characteristics of wheat genotypes that used in this study

ردیف	نام ژنوتیپ	نام رقم	خاستگاه	سال	شجره
No.	Genotype name	Cultivars	Origin	Year	Pedigree
1	C-98-1	Mihan	Mihan	1388	Bkt/90-Zhong 87
2	C-98-2	Haydari	Haydari	1393	Ghk"s"/Bow"s"/90Zhong87/3/Shiroodi
3	C-98-3	Zarrineh	Zarrineh	1395	Omid/4/Bb/Kal//Ald/3/Y50E/Kal*3//Emu"s"/5/Zrn/6/Zrn/Shiroodi
4	C-98-4	Zareh	Zareh	1388	130L1,11//F35,70/Mo73/4/Ymh/Tob//Mcd/3/Lira
5	C-98-5	-	-	-	Alvd/4/Ghk"s"/Bow"s"/90Zhong87/3/Shiroodi
6	C-98-6	-	-	-	Alvd/4/Ghk"s"/Bow"s"/90Zhong87/3/Shiroodi
7	C-98-7	-	-	-	Charger//CMH80A.768/3*Cno79/3/Zrn
8	C-98-8	-	-	-	Charger//CMH80A.768/3*Cno79/3/Zrn
9	C-98-9	-	-	-	Spb"s"/K1349/Go/3/Vee"s"/4/Bkt/90-Zhong 87
10	C-98-10	-	-	-	Shahpasand/Norman
11	C-98-11	-	-	-	Alvd/4/Ghk"s"/Bow"s"/90Zhong87/3/Shiroodi
12	C-98-12	-	-	-	Alvd/4/Ghk"s"/Bow"s"/90Zhong87/3/Shiroodi
13	C-98-13	-	-	-	Alvd/4/Ghk"s"/Bow"s"/90Zhong87/3/Shiroodi
14	C-98-14	-	-	-	Spb"s"/K1349/Go/3/Vee"s"/4/Pishgam
15	C-98-15	-	-	-	AU/3/MINN//HK/38MA/4/YMH/ERA/5/PMF//CNO/GLL/6/KAUZ//ALTAR 84/AOS/7/TAM105/3/NE70654/BBY//BOW"S"/4/Century*3/TA2450
16	C-98-16	-	-	-	GRK79/TUKURU
17	C-98-17	-	-	-	MV NEMERE
18	C-98-18	-	-	-	ARS97135-9/O3A-B4/KS06O3A-49
19	CD-94-9	-	-	-	Zarrin/Shiroodi/6/Zarrin/5/Omid/4/Bb/Kal//Ald/3/Y50E/Kal*3//Emu
20	CD-94-5	-	-	-	Ga961565-27-6/La95283Ca-78-1-2
21	MV-17	MV-17	MV-17	1371	SLAVIA/MV-FT//BARANJK
22	CD-92-6	Heyran	Heyran	1397	Lufer-1/Kinaci97
23	Morocco	Morocco	Morocco	-	Susceptible check
24	Bolany	Bolany	Bolany	-	Susceptible check

جدول ۲- تجزیه واریانس صفات فیزیولوژیک اندازه‌گیری شده در ژنوتیپ‌های مختلف گندم در شرایط آلودگی و عدم آلودگی به زنگ سیاه
Table 2. Variance analysis of physiological traits measured in different genotypes of wheat under stem rust infection and non-infection conditions.

میانگین مربعات Mean of squares								منابع تغییر S.O.V
کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II ($\Delta F/F_m$)	فلورسانس متغیر (Fv)	فلورسانس بیشینه (Fm)	فلورسانس اولیه (Fo)	غلظت کلروفیل (SPAD)	هدایت الکتریکی (EC)	میزان نفوذپذیری غشاء سلولی (MP)	محتوای نسبی آب برگ (RWC)	درجه آزادی
0.003 ^{ns}	185691.88**	265741.92**	7154.08**	4116.255**	2231934.380**	478.172**	7714.005**	1
0.054	1117541.57	1235535.13	33460.58	47.450	95432.859	8.214	249.089	6
0.131**	1279718.40**	1629080.15**	208184.99**	31.614 ^{ns}	507787.114**	264.375**	686.929**	23
0.095**	595237.54**	452415.74**	108573.36**	53.538*	325283.391**	229.639**	611.223**	23
0.023	130474.04	130544.44	29086.06	31.134	64529.508	49.203	248.103	138
23.04	32.96	22.71	34.44	15.29	28.63	16.65	20.97	خطا Error
								ضریب تغییرات (%) CV(%)

, * and ^{ns} Significant at 1%, 5% and non-significant probability level, * و ^{ns} به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ و غیر معنی‌دار

جدول ۳- مقایسه میانگین صفات فیزیولوژیک اندازه گیری شده در ژنوتیپ های مختلف گندم در شرایط آلودگی وعدم آلودگی به زنگ سیاه

Table3. Mean of physiological traits measured in different genotypes of wheat under stem rust infection and non-infection conditions.										
صفات اندازه گیری شده										
Traits										
بیماری Disease	ژنوتیپ Genotype	محتوای نسبی آب برگ (RWC)	میزان نفوذپذیری غشاء سلولی (MP)	هدایت الکتریکی (EC)	فلورسانس اولیه (Fo)	فلورسانس بیشینه (Fm)	فلورسانس متغیر (Fv)	کارایی فتوسیمیایی فتوسیستم II (ΔF/Fm)	غلظت کلروفیل (SPAD)	
آلودگی Infection	C-98-1	74.00	47.50	627.0	697.5	2181.	1484	0.6717	37.25	
	C-98-2	86.00	31.75	1380	641.5	2007.	1365	0.6679	36.75	
	C-98-3	80.00	22.00	1423	510.3	2172.	1661	0.7525	32.00	
	C-98-4	88.50	22.50	1471	820.3	1587.	766.5	0.4492	34.00	
	C-98-5	71.50	44.25	1008	664.5	1567.	902.3	0.5083	32.50	
	C-98-6	67.50	45.00	978.0	689.3	1300.	610.5	0.4249	24.25	
	C-98-7	89.00	25.75	1526.	614.3	2222.	1608.	0.7141	36.25	
	C-98-8	74.00	44.00	1032.	603.8	1960.	1356.	0.6970	30.00	
	C-98-9	70.50	25.75	1526.	524.5	1895.	1370.	0.7116	33.00	
	C-98-10	82.50	48.75	527.5	406.3	2200.	1793.	0.8169	31.00	
	C-98-11	75.50	45.75	916.3	416.0	1651.	1235.	0.7206	36.25	
	C-98-12	101.5	46.50	865.5	389.3	1007.	617.5	0.6099	30.00	
	C-98-13	82.50	47.75	630.3	354.5	1158.	803.3	0.6959	32.25	
	C-98-14	85.50	44.50	1079.	233.5	1189.	955.0	0.8023	25.2	
	C-98-15	67.00	47.25	605.0	301.3	1161.	859.5	0.7391	35.00	
	C-98-16	99.50	46.00	789.8	464.3	1641.	1177.	0.7233	32.50	
	C-98-17	77.50	45.25	1114.	759.5	1100	340.5	0.2450	29.00	
	C-98-18	99.50	44.00	1085.	431.0	862.5	431.5	0.5333	32.50	
	CD-94-9	92.50	26.00	1447.	295.0	1755.	1460.	0.8326	29.00	
	CD-94-5	89.00	42.50	1148.	473.0	2065.	1592.	0.7746	30.75	
	MV-17	62.50	48.25	490.3	461.0	1382.	921.0	0.6690	31.50	
	CD-92-6	94.00	47.50	623.0	438.8	895.8	457.0	0.5046	31.25	
	عدم آلودگی Non -Infection	Morocco	75.50	46.50	758.8	260.0	1370.	1110.	0.8128	32.25
		Bolany	82.50	46.25	836.3	290.3	973.5	683.3	0.6960	31.00
		C-98-1	73.50	46.25	918.5	797.8	2571.	1774.	0.6882	40.25
C-98-2		67.50	37.50	750.3	245.5	1983.	1738.	0.8714	39.25	
C-98-3		54.00	47.50	615.3	553.5	2042.	1860.	0.7685	37.75	
C-98-4		53.00	46.75	575.3	881.5	2414.	1160.	0.5508	36.50	
C-98-5		50.50	43.75	1137.	748.5	2433.	1684.	0.6834	40.50	
C-98-6		73.00	43.75	1174.	234.8	2044.	1809.	0.8885	42.25	
C-98-7		59.50	47.00	702.3	843.0	2066.	1223.	0.5600	42.25	
C-98-8		50.50	47.75	441.5	339.5	1960.	1620.	0.8380	38.75	
C-98-9		79.50	34.75	1219.	799.5	2111.	1312.	0.5930	40.00	
C-98-10		77.50	48.00	501.3	680.0	1807.	1127.	0.6149	41.50	
C-98-11		76.00	47.75	512.5	590.5	1788.	1197.	0.6432	38.75	
C-98-12		82.50	42.75	948.0	647.5	1082	434.5	0.3644	34.50	
C-98-13		103.0	47.25	641.5	214.8	1213	998.5	0.8251	49.25	
C-98-14		74.50	44.75	812.0	204.5	1732.	1528.	0.8782	45.75	
C-98-15		75.50	45.25	671.8	359.5	1845.	1485.	0.8076	43.75	
C-98-16		77.00	46.75	584.0	521.8	1145	623.0	0.4721	41.25	
C-98-17		77.00	23.00	1477.	505.0	813.8	308.8	0.3929	38.75	
C-98-18		60.75	47.75	516.5	441.8	672.8	231.0	0.4070	46.00	
CD-94-9		58.50	45.50	797.8	651.5	863.5	212.0	0.2496	43.75	
CD-94-5		44.50	40.50	955.5	118.5	1350.	1231.	0.8857	45.00	
MV-17		50.50	47.75	450.0	452.3	824.8	372.5	0.4436	38.50	
CD-92-6	77.50	46.50	760.5	283.3	1061	777.3	0.7234	42.00		
Morocco	80.50	53.75	616.5	616.5	1543.	926.5	0.6127	40.75		
Bolany	87.50	36.75	1324.	301.5	1722.	1420.	0.8088	40.00		

جدول ۴- همبستگی صفات فیزیولوژیک اندازه گیری شده در ژنوتیپ های مختلف گندم در شرایط آلودگی به زنگ سیاه
Table 4. Pearson's correlation of physiological traits measured in different genotypes of wheat under stem rust infection condition.

کارایی فتوشیمیایی II فتوسیستم (ΔF/F _m)	فلورسانس متغیر (F _v)	فلورسانس بیشینه (F _m)	فلورسانس اولیه (F ₀)	غلظت کلروفیل (SPAD)	هدایت الکتریکی (EC)	میزان نفوذپذیری غشاء سلولی (MP)	محتوای نسبی آب برگ (RWC)
1	0.718**	0.430*	-0.673**	0.265 ^{ns}	-0.066 ^{ns}	-0.081 ^{ns}	0.035 ^{ns}
	1	0.932**	-0.021 ^{ns}	0.419*	0.260 ^{ns}	-0.395 ^{ns}	-0.084 ^{ns}
		1	0.334 ^{ns}	0.436*	0.375 ^{ns}	-0.484*	-0.142 ^{ns}
			1	0.118 ^{ns}	0.360 ^{ns}	-0.310 ^{ns}	-0.176 ^{ns}
				1	0.109 ^{ns}	-0.181 ^{ns}	0.097 ^{ns}
					1	-0.891**	0.125 ^{ns}
						1	-0.147
							1

**, * and ^{ns} Significant at 1%, 5% and non-significant probability level

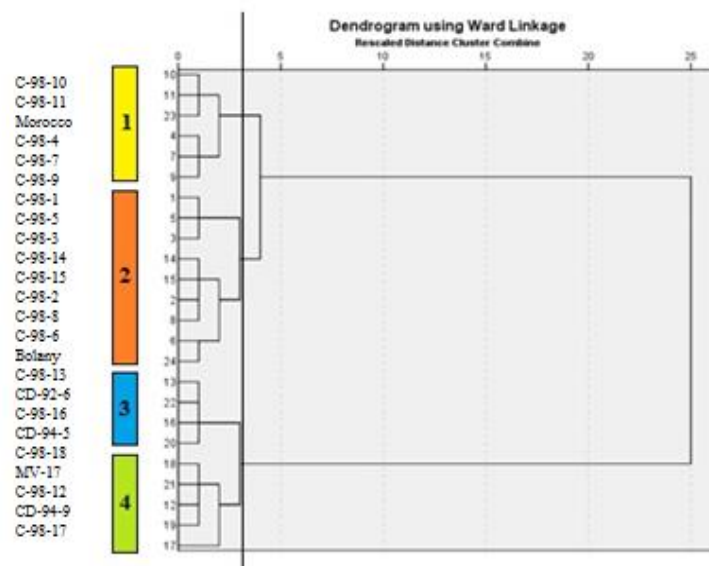
**, * و ^{ns} به ترتیب معنی دار در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ و غیر معنی دار

جدول ۵- همبستگی صفات فیزیولوژیک اندازه گیری شده در ژنوتیپ های مختلف گندم در شرایط عدم آلودگی به زنگ سیاه
Table 5. Pearson's correlation of physiological traits measured in different genotypes of wheat under stem rust non-infection condition.

کارایی فتوشیمیایی II فتوسیستم (ΔF/F _m)	فلورسانس متغیر (F _v)	فلورسانس بیشینه (F _m)	فلورسانس اولیه (F ₀)	غلظت کلروفیل (SPAD)	هدایت الکتریکی (EC)	میزان نفوذپذیری غشاء سلولی (MP)	محتوای نسبی آب برگ (RWC)
1	0.826**	0.549**	-0.589**	0.270 ^{ns}	0.060 ^{ns}	0.048 ^{ns}	0.076 ^{ns}
	1	0.914**	-0.101 ^{ns}	-0.051 ^{ns}	0.122 ^{ns}	0.061 ^{ns}	-0.090 ^{ns}
		1	0.310 ^{ns}	-0.243 ^{ns}	0.091 ^{ns}	0.108 ^{ns}	-0.146 ^{ns}
			1	-0.473*	-0.062 ^{ns}	0.122 ^{ns}	-0.145 ^{ns}
				1	-0.074 ^{ns}	0.172 ^{ns}	0.208 ^{ns}
					1	0.835**	0.167 ^{ns}
						1	-0.138 ^{ns}
							1

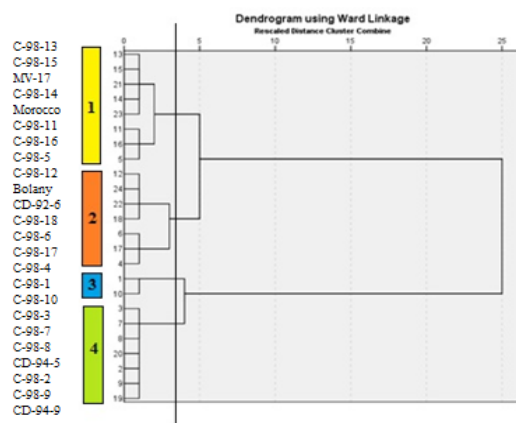
**, * and ^{ns} Significant at 1%, 5% and non-significant probability level

**, * و ^{ns} به ترتیب معنی دار در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ و غیر معنی دار



شکل ۱- نمودار درختی حاصل از تجزیه خوشه ای ژنوتیپ های مختلف گندم با استفاده از صفات اندازه گیری شده در شرایط آلودگی به زنگ سیاه به روش وارد

Figure 1. Dendrogram of cluster analysis of different wheat genotypes based on measured physiological traits under stem rust infection condition using Ward method.



شکل ۲- نمودار درختی حاصل از تجزیه خوشه‌ای ژنوتیپ‌های مختلف گندم با استفاده از صفات اندازه‌گیری شده در شرایط عدم آلودگی به زنگ سیاه به روش وارد

Figure 2. Dendrogram of cluster analysis of different wheat genotypes based on measured physiological traits under stem rust non-infection condition using Ward method.

جدول ۶- میانگین خوشه‌ها و درصد انحراف آن‌ها از میانگین کل بر اساس صفات فیزیولوژیک اندازه‌گیری شده در ژنوتیپ‌های مختلف گندم به زنگ سیاه در شرایط آلودگی

Table 6. Average of groups and their percentage deviation from the total average based on measured physiological traits in different genotypes of wheat under stem rust infection and infection conditions.

صفات اندازه‌گیری شده								خوشه (Cluster)	گروه (Group)
کارایی فتوشیمیایی II فتوسیستم ($\Delta F/F_m$)	فلورسانس متغیر (Fv)	فلورسانس پیشینه (Fm)	فلورسانس اولیه (Fo)	غلظت کلروفیل (SPAD)	هدایت الکتریکی (EC)	میزان نفوذپذیری غشاء سلولی (MP)	محتوای نسبی آب برگ (RWC)		
0.74	1638.37	2190.25	551.87	36.75	577.25	48.12	78.25	میانگین Mean	1
13.25	53.85	40.93	12.86	15.33	-41.99	17.70	-4.57	درصد انحراف از میانگین deviation from the total average percentage	
0.73	1487.42	2010.60	523.17	32.67	1354.39	31.10	83	میانگین Mean	2
11.95	39.67	29.37	6.95	2.55	36.09	-23.91	1.21	درصد انحراف از میانگین deviation from the total average percentage	
0.37	572.50	1328.83	756.33	29.08	1187.75	37.58	77.83	میانگین Mean	3
-43.24	-46.23	-14.49	54.62	-8.72	19.34	-8.07	-5.08	درصد انحراف از میانگین deviation from the total average percentage	
0.70	995.31	1389.68	394.37	31.03	784.59	46.28	77.43	میانگین Mean	4
7.86	-6.56	-10.57	-19.37	-2.61	-21.16	13.19	-5.56	درصد انحراف از میانگین deviation from the total average percentage	
0.65	1064.91	1554.05	489.13	31.86	995.19	40.88	82	میانگین کل Total mean	

جدول ۷- میانگین خوشه‌ها و درصد انحراف آن‌ها از میانگین کل بر اساس صفات فیزیولوژیک اندازه‌گیری شده در ژنوتیپ‌های مختلف گندم به زنگ سیاه در شرایط عدم آلودگی

Table 7. Average of groups and their percentage deviation from the total average based on measured physiological traits in different genotypes of wheat under stem rust infection and non-infection conditions.

صفات اندازه‌گیری شده								خوشه (Cluster)	گروه (Group)
کارایی فتوشیمیایی II فتوسیستم ($\Delta F/F_m$)	فلورسانس متغیر (Fv)	فلورسانس پیشینه (Fm)	فلورسانس اولیه (Fo)	غلظت کلروفیل (SPAD)	هدایت الکتریکی (EC)	میزان نفوذپذیری غشاء سلولی (MP)	محتوای نسبی آب برگ (RWC)		
0.80	1657.47	2078.02	420.55	40.91	871.25	43.69	67.38	میانگین Mean	1
23.86	47.05	27.60	-16.11	-0.50	11.79	-0.97	-2.78	درصد انحراف از میانگین deviation from the total average percentage	
0.59	1157.45	1892.62	735.16	39.95	622.45	46.33	71	میانگین Mean	2
-8.17	2.69	16.22	46.63	-2.83	-20.15	5	2.41	درصد انحراف از میانگین deviation from the total average percentage	
0.37	311.75	851.35	539.60	40.30	837.90	41.35	65.85	میانگین Mean	3
-42.73	-72.34	-47.72	7.63	-2	7.48	-6.28	-5	درصد انحراف از میانگین deviation from the total average percentage	
0.72	907.50	1192.06	284.56	44.37	735.37	45.25	75.50	میانگین Mean	4
11.98	-19.48	-26.79	-43.2	7.90	-5.66	2.54	-8.91	درصد انحراف از میانگین deviation from the total average percentage	
0.64	1127.11	1628.45	501.34	41.12	779.56	44.12	69.32	میانگین کل Total mean	

جدول ۸- تجزیه تابع تشخیص برای شناسایی محل برش نمودار درختی در تجزیه خوشه‌ای ژنوتیپ‌های مختلف گندم بر اساس صفات فیزیولوژیک اندازه‌گیری شده در شرایط آلودگی به زنگ سیاه

Table 8. Discriminant function analysis for determining cutting pint of dendrogram obtained from cluster analysis of different wheat genotypes based on measured physiological traits under stem rust infection condition.

درجه آزادی df	کای اسکور Chi-square	مقادیر ویژه Eigenvalue	درصد واریانس % of Variance	درصد واریانس تجمعی % Of Cumulative	همبستگی کانونیک Canonical Correlation	لمبدا ویلکس Wilks' Lambda	گروه Group
28	89.98**	10.36	62.8	62.8	0.95	0.005	5
18	48.66**	4.56	27.6	90.4	0.90	0.057	
10	19.48*	1.03	6.2	96.7	0.71	0.318	
4	7.43 ^{ns}	0.54	3.3	100	0.59	0.646	

**, * and ^{ns} Significant at 1%, 5% and non-significant probability level

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

جدول ۹- تجزیه تابع تشخیص برای شناسایی محل برش نمودار درختی در تجزیه خوشه‌ای ژنوتیپ‌های مختلف گندم بر اساس صفات فیزیولوژیک اندازه‌گیری شده در شرایط عدم آلودگی به زنگ سیاه

Table 9. Discriminant function analysis for determining cutting pint of dendrogram obtained from cluster analysis of different wheat genotypes based on measured physiological traits under stem rust non-infection condition.

درجه آزادی df	کای اسکور Chi-square	مقادیر ویژه Eigenvalue	درصد واریانس % of Variance	درصد واریانس تجمعی % Of Cumulative	همبستگی کانونیک Canonical Correlation	لمبدا ویلکس Wilks' Lambda	گروه Group
21	81.23**	14.96	81.9	81.9	0.96	0.010	4
12	32.27**	2.39	13.1	95	0.84	0.154	
5	11.37*	0.916	5	100	0.69	0.522	

**, * and ^{ns} Significant at 1%, 5% and non-significant probability level

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

لاین‌های لاین‌های C-98-17، C-98-11، C-98-5، C-98-9، C-98-12

با مقاومت گونه‌های تجاری شاهد آزمایش شامل MV-17 (مقاوم)، بولانی و مراکش (مقاوم) هستند که می‌توان از آن‌ها برای تولید ارقام جدید و برنامه‌های اصلاحی استفاده کرد. واحدرضائی و همکاران (Vahed Rezaei et al., 2023) با بررسی مقاومت ژنوتیپ‌های گندم به بیماری زنگ سیاه در شرایط گیاه بالغ و گیاهچه‌ای، لاین C-98-17 را ژنوتیپ مقاوم و لاین‌های C-98-14 و C-98-9 را ژنوتیپ‌های حساس به بیماری زنگ سیاه گندم گزارش کردند. بر همین اساس می‌توان نتیجه گرفت با توجه به ارتباط میان نتایج حاصل از ارزیابی صفات فیزیولوژیک و پاتولوژیک، امکان استفاده از صفات فیزیولوژیک به عنوان نشانگرهای مرتبط با مقاومت به بیماری زنگ سیاه گندم بهره‌مند شد. به عبارت دیگر، نشانگرهای فیزیولوژیک مورد استفاده قادر به تشخیص وجود تنوع و پاسخ به مقاومت نسبت به بیماری زنگ سیاه بود و می‌توان از آن‌ها به عنوان نشانگرهای فیزیولوژیک مرتبط با مقاومت به بیماری زنگ سیاه گندم استفاده نمود. این مطالعه تاثیر نژاد TKTF زنگ ساقه آذربایجان شرقی بر صفات فیزیولوژیک ارقام زمستانه و لاین‌های امید بخش گندم را نشان داد. این نژاد باعث ایجاد تغییرات در صفات فیزیولوژیک مورد مطالعه در هر دو شرایط آزمایشی شد که از این خروجی می‌توان نتیجه گرفت که لاین‌های مقاوم نسبت به رقم تجاری مقاوم به بیماری بوده و توصیه می‌شود به عنوان لاین‌های انتخابی در برنامه‌های اصلاحی استفاده شود. نتایج تجزیه خوشه‌ای نشان داد که تنوع ژنتیکی مناسبی برای صفات فیزیولوژیک مورد مطالعه وجود دارد و می‌توان از این تنوع‌ها برای اصلاح ژنوتیپ‌های گندم زمستانه استفاده کرد. بررسی صفات مختلف در شرایط محیطی مختلف نشان داده است که با تغییر شرایط محیطی، نحوه عمل و پاسخ ژنوتیپ‌ها به پاتوژن تغییر می‌کند. برای این کار باید این مطالعات در چند سال و محیط‌های مختلف انجام شود. همچنین توصیه می‌شود آزمایش فوق با استفاده از صفات زراعی در مرحله گیاه بالغ و نیز صفات بیوشیمیایی مرتبط با بیماری نیز اجرا گردد.

نتیجه‌گیری کلی

بررسی تنوع ژنتیکی این گیاه استراتژیک، به نژادگران را در شناسایی پتانسیل و ظرفیت ژنتیکی واقعی صفات مرتبط با اهداف به نژادی از جمله عملکرد و اجزای عملکرد، کمک می‌نماید. آگاهی از اختلاف بین ژنوتیپ‌های مختلف گندم و چگونگی روابط این تفاوت با عملکرد بالقوه آنها در بهبود و پیشرفت عملکرد ارقام جدید بسیار حیاتی است (Kabiri et al., 2023). نژادهای مختلف عامل بیماری زنگ سیاه گندم مسئول کاهش عملکرد گندم به شمار می‌آید. بر این اساس اکثر مطالعات در مورد ارزیابی مقاومت و تجزیه تنوع ژنتیکی ژنوتیپ‌های مختلف گندم امری مهم در مبارزه با این عامل بیماری می‌باشد (Knott, 2012). در این پژوهش تفاوت معنی‌دار بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه، از نظر صفات فیزیولوژیک مشاهده شد که فرصت خوبی را برای بهبود صفات فیزیولوژیک مرتبط با تحمل بیماری در برنامه‌های اصلاحی زنگ ساقه گندم فراهم می‌کند که نتایج فوق مشابه نتایج گزارش شده توسط واحدرضائی و همکاران (Vahed Rezaei et al., 2023) دکت و چالا (Degete and Chala, 2019)، هاندی (Hundie et al., 2018) و سورا (Soresa, 2018) بود. تنش سبب ایجاد واکنش‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیک متفاوتی در گیاه می‌گردد (Hassanpour et al., 2015) اندازه‌گیری برخی صفات فیزیولوژیک گیاه بسیار مهم است. نتایج این پژوهش نشان داد که ژنوتیپ‌های مورد مطالعه در اثر آلودگی به بیماری با کاهش صفات محتوای نسبی آب، شاخص نفوذپذیری غشا، میزان کلروفیل، فلورسانس اولیه، فلورسانس بیشینه، فلورسانس متغیر، میزان کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم II و افزایش هدایت الکتریکی مواجه می‌شوند که این رفتار می‌تواند در آینده در تغییرات ویژگی‌های عملکردی و زراعی گیاه به دلیل تغییر در هدایت روزنه‌ای و فتوسنتز موثر باشد. همچنین، براساس گزارشات پسرکلی (Pessarakli, 2019) مطالعه صفات فیزیولوژیک از جمله شاخص‌های مهم جهت بررسی مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی است. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که سطوح مقاومت مرتبط با صفات فیزیولوژیک زنگ ساقه در

References

- Bhattacharya, S. (2017). Deadly new wheat disease threatens Europe's crops. *Nature*, 542(7640).
- Bolhar-Nordenkamp, H. R., Hofer, M., & Lechner, E. G. (1991). Analysis of light-induced reduction of the photochemical capacity in field-grown plants. Evidence for photoinhibition? *Photosynthesis Research*, 27, 31-39.
- Christoforidou, M., Borghuis, G., Seijger, C., van Halsema, G. E., & Hellegers, P. (2023). Food security under water scarcity: a comparative analysis of Egypt and Jordan. *Food Security*, 15(1), 171-185.
- Degete, A. G., & Chala, A. (2019). Effects of Stem Rust (*Puccinia graminis* f. sp. *tritici*) on Yield, Physical and Chemical Quality of Durum Wheat Varieties in East Shoa Zone, Ethiopia. *American Journal of Agriculture and Forestry*, 7(2), 78-83.
- Figuroa, M., Hammond-Kosack, K. E., & Solomon, P. S. (2018). A review of wheat diseases—a field perspective. *Molecular plant pathology*, 19(6), 1523-1536.
- Fracheboud, Y. (2006). Using chlorophyll fluorescence to study photosynthesis. *Institute of Plant Sciences ETH, Universitatstrass*.
- Fu, J., Fry, J., & Huang, B. (2004). Minimum water requirements of four turfgrasses in the transition zone. *HortScience*, 39(7), 1740-1744.
- Ghosh, D., Lin, Q., Xu, J., & Hellmann, H. A. (2017). How plants deal with stress: exploration through proteome investigation. *Frontiers in plant science*, 8, 1176.
- Gregersen, P. L., & Holm, P. B. (2007). Transcriptome analysis of senescence in the flag leaf of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Biotechnology Journal*, 5(1), 192-206.
- Hak, I. J. (2018). The World Food Situation.
- Hak, R., Rinderle-Zimmer, U., Lichtenthaler, H., & Natr, L. (1993). Chlorophyll a fluorescence signatures of nitrogen deficient barley leaves. *Photosynthetica (Praha)*, 28(1), 151-159.
- HASSANPOUR, L. K., AHMADI, J., DANESHIAN, J., & HATAMI, S. (2015). Changes in chlorophyll, protein and antioxidant enzymes on durum wheat under drought stress.
- Hundie, B., Yirga, F., Kassa, D., Hailu, E., Negash, T., Tesfaye, T., Zegaye, H. (2018). Evaluation of Advanced Bread Wheat Lines for Field and Seedling Resistance to Stem Rust (*Puccinia graminis* f. sp. *tritici*). *American Journal of Biological and Environmental Statistics*, 4(2), 74-82.
- Ingolia, N. T. (2014). Ribosome profiling: new views of translation, from single codons to genome scale. *Nature Reviews Genetics*, 15(3), 205-213.
- Kabiri, A., Zaefaian, F., Omrani, A., & Abassian, A. (2023). Evaluation of Yield and Yield Components in Promising Wheat Lines using Multivariate Statistical Methods. *Journal of Crop Breeding*, 15(45), 135-148 (In Persian). doi:10.52547/jcb.15.45.135
- Knott, D. R. (2012). *The wheat rusts—breeding for resistance* (Vol. 12): Springer Science & Business Media.
- Kosová, K., Vitámvás, P., & Prášil, I. T. (2014). Proteomics of stress responses in wheat and barley—search for potential protein markers of stress tolerance. *Frontiers in plant science*, 5, 711.
- Levitt, J. (1980). Responses of plants to environmental stress. *Chilling, freezing, and high temperature stresses*.
- Lewis, C. M., Persoons, A., Bebb, D. P., Kigathi, R. N., Maintz, J., Findlay, K., Kangara, N. (2018). Potential for re-emergence of wheat stem rust in the United Kingdom. *Communications biology*, 1(1), 1-9.
- Liu, Y., Lu, S., Liu, K., Wang, S., Huang, L., & Guo, L. (2019). Proteomics: a powerful tool to study plant responses to biotic stress. *Plant Methods*, 15(1), 135.
- McIntosh, R., Yamazaki, Y., Dubcovsky, J., Rogers, W., Morris, C., & Appels, R. (2013). Catalogue of gene symbols for wheat, Proceedings of the 12th International Wheat Genetics Symposium.
- Murchie, E. H., & Lawson, T. (2013). Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications. *Journal of experimental botany*, 64(13), 3983-3998.
- Najafi Babady, K., Hassibi, P., Roshanfekr, H., & Broumand Nassab, S. (2018). Effect of drought stress on chlorophyll fluorescence and forage yield of two forage millet cultivars (*Pennisetum americanum* var *nutrified* and *Panicum* sp var *pishahang*). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 16(2), 333-344.
- Nazari, K., Mafi, M., Yahyaoui, A., Singh, R., & Park, R. (2009). Detection of wheat stem rust (*Puccinia graminis* f. sp. *tritici*) race TTKSK (Ug99) in Iran. *Plant Disease*, 93(3), 317-317.
- Olivera Firpo, P., Newcomb, M., Flath, K., Sommerfeldt-Impe, N., Szabo, L., Carter, M., . . . Jin, Y. (2017). Characterization of *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* isolates derived from an unusual wheat stem rust outbreak in Germany in 2013. *Plant pathology*, 66(8), 1258-1266.
- Olivera, P., Newcomb, M., Szabo, L. J., Rouse, M., Johnson, J., Gale, S., Burgin, L. (2015). Phenotypic and genotypic characterization of race TKTF of *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* that caused a wheat stem rust epidemic in southern Ethiopia in 2013–14. *Phytopathology*, 105(7), 917-928.
- Pessarakli, M. (2019). *Handbook of plant and crop stress*: CRC press.
- Pretorius, Z., Singh, R., Wagoire, W., & Payne, T. (2000). Detection of virulence to wheat stem rust resistance gene Sr31 in *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* in Uganda. *Plant Disease*, 84(2), 203-203.
- Ritchie, S. W., Nguyen, H. T., & Holaday, A. S. (1990). Leaf water content and gas-exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. *Crop science*, 30(1), 105-111.
- Roelfs, A. P. (1992). *Rust diseases of wheat: concepts and methods of disease management*: Cimmyt.
- Singh, R. P., Hodson, D. P., Huerta-Espino, J., Jin, Y., Bhavani, S., Njau, P., Govindan, V. (2011). The emergence of Ug99 races of the stem rust fungus is a threat to world wheat production. *Annual review of phytopathology*, 49, 465-481.
- Singh, R. P., Hodson, D. P., Huerta-Espino, J., Jin, Y., Njau, P., Wanyera, R., Ward, R. W. (2008). Will stem rust destroy the world's wheat crop *Advances in agronomy*, 98, 271-309.
- Singh, R. P., Hodson, D. P., Jin, Y., Lagudah, E. S., Ayliffe, M. A., Bhavani, S., Huerta-Espino, J. (2015). Emergence and spread of new races of wheat stem rust fungus: continued threat to food security and prospects of genetic control. *Phytopathology*, 105(7), 872-884.
- Soresa, D. N. (2018). Evaluation of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes for resistance against stem rust (*Puccinia graminis* f. sp. *tritici*) diseases at seedling and adult stages. *African Journal of Agricultural Research*, 13(52), 2904-2910.
- Vahed Rezaei, A., Asghari, A., Norouzi, M., Aharizad, S., Roohparvar, R., & Amini, A. (2023). Biometrical analysis of resistance to stem rust (*Puccinia graminis* f. sp. *tritici*) in the winter wheat genotypes. *Journal of Plant Physiology and Breeding*, 201-225.
- Winfield, M. O., Allen, A. M., Wilkinson, P. A., Burrige, A. J., Barker, G. L., Coghill, J., Edwards, K. J. (2018). High-density genotyping of the AE Watkins Collection of hexaploid landraces identifies a large molecular diversity compared to elite bread wheat. *Plant biotechnology journal*, 16(1), 165-175.
- Yang, Y., Liu, Q., Han, C., Qiao, Y., Yao, X., & Yin, H. (2007). Influence of water stress and low irradiance on morphological and physiological characteristics of *Picea asperata* seedlings. *Photosynthetica*, 45, 613-619.
- Zhao, Y., Aspinall, D., & Paleg, L. (1992). Protection of membrane integrity in *Medicago sativa* L. by glycinebetaine against the effects of freezing. *Journal of Plant Physiology*, 140(5), 541-543.