University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

Cereal Research
Vol. 13, No. 4, Winter 2024 (351-366)
doi: 10.22124/CR.2024.26308.1801
pISSN: 2252-0163 eISSN: 2538-6115

RESEARCH PAPER OPEN ACCESS

Genetic investigation of the resistance of promising wheat lines to virulence factors of stripe rust and leaf rust races

Amir Kabiri[1*], Faezeh Zaefariyan[2] and Ali Omrani[3]

1. Research Instructor, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran ([*] Corresponding author: a.kabiri366@gmail.com)
2. Associate Professor, Department of Agronomy, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Science and Natural University, Sari, Iran
3. Research Assistant Professor, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Moghan, Iran

Comprehensive abstract

Introduction

Stripe rust (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*) and leaf rust (*Puccinia triticina* Eriks) are among the prevalent and devastating fungal diseases of wheat worldwide. The use of genetic resistance is the most effective, sustainable, and economical strategy for controlling rusts. The first step in wheat breeding programs to create the effective genetic resistances (resistant varieties) to rust disease is to know the characteristics of rust isolates in different regions, and in the next step, is to identify resistance sources to produce resistant varieties. The objectives of this study were to determine the virulence factors of rust pathogens to resistance genes in international standard and differential cultivars and lines associated with each rust and to evaluate the response of promising wheat lines to stripe and leaf rust races to identify resistance sources.

Materials and methods

Five stripe rust isolates collected from the regions of Karaj, Sari, Zarqan, Moghan, and Mashhad, and three leaf rust isolates collected from the regions of Gorgan, Moghan, and Ahvaz were identified. To identify the sources of resistance to the studied stripe and leaf rust races, the reaction of 23 promising wheat lines (ERWYT-N99) was evaluated at seedling stage (rusts greenhouses of Seed and Plant Improvement Institute, Karaj, Iran) and adult plant stage (research station of the Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Moghan, Iran). The resistance reaction of wheat lines to five stripe rust isolates and three leaf rust isolates at the seedling stage was evaluated in separate experiments based on randomized complete block design with three replications. The resistance reaction of wheat lines at the adult plant stage was also investigated under field conditions and natural contamination of stripe and leaf rusts using disease progression parameters on the plant and disease severity percentage appeared on leaves.

Research findings

The results of determining the race of the isolates showed that the stripe rust isolates collected from Karaj, Sari, Zarqan, Moghan, and Mashhad regions included the races of 14E158A+, Yr27; 142E158A+, Yr27; 6E134A+, Yr27;, 166E62A+, Yr27; and 6E142A+, Yr27; respectively, and the leaf rust isolates collected from Gorgan, Moghan, and Ahvaz included FDTTS, FKTTS, and FJTTS, respectively. The resistance genes *Yr1, Yr4, Yr5, Yr10, Yr15, Yr24, YrSU, YrSP*, and *YrCV* were identified as the effective resistance genes against stripe rust races, and the resistance genes *Lr1, Lr2a, Lr9, Lr19*, and *Lr28* were identified as the effective resistance genes against leaf rust races. The results showed that there was a significant genetic difference between the reaction of promising wheat lines to

CC BY

stripe and leaf rust races. Based on the results of the reaction of wheat lines to stripe rust races in both seedling and adult plant stages, wheat lines were divided into two main groups (resistant and semi-resistant to semi-susceptible), so that except for lines number 21 and 22 (with semi-resistant to semi-susceptible reaction), other wheat lines showed acceptable resistance to stripe rust races. Based on the reaction of promising wheat lines to leaf rust races in both seedling and adult plant stages, the lines were also classified into three main groups (resistant, semi-resistant to semi-susceptible, and susceptible), and lines number 1, 3, 11, 14, 21, and 22 showed acceptable resistance to leaf rust races.

Conclusion

Developing durable and effective resistance is one of the crucial strategy for mitigating the detrimental effects of wheat diseases and reducing the excessive reliance of chemical fungicides. In addition to exhibiting high yield potential and desirable agronomic traits, newly developed wheat lines must harbor an acceptable level of resistance to the most prevalent wheat diseases, particularly rusts, to qualify for commercialization. The presence of rust pathogens poses a significant threat during the growing season. If environmental conditions favor their pathogenicity, the damage inflicted can be substantial, warranting the development of robust resistant varieties. The resistant lines identified in this study can be used as sources of resistance in breeding programs to develop wheat varieties resistant to stripe and leaf rust diseases.

Keywords: *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*, *Puccinia triticina* Eriks, Resistance genes, Virulence

Received: September 15, 2023 Accepted: December 16, 2023

Cite this article:

Kabiri, A., Zaefariyan, F., & Omrani, A. (2024). Genetic investigation of the resistance of promising wheat lines to virulence factors of stripe rust and leaf rust races. *Cereal Research*, *13*(4), 351-366. doi: 10.22124/CR.2024.26308.1801.

تحقیقات غلات
دوره سیزدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۲ (۳۶۶-۳۵۱)
doi: 10.22124/CR.2024.26308.1801
مقاله پژوهشی
دسترسی آزاد

بررسی ژنتیکی مقاومت لاین‌های امیدبخش گندم نسبت به فاکتورهای بیماری‌زایی نژادهای زنگ زرد و زنگ قهوه‌ای

امیر کبیری*[۱]، فائزه زعفریان[۲] و علی عمرانی[۳]

۱- مربی پژوهش، موسسه اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران (* نویسنده مسئول: a.kabiri366@gmail.com)

۲- دانشیار، گروه زراعت، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۳- استادیار پژوهش، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اردبیل، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مغان، ایران

چکیده جامع

مقدمه: زنگ زرد (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*) و زنگ قهوه‌ای (*Puccinia triticina* Eriks) از شایع‌ترین و خسارت‌زاترین بیماری‌های قارچی گندم در سراسر جهان هستند. استفاده از مقاومت‌های ژنتیکی کارآمدترین، سالم‌ترین و اقتصادی‌ترین روش کنترل زنگ‌ها است. اولین گام در برنامه‌های به‌نژادی گندم برای ایجاد مقاومت‌های ژنتیکی موثر (رقم‌های مقاوم) نسبت به بیماری زنگ‌ها، اطلاع از ویژگی‌های نژادهای بیمارگر زنگ‌ها در مناطق مختلف و در مرحله بعد برای پیشبرد برنامه‌های به‌نژادی تولید ارقام مقاوم، شناسایی منابع مقاومت است. هدف از این مطالعه، تعیین الگوی پرآزاری عوامل بیماری زای مرتبط با هر یک از زنگ‌ها روی ژن‌های مقاومت در مجموعه ارقام و لاین‌های استاندارد و افتراقی بین‌المللی و ارزیابی واکنش لاین‌های امیدبخش گندم نسبت به نژادهای زنگ زرد و قهوه‌ای به‌منظور شناسایی منابع مقاومت بود.

مواد و روش‌ها: نژادهای پنج جدایه زنگ زرد جمع‌آوری شده از مناطق کرج، ساری، زرقان، مغان، مشهد و سه جدایه زنگ قهوه‌ای جمع‌آوری شده از مناطق گرگان، مغان و اهواز تعیین شدند. به‌منظور شناسایی منابع مقاومت نسبت به نژادهای مورد مطالعه، واکنش ۲۳ لاین امیدبخش گندم (ERWYT-N99) در مراحل گیاهچه‌ای (در گلخانه زنگ موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه و نهال و بذر کرج) و گیاه بالغ (در ایستگاه تحقیقاتی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل، مغان) بررسی شد. واکنش مقاومت لاین‌ها نسبت به پنج نژاد زنگ زرد و سه نژاد زنگ قهوه‌ای در مرحله گیاهچه‌ای در آزمایش‌های مجزا در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار ارزیابی شد. در مرحله گیاه بالغ نیز واکنش مقاومت لاین‌ها تحت شرایط مزرعه و آلودگی طبیعی زنگ زرد و قهوه‌ای با استفاده از ویژگی‌های پیشرفت بیماری روی گیاه و درصد شدت بیماری ظهور یافته روی برگ‌ها بررسی شد.

یافته‌های تحقیق: بر اساس نتایج تعیین نژاد جدایه‌ها در این مطالعه، جدایه‌های زنگ زرد جمع‌آوری شده از مناطق کرج، ساری، زرقان، مغان و مشهد به‌ترتیب به‌عنوان نژادهای 14E158A+, Yr27، 142E158A+, Yr27، 6E134A+, Yr27، 166E62A+, Yr27 و 6E142A+, Yr27 و جدایه‌های زنگ قهوه‌ای جمع‌آوری شده از مناطق گرگان، مغان و اهواز به‌ترتیب به‌عنوان نژادهای FDTTS، FKTTS و FJTTS شناسایی شدند. ژن‌های مقاومت *Yr1*، *Yr4*، *Yr5*، *Yr10*، *Yr15*، *Yr24*، *YrSU*، *YrSP* و *YrCV* از جمله ژن‌های مقاومت موثر نسبت به نژادهای زنگ زرد و ژن‌های مقاومت *Lr1*، *Lr2a*، *Lr9*، *Lr19*

و *Lr28* نیز از جمله ژن‌های مقاومت موثر نسبت به نژادهای زنگ قهوه‌ای بودند. نتایج نشان داد که از لحاظ ژنتیکی تفاوت معنی‌داری بین واکنش لاین‌های گندم نسبت به نژادهای زنگ زرد و زنگ قهوه‌ای وجود داشت. بر اساس واکنش مقاومت لاین‌های گندم نسبت به نژادهای زنگ زرد در هر دو مرحله گیاهچه‌ای و گیاه بالغ، لاین‌های گندم در دو گروه اصلی (مقاوم و نیمه‌مقاوم تا نیمه‌حساس) تفکیک شدند، به‌طوری که به‌جز لاین‌های شماره ۲۱ و ۲۲ که دارای واکنش نیمه‌مقاوم تا نیمه‌حساس بودند، سایر لاین‌های گندم نسبت به نژادهای زنگ زرد مقاومت قابل قبولی را نشان دادند. همچنین، بر اساس واکنش مقاومت لاین‌های گندم نسبت به نژادهای زنگ قهوه‌ای در هر دو مرحله گیاهچه‌ای و گیاه بالغ، لاین‌ها در سه گروه اصلی (مقاوم، نیمه‌مقاوم تا نیمه‌حساس و حساس) دسته‌بندی شدند و لاین‌های شماره ۱، ۳، ۱۱، ۱۴، ۲۱ و ۲۲ مقاومت قابل قبولی را نسبت به نژادهای زنگ قهوه‌ای نشان دادند.

نتیجه‌گیری: ایجاد مقاومت‌های مؤثر و پایدار یکی از راه‌هایی است که می‌تواند منجر به کاهش خسارت این بیماری‌ها و کاهش مصرف بی‌رویه سموم شیمیایی شود. لاین‌های جدید گندم، علاوه بر عملکرد بالا و ویژگی‌های زراعی مطلوب، باید نسبت به مهم‌ترین بیماری‌های گندم (زنگ‌ها) مقاومت قابل قبولی داشته باشند تا بتوانند به‌عنوان رقم تجاری معرفی شوند، در غیر این صورت حذف می‌شوند، زیرا در صورت فراهم شدن شرایط محیطی مناسب برای فعالیت بیمارگر زنگ‌ها، خسارت بسیار چشم‌گیر خواهد بود. از لاین‌های مقاوم شناسایی شده در این تحقیق می‌توان به‌عنوان منابع مقاومت در برنامه‌های به‌نژادی تهیه ارقام گندم مقاوم به زنگ زرد و زنگ قهوه‌ای استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: ارقام افتراقی، ژن‌های مقاومت مرحله گیاه بالغ، ژن‌های مقاومت مرحله گیاهچه‌ای، *Puccinia striiformis* *Puccinia triticina* Eriks ،f. sp. *tritici*

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۵

نحوه استناد به این مقاله:

کبیری، امیر، زعفریان، فائزه، و عمرانی، علی. (۱۴۰۲). بررسی ژنتیکی مقاومت لاین‌های امیدبخش گندم نسبت به فاکتورهای بیماری‌زایی نژادهای زنگ زرد و زنگ قهوه‌ای. *تحقیقات غلات*، ۱۳ (۴)، ۳۶۶-۳۵۱. doi: 10.22124/CR.2024.26308.1801

مقدمه

انواع تنش‌های زیستی و غیرزیستی همه ساله باعث کاهش عملکرد در تولید محصول گندم می‌شوند. بیماری‌ها مهم‌ترین تنش‌های زیستی به‌شمار می‌آیند و می‌توانند عملکرد گندم را تا ۲۰ درصد در سطح جهان کاهش دهند (Bouvet *et al*., 2022). زنگ زرد (نواری) و زنگ قهوه‌ای (برگ) که به‌ترتیب توسط عامل‌های قارچی (*Puccinia striiformis* f.sp. *tritici* Eriks) و (*Puccinia triticina*) ایجاد می‌شوند، از شایع‌ترین و خسارت‌زاترین بیماری‌های گندم در سراسر دنیا از جمله ایران محسوب می‌شوند. خسارت سالیانه زنگ‌ها به محصول گندم تا ۵۰ میلیون تن در سطح جهان تخمین زده شده است (Huerta-Espino *et al*., 2020; Basnet *et al*., 2022). زنگ قهوه‌ای در شرایط مساعد می‌تواند تا ۵۰ درصد از عملکرد گندم را کاهش دهد. زنگ زرد نیز بسته به شدت همه‌گیری باعث کاهش ۱۰ تا ۷۰ درصدی عملکرد و گاهی در همه‌گیری‌های شدیدتر، سبب از بین رفتن کامل محصول گندم می‌شود (Ye *et al*., 2022; Bouvet *et al*., 2022). طبق بررسی‌های به‌عمل آمده، زنگ قهوه‌ای وسعت پراکندگی و میزان خسارت بیش‌تری نسبت به سایر زنگ‌ها در دنیا دارد و زنگ زرد در جایگاه دوم می‌باشد (Kolmer, 2019). هوای خنک و رطوبت نسبی بالا در اوایل فصل بهار زمینه مناسبی را برای شیوع زنگ زرد روی ارقام حساس گندم فراهم می‌سازد. این بیماری به‌دلیل نیاز دمایی پایین‌تر عموماً زودتر از سایر زنگ‌ها در مزرعه ظهور می‌یابد. زنگ قهوه‌ای نیاز دمایی بالاتری از زنگ زرد و پایین‌تری از زنگ سیاه برای فعالیت و تکثیر دارد و معمولاً بعد از زنگ زرد در مزرعه مشاهده می‌شود.

زنگ‌ها علاوه بر گندم و جو به چاودار، یولاف و بیش از ۳۲۰ گونه متعلق به ۱۸ جنس از گیاهان خانواده گندمیان حمله و ایجاد بیماری می‌کنند. از جمله خسارت‌هایی که بیماری‌های زنگ گندم ایجاد می‌کنند، می‌توان به کوچک و چروکیده شدن دانه‌ها، آسیب پنجه‌ها و حتی در برخی موارد از بین رفتن تمام محصول گندم در مزرعه اشاره کرد (McIntosh *et al*., 1995). اگرچه شدت بروز زنگ‌ها بسته به فراهم بودن شرایط محیطی ایده‌ال برای هر یک از زنگ‌ها از لحاظ دما، زمان مناسب استقرار بیماری، میزان مایه تلقیح اولیه و میزان مقاومت موجود در ارقام کشت شده در منطقه متفاوت است، با این‌حال استفاده از ارقام مقاوم، کارآمدترین، اقتصادی‌ترین و ایمن‌ترین روش سازگار با محیط زیست نسبت به سایر روش‌های کنترل زنگ‌ها است. در این روش، صرف‌نظر از هزینه‌های بالای استفاده از سموم شیمیایی، اثرات سوء باقی ماندن سموم شیمیایی در محیط زیست به‌عنوان بزرگ‌ترین چالش کنترل شیمیایی منتفی است (Draz *et al*., 2015; Pooja *et al*., 2022). ایجاد مقاومت ژنتیکی در ژنوتیپ‌های گندم مستلزم کوشش‌های مستمر است، چرا که زنگ‌ها به‌دلیل داشتن نژادهای فیزیولوژیک متعدد، فرم‌های بیماری‌زایی متفاوت و توانایی به‌وجود آوردن نژادهای جدید از طریق ترکیبات جنسی و غیرجنسی، قادر هستند ژن‌های مقاومت موجود در ژنوتیپ‌های مقاوم را بشکنند و باعث ایجاد همه‌گیری شوند (McCallum *et al*., 2016). تا کنون بیش از ۲۸۰ ژن مقاومت به زنگ‌ها در سطوح ژنتیکی مختلف در گندم شناسایی شده است که منشا بسیاری از آن‌ها از خویشاوندان گندم بوده است. از بین ژن‌های مقاومت، حدود ۸۰ ژن مقاومت نسبت به زنگ قهوه‌ای و ۱۰۵ ژن مقاومت نسبت به زنگ زرد شناسایی شده است (Zhang *et al*., 2020 a, b; Basnet *et al*., 2022). به‌نژادگران همیشه به‌دنبال راهی برای ایجاد مقاومت‌های پایدار و یا مقاومت‌هایی هستند که نرخ سرعت همه‌گیری را کاهش دهند.

مقاومت به زنگ‌ها در گندم از لحاظ دوره رشدی به دو دسته، مقاومت گیاهچه‌ای (Seedling resistance) و مقاومت گیاه بالغ (Adult plant resistance) تقسیم می‌شود. طول عمر مقاومت مرحله گیاهچه‌ای کوتاه و معمولاً چند سال می‌باشد و اغلب توسط تعداد محدودی از ژن‌های مقاومت کنترل می‌شود. مقاومت گیاهچه‌ای اختصاص به نژاد (Race specific) دارد، به‌عبارت دیگر این نوع مقاومت در برابر تعداد محدوی از نژادهای بیمارگر موثر و در برابر برخی دیگر بی‌اثر است. این مقاومت در تمام مراحل رشد گیاه بیان می‌شود و سطح بالایی از مقاومت را در برابر بیش‌تر نژادهای بیمارگر ایجاد می‌کند. اغلب ژن‌های مقاومت گیاهچه‌ای منجر به بروز واکنش فوق‌حساسیت (Hypersenstive resistance) یا چوبی شدن دیواره‌های سلولی در گیاه در نواحی می‌شود که عامل بیماری نفوذ کرده و در حال فعالیت و گسترش است. این نوع مقاومت می‌تواند به‌علت تغییر در الگوی پرآزاری قارچ عامل بیماری به‌دلیل تولید مثل جنسی (نوترکیبی ژنی)، جهش، مهاجرت و فشار انتخاب بیمارگر توسط ژن‌های مقاومت، به‌راحتی شکسته شود (Figueroa

et al., 2020). در مقابل، مقاومت گیاه بالغ که در مراحل بعد از مرحله گیاهچه‌ای (بعد از رویش برگ پرچم) ایجاد می‌شود، غیراختصاص به نژاد (Non race specific) عمل می‌کند و از پایداری بیش‌تری برخوردار است. مقاومت گیاه بالغ یا مقاومت مزرعه‌ای و یا مقاومت نسبی (ناقص یا جزئی)، باعث ایجاد مقاومت نسبی در برابر کلیه نژادهای عامل بیماری می‌شود و به‌طور معمول زنگ- زدگی تدریجی (Slow rusting) را در گیاه ایجاد می‌کند. اثرات این ژن‌ها به‌تنهایی در بیش‌تر مواقع جزئی است، اما در ترکیبات ژنی با ژن‌های مقاومت گیاهچه‌ای باعث ایجاد اثرات افزایشی می‌شوند و می‌توانند سطوح بالاتری از مقاومت را ایجاد کنند (Ellis *et al*., 2014; Huerta-Espino *et al*., 2020). عمر ژن‌های مقاومت اختصاصی به نژاد می‌تواند با استفاده از ترکیب ژن‌های مسئول مقاومت ناقص (جزئی) افزایش یابد. همچنین می‌توان ژن‌های مقاومت در مرحله گیاه بالغ را با ژن‌هایی که زنگ-زدگی تدریجی ایجاد می‌کنند، ترکیب کرد. ژن‌های مقاومت در مرحله گیاه بالغ به‌تنهایی نمی‌توانند مقاومت کافی را در برابر نژادهایی که دارای بیماری‌زایی بالا هستند، ایجاد کنند، اما با ترکیب چهار تا پنج ژن از این نوع نتایج بسیار مطلوبی ایجاد می‌شود (Huerta-Espino *et al*., 2020).

همه ساله مطالعات گسترده‌ای در زمینه تعیین الگوی پرآزاری نژادهای زنگ‌ها روی ژن‌های مقاومت و شناسایی منابع مقاومت به زنگ‌ها در کشورهای مختلف صورت می‌گیرد. گزارش‌های مختلف نشان می‌دهند که ژن‌های مقاومت *Yr2*، *Yr3*، *Yr6*، *Yr7*، *Yr8*، *Yr9*، *Yr20*، *Yr25*، *Yr28*، *Yr29*، *Yr31* و *YrExp2* کارآیی لازم را در برابر نژادهای پویای زنگ زرد در سطح جهان ندارند و بی‌اثر شده‌اند. ژن‌های مقاومت *Yr5* و *Yr15* از جمله ژن‌های مقاومت موثر در برابر اغلب نژادهای زنگ زرد هستند و سایر ژن‌های مقاومت مانند *Yr1*، *Yr4*، *Yr10*، *Yr17*، *Yr18*، *Yr24*، *Yr26*، *Yr27*، *Yr32*، *Yr43*، *Yr44*، *Yr64*، *Yr65*، *Yr76*، *Yr84*، *YrCV*، *YrSD*، *YrSP*، *YrSU*، *YrND* و *YrTr1* در برابر تعداد محدودی از نژادهای زنگ زرد در سطح جهان کارآیی دارند (Hovmøller *et al*., 2016; Chen, 2020). در مورد زنگ قهوه‌ای نیز ژن‌های مقاومت *Lr2c*، *Lr3*، *Lr3ka*، *Lr3bg*، *Lr10*، *Lr11*، *Lr12*، *Lr13*، *Lr14a*، *Lr14b*، *Lr17*، *Lr18*، *Lr24*، *Lr25*، *Lr26*، *Lr30*، *Lr32*، *Lr33*، *Lr34*، *Lr35*، *Lr36*، *Lr37* و *Lrb* کارآیی لازم را در برابر نژادهای پویای زنگ قهوه‌ای در سطح جهان ندارند و بی‌اثر شده‌اند. ژن‌های مقاومت *Lr2a*، *Lr2b*، *Lr9*، *Lr10/Lr27/Lr31*، *Lr19* و *Lr28* از جمله ژن‌های مقاومت موثر در برابر اغلب نژادهای زنگ قهوه‌ای هستند. سایر ژن‌های مقاومت نظیر *Lr1*، *Lr15*، *Lr16*، *Lr20*، *Lr21*، *Lr22a*، *Lr23* و *Lr29* در برابر تعداد محدودی از نژادهای زنگ قهوه‌ای در سطح جهان کارآیی دارند (Huerta-Espino *et al*., 2020; McCallum *et al*., 2020, 2021; Dadrezaei *et al*., 2022 a, b).

هدف از این پژوهش شناسایی الگوی پرآزاری عامل‌های (ژن‌های) نژادهای زنگ زرد و زنگ قهوه‌ای روی ژن‌های مقاومت موجود در ارقام و لاین‌های افتراقی زنگ زرد و زنگ قهوه‌ای و همچنین شناسایی منابع مقاومت موثر نسبت به این نژادها به‌منظور ایجاد مقاومت‌های پایدار در لاین‌های جدید گندم در برنامه‌های به‌نژادی بود.

مواد و روش‌ها

در زمان جمع‌آوری نمونه‌های برگی آلوده در مزرعه این احتمال وجود دارد که زنگ‌های مختلف و سایر عوامل بیماری‌زای قارچی دیگر همزمان در یک نمونه برگی وجود داشته باشند. به‌منظور حذف یوردینیسپورهای سایر زنگ‌ها از نمونه‌های برگی آلوده به زنگ زرد و نمونه‌های آلوده به زنگ قهوه‌ای، چند دوره خالص‌سازی (جدا نمودن قسمت‌های آلوده برگ به زنگ مد نظر، شستشو با آب مقطر و قرار دادن روی کاغذ صافی استریل مرطوب در پتری‌دیش جهت تولید یوردینیسپورهای جدید روی جوش‌های موجود در نمونه‌های برگی جدا شده) و تکثیر جدایه‌های اولیه روی رقم حساس بولانی از طریق روش مالشی انجام شد. اسپورهای خالص جدایه‌ها هر کدام به‌صورت جداگانه پس از تکثیر روی میزبان حساس جمع‌آوری و در آزمایش‌های تعیین نژاد و ارزیابی لاین‌های امیدبخش گندم مورد استفاده قرار گرفتند (Ali & Hodson, 2017).

تعیین نژاد جدایه‌های خالص‌سازی شده زنگ زرد و قهوه‌ای به‌منظور تعیین الگوی بیماری‌زایی (ویرولانس) روی ارقام استاندارد و افتراقی حامل ژن‌های مقاومت مختلف انجام شد (Figueroa *et al*., 2020). برای تعیین نژاد جدایه‌ها از دو مجموعه ارقام استاندارد و افتراقی بین‌المللی (دریافتی از سیمیت) استفاده شد. مجموعه ارقام استاندارد و افتراقی برای زنگ زرد شامل ۵۶ ژنوتیپ

و برای زنگ قهوه‌ای شامل ۳۹ ژنوتیپ بود (جدول ۱). پس از جوانه‌زنی بذر ارقام استاندارد و افتراقی در خاک مزرعه، گیاهچه‌ها، هنگامی که برگ اول به رشد کامل رسید و برگ دوم در حال ظاهر شدن بود، با مخلوط همگن از یوردینیوسپور خالص تکثیر شده و روغن صنعتی سالترول ۱۷۰ مایه‌زنی شدند (هر جدایه به‌طور جداگانه مایه‌زنی شد). سپس گیاهچه‌ها با آب مقطر مه‌پاشی و به‌منظور جلوگیری از اختلاط اسپور سایر نژادها در گلخانه و حفظ رطوبت، با استفاده از سرپوش‌های پلاستیکی پوشانده شد و به‌مدت ۲۴ ساعت در تاریکی کامل با دمای ۱۰ درجه سلسیوس برای زنگ زرد و ۱۸ درجه سلسیوس برای زنگ قهوه‌ای در شرایط رطوبت اشباع قرار گرفتند. پس از سپری شدن مرحله تاریکی و برای گذراندن دوره کمون بیماری، گیاهچه‌های ارقام استاندارد و افتراقی زنگ زرد به‌مدت ۲۱ روز و گیاهچه‌های ارقام استاندارد و افتراقی زنگ قهوه‌ای به‌مدت ۱۴ روز به گلخانه‌های با دمای ۲۲ درجه سلسیوس برای زنگ قهوه‌ای و ۱۴ درجه سلسیوس برای زنگ زرد با دوره نوری ۱۶ ساعت روشنایی (با شدت نور حداقل ۱۲۰۰۰ لوکس) و ۸ ساعت تاریکی منتقل شدند (Ali & Hodson, 2017). یادداشت‌برداری از واکنش گیاهچه‌های مایه‌زنی شده (تیپ آلودگی) نسبت به زنگ زرد بر اساس مقیاس صفر تا ۹ و نسبت به زنگ قهوه‌ای بر اساس مقیاس صفر تا ۴ انجام شد (McIntosh *et al*., 1995).

نام‌گذاری نژادهای زنگ زرد با استفاده از سیستم کددهی جانسون و همکاران (Johnson *et al*., 1972) و نام‌گذاری نژادهای زنگ قهوه‌ای با استفاده از سیستم کددهی اوردونز و همکاران (Ordoñez *et al*., 2010) صورت گرفت. نام‌گذاری نژادهای بیمارگر زنگ زرد در سیستم جانسون و همکاران (Johnson *et al*., 1972) به این صورت انجام شد. ابتدا شماره به‌دست آمده از مجموع واکنش ارقام استاندارد متمایز کننده جهانی (Word set) که مشتمل بر هشت رقم می‌باشد، در فرمول بیماری‌زایی جایگزین و پس از آن پیشوند E که از کلمه اروپایی گرفته شده، اضافه شد و سپس شماره به‌دست آمده از مجموع واکنش سری دوم ارقام استاندارد متمایز کننده اروپایی (European set) که شامل هشت رقم می‌باشد، نوشته شد. این سیستم دارای تعدادی ارقام حساس عمومی (Universal susceptible) نیز می‌باشد. رقم Avocet که دارای ژن *YrA* است، در صورت وجود ویرولانس و عدم ویرولانس روی این رقم به فرمول به‌دست آمده به‌ترتیب A^+ و A^- اضافه می‌شود. برای نام‌گذاری نژادهای بیمارگر زنگ قهوه‌ای در سیستم اوردونز و همکاران (Ordoñez *et al*., 2010) نیز پنج خانواده یا گروه ژنی وجود دارد (ارقام استاندارد و متمایزکننده) که هر خانواده شامل چهار عضو با ژن‌های متفاوت است. نام‌گذاری با توجه به نوع آلودگی (بالا یا پایین) برای اعضای هر یک از گروه‌ها، برای هر ترکیب بیماری‌زایی/ غیربیماری‌زایی در یک خانواده ژنی (سری ژنی) یک حرف انگلیسی از حرف B تا T در نظر گرفته می‌شود که مجموعاً ۱۶ حالت ممکن تعیین شده است. وجود پنج خانواده ژنی سبب شده برای هر نژاد یک نام پنج حرفی ایجاد شود.

در این تحقیق واکنش مقاومت گیاهچه‌ای ۲۳ لاین امیدبخش گندم (ERWYT-N99) مربوط به اقلیم گرم و مرطوب شمال (شجره لاین‌های مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است) و رقم حساس بولانی به‌عنوان شاهد نسبت به پنج جدایه عامل بیماری زنگ زرد و سه جدایه عامل بیماری زنگ قهوه‌ای (در آزمایش‌های مجزا) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار ارزیابی شد. کلیه مراحل آزمایش‌های ارزیابی لاین‌های امیدبخش در گلخانه مشابه آزمایش‌های تعیین نژاد انجام شده در گلخانه بود. صفت تیپ آلودگی لاین‌های گندم نیز ۲۱ روز برای زنگ زرد و ۱۴ روز برای زنگ قهوه‌ای پس از مایه‌زنی بر اساس مقیاس‌های ذکر شده برای هر یک از زنگ‌ها ثبت شد. به‌منظور غربال‌گری فنوتیپی ۲۳ لاین امیدبخش گندم در مرحله گیاه بالغ پس از کاشت و کامل شدن مراحل رشدی لاین‌های مورد مطالعه در ایستگاه تحقیقاتی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان)، تحت شرایط مزرعه و آلودگی طبیعی زنگ زرد و قهوه‌ای توسط پارامترهای پیشرفت بیماری روی گیاه و درصد شدت بیماری ظهور یافته روی برگ‌ها بررسی شدند.

کاشت بذر در مزرعه به‌صورت خطی روی دو خط یک متری به‌فاصله ۳۰ سانتی‌متر انجام شد. جهت تسهیل در توسعه بیماری، در اطراف خزانه و همچنین به‌ازای هر ده خط لاین گندم مورد مطالعه یک خط شاهد حساس بولانی کاشته شد. کنترل علف‌های هرز در آزمایش‌های مزرعه‌ای به‌صورت مکانیکی (دستی) و آبیاری ارقام استاندارد و افتراقی و لاین‌های امیدبخش گندم مورد مطالعه طبق عرف منطقه مغان در پنج نوبت انجام شد.

جدول ۱- ژن‌های مقاومت و لاین‌های افتراقی مورد استفاده برای تعیین نژادهای فیزیولوژیک زنگ زرد و زنگ قهوه‌ای گندم

Table 1. *Lr* and *Yr* genes and differential lines used to determine pathotypes and physiologic races of wheat stripe and leaf rust

No.	Name/Pedigree	*Lr or Yr* genes	No.	Name/Pedigree	*Lr or Yr* genes
1	Thatcher	*Lr22b*	9	*Triticum spelta var. album*	*Yr5*
2	TC*6/CENTENARIO (RL6003)	*Lr1*	10	Hybrid 46	*Yr4*
3	TC*6/WEBSTER (RL6016)	*Lr2a*	11	Reichersberg 42	*Yr7+*
4	TC*6/CARINA(RL6019)	*Lr2b*	12	Heines Peko	*Yr2,Yr6, +*
5	TC*6/LOROS(RL6047)	*Lr2c*	13	Nord Desprez	*YrND*
6	TC*6/DEMOCRAT(RL6002)	*Lr3*	14	Compair .	*Yr8*
7	TC*6/ANIVERSARIO(RL6007)	*Lr3ka*	15	Carstens V	*YrCV*
8	BAGE/8*TC(RL6042)	*Lr3bg*	16	Spalding Prolific	*YrSP*
9	TRANSFER/6*TC(RL6010)	*Lr9*	17	Heines VII	*Yr2+*
10	TC*6/EXCHANGE(RL6004)	*Lr10*	18	Avocet ‘R’	*YrA*
11	HUSSAR(W976)	*Lr11*	19	Kalyansona	*Yr2*
12	EXCHANGE/6*TC(RL6011)	*Lr12*	20	Trident	*Yr17+Sr38*
13	MANITUOU	*Lr13*	21	Yr15/6* Avocet S	*Yr15*
14	SELKIRK/6*TC(RL6013)	*Lr14a*	22	Hugenoot	*Yr25*
15	TC*6/MARIA ESCOBAR(RL6006)	*Lr14b*	23	Selkirk	*Yr27*
16	TC*6/KENYA1483(RL6052)	*Lr15*	24	Federation *4/Kavkaz	*Yr9*
17	TC*6/EXCHANGE(RL6005)	*Lr16*	25	Federation	
18	KLEIN LUCERO/6*TC(RL6008)	*Lr17*	26	Yr1/6*Avocet ‘S’	*Yr1*
19	TC*7/AFRICA43(RL6009)	*Lr18*	27	Yr5/6*Avocet ‘S’	*Yr5*
20	TC*7/TR(RL6040)	*Lr19*	28	Yr6/6*Avocet ‘S’	*Yr6*
21	THEW(W203)	*Lr20*	29	Yr7/6*Avocet ‘S’	*Yr7*
22	TC*6/RL5406(RL6043)	*Lr21*	30	Yr8/6*Avocet ‘S’	*Yr8*
23	TC*6/RL5404(RL6044)	*Lr22a*	31	Yr9/6*Avocet ‘S’	*Yr9*
24	LEE310/6*TC(RL6012)	*Lr23*	32	Yr10/6*Avocet ‘S’	*Yr10*
25	TC*6/AGENT(RL6064)	*Lr24*	33	Yr15/6* Avocet ‘S’	*Yr15*
26	TC*?/TRANSEC	*Lr25*	34	Yr17/6* Avocet ‘S’	*Yr17*
27	TC*6/ST-1-25(RL6078)	*Lr26*	35	Yr18/6* Avocet ‘S’	*Yr18*
28	GATCHER(W3201)	*Lr10 / Lr27 + / Lr31*	36	Yr24/6* Avocet ‘S’	*Yr24*
29	CS2D-2M	*Lr28*	37	Yr26/6* Avocet ‘S’	*Yr26*
30	TC*6/CS7AG#11(RL6080)	*Lr29*	38	Yr27/6* Avocet ‘S’	*Yr27*
31	TC*6/TERENZ10(RL6049)	*Lr30*	39	Yr32/6* Avocet ‘S’	*Yr32*
32	TCLR32(RL5497)	*Lr32*	40	YrSP/6* Avocet ‘S’	*YrSP*
33	TC*6/PI58548(RL6057)	*Lr33*	41	Jupateco73R	
34	TC*6/PI58548(RL6058)	*Lr34*	42	Jupateco73S	
35	RL5711	*Lr35*	43	Avocet ‘R”	*YrA*
36	E84018(NEP/AE.SPELTOIDES.2-9-w…	*Lr36*	44	Avocet ‘S”	
37	TC*6/VPM(RL6081)	*Lr37*	45	Bolani (Suceptible check)	
38	TC*6//CARINA(RL6051)	*Lrb*	46	Fielder	*Yr6, Yr20*
39	WL711	*Lr13*	47	Thatcher	*Yr7*
40	Bolani (Suceptible check)	-	48	Lemhi	*Yr21*
1	Chinese 166	*Yr1*	49	TP1295	*Yr25*
2	Lee	*Yr7*	50	Yr27/6*Av.S	*Yr27*
3	Heines Kolben	*Yr2*	51	Ciano79	*Yr27*
4	Vilmorin 23	*Yr3*	52	Opata85	*Yr27+Yr18*
5	Moro	*Yr10*	53	Avocet Yr28	*Yr28*
6	Strubs Dikkopf	*YrSD*	54	Lalbahador/Pavon	*Yr29*
7	Suwon 92/Omar	*YrSU*	55	Avocet-YrA*3/Pastor	*Yr31*
8	Clement	*Yr2, Yr9, +*	56	Pastor	*Yr31+APR*

شدت آلودگی در مرحله ظهور برگ پرچم پس از یکنواختی در ظهور بیماری روی رقم حساس (بولانی) از طریق تعیین درصد پوشش آلوده سطح برگ (۱۰۰-۰) یادداشت‌برداری شد. تیپ آلودگی نیز بر اساس روش مک‌اینتاش و همکاران (McIntosh *et al*., 1995) به‌شرح ذیل انجام شد:

O = مصون، بدون هیچگونه علائم

R = مقاوم، ظهور لکه‌های نکروتیک، بدون ظهور اسپور، یا جوش‌های ریز و پراکنده.

MR = نیمه‌مقاوم، ظهور جوش‌های کوچک زنگ که توسط لکه‌های نکروتیک و گاهی کلروتیک احاطه شده‌اند.

MS = نیمه‌حساس، ظهور جوش‌های با اندازه متوسط، بدون لکه‌های نکروتیک، گاهی همراه با لکه‌های کلروتیک.

S = حساس، وجود جوش‌های بزرگ به‌مقدار فراوان و بدون لکه‌های کلروتیک و گاهی همراه با این لکه‌ها.

در این بررسی، آلودگی بالاتر از 50S به‌عنوان بیماری‌زایی (پرآزاری) روی ژن‌های مورد مطالعه منظور شد. برای محاسبه ضریب آلودگی، داده‌های مربوط به شدت بیماری و تیپ آلودگی با هم ترکیب شدند. ضریب آلودگی از ضرب شدت بیماری در ثابت مربوط به واکنش میزبان (Immune=0.0, R=0.2, MR=0.4, M=0.6, MS=0.8, MSS=0.9, S=1) به‌دست آمد (McIntosh *et al*., 1995).

جدول ۲- شجره لاین‌های امیدبخش گندم مورد مطالعه

Table 2. Pedigree of studied promising wheat lines

ER-N-99 No.	Pedigree	ER-N-99 No.	Pedigree
1	Tirgan	13	MUCUY/3/PBW343*2/KUKUNA*2//FRTL/PIFED
2	Kalate	14	KFA/2*KACHU/3/PBW343*2/KUKUNA*2//FRTL/PIFED/4/KFA
3	Morvarid/Yang//VOROBEY	15	NELOKI//SOKOLL/EXCALIBUR
4	KACHU//WBLL1*2/BRAMBLING/3/KACHU/KIRITATI	16	MUCUY
5	KACHU//WBLL1*2/BRAMBLING*2/3/KACHU/KIRITATI	17	NELOKI//SOKOLL/EXCALIBUR
6	KACHU//WBLL1*2/BRAMBLING*2/3/KACHU/KIRITATI	18	BAJ #1*2/PREMIO
7	KACHU//WBLL1*2/BRAMBLING*2/3/KACHU/KIRITATI	19	KACHU#1/3/C80.1/3*BATAVIA//2*WBLL1/4/KACHU/8/TACUPE
8	ONIX/KBIRD*2//KFA/2*KACHU	20	SAUAL/MUTUS/4/KACHU #1//WBLL1*2/KUKUNA/3/BRBT1*2/K
9	KACHU/SAUAL*2/3/KINGBIRD #1//INQALAB 91*2/TUKURU	21	BABAX/LR42//BABAX/3/ER2000/7/CNO79//PF70354/MUS/3/PAS
10	KACHU/SAUAL*2/3/KINGBIRD #1//INQALAB 91*2/TUKURU	22	BAJ #1*2/PREMIO
11	UP2338*2/SHAMA/3/MILAN/KAUZ//CHIL/CHUM18/4/UP2338*2	23	BAVIS #1*2/PREMIO
12	MUTUS*2/TECUE #1/3/KINGBIRD #1//INQALAB 91*2/TUKURU	24	Bolani (Suceptible check)

توزیع انحرافات داده‌های مربوط به تیپ آلودگی در شرایط گلخانه‌ای به‌وسیله تبدیل آرک سینوس یا تبدیل زاویه‌ای نرمال شد. با توجه به این‌که ارزیابی ژنوتیپ‌ها نسبت به جدایه‌های مختلف در زمان‌های متفاوت انجام شد و شرایط گلخانه از لحاظ نور و دما در فصول مختلف سال کمی متفاوت بود، بنابراین از تجزیه واریانس مرکب برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده و هر جدایه معادل مکان آزمایش در نظر گرفته شد. جهت تجزیه مرکب و تجزیه خوشه‌ای از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۳ و برای آزمون نرمالیتی از نرم‌افزار Minitab نسخه ۱۶ استفاده شد.

نتایج و بحث

اطلاع از ساختار ژنتیکی جمعیت از طریق تعیین الگو و طیف پرآزاری نژادهای زنگ‌ها روی مجموعه ژن‌های مقاومت موجود در ارقام استاندارد و افتراقی بین‌المللی و بررسی روند تغییرات نژادی در جمعیت زنگ‌ها در مناطق مختلف در سازماندهی و موفقیت یک برنامه به‌نژادی ضروری است. مجموع این بررسی‌ها اطلاعات بسیار مهمی را در اختیار به‌نژادگران گندم برای ایجاد مقاومت‌های موثر و پایدار در ارقام گندم قرار می‌دهد و بدون این اطلاعات که در واقع حکم نقشه راه برای ادامه مسیر را دارند، مقاومت‌های ایجاد شده در ارقام مقاوم گندم تولید شده نسبت به انواع نژادهای زنگ‌ها، خیلی زود شکسته می‌شود و جز هزینه‌های هنگفتی که ایجاد خواهد کرد، نتیجه‌ای در بر نخواهد داشت.

بر اساس نتایج تعیین نژاد جدایه‌ها در این مطالعه، جدایه‌های زنگ زرد متعلق به مناطق کرج، ساری، زرقان، مغان و مشهد به‌ترتیب به‌عنوان نژاد 14E158A+, Yr27، 6E134A+, Yr27 ،142E158A+, Yr27

166E62A+, Yr27 و 6E142A+, Yr27 و جدایه‌های زنگ قهوه‌ای متعلق به مناطق گرگان، مغان و اهواز به‌ترتیب به‌عنوان نژاد FDTTS، FKTTS و FJTTS نام‌گذاری شدند (جدول‌های ۳ و ۴). نژادهای زنگ‌های زرد و قهوه‌ای شناسایی شده در این تحقیق از نژادهای رایج این بیماری‌های قارچی در ایران هستند (Omrani *et al*., 2013, 2014; Dadrezaei *et al*., 2022 a, b).

ژن‌های مقاومت *Yr1*، *Yr4*، *Yr5*، *Yr10*، *Yr15*، *Yr24*، *YrSU*، *YrSP* و *YrCV* از جمله ژن‌های مقاومت موثر در برابر نژادهای زنگ زرد و ژن‌های مقاومت *Lr1*، *Lr2a*، *Lr9*، *Lr19* و *Lr28* نیز از جمله ژن‌های مقاومت موثر در برابر نژادهای زنگ قهوه‌ای شناسایی شدند. ارقام و لاین‌های افتراقی حامل ژن‌های مقاومت *Yr3*، *Yr26* و *YrSD* نسبت به نژادهای زنگ زرد و ارقام و لاین‌های افتراقی حامل ژن‌های مقاومت *Lr2b*، *Lr16* و *Lr10/Lr27 +/Lr31* نسبت به نژادهای زنگ قهوه‌ای واکنش مقاومت اختصاصی داشتند. سایر ژن‌های مقاومت موجود در ارقام و لاین‌های افتراقی نسبت به نژادهای زنگ زرد و قهوه‌ای اثربخشی لازم را نداشتند.

نتایج تجزیه واریانس مرکب (جدول ۵) نشان داد که بین نژادهای زنگ زرد و زنگ قهوه‌ای مورد مطالعه و نیز بین لاین‌های گندم از نظر واکنش مقاومت نسبت به نژادهای زنگ زرد و زنگ قهوه‌ای در مرحله گیاهچه‌ای اختلاف آماری بسیار معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد وجود داشت. اثر برهمکنش لاین×نژاد نیز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. این نتایج نشان داد که واکنش هر یک از لاین‌های گندم نسبت به نژادهای زنگ زرد و زنگ قهوه‌ای یکسان نبود. به این ترتیب با توجه به وجود تنوع ژنتیکی بالا در بین لاین‌های گندم مورد مطالعه می‌توان از این لاین‌ها در برنامه‌های مکان‌یابی ارتباطی برای شناسایی ژن‌های مقاومت به بیماری‌های زنگ زرد و زنگ قهوه‌ای استفاده کرد (Mago *et al*., 2022). وجود تنوع ژنتیکی در جمعیت‌های قارچ‌های عامل بیماری‌های زنگ زرد و زنگ قهوه‌ای و همچنین وجود تنوع در واکنش مقاومت بین ژنوتیپ‌های مختلف گندم نسبت به نژادهای مختلف زنگ‌ها توسط محققین دیگر نیز گزارش شده است. عمرانی و همکاران (Omrani *et al*., 2013, 2014, 2017, 2018)، عمرانی و روح‌پرور (Omrani & Roohparvar, 2020, 2021) و دادرضایی و همکاران (Dadrezaei *et al*., 2018, 2022 a, b) نیز با تعیین الگوی پرآزاری نژادهای زنگ زرد، زنگ قهوه‌ای و زنگ سیاه، تنوع ژنتیکی بالایی را بین نژادهای زنگ‌ها و نیز بین ژنوتیپ‌های مختلف گندم از لحاظ واکنش نسبت به نژادهای متفاوت زنگ‌ها در مراحل گیاهچه‌ای و گیاه بالغ گزارش کردند.

واکنش مقاومت هر یک از لاین‌های گندم نسبت به نژادهای زنگ زرد و قهوه‌ای مورد مطالعه در دو مرحله گیاهچه‌ای و گیاه بالغ (منطقه مغان) در جدول‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. نتایج واکنش مقاومت لاین‌ها نسبت به نژادهای زنگ زرد در دو مرحله گیاهچه‌ای و گیاه بالغ نشان داد که لاین‌ها را می‌توان در دو گروه اصلی گروه‌بندی کرد، به‌طوری که حدود ۹۱ درصد از لاین‌ها دارای واکنش مقاومت و حدود هشت درصد دارای واکنش نیمه‌مقاومت تا نیمه‌حساسیت (مقاومت اختصاصی به نژاد) بودند.

جدول ۳- فرمول پرآزاری/ ناپرآزاری نژادهای بیماری زنگ زرد

Table 3. Avirulence/virulence formula of stripe rust races

No.	Location	Race	Virulence genes	Avirulence genes
1	Karaj	14E158A+, Yr27	*Yr2, Yr3, Yr6, Yr7, Yr8, Yr9; Yr17, Yr25, Yr26, Yr27; Yr32, YrA, YrND*	*Yr1, Yr4, Yr5, Yr10; Yr15, Yr24, YrSU, YrSP, YrCV, YrSD*
2	Sari	142E158A+, Yr27	*Yr2, Yr3, Yr6, Yr7, Yr8, Yr9; Yr17, Yr25, Yr26, Yr27; Yr32, YrA, YrND*	*Yr1, Yr4, Yr5, Yr10; Yr15, Yr24, YrSU, YrSP, YrCV, YrSD*
3	Zarghan	6E134A+, Yr27	*Yr2, Yr3, Yr6, Yr7, Yr8, Yr9; Yr17, Yr25, Yr26, Yr27; Yr32, YrA, YrND*	*Yr1, Yr4, Yr5, Yr10; Yr15, Yr24, YrSU, YrSP, YrCV, YrSD*
4	Moghan	166E62A+, Yr27	*Yr2, Yr6, Yr7, Yr8, Yr9; Yr17, Yr25, Yr26, Yr27; Yr32, YrA, YrSD, YrND*	*Yr1, Yr3, Yr4, Yr5, Yr10; Yr15, Yr24, YrSU, YrSP, YrCV*
5	Mashhad	6E142A+, Yr27	*Yr2, Yr6, Yr7, Yr8, Yr9; Yr17, Yr25, Yr27; Yr32, YrA, YrND*	*Yr1, Yr3, Yr4, Yr5, Yr10; Yr15, Yr24, Yr26; YrSU, YrSP, YrCV, YrSD*

جدول ۴- فرمول پرآزاری/ ناپرآزاری نژادهای بیماری زنگ قهوه‌ای

Table 4. Avirulence/virulence formula of leaf rust races

No.	Location	Race	Virulence genes	Avirulence genes
1	Moghan	FKTTS	*Lr22b, Lr2c, Lr3, Lr3ka, Lr3bg, Lr10, Lr11, Lr12, Lr13, Lr14a, Lr14b, Lr15, Lr16, Lr17, Lr18, Lr20, Lr21, Lr22a, Lr23, Lr24, Lr25, Lr26, Lr10 / Lr27 + / Lr31, Lr29, Lr30, Lr32, Lr33, Lr34, Lr35, Lr36, Lr37, Lrb, Lr13*	*Lr1, Lr2a, Lr2b, Lr9, Lr19, Lr28*
2	Ahvaz	FJTTS	*Lr22b, Lr2b, Lr2c, Lr3, Lr3ka, Lr3bg, Lr10, Lr11, Lr12, Lr13, Lr14a, Lr14b, Lr15, Lr16, Lr17, Lr18, Lr20, Lr21, Lr22a, Lr23, Lr24, Lr25, Lr26, Lr29, Lr30, Lr32, Lr33, Lr34, Lr35, Lr36, Lr37, Lrb, Lr13*	*Lr1, Lr2a, Lr9, Lr19, Lr10 / Lr27 + / Lr31, Lr28*
3	Gorgan	FDTTS	*Lr22b, Lr2c, Lr3, Lr3ka, Lr3bg, Lr10, Lr11, Lr12, Lr13, Lr14a, Lr14b, Lr15, Lr17, Lr18, Lr20, Lr21, Lr22a, Lr23, Lr24, Lr25, Lr26, Lr29, Lr30, Lr32, Lr33, Lr34, Lr35, Lr36, Lr37, Lrb, Lr13*	*Lr1, Lr2a, Lr2b, Lr9, Lr16, Lr19, Lr10 / Lr27 + / Lr31, Lr28*

جدول ۵- تجزیه مرکب تیپ آلودگی لاین‌های گندم نسبت به نژادهای زنگ زرد و زنگ قهوه‌ای در مرحله گیاهچه‌ای

Table 5. Combined analysis of variance for infection type of wheat lines to strip and leaf rusts at seedling stage

Source of variation	df		Mean square	
	Stripe rust	Leaf rust	Stripe rust	Leaf rust
Race	4	2	15.93**	21.69**
Error (1)	10	6	1.37	1.94
Line	23	23	29.78**	37.41**
Line × Race	92	46	32.8**	42.58**
Error (2)	230	138	3.86	4.71
CV (%)	-	-	9.74	11.14

^{ns}, * and ** Not-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

نتایج واکنش مقاومت لاین‌های گندم نسبت به نژادهای زنگ قهوه‌ای نیز در دو مرحله گیاهچه‌ای و گیاه بالغ (جدول ۷) نشان داد که لاین‌ها را می‌توان در سه گروه اصلی قرار داد، به‌طوری که حدود ۹۱ درصد از لاین‌های گندم دارای واکنش مقاومت، حدود هشت درصد دارای واکنش نیمه‌مقاومت تا نیمه‌حساسیت (مقاومت اختصاصی به نژاد) و حدود ۱۲ درصد دارای واکنش حساسیت بودند. تفکیک واکنش مقاومت، حساسیت و مقاومت نسبی (نیمه‌مقاومت تا نیمه‌حساسیت) با روش مشابه با زو و همکاران (Xu *et al*., 2009) انجام شد.

نتایج تجزیه خوشه‌ای بر اساس صفات تیپ آلودگی و ضریب آلودگی در مراحل گیاهچه‌ای و گیاه بالغ در شکل ۱ ارائه شده است. از بین روش‌ها و الگوریتم‌های مختلف تجزیه خوشه‌ای، روش متوسط فاصله بین گروه‌ها یا روش UPGMA بهترین دندروگرام را از نظر گرافیکی و ضریب همبستگی کوفنتیک ارائه داد. نتایج تجزیه خوشه‌ای نشان داد که ارقام تجاری گندم مورد مطالعه را از نظر نوع واکنش آن‌ها نسبت به نژادهای زنگ زرد در هر دو مرحله گیاهچه‌ای و گیاه بالغ می‌توان در دو گروه اصلی و نسبت به نژادهای زنگ قهوه‌ای در سه گروه اصلی گروه‌بندی کرد. تمامی لاین‌های گندم مورد مطالعه، به‌جز لاین‌های شماره ۲۱ و ۲۲ (که دارای واکنش نیمه‌مقاومت تا نیمه‌حساسیت بودند)، نسبت به نژادهای زنگ زرد مقاومت قابل قبولی را نشان دادند. واکنش لاین‌ها نسبت به نژادهای زنگ قهوه‌ای نیز نشان داد که لاین‌های منتسب به گروه حساس بالاترین مقادیر را برای صفات اندازه‌گیری شده در مراحل گیاهچه‌ای و گیاه بالغ داشتند. لاین‌های منتسب به گروه دوم مقادیر بینابین را برای صفات اندازه‌گیری شده داشتند. لاین‌های منتسب به این گروه دارای واکنش نیمه‌مقاومت تا نیمه‌حساسیت در یکی از دو مرحله گیاهچه‌ای و گیاه بالغ بودند. لاین‌های گروه سوم نیز که کم‌ترین مقادیر را برای صفات اندازه‌گیری شده داشتند، دارای واکنش مقاومت در هر دو مرحله گیاهچه‌ای و گیاه بالغ بودند. همچنین، لاین‌های شماره ۱، ۳، ۱۱، ۱۴، ۲۱ و ۲۲ نسبت به نژادهای زنگ قهوه‌ای مقاومت قابل قبولی را نشان دادند.

جدول ۶- واکنش مقاومت لاین‌های گندم در مراحل گیاهچه‌ای و گیاه بالغ نسبت به نژادهای زنگ زرد

Table 6. Resistance response of wheat lines to strip rust at seedling and adult plant stages

No.	Wheat line	Response of wheat lines to stripe rust races at seedling stage					Adult plant stage †
		Karaj	Sari	Zarghan	Mashhad	Moghan	
		14E158A+, YR27	142E158A+, YR27	6E134A+, YR27	6E142A+, YR27	166E62A+, YR27	
1	ERWYT-N99-1	2C	;1CN	2CN	;1CN	0;	10MR
2	ERWYT-N99-2	2C	0;	;1CN	2CN	;1CN	15MR
3	ERWYT-N99-3	3	0;	2CN	;1CN	;1CN	20MR
4	ERWYT-N99-4	2C	2CN	3	0;	2CN	10MR
5	ERWYT-N99-5	;1CN	;1CN	2CN	0;	3	20MR
6	ERWYT-N99-6	2CN	0;	2CN	;1CN	2CN	15MR
7	ERWYT-N99-7	3	0;	3	0	3	10MR
8	ERWYT-N99-8	3	;1CN	2CN	2C	3	10MR
9	ERWYT-N99-9	2CN	2CN	3	3	2CN	10MR
10	ERWYT-N99-10	;1CN	;1CN	2C	;1CN	0;	15MR
11	ERWYT-N99-11	;1CN	0;	0;	0;	2CN	10MR
12	ERWYT-N99-12	7	0;	2CN	3	3	20MR
13	ERWYT-N99-13	0	2CN	3	2CN	3	20MR
14	ERWYT-N99-14	0;	;1CN	;1CN	;1CN	3	15MR
15	ERWYT-N99-15	2CN	0;	2CN	;1CN	3	20MR
16	ERWYT-N99-16	8	0;	2C	3	2CN	10MR
17	ERWYT-N99-17	2C	0;	2CN	0;	;1CN	15MR
18	ERWYT-N99-18	;1CN	2CN	;1CN	0;	2CN	10MR
19	ERWYT-N99-19	2CN	2CN	3	0;	;1CN	15MR
20	ERWYT-N99-20	2CN	2CN	3	2CN	;1CN	20MR
21	ERWYT-N99-21	7	2CN	2CN	3	8	20MS
22	ERWYT-N99-22	6	;1CN	4	2CN	3	30MS
23	ERWYT-N99-23	2CN	;1CN	0;	;1CN	2CN	20MR
24	Bolani	8	8	8	8	8	100S

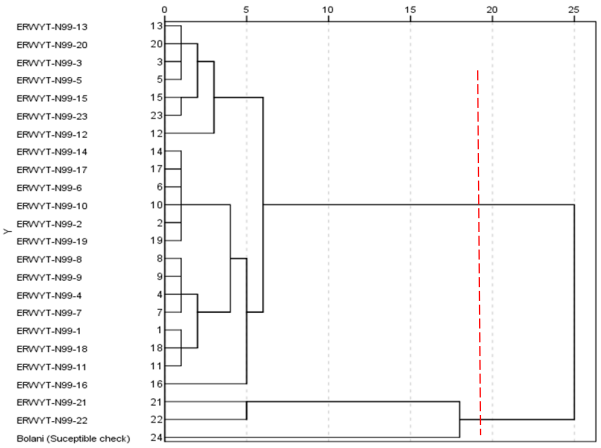
† S, susceptible; MS, moderate susceptible; MR, moderate resistant; R, resistant.

جدول ۷- واکنش مقاومت لاین‌های گندم در مراحل گیاهچه‌ای و گیاه بالغ نسبت به نژادهای زنگ قهوه‌ای

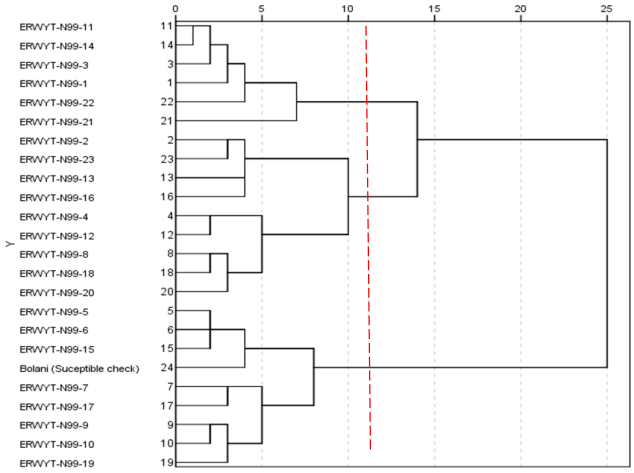
Table 7. Resistance response of wheat lines to leaf rust at seedling and adult plant stages

No.	Wheat line	Response of wheat lines to leaf rust races at seedling stage			Adult plant stage †
		Gorgan	Ahvaz	Moghan	
		FDTTS	FKTTS	FJTTS	
1	ERWYT-N99-1	;1	0	3	10MS
2	ERWYT-N99-2	3	2+	3	30MS
3	ERWYT-N99-3	;1	;1	3	20MS
4	ERWYT-N99-4	3	;	3	15MS
5	ERWYT-N99-5	3	3	3	20S
6	ERWYT-N99-6	3	3	3	30MS
7	ERWYT-N99-7	3	3	3	20MS
8	ERWYT-N99-8	3	1	3	20M
9	ERWYT-N99-9	3	3	3	20S
10	ERWYT-N99-10	3	3	3	20MS
11	ERWYT-N99-11	;1	0	3	30M
12	ERWYT-N99-12	;1	1	3	30MS
13	ERWYT-N99-13	;1	3	3	20MSS
14	ERWYT-N99-14	;1	0	3	10MS
15	ERWYT-N99-15	3	3	3	20S
16	ERWYT-N99-16	3	2	3	20MSS
17	ERWYT-N99-17	3	3	3	15S
18	ERWYT-N99-18	3	1	3	10MS
19	ERWYT-N99-19	3	3	3	30S
20	ERWYT-N99-20	2+	3	3	20MS
21	ERWYT-N99-21	;1	;1	;1	10MR
22	ERWYT-N99-22	;1	;1	3	30MS
23	ERWYT-N99-23	3	2	3	40MSS
24	Bolani (Suceptible check)	4	4	4	100S

† S, susceptible; MS, moderate susceptible; MR, moderate resistant; R, resistant.



(A)



(B)

شکل ۱- گروه‌بندی لاین‌های گندم بر اساس واکنش نسبت به نژادهای زنگ در مراحل گیاهچه‌ای و گیاه بالغ با استفاده از تجزیه خوشه‌ای، A) زنگ زرد، A) زنگ قهوه‌ای.

Figure 1. Grouping wheat lines based on response to rust races at seedling and adult plant stages using cluster analysis, A) Strip rust, B) leaf rust.

نتیجه‌گیری کلی

روش‌های به‌زراعی و شیمیایی به‌تنهایی کارایی لازم برای کنترل بیماری‌های قارچی زنگ‌ها را ندارند. استفاده تلفیقی از این روش‌ها با روش اصلی که استفاده از مقاومت‌های ژنتیکی (ارقام مقاوم) می‌باشد، بهترین روش مدیریت زنگ‌ها محسوب می‌شود. بر اساس نتایج این تحقیق، استفاده از ترکیب‌های ژن‌های مقاومت *Yr1*، *Yr4*، *Yr5*، *Yr10*، *Yr15*، *Yr24*، *YrSU*، *YrSP* و *YrCV* با ژن‌های مقاومت *Yr3*، *Yr26* و *YrSD* نسبت به نژادهای زنگ زرد و ژن‌های مقاومت *Lr1*، *Lr2a*، *Lr9*، *Lr19* و *Lr28* با ژن‌های مقاومت *Lr2b*، *Lr16* و *Lr10/Lr27 +/Lr31* نسبت به نژادهای زنگ قهوه‌ای جهت استفاده در برنامه‌های به‌نژادی به‌منظور ایجاد مقاومت‌های مؤثر و پایدار یکی از راه‌هایی است که می‌تواند منجر به کاهش خسارت بیماری‌ها و کاهش مصرف بی‌رویه سموم در اراضی اقلیم گرم و مرطوب شمال از جمله دشت مغان شود. در تحقیق حاضر تعداد لاین‌های گندم دارای واکنش مقاومت نسبت به نژادهای زنگ زرد به‌کار گرفته شده بیش‌تر از تعداد لاین‌های گندم دارای واکنش مقاومت نسبت به نژادهای زنگ قهوه‌ای بود. نژادهای زنگ زرد و زنگ قهوه‌ای به‌کار گرفته شده نمونه‌ای از جمعیت نژادی موجود در کشور هستند و بیانگر این مطلب است که ژن‌های مقاومت مؤثر در لاین‌های جدید گندم در برنامه‌های به‌نژادی وارد شده و مورد استفاده قرار

گرفته است. با این وجود، لاین‌های جدید گندم علاوه بر داشتن عملکرد بالا و ویژگی‌های زراعی مطلوب، حتماً باید نسبت به مهم‌ترین بیماری‌های گندم (زنگ‌ها) مقاومت قابل قبولی داشته باشند تا بتوانند به‌عنوان رقم تجاری معرفی شوند. بدیهی است که این لاین‌ها در صورت نداشتن مقاومت کافی باید حذف شوند، زیرا در صورت فراهم شدن شرایط محیطی برای فعالیت بیمارگر زنگ‌ها در طول فصل زراعی، خسارت بسیار چشم‌گیر خواهد بود. از لاین‌های مقاوم شناسایی شده در این تحقیق می‌توان به‌عنوان منابع مقاومت جهت تهیه ارقام گندم مقاوم به زنگ زرد و زنگ قهوه‌ای در برنامه‌های به‌نژادی استفاده کرد.

سپاسگزاری

این تحقیق مربوط به نتایج پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول می‌باشد. بدین وسیله از آقایان دکتر افشاری و دکتر دادرضایی به‌خاطر مشاوره‌های ارزشمند علمی و فراهم کردن شرایط اجرای این تحقیق، تشکر و قدردانی می‌شود.

تضاد منافع

نویسنده (گان) تایید می‌کنند که این تحقیق در غیاب هرگونه روابط تجاری یا مالی که می‌تواند به‌عنوان تضاد منافع بالقوه تعبیر شود، انجام شده است.

رعایت اخلاق در نشر

نویسنده (گان) اعلام می‌کنند که در نگارش این مقاله به‌طور کامل از اخلاق نشر از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پیروی کرده‌اند. همچنین این مقاله حاصل یک کار تحقیقاتی اصیل بوده و تاکنون به‌طور کامل به هیچ زبانی و در هیچ نشریه یا همایشی چاپ و منتشر نشده و هیچ اقدامی نیز برای انتشار آن در هیچ نشریه یا همایشی صورت نگرفته و نخواهد گرفت.

اجازه انتشار مقاله

نویسنده (گان) با چاپ این مقاله به‌صورت دسترسی باز موافقت کرده و کلیه حقوق استفاده از محتوا، جدول‌ها، شکل‌ها، تصویرها و غیره را به ناشر واگذار می‌کنند.

References

Ali, S., & Hodson, D. (2017). Wheat rust surveillance: Field disease scoring and sample collection for phenotyping and molecular genotyping. In: Periyannan, S. (Ed.). Wheat Rust Diseases. Methods in Molecular Biology. Vol. 1659. Humana Press, New York. doi: 10.1007/978-1-4939-7249-4_1.

Basnet, B., Juliana, P., Bhattarai, K., & Upreti, U. (2022). A review on major rust resistance gene and amino acid changes on wheat (*Triticum aestivum* L.). *Advances in Agriculture*, *2022*, 7419326. doi: 10.2139/ssrn.4258549.

Bouvet, L., Percival-Alwyn, L., Berry, S., Fenwick, P., Mantello, C. C., Sharma, R., Holdgate, S., Mackay, I. J., & Cockram, J. (2022). Wheat genetic loci conferring resistance to stripe rust in the face of genetically diverse races of the fungus *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*. *Theoretical & Applied Genetics*, *135*, 301-319. doi: 10.1007/s00122-021-03967-z.

Chen, X. (2020). Pathogens which threaten food security: *Puccinia striiformis*, the wheat stripe rust pathogen. *Food Security*, *12*(2), 239-251. doi: 10.1007/s12571-020-01016-z.

Dadrezaei, S. T., Dehghan, M. A., Safavi, S., Dalvand, M., & Shahbazi, K. (2022a). Resistance evaluation of advanced and commercial genotypes of Iranian wheat to leaf rust at seedling and adult plant stages. *Journal of Applied Research in Plant Protection*, *11*(4), 1-13. [In Persian]. doi: 10.22034/ARPP.2022.15742.

Dadrezaei, S.T., Delfan, S., & Allahassani, E. (2022b). Determination of pathotypes and physiologic races of *Puccinia triticina*, the causal agent of wheat leaf rust in Iran. *Journal of Applied Research in Plant Protection*, *11*(3), 1–15. [(In Persian]. doi: 10.22034/ARPP.2021.13545.

Dadrezaei, S. T., Nazari, K., Afshari, F., & Torabi, M. (2018). Genetic diversity and migration of wheat leaf rust populations in Iran based on virulence and molecular data. *Seed & Plant Journal*, *33*(3), 401-425. [In Persian]. doi: 10.22092/SPIJ.2017.116686.

Draz, I. S., Abou-Elseoud, M. S., Kamara, A. E. M., Alaa-Eldein, O. A. E., & El-Bebany, A. F. (2015). Screening of wheat genotypes for leaf rust resistance along with grain yield. *Annals of Agricultural Sciences*, *60*(1), 29-39. doi: 10.1016/j.aoas.2015.01.001.

Ellis, J. G., Lagudah, E. S., Spielmeyer, W., & Dodds, P. N. (2014). The past, present and future of breeding rust resistant wheat. *Frontiers in Plant Science*, *5*, 641. doi: 10.3389/fpls.2014.00641.

Figueroa, M., Dodds, P. N., & Henningsen, E. C. (2020). Evolution of virulence in rust fungi multiple solutions to one problem. *Current Opinion in Plant Bbiology*, *56*, 20-27. doi: 10.1016/j.pbi.2020.02.007.

Johnson, R., Stubbs, R. W., Fuchs, E., & Chamberlain, N. H. (1972). Nomenclature for physiologic races of *Puccinia striiformis* infecting wheat. *Transactions of the British Mycological Society*, *58*(3), 475-480. doi: 10.1016/S0007-1536(72)80096-2.

Huerta-Espino, J., Singh, R., Crespo-Herrera, L. A., Villaseñor-Mir, H. E., Rodriguez-Garcia, M. F., Dreisigacker, S., Barcenas-Santana, D., & Lagudah, E. (2020). Adult plant slow rusting genes confer high levels of resistance to rusts in bread wheat cultivars from Mexico. *Frontiers in Plant Science*, *11*, 824. doi: 10.3389/fpls.2020.00824.

Hovmøller, M. S., Walter, S., Bayles, R. A., Hubbard, A., Flath, K., Sommerfeldt, N., Leconte, M., Czembor, P., Rodriguez-Algaba, J., Thach, T., & Hansen, J. G. (2016). Replacement of the European wheat yellow rust population by new races from the centre of diversity in the near-Himalayan region. *Plant Pathology*, *65*(3), 402-411. doi: 10.1111/ppa.12433.

Kolmer, J. A. (2019). Virulence of *Puccinia triticina*, the wheat leaf rust fungus, in the United States in 2017. *Plant Disease*, *103*(8), 2113-2120. doi: 10.1094/PDIS-09-18-1638-SR.

Mago, R., Chen, C., Xia, X., Whan, A., Forrest, K., Basnet, B. R., Perera, G., Chandramohan, S., Randhawa, M., Hayden, M., & Bansal, U. (2022). Adult plant stem rust resistance in durum wheat Glossy Huguenot: mapping, marker development and validation. *Theoretical & Applied Genetics*, *135*(5), 1541-1550. doi: 10.1007/s00122-022-04052-9.

McCallum, B. D., Hiebert, C. W., Cloutier, S., Bakkeren, G., Rosa, S. B., Humphreys, D. G., & Wang, X. (2016). A review of wheat leaf rust research and the development of resistant cultivars in Canada. *Canadian Journal of Plant Pathology*, *38*(1), 1-18. doi: 10.1080/07060661.2016.

Mccallum, B. D., Reimer, E., McNabb, W., Foster, A., & Xue, A. (2020). Physiological specialization of *Puccinia triticina*, the causal agent of wheat leaf rust, in Canada in 2014. *Canadian Journal of Plant Pathology*, *42*(4), 520-526. doi: 10.1080/07060661.2021.1888156.

McCallum, B. D., Reimer, E., McNabb, W., Foster, A., Rosa, S., & Xue, A. (2021). Physiologic specialization of *Puccinia triticina*, the causal agent of wheat leaf rust, in Canada in 2015-2019. *Canadian Journal of Plant Pathology*, *43*(2), 333-346. doi: 10.1094/PDIS-91-8.

Mcintosh, R. A., Wellings, C. R., & Park, R. F. (1995). Wheat Rusts: An Atlas of Resistance Genes. Melbourne, CSIRO Publishing.

Omrani, A., Aharizad, S., Roohparvar, R., Khodarahmi, M., & Toorchi, M. (2017). Identification of stem and leaf rust resistance genes in some promising wheat lines using molecular markers. *Crop Biotechnology*, *7*(18), 15-25. [In Persian]. dorl: 20.1001.1.22520783.1396.7.18.2.1.

Omrani, A., Aharizad, S., Roohparvar, R., Khodarahmi, M., & Toorchi, M. (2018). Virulence factors of wheat stem rust (*Puccinia graminis* f. sp. *tritici*) isolates and identification of resistance sources in CIMMYT wheat synthetic genotypes. *Journal of Crop Breeding*, *10*(27), 84-93. [In Persian]. doi: 10.29252/jcb.10.27.84.

Omrani, A., Khodarahmi, M., & Afshari, F. (2013). Genetics study of resistance to yellow rust in CIMMYT origin wheat advanced lines at seedling and adult plant stages. *Archives of Phytopathology & Plant Protection*, *46*(19), 2341-2355. doi: 10.1080/03235408.2013.794529.

Omrani, A., Khodarahmi, M., & Afshari, F. (2014). Reaction of some wheat cultivars and breeding lines to *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* hot races in Iran. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, *47*(9), 1136-1145. doi: 10.1080/03235408.2013.832865.

Omrani, A., & Roohparvar, R. (2020). First report of TTKTK, a variant of the race TTKSK (Ug99) of *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* with virulence on the resistance genes *Sr31* and *SrTmp* in Iran. *Journal of Applied Research in Plant Protection*, *9*(3), 87-89. [In Persian].

Omrani, A., & Roohparvar, R. (2021). First report of TTRTF race of the wheat stem rust pathogen, *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* from Iran (Northwest, cold zone). *Journal of Applied Research in Plant Protection*, *9*(4), 101-103. [In Persian]. doi: 10.22034/ARPP.2021.12363.

Ordoñez, M. E., German, S. E., & Kolmer, J. A. (2010). Genetic differentiation within the *Puccinia triticina* population in South America and comparison with the North American population suggests common ancestry and intercontinental migration. *Phytopathology*, *100*(4), 376-383. doi: 10.1094/PHYTO-100-4-0376.

Pooja, P., Dhanda, S. S., Pahil, V. S., & Behl, R. K. (2022). Evaluation of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes for yellow rust resistance in relation to meteorological parameters. *Ekin Journal of Crop Breeding and Genetics*, *8*(1), 53-60.

Xu, S. S., Jin, Y., Klindworth, D. L., Wang, R. R., & Cai, X. (2009). Evaluation and characterization of seedling resistances to stem rust Ug99 races in wheat-alien species derivatives. *Crop Science*, *49*(6), 2167. doi: 10.2135/cropsci2009.02.0074.

Ye, B., Singh, R. P., Yuan, C., Liu, D., Randhawa, M. S., Huerta-Espino, J., Bhavani, S., Lagudah, E., & Lan, C. (2022). Three co-located resistance genes confer resistance to leaf rust and stripe rust in wheat variety Borlaug 100. The Crop Journal 10(2), 490-497. doi: 10.1016/j.cj.2021.07.004.

Zhang, L., Shi, C., Li, L., Li, M., Meng, Q., Yan, H., & Liu, D. (2020a). Race and virulence analysis of *Puccinia triticina* in China in 2014 and 2015. *Plant Disease*, *104*(2), 455-464. doi: 10.1094/PDIS-05-19-1051-RE.

Zhang, L., Xiao, Y., Gao, Y., Zhao, N., An, Y., Yang, W., & Liu, D. (2020b). Race and virulence analysis of *Puccinia triticina* in China during 2011 to 2013. *Plant Disease*, *104*(8), 2095-2101. doi: 10.1094/PDIS-01-20-0047-RE.