



Investigating the reaction of resistance to stripe rust disease (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*) in commercial cultivars and promising wheat lines (candidate to be introduced as a commercial cultivar)

A. Omrani*¹, F. Afshari², K. Shahbazi¹, A. Kabiri³

1. *Corresponding Author: Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Moghan, Iran (a.omrani@areeo.ac.ir)
2. Professor, Department of Cereal Research, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
3. Research expert, Department of Cereal Research Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

Received: 24 October 2022

Revised: 15 November 2024

Accepted: 25 November 2024

Abstract

Background and Objectives

Yellow or stripe rust caused by the fungal pathogen *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* is one of wheat's most prevalent diseases. It poses a significant threat to wheat production worldwide, including in Iran. Diseases are considered one of the most significant biological challenges that can reduce wheat performance by up to 20% globally. Given the total wheat production, this incurs an economic impact of several hundred million dollars. Annual losses caused by rust diseases in wheat are estimated to reach up to 50 million tons worldwide. Integrated management using agronomic and chemical control methods and genetic resistance (developing resistant cultivars) is considered the most effective strategy for controlling this disease. Identifying sources of resistance at various genetic levels within wheat germplasm is crucial in national wheat breeding programs for establishing effective and heritable genetic resistance against this disease.

Materials and Methods

Two distinct races with high and low virulence were obtained from the yellow rust pathogen collection of the Pathology Unit at the Seed and Plant Improvement Institute for phenotypic screening of resistance in wheat cultivars and promising lines at the seedling stage (under greenhouse conditions). The elimination of urediniospores from other rust species was achieved through several rounds of purification on the susceptible Bolani cultivar using the rub-in method. To identify effective and stable resistance sources against yellow rust pathogen races, the resistance reaction of 41 commercial cultivars and 45 promising wheat lines (from four climatic regions of the country), along with the sensitive cultivar Bolani (as a control), was evaluated at the seedling stage against two yellow rust races from the pathogen collection of the Pathology Unit at the Seed and Plant Improvement Institute in Karaj, with high and low aggressiveness (174E191A+, Yr27 and 6E134A+, Yr27), and at the adult plant stage in the research station of the Ardabil (Moghan) Agricultural and Natural Resources Research and Education Center.

Results

In the 2023 and 2024 growing seasons, the climatic conditions in the Moghan Plain were highly conducive to the emergence and spread of yellow rust disease. The weather was characterized by cool temperatures ranging from 8 to 17 degrees Celsius and high relative humidity from late March to mid-May. During the 2024 growing season, the prevalence of yellow rust disease was notably more severe in various regions of the country, particularly in the northern areas. The resistance genes *Yr1*, *Yr5*, *Yr10*, *Yr15*, *Yr24*, *YrSU*, and *YrSP* were identified as effective resistance genes against the yellow rust races. The results indicated that approximately 56% of the commercial wheat cultivars exhibited acceptable resistance reactions, while about 44% lacked effective resistance (showing intermediate to susceptible reactions). Furthermore, around 87% of the promising wheat lines displayed acceptable resistance reactions, whereas about 13% lacked effective resistance. The yearly variation in results could be attributed to differences in the abundance and virulence of dominant pathogen populations in the region, and environmental conditions affecting the two years.

Discussion

The findings of this study indicate that heritable genetic resistances are present in most of the commercial cultivars currently cultivated extensively and in the lines nominated for introduction as new commercial wheat cultivars. In the present study, the number of wheat cultivars and promising lines exhibiting resistance to yellow rust races was greater than those showing susceptibility and intermediate susceptibility. This indicates that effective resistance genes have been incorporated into the new wheat lines within breeding programs. New wheat lines must possess high yield potential and desirable agronomic traits and demonstrate acceptable levels of resistance to the most significant wheat diseases, particularly rusts, to be introduced as commercial cultivars. If they do not possess such resistance, they should be discarded, as environmental conditions during the growing season can favor rust pathogen activity, especially yellow rust, leading to significant yield losses. The identified resistant cultivars and lines from this research can be utilized in breeding programs to develop wheat cultivars resistant to yellow rust.

Keywords: Differential cultivars, genetic resistance sources, races, virulence.

Associate editor: S. Abasi (Ph.D.)

Citation: Omrani, A., Afshari, F., Shahbazi, F. & Kabiri, A. (2024). Investigating the reaction of resistance to stripe rust disease (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*) in commercial cultivars and promising wheat lines (candidate to be introduced as a commercial cultivar). *Plant Protection (Scientific Journal of Agriculture)*, 47(3), 79-97. <https://doi.org/10.22055/ppr.2024.48221.1769>.



گیاه پزشکی (مجله علمی کشاورزی)

جلد ۴۷، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۳

doi 10.22055/ppr.2024.48221.1769

بررسی واکنش مقاومت نسبت به بیماری زنگ زرد (*Puccinia striiformis* f.sp. *tritici*)

در ارقام تجاری و لاین‌های امیدبخش گندم (نامزد معرفی به‌عنوان رقم تجاری)

علی عمرانی^{۱*}، فرزاد افشاری^۲، کمال شهبازی^۱، امیر کبیری^۳

۱- * نویسنده مسوول: استادیار بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان)،

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مغان، ایران (a.omrani@areeo.ac.ir)

۲- استاد بخش تحقیقات غلات، موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

۳- کارشناس بخش تحقیقات غلات، موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۳

چکیده

زنگ زرد با عامل قارچی (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*) یکی از شایع‌ترین بیماری‌های گندم است که تهدید بسیار جدی برای تولید این محصول در سراسر جهان از جمله ایران می‌باشد. مدیریت تلفیقی با استفاده از روش‌های به‌زراعی، شیمیایی و مقاومت‌های ژنتیکی (ارقام مقاوم و متحمل) کارآمدترین روش کنترل این بیماری محسوب می‌شود. در برنامه‌های به‌نژادی گندم در سطح ملی شناسایی منابع مقاومت در سطوح مختلف ژنتیکی ژرم پلاسما گندم برای ایجاد مقاومت‌های ژنتیکی مؤثر و توارث پذیر، از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. به‌منظور شناسایی منابع مقاومت مؤثر و پایدار نسبت به نژادهای بیمارگر زنگ زرد، واکنش مقاومت ۴۱ رقم تجاری و ۵۰ لاین امیدبخش گندم (از چهار اقلیم کشور) به‌همراه رقم حساس بولانی (به‌عنوان شاهد) با دو نژاد به‌ترتیب پرآزار (174E191A+, Yr27) و کم‌آزار (6E134A+, Yr27) زنگ زرد در مرحله گیاهچه‌ای در شرایط گلخانه در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و واکنش مقاومت ارقام تجاری و لاین‌های امیدبخش گندم در مرحله گیاه بالغ در ایستگاه تحقیقاتی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان) طی سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ تحت شرایط آلودگی طبیعی بررسی شد. ژن‌های مقاومت *YrSP* و *YrSU*، *Yr24*، *Yr15*، *Yr10*، *Yr5*، *Yr1* از جمله ژن‌های مقاومت مؤثر در برابر نژادهای زنگ زرد به‌کاربرده شده در مرحله گیاهچه‌ای بودند. براساس نتایج این پژوهش حدود ۵۶ درصد ارقام تجاری گندم دارای واکنش مقاومت قابل قبول و حدود ۴۴ درصد ارقام فاقد واکنش مقاومت مؤثر بودند (دارای واکنش نیمه حساسیت تا حساسیت). همچنین حدود ۸۷ درصد لاین‌های امیدبخش گندم دارای واکنش مقاومت قابل قبول و حدود ۱۳ درصد لاین‌ها فاقد واکنش مقاومت مؤثر بودند. وجود اختلاف و تغییر در فراوانی و پرآزاری جمعیت عوامل بیماری‌زای غالب در منطقه و نیز شرایط محیطی تأثیرگذار در طی دو سال موجب تفاوت در نتایج سالیانه شد. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که مقاومت‌های ژنتیکی توارث پذیر قابل قبولی هم در بیشتر ارقام تجاری که هم‌اکنون در سطح وسیع کشت و کار می‌شوند و هم در لاین‌های کاندید برای معرفی به‌عنوان رقم تجاری جدید گندم، وجود دارند. از ارقام و لاین‌های مقاوم شناسایی شده در این تحقیق می‌توان در برنامه‌های به‌نژادی تهیه ارقام گندم مقاوم به زنگ زرد، به‌عنوان منابع مقاومت استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: ارقام افتراقی، پرآزاری، منابع مقاومت ژنتیکی، نژاد

دبیر تخصصی: دکتر سعید عباسی

مقدمه

گندم یکی از مهمترین محصولات زراعی راهبردی در تأمین امنیت غذایی مردم جهان می باشد. همه ساله انواع تنش های زیستی و غیرزیستی سبب کاهش عملکرد محصول گندم می شوند. بیماری ها مهم ترین چالش های زیستی به شمار می آیند که می تواند عملکرد گندم را تا ۲۰ درصد در سطح جهان کاهش دهند (Bouvet et al., 2022) که با توجه به میزان تولید کل گندم، ارزش اقتصادی چند صد میلیون دلاری را به خود اختصاص می دهد. خسارت سالیانه ناشی از زنگ ها به محصول گندم تا ۵۰ میلیون تن در سطح جهان تخمین زده شده است (Huerta Espino et al., 2020; Basnet et al., 2022). زنگ زرد (نوری) با عامل قارچی (*Puccinia striiformis* f.sp. *tritici*) به دلیل توانایی بالا در گسترش سریع و آلوده کردن کل مزارع، شایع ترین و خسارت زاترین بیماری گندم در سراسر جهان محسوب می شود (Wellings, 2011; Chen, 2020). در اوایل فصل بهار هوای خنک و رطوبت نسبی بالا شرایط مناسبی را برای فعالیت هر چه بیشتر بیمارگر و در نتیجه شیوع بیماری زنگ زرد روی ارقام حساس گندم ایجاد می نماید. این بیماری به دلیل نیاز دمایی پایین تر عموماً زودتر از سایر زنگ ها در مزرعه ظهور می یابد. از خسارت های عمده بیماری های زنگ گندم می توان به کوچک و چروکیده شدن دانه ها، آسیب پنجه ها و در زمان های همه گیری شدید به از بین رفتن تمام محصول گندم در مزرعه، اشاره نمود (McIntosh et al., 1995; Wellings, 2011; Ali et al., 2014). بسته به فراهم بودن شرایط محیطی ایده آل از لحاظ دما، رطوبت، زمان مناسب استقرار بیماری، میزان زادمایه اولیه و میزان مقاومت موجود در ارقام کشت شده در منطقه، میزان شدت بروز زنگ زرد متفاوت می باشد. استفاده از ارقام مقاوم کار آمدترین، مقرون به صرفه ترین و ایمن ترین روش سازگار با محیط زیست نسبت به سایر روش های کنترل زنگ ها است. در این روش، مسئله اثرات سوء باقی ماندن سموم شیمیایی در محیط

زیست و حفظ منابع طبیعی که بزرگ ترین چالش صرف نظر از هزینه های بالا در استفاده از سموم شیمیایی می باشد، منتفی است (Draz et al., 2015; Pooja et al., 2022).

ایجاد مقاومت ژنتیکی در ژنوتیپ های گندم مستلزم کوشش های مستمر است چرا که زنگ ها به دلیل داشتن نژادهای فیزیولوژیک متعدد در سطح جهان و با داشتن فرم های بیماری زایی متفاوت و توانایی به وجود آوردن نژادهای جدید از طریق ترکیبات جنسی و غیرجنسی و سایر عوامل مثل جهش، مهاجرت و فشار حاصل از گزینش قادرند ژن های مقاومت موجود در ژنوتیپ های مقاوم را شکسته و باعث بروز همه گیری شوند (McCallum et al., 2016; Hovmoller et al., 2022). تنوع در نژادهای فیزیولوژیک زنگ زرد در ایران نیز گزارش شده است (Afshari, 2013; Omrani et al., 2013, 2014; Kabiri et al., 2024).

به نژادگران همیشه به دنبال راهی برای ایجاد مقاومت های پایدار و یا مقاومت هایی که بتوانند نرخ سرعت همه گیری را در بیمارگرهای زنگ گندم کاهش دهند، هستند. تاکنون بیش از ۲۸۰ ژن مقاومت به زنگ ها در سطوح ژنتیکی مختلف گندم شناسایی شده است که بسیاری از آنها از خویشاوندان گندم منشا گرفته اند. از بین ژن های مقاومت حدود ۱۰۵ ژن مقاومت نسبت به بیماری زنگ زرد شناسایی شده است که بیشتر آنها در دوره های مختلف در برنامه های به نژادی گندم در سراسر جهان برای ایجاد مقاومت به بیماری زنگ زرد به کارگیری شده اند (Basnet et al., 2022). مقاومت به زنگ ها در گندم از لحاظ دوره رشدی به دو دسته مقاومت گیاهچه ای^۱ و مقاومت گیاه کامل یا بالغ^۲ تقسیم می شود. طول عمر مقاومت مرحله گیاهچه ای کوتاه و معمولاً چند سال می باشد و اغلب توسط تعداد محدودی از ژن های مقاومت کنترل می شود. مقاومت گیاهچه ای اختصاص به نژاد^۳ بوده، به عبارت دیگر این نوع مقاومت در برابر تعداد محدودی از نژادهای بیمارگر موثر و در برابر برخی

3- Race specific

1- Seedling resistance

2- Adult plant resistance

مدیریت موثر بیماری‌های قارچی گندم به‌ویژه زنگ زرد، اتخاذ رویکردی یکپارچه را می‌طلبد که در آن ترکیبی از شیوه‌های زراعی، آگاهی کامل از ویژگی‌های زیستی عامل بیماری و الگوهای بیماری‌زایی و اطلاع از ژنتیک واریته‌های گندم باشد (Downie et al., 2020).

همه ساله مطالعات زیادی در رابطه با تعیین الگوی پرآزاری نژادهای زنگ‌ها روی ژن‌های مقاومت و شناسایی منابع مقاومت به زنگ‌ها در کشورهای مختلف صورت می‌گیرد. طبق بررسی‌ها ژن‌های مقاومت *Yr2*، *Yr3*، *Yr6*، *Yr7*، *Yr8*، *Yr9*، *Yr20*، *Yr25*، *Yr28*، *Yr29*، *Yr31* و *YrExp2* در برابر نژادهای پویای زنگ زرد در سطح جهان کارایی لازم را ندارند و بی‌اثر شده‌اند. ژن‌های مقاومت *Yr5* و *Yr15* از جمله ژن‌های مقاومت موثر در برابر اغلب نژادهای زنگ زرد و سایر ژن‌های مقاومت *Yr1*، *Yr4*، *Yr10*، *Yr17*، *Yr18*، *Yr24*، *Yr26*، *Yr27*، *Yr32*، *Yr43*، *Yr44*، *Yr64*، *Yr65*، *Yr76*، *Yr84*، *YrCV*، *YrSD*، *YrSP*، *YrSU* و *YrND* در برابر تعداد محدودی از نژادهای زنگ زرد در سطح جهان کارایی دارند (Hovmöller et al., 2016; Chen et al., 2020). به‌منظور شناسایی منابع مقاومت نسبت به نژادهای زنگ زرد در یک آزمایشی واکنش مقاومت گیاه کامل به زنگ زرد در ۴۸ ژنوتیپ گندم به‌همراه شاهد حساس بولانی در سه مکان (مشهد، زرقان و اردبیل) و در دو سال متوالی و واکنش گیاهچه‌ای ژنوتیپ‌ها با سه نژاد متفاوت جمع‌آوری شده از مناطق مذکور *Yr27*، *Yr27*، *6E142A+* بررسی شدند که در مجموع ده ژنوتیپ در طول سال‌ها و مکان‌های مورد مطالعه، واکنش مقاومت پایدارتری داشتند (Mohammadi et al., 2023).

در آزمایش دیگری واکنش مقاومت گیاه کامل به زنگ زرد ۲۳ لاین امیدبخش گندم به‌همراه رقم حساس بولانی و واکنش گیاهچه‌ای ژنوتیپ‌ها با پنج نژاد متفاوت جمع‌آوری شده از مناطق

دیگر بی‌اثر هستند. این نوع مقاومت در تمام مراحل رشد گیاه بیان می‌شوند و سطح بالایی از مقاومت را در برابر بیشتر نژادهای بیمارگر ایجاد می‌کنند (Singh et al., 2011).

اغلب ژن‌های مقاومت گیاهچه‌ای منجر به بروز واکنش فوق‌حساسیت^۱ یا چوبی شدن دیواره‌های سلولی در گیاه در نواحی که عامل بیماری نفوذ کرده و در حال فعالیت و گسترش هستند، می‌شوند. این نوع مقاومت می‌تواند به‌علت تغییر در الگوی پرآزاری قارچ عامل بیماری به‌دلیل تولید مثل جنسی (نو ترکیبی ژنی)، جهش، مهاجرت و فشار انتخاب بیمارگر توسط ژن‌های مقاومت، به‌راحتی شکسته شود (Figueroa et al., 2020). مقاومت گیاه بالغ که در مراحل بعد از مرحله گیاهچه‌ای (بعد از رویش برگ پرچم) ایجاد می‌شود، این نوع مقاومت غیر اختصاص به نژاد^۲ عمل کرده و از پایداری بیشتری برخوردار است. مقاومت نسبی (ناقص یا جزئی) یا مقاومت مزرعه‌ای یا مقاومت در مرحله گیاه بالغ، باعث ایجاد مقاومت نسبی در برابر کلیه نژادهای عامل بیماری شده و به‌طور معمول زنگ-زدگی تدریجی^۳ در گیاه را ایجاد می‌نماید. اثرات این ژن‌ها به‌تنهایی، بیشتر مواقع جزئی بوده، اما در ترکیبات ژنی با ژن‌های مقاومت گیاهچه‌ای باعث ایجاد اثرات افزایشی می‌شوند و سطوح بالاتری از مقاومت را می‌توانند ایجاد کنند (Ellis et al., 2014; Huerta-Espino et al., 2020). عمر ژن‌های مقاومت اختصاص به نژاد می‌تواند با استفاده از ترکیب ژن‌های مسئول مقاومت ناقص (جزئی) افزایش یابد. همچنین می‌توان ژن‌هایی که دارای مقاومت در مرحله گیاه بالغ هستند را با ژن‌هایی که باعث زنگ-زدگی تدریجی می‌شوند، 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 ۴ تا ۵ مورد از این ژن‌ها نتایج بسیار مطلوبی ایجاد می‌شود (Singh et al., 2011; Huerta-Espino et al., 2020). در نهایت،

3- Slow rusting

1- Hypersensitive resistance
2- Non race specific

(Figuerola et al., 2020). مجموعه ارقام استاندارد و افتراقی زنگ زرد شامل ۵۶ ژنوتیپ بود (جدول ۱). بذور مجموعه ارقام استاندارد و افتراقی در گلدان‌های به قطر ۱۰ سانتی متر حاوی پیت‌ماس و خاک مزرعه، کشت شدند. پس از جوانه‌زنی بذور در شرایط گلخانه کشت با دمای ۲۲ تا ۲۵ درجه سلسیوس، گیاهچه‌ها هنگامی که برگ اول به رشد کامل رسیده و برگ دوم در حال ظاهر شدن بود (مرحله ۱۲ از مقیاس زادوکس (Zadoks et al., 1974)) با مخلوط همگن از یوردینیوسپور خالص تکثیر شده با روغن صنعتی سالترو ۱۷۰ مایه‌زنی شدند (هر جدایه به‌طور جداگانه مایه‌زنی شد). سپس برای تأمین رطوبت لازم برای جوانه‌زنی یوردینیوسپورهای مستقر شده روی برگ گیاهچه‌ها و نفوذ به داخل بافت برگ، گیاهچه‌ها با آب مقطر مه‌پاشی شدند. به منظور جلوگیری از اختلاط اسپور سایر نژادها در گلخانه و حفظ رطوبت با استفاده از سرپوش‌های پلاستیکی پوشانده شد و به مدت ۲۴ ساعت در تاریکی کامل با دمای ۱۰ درجه سلسیوس در شرایط رطوبت نسبی در حد اشباع قرار گرفتند. پس از سپری شدن مرحله تاریکی، برای گذراندن دوره کمون بیماری، گیاهچه‌های ارقام استاندارد و افتراقی زنگ زرد به مدت ۲۱ روز به گلخانه‌های با دمای ۱۶-۱۴ درجه سلسیوس با دوره نوری ۱۶ ساعت روشنایی با شدت حداقل ۱۲۰۰۰ لوکس و ۸ ساعت تاریکی منتقل شدند (Omrani et al., 2013, 2014; Ali & Hodson, 2017). یادداشت برداری از واکنش گیاهچه‌های مایه‌زنی شده (تیپ آلودگی) نسبت به زنگ زرد براساس مقیاس صفر تا ۴ انجام گردید (McIntosh et al., 1995). نام‌گذاری نژادهای زنگ زرد با استفاده از سیستم کدهی جانسون و همکاران (Johnson et al., 1972) صورت گرفت.

ارزیابی ارقام تجاری و لاین‌های امیدبخش گندم مورد مطالعه در مراحل گیاهچه‌ای و گیاه کامل

در این پژوهش واکنش مقاومت گیاهچه‌ای ۴۱ رقم تجاری و ۴۵ لاین امیدبخش گندم (جدول ۲) مربوط به چهار

کرج، ساری، زرقان، مغان و مشهد 14E158A+, Yr27, 166E62A+, 6E134A+, Yr27, 142E158A+, Yr27 و 6E142A+, Yr27 بررسی شدند که در مجموع ۲۰ ژنوتیپ مورد مطالعه در هر دو مرحله گیاهچه‌ای و گیاه کامل واکنش مقاومت قابل قبولی داشتند (Kabiri et al., 2024).

هدف از این پژوهش شناسایی منابع مقاومت موثر نسبت به این نژادهای بیمارگر زنگ زرد به‌منظور ایجاد مقاومت‌های پایدار در لاین‌های جدید گندم در برنامه‌های به‌نژادی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

خالص سازی نژادهای بیمارگر زنگ زرد

دو نژاد متفاوت با پرآزاری بالا (با کد ۲۹-۰۲) و پایین (زرقان با کد ۱۵-۰۱) از کلکسیون بیمارگر زنگ زرد متعلق به واحد پاتولوژی بخش غلات موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر به‌منظور غربالگری فنوتیپی مقاومت ارقام تجاری و لاین‌های امیدبخش مورد مطالعه در مرحله گیاهچه‌ای (در شرایط گلخانه) دریافت شد. به‌منظور حذف یوردینیوسپورهای سایر زنگ‌ها، چند دوره خالص‌سازی (جدا نمودن قسمت‌های آلوده برگ به زنگ زرد، شستشو با آب مقطر و قرار دادن روی کاغذ صافی استریل مرطوب در پتری‌دیش جهت تولید یوردینیوسپورهای جدید روی جوش‌های یوریدی موجود در نمونه‌های برگ‌ی جداشده) و تکثیر جدایه‌های اولیه روی رقم حساس بولانی از طریق روش مالشی انجام شد (Ali & Hodson, 2017). اسپورهای خالص جدایه‌ها هر کدام به صورت جداگانه پس از تکثیر روی میزبان حساس جمع‌آوری و در آزمایش‌های تعیین نژاد و ارزیابی ارقام و لاین‌های امیدبخش گندم مورد استفاده قرار گرفتند.

تعیین نژاد بیمارگر

تعیین نژاد جدایه‌های خالص‌سازی شده بیمارگر زنگ زرد به‌منظور تعیین الگوی بیماری‌زایی (فرمول ویروالانس) بر روی ارقام استاندارد و افتراقی بین‌المللی (دریافتی از سیمیت) حامل ژن‌های مختلف مقاومت، در مرحله گیاهچه‌ای انجام شد

تجاری و لاین‌های امیدبخش گندم مورد مطالعه طبق عرف منطقه مغان در پنج نوبت، صورت گرفت. یادداشت برداری از شدت آلودگی در مرحله ظهور برگ پرچم پس از یکنواختی در ظهور بیماری روی رقم حساس (بولانی) از طریق تعیین درصد پوشش آلوده‌ی سطح برگ (۱۰۰-۰)، تیپ آلودگی براساس روش مک‌اینثاش و همکاران (McIntosh et al., 1995) به شرح ذیل انجام شد:

O = مصون، بدون هیچگونه علائم

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

MR = نیمه مقاوم، ظهور جوش‌های کوچک زنگ، احاطه شده با لکه‌های نکروتیک و گاهی کلروتیک

MS = نیمه حساس، ظهور جوش‌هایی به اندازه متوسط، بدون لکه‌های نکروتیک، گاهی همراه با لکه‌های کلروتیک

S = حساس، وجود جوش‌های بزرگ زنگ به مقدار فراوان و بدون لکه‌های کلروتیک و گاهی همراه با این لکه‌ها

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,)

(McIntosh et al., 1995) به دست آمد (MSS=0.9, S=1).

اقلیم ایران و رقم بولانی (به‌عنوان شاهد حساس) نسبت به دو نژاد بیماری زنگ زرد (در آزمایش‌های مجزا) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار ارزیابی گردید. کلیه مراحل آزمایش‌های ارزیابی ارقام و لاین‌های امیدبخش گندم مشابه آزمایش‌های تعیین نژاد انجام شده در گلخانه بود و صفت تیپ آلودگی ارقام و لاین‌های گندم نیز ۲۱ روز پس از مایه‌زنی بر اساس مقیاس ذکر شده، ثبت گردید.

به‌منظور غربال‌گری فنوتیپی ارقام تجاری و لاین‌های امیدبخش گندم مورد مطالعه در مرحله گیاه بالغ (مراحل ۷۵ تا ۷۷ از مقیاس زادوکس) پس از کاشت و کامل شدن مراحل رشدی آنها در ایستگاه تحقیقاتی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان) طی سال‌های زراعی ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳، تحت شرایط آلودگی طبیعی زنگ زرد در مزرعه توسط پارامترهای پیشرفت بیماری بر روی گیاه و درصد شدت بیماری ظهور یافته روی برگ‌ها بررسی شدند. کاشت بذور در مزرعه به‌صورت خطی روی دو خط یک متری به‌فاصله ۳۰ سانتی‌متر انجام شده و 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 علف هرز در آزمایش‌های مزرعه به‌صورت مکانیکی (دستی) بود. آبیاری ارقام استاندارد و افتراقی ارقام

جدول ۱- ارقام استاندارد و افتراقی زنگ زرد گندم

Table 1. Differential cultivars of wheat stripe rust

No.	Name/Pedigree	No.	Name/Pedigree	No.	Name/Pedigree	No.	Name/Pedigree
1	Chinese 166	15	Carstens V	29	Yr7/6*Avocet 'S'	43	Avocet 'R'
2	Lee	16	Spalding Prolific	30	Yr8/6*Avocet 'S'	44	Avocet 'S'
3	Heines Kolben	17	Heines VII	31	Yr9/6*Avocet 'S'	45	Bolani (Suceptible check)
4	Vilmorin 23	18	Avocet 'R'	32	Yr10/6*Avocet 'S'	46	Fielder
5	Moro	19	Kalyansona	33	Yr15/6* Avocet 'S'	47	Thatcher
6	Strubs Dikkopf	20	Trident	34	Yr17/6* Avocet 'S'	48	Lemhi
7	Suwon 92/Omar	21	Yr15/6* Avocet S	35	Yr18/6* Avocet 'S'	49	TP1295
8	Clement	22	Hugenoot	36	Yr24/6* Avocet 'S'	50	Yr27/6*Av.S
9	<i>Triticum spelta</i> var. <i>album</i>	23	Selkirk	37	Yr26/6* Avocet 'S'	51	Ciano79
10	Hybrid 46	24	Federation *4/Kavkaz	38	Yr27/6* Avocet 'S'	52	Opata85
11	Reichersberg 42	25	Federation	39	Yr32/6* Avocet 'S'	53	Avocet Yr28
12	Heines Peko	26	Yr1/6*Avocet 'S'	40	YrSP/6* Avocet 'S'	54	Lalbahador/Pavon
13	Nord Desprez	27	Yr5/6*Avocet 'S'	41	Jupateco73R	55	Avocet-YrA*3/Pastor
14	Compair	28	Yr6/6*Avocet 'S'	42	Jupateco73S	56	Pastor

جدول ۲- ارقام و لاین‌های امیدبخش گندم مورد مطالعه در ارزیابی مقاومت به زنگ زرد

Table 2. Commercial cultivars and promising wheat lines studied

No.	Commercial cultivars	No.	Cultivars/ Lines	No.	Promising wheat lines
1	Taktaz	31	Heyran	17	M-99-15
2	Araz	32	Zarrineh	18	MDH-99-10
3	Arman	33	Heydari	19	CD-91-12
4	Meraj	34	Barzgar	20	C-96-8
5	Kalateh	35	Narin	21	CD-96-10
6	Tirgan	36	Avan	22	C-97-4
7	Ehsan	37	Taban	23	C-97-16
8	Gonbad	38	Sana	24	CD-97-19
9	Fallah	39	Aran	25	C-98-5
10	Raj	40	Hana	26	C-98-7
11	Sahar	41	Shabrang	27	C-98-8
12	Setareh	42	Bolani (Suceptible check)	28	C-98-12
15	Barat	1	N-95-6	31	C-99-8
16	Shoush	2	N-97-20	32	CD-99-15
17	Mehregan	3	N-98-8	33	MS-94-14
18	Shavour	4	N-98-16	34	MS-95-4
19	Chamran 2	5	N-98-20	35	MS-95-9
20	Bamdad	6	N-99-4	36	MS-96-4
21	Sepehr	7	N-99-6	37	MS-97-4
22	Danesh	8	N-99-19	38	MS-98-3
23	Amin	9	S-96-15	39	MS-99-6
24	Farin	10	S-96-16	40	MS-99-7
25	Torabi	11	S-97-10	41	MS-99-19
26	Talaei	12	S-98-22	42	D-99-4
27	Rakhshan	13	S-99-18	43	D-99-6
28	Baharan	14	M-DH98-10	44	D-99-10
29	Sirvan	15	M-DH98-18	45	D-99-18
30	Simin	16	M-99-9	46	Bolani (Suceptible check)

از مجموعه ژن‌های مقاومت موجود در ارقام استاندارد و افتراقی بین‌المللی مرتبط با زنگ زرد، انجام شد. از طریق بررسی روند تغییرات در نژادهای فیزیولوژیک بیمارگر زنگ زرد اطلاعات بسیار مهمی در اختیار به‌نژادگران گندم قرار می‌گیرد که براساس این اطلاعات می‌توانند یک برنامه به‌نژادی برای ایجاد مقاومت‌های موثر و موفق نسبت به بیماری زنگ زرد در ارقام مطلوب گندم (ارقام پرمولکرد و دارای صفات زراعی مطلوب وابسته به عملکرد) را سازماندهی نمایند. بدون این اطلاعات ادامه مسیر با مشکل مواجه می‌گردد، چراکه به‌کارگیری غیر اصولی و نادرست ژن‌های مقاومت در ایجاد ارقام مقاوم گندم نسبت به نژادهای زنگ‌ها در مناطق مختلف، این مقاومت‌ها خیلی زود شکسته می‌شود و جز هزینه‌های هنگفتی که تحمیل خواهد نمود، نتیجه دیگری در بر نخواهد داشت.

توزیع انحرافات داده‌های مربوط به تیپ آلودگی در شرایط گلخانه‌ای به‌وسیله تبدیل زاویه‌ای نرمال گردید. با توجه به این که ارزیابی ژنوتیپ‌ها نسبت به جدایه‌های مختلف در زمان‌های متفاوت انجام گرفت، 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 شد. هر جدایه معادل مکان در طرح آزمایشی در نظر گرفته شد. جهت تجزیه مرکب و تجزیه خوشه‌ای از نرم افزار SAS نسخه ۹/۳ و برای آزمون نرمالیتی از نرم افزار Minitab نسخه ۱۶ استفاده گردید.

نتایج و بحث

به‌منظور شناخت از ساختار ژنتیکی بیمارگر زنگ زرد، تعیین الگو و طیف پرآزاری نژادها، تعیین نژاد جدایه‌ها با استفاده

نظر واکنش مقاومت نسبت به نژادهای زنگ زرد در مرحله گیاهچه‌ای اختلاف آماری معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد وجود داشت. میانگین مربعات برهمکنش ژنوتیپ × نژاد در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. بنابراین واکنش هر یک از ژنوتیپ‌ها نسبت به نژادهای زنگ زرد یکسان نبودند. از تنوع ژنتیکی بالا در بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه می‌توان در برنامه‌های مکان‌یابی ارتباطی برای شناسایی ژن‌های مقاومت به بیماری زنگ زرد استفاده نمود (Mago et al., 2022). تنوع ژنتیکی در جمعیت‌های قارچ عامل بیماری هر سه نوع زنگ و همچنین تنوع در واکنش مقاومت بین ژنوتیپ‌های مختلف گندم نسبت به نژادهای مختلف زنگ‌ها گزارش شده است. عمرانی و همکاران (Omrani et al., 2013; 2014; 2017; 2018; 2020; 2021) و دادرزایی و همکاران (Dadrezaei et al., 2018, 2022; 2023) با تعیین الگوی پرآزاری نژادهای زنگ زرد، زنگ قهوه‌ای و زنگ سیاه تنوع ژنتیکی بالایی بین نژادهای زنگ‌ها و همچنین بین ژنوتیپ‌های مختلف گندم از لحاظ واکنش نسبت به نژادهای متفاوت زنگ‌ها در مراحل گیاهچه‌ای و گیاه بالغ گزارش نمودند.

بر اساس نتایج تعیین نژاد (جدول 3)، نژادهای مورد مطالعه به ترتیب 6E134A+, Yr27 و 174E191A+, Yr27 نام-گذاری شدند. در نژاد 174E191A+, Yr27 پرآزاری بیشتری روی ژن‌های مقاومت موجود در ارقام استاندارد و افتراقی نسبت به نژاد 6E134A+, Yr27 مشاهده شد. همان‌طور که در جدول 3 مشاهده می‌شود، ژن‌های مقاومت *Yr1*، *Yr5*، *Yr10*، *Yr15*، *Yr24*، *YrSU* و *YrSP* از جمله ژن‌های مقاومت موثر در برابر نژادهای زنگ زرد موجود در منطقه دشت مغان شناسایی شدند. ژن‌های مقاومت *Yr5*، *Yr10* و *Yr15* از ژن‌های مقاومت گیاهچه‌ای بسیار مؤثر در برابر اکثر نژادهای بیمارگر زنگ زرد در سطح جهان می‌باشند (Hovmoller et al., 2022). ارقام و لاین‌های افتراقی حامل ژن‌های مقاومت *Yr3*، *Yr4*، *Yr8*، *Yr24*، *YrCV*، *YrND* و *YrSD* نسبت به نژادهای زنگ زرد مورد مطالعه واکنش مقاومت اختصاصی داشتند. مابقی ژن‌های مقاومت موجود در ارقام و لاین‌های افتراقی نسبت به نژادهای زنگ زرد مورد مطالعه اثر بخشی لازم را نداشتند. بر اساس نتایج تجزیه واریانس مرکب (جدول 4) بین نژادهای زنگ زرد مورد مطالعه، بین ارقام و لاین‌های امیدبخش (ژنوتیپ‌ها) گندم از

جدول 3- فرمول پرآزاری/ناپرآزاری نژادهای بیماری زنگ زرد

Table 3. Avirulence/virulence formula of stripe rust races

No.	Race	Virulence genes	Avirulence genes
1	174E191A+, Yr27	<i>Yr2, Yr3, Yr4, Yr6, Yr7, Yr8, Yr9, Yr17, Yr25, Yr26, Yr27, Yr32, YrA, YrCV, YrND, YrSD</i>	<i>Yr1, Yr5, Yr10; Yr15, Yr24, YrSU, YrSP</i>
2	6E134A+, Yr27	<i>Yr2, Yr6, Yr7, Yr9; Yr17, Yr25, Yr26, Yr27; Yr32, YrA,</i>	<i>Yr1, Yr3, Yr4, Yr5, Yr8, Yr10; Yr15, Yr24, YrSU, YrSP, YrCV, YrSD, YrND</i>

جدول 4- تجزیه مرکب تیپ آلودگی ارقام تجاری و لاین‌های امیدبخش گندم نسبت به نژادهای زنگ زرد در مرحله گیاهچه‌ای

Table 4. Combined analysis of variance for infection type of commercial cultivars and promising wheat lines to stripe rust at seedling stage

S.o.v	df	Stripe rust
		Ms
Race	1	18.77**
Error (1)	4	1.93
Line cultivars and	86	26.52**
cultivars and Line × Race	86	29.74**
Error (2)	344	2.71
	%CV	11.28

ns, *, and ** Not-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively

8-98 و سایر لاین‌های دیگر) و حدود ۱۳ درصد لاین‌ها فاقد واکنش مقاومت موثر در دو مرحله گیاهچه‌ای و گیاه بالغ (در منطقه مغان) بودند. تفکیک واکنش‌های مقاومت، حساسیت براساس روش مشابه با (Xu et al., 2009) تعیین شد.

تقریباً در ۳۷ درصد از ارقام تجاری (مثل ارقام آراز، آرمان، راج، سحر، سارنگ، خلیل و برات و سایر ارقام دیگر و همچنین ۱۳ درصد از لاین‌های امیدبخش گندم مثل لاین‌های M-99-15 و D-99-6) به احتمال زیاد ژن‌های مقاومت در مرحله گیاه کامل وجود دارند زیرا مقاومت نسبی به نژادهای بیمارگر زنگ زرد در این مرحله در آنها مشاهده شد. واکنش این ارقام و لاین‌ها نسبت به نژادهای بیمارگر زنگ زرد در مرحله گیاهچه‌ای به صورت حساسیت بود. ژن‌های مقاومت گیاه بالغ در مرحله گیاهچه‌ای بیان نمی‌شوند ولی ژن‌های مقاومت گیاهچه‌ای می‌توانند در تمام مراحل رشدی گندم بیان شوند (McIntosh et al., 1995).

براساس نتایج مطالعات در بیشتر ارقام تجاری گندم داخلی تعداد محدودی از ژن‌های مقاومت نسبت به نژادهای بیمارگر زنگ زرد وجود دارند که عمدتاً نیز از نوع گیاهچه‌ای هستند (Nazari et al., 2000) و با ظهور نژادهای جدید بیمارگر زنگ زرد اثر بخشی خود را از دست می‌دهند. برای ایجاد مقاومت‌های ژنتیکی پایدار با طول عمر بیشتر نیاز است که ژن‌های مقاومت موثر گیاهچه‌ای همراه با چند ژن (بین ۴ تا ۵ ژن) مقاومت تدریجی (مرحله گیاه بالغ) در ژنوتیپ‌های مطلوب گندم از نظر عملکرد و سایر ویژگی‌های زراعی خوب، از طریق تلاقی و سپس انتخاب به کمک نشانگرهای مولکولی مرتبط، جمع‌گردند (Singh et al., 2011; Ye et al., 2022).

در سال‌های زراعی ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ شرایط آب و هوایی دشت مغان (جدول ۵) برای ظهور و گسترش بیماری زنگ زرد بسیار ایده‌آل بود (هوای خنک با دمای بین ۸ تا ۱۷ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی بالا از اواخر اسفند تا اواسط اردیبهشت ماه و همچنین تعداد ساعت‌های آفتابی بین ۷ تا ۸ ساعت).

براساس مشاهدات میدانی همکاران واحد پاتولوژی بخش غلات موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر در سال زراعی ۱۴۰۳ وضعیت بیماری زنگ زرد در مناطق مختلف کشور به ویژه در شمال کشور از شدت بیشتری برخوردار بود. نتایج واکنش مقاومت هر یک از ارقام تجاری گندم و لاین‌های امیدبخش گندم نسبت به نژادهای زنگ زرد مورد مطالعه در دو مرحله گیاهچه‌ای و گیاه بالغ (در منطقه مغان) در جدول ۶ ارایه شده است. اختلاف در نتایج واکنش ارقام تجاری و لاین‌های امیدبخش گندم مورد مطالعه می‌تواند به دلیل وجود تنوع ژنتیکی در این ژنوتیپ‌های گندم و همچنین تغییر در فراوانی و پراوری جمعیت عوامل بیماری‌زای غالب در منطقه و نیز شرایط محیطی تاثیرگذار در طی دو سال باشد. عمرانی و دادرزائی نیز تنوع ژنتیکی را برای واکنش مقاومت ارقام تجاری و لاین‌های امیدبخش گندم نسبت به نژادهای زنگ قهوه‌ای را گزارش نمودند (Omrani & Dadrezaei, 2024).

براساس نتایج حدود ۵۶ درصد ارقام تجاری گندم (مثل رقم تکتاز، تیرگان، احسان و سایر ارقام دیگر) دارای واکنش مقاومت قابل قبول و حدود ۴۴ درصد ارقام فاقد واکنش مقاومت موثر بودند (دارای واکنش نیمه حساسیت تا حساسیت). همچنین حدود ۸۷ درصد لاین‌های امیدبخش گندم دارای واکنش مقاومت قابل قبول (مثل لاین N-95-6، N-97-20، N-

جدول ۵- ویژگی‌های آب و هوایی منطقه مغان طی سال‌های زراعی ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳

Table 5 - Climatic characteristics of the Moghan region during years 2023 and 2024

Months	2023			2024		
	Average temperature	Average relative humidity(%)	Average number of sunshine hours	Average temperature	Average relative humidity(%)	Average number of sunshine hours
Bahman	3	71	7.5	4	74	6.7
Esfand	12	68	6.8	7	70	7.1
Farvardin	15	65	7	15	67	7.4
Ordibehesht	17	62	7.6	18	70	8.5

ضریب آلودگی در مراحل گیاهچه‌ای و گیاه بالغ نشان داد لاین‌های امیدبخش گندم نیز در دو گروه اصلی طبقه‌بندی شدند. گروه منتسب به حساس بالاترین مقدار را برای صفات اندازه‌گیری شده در مراحل گیاه بالغ و گیاهچه‌ای، داشتند و دارای واکنش حساسیت نسبت به نژادهای بیمارگر زنگ زرد، بودند. گروه دوم، لاین‌های منتسب به این گروه کمترین مقدار را برای صفات اندازه‌گیری شده مذکور داشتند و دارای واکنش مقاومت تا نیمه مقاومت در هر دو مرحله گیاهچه‌ای و گیاه بالغ بودند.

در شکل نقشه دمایی هرچه قدر مقاومت ژنوتیپ‌های گندم نسبت به نژادهای بیمارگر زنگ زرد بیشتر بود به رنگ قرمز تیره و هرچه قدر واکنش مقاومت کاسته می‌شد به رنگ آبی متمایل بود. همچنین گروه‌بندی ژنوتیپ‌های گندم از طریق روابط موجود بین یکدیگر از لحاظ قرابت پاسخ و ایجاد مقاومت نسبت به بیمارگر زنگ زرد در ساختار درختچه‌ای قابل مشاهده است.

از بین روش‌ها و الگوریتم‌های مختلف برای تجزیه خوشه-ای، روش وارد (Wards) بهترین دندروگرام را از نظر گرافیکی و ضریب کوفتتیک داشت. نقشه دمایی به همراه تجزیه و تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی واکنش ارقام و لاین‌های امیدبخش گندم نسبت به نژادهای بیمارگر زنگ زرد براساس صفات تیپ آلودگی و ضریب آلودگی در مراحل گیاهچه‌ای و گیاه بالغ نشان داد (شکل ۱ و شکل ۲) ارقام تجاری گندم مورد مطالعه در دو گروه اصلی طبقه‌بندی شدند. گروه منتسب به حساس‌ها، دارای واکنش حساسیت نسبت به نژادهای بیمارگر زنگ زرد بودند و بالاترین مقدار را برای صفات اندازه‌گیری شده مذکور در مراحل گیاه بالغ و گیاهچه‌ای، داشتند. گروه دوم، ارقام منتسب به این گروه کمترین مقدار را برای صفات اندازه‌گیری شده مذکور داشتند و دارای واکنش مقاومت تا نیمه مقاومت در هر دو مرحله گیاهچه‌ای و گیاه بالغ بودند. تجزیه خوشه‌ای لاین‌های امیدبخش گندم مورد مطالعه نسبت به نژادهای زنگ زرد براساس صفات تیپ آلودگی و

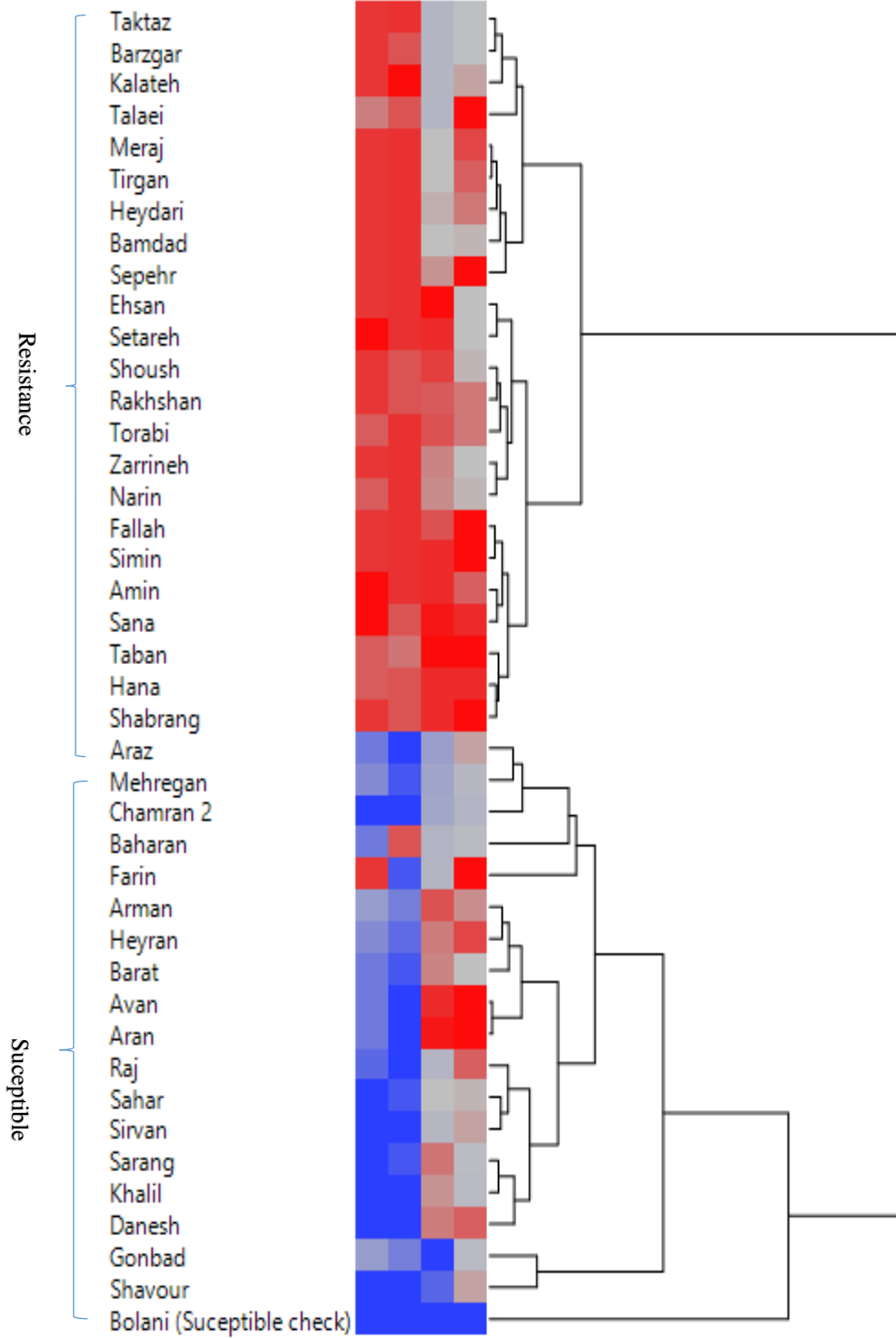
جدول ۶- واکنش مقاومت ارقام تجاری و لاین‌های امیدبخش گندم در مراحل گیاهچه‌ای و گیاه بالغ نسبت به نژادهای زنگ زرد
Table 6. Resistance response of commercial cultivars and promising wheat lines to stripe rust at seedling and adult plant stages

No.	Commercial cultivars	Adult plant stage		Seedling stage	
		Moghan (2023)	Moghan (2024)	174E191A+, Yr27	6E134A+, Yr27
1	Taktaz	10MS	40MS	0;	0;
2	Araz	10M	60MS	4	3
3	Arman	10M	20MR	3	2+C 3-
4	Meraj	5MR	30MS	0;CN	0;
5	Kalateh	15MR	40MS	0	0;
6	Tirgan	5MR	30MS	0;	0;
7	Ehsan	10MS	0	0;	0;
8	Gonbad	15MSS	100S	3	2+3-
9	Fallah	0	20MR	0;	0;
10	Raj	10MR	40MS	4	3
11	Sahar	10MS	30MS	4	4
12	Setareh	10MS	10MR	0;	0;
13	Sarang	20M	30MR	4	4
14	Khalil	15MS	20MS	4	4
15	Barat	10MS	40MR	4	3
16	Shoush	10MS	15MR	0;1CN	0;C
17	Mehregan	20MS	50MS	3+	3C
18	Shavour	10M	80MSS	4	4
19	Chamran 2	20MSS	50MS	4	4
20	Bamdad	10M	30MS	0;CN	0;
21	Sepehr	0	20MS	0;	0;
22	Danesh	10MR	40MR	4	4
23	Amin	10MR	10MR	0;	0;
24	Farin	0	40MS	4	0;

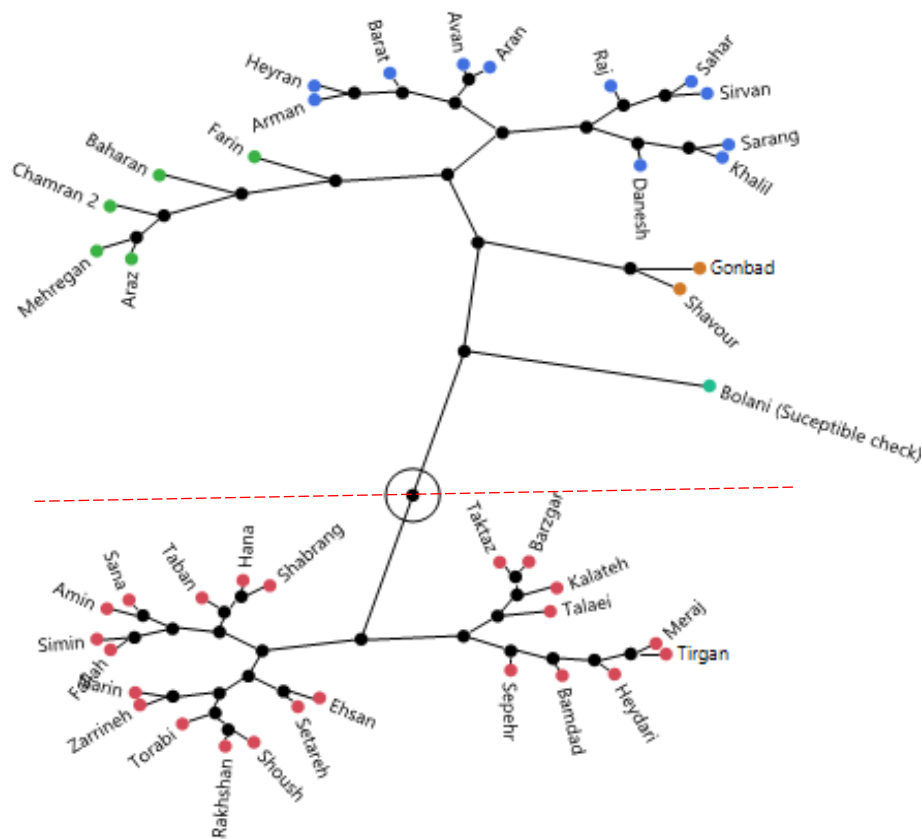
ادامه جدول ۶:

25	Torabi	10MR	20MR	0;	:1CN
26	Talaei	0	40MS	:1CN	:2CN
27	Rakhshan	10MS	20MR	:1CN	0;
28	Baharan	15MS	40MS	:1CN	3
29	Sirvan	10M	40MS	4	4
30	Simin	0	10MR	0;	0;
31	Heyran	5MR	40MR	3	3
32	Zarrineh	20MR	40MR	0;	0;
33	Heydari	10MR	50MR	0;	0;
34	Barzgar	10MS	40MS	:1CN	0;
35	Narin	10MS	40MR	0;	:1CN
36	Avan	0	10MR	4	3
37	Taban	0	0	0;1	:1CN
38	Sana	0	0	:1CN	;
39	Aran	0	0	4	3
40	Hana	0	10MR	:1CN	0;1C
41	Shabrang	0	10MR	:1CN	0;
42	Bolani (Suceptible check)	100S	100S	4	4
43	N-95-6	5MR	0	0;	0;
44	N-97-20	0	0	0;	0;
45	N-98-8	0	0	0;	0;
46	N-98-16	10MR	40MR	0;	0;
47	N-98-20	0	20MR	0;	0;
48	N-99-4	5MR	10MR	0;	0;
49	N-99-6	0	10MR	0;	0;
50	N-99-19	0	10MR	0;	0;
51	S-96-15	30MS	80MS	3	4
52	S-96-16	0	20MR	2+C	:2CN
53	S-97-10	5MR	15MR	0;	0;
54	S-98-22	20MR	30MR	0;	0;
55	S-99-18	0	20MS	0;	0;
56	M-DH98-10	10MR	40MR	0;	0;
57	M-DH98-18	10MR	20MS	0;	0;
58	M-99-9	0	80MS	:1CN	0;CN
59	M-99-15	5MR	40MR	4	4
60	MDH-99-10	0	15MR	0;	0;
61	CD-91-12	0	10MR	:2C	2CN
62	C-96-8	0	10MR	:2C	:2CN
63	CD-96-10	0	10MR	0;	0;
64	C-97-4	0	10MR	:1CN	:1CN
65	C-97-16	0	50MS	4	4
66	CD-97-19	0	10MR	0;	0;
67	C-98-5	0	20MS	0;	0;
68	C-98-7	0	10MR	0;	0;
69	C-98-8	0	20MR	0;	0;
70	C-98-12	0	10MR	0;	0;
71	CD-98-9	5MR	10MR	0;	0;
72	C-99-3	0	40MS	0;	0;
73	C-99-8	0	20MR	0;	0;
74	CD-99-15	0	10MR	0;	0;
75	MS-94-14	10MS	50MS	0;	:1CN
76	MS-95-4	10MS	50MS	0;	0;
77	MS-95-9	0	60MS	:1CN	0;
78	MS-96-4	0	60MS	0;	0;1
79	MS-97-4	5MR	60MS	:1CN	:1CN
80	MS-98-3	0	60MS	0;	0;
81	MS-99-6	0	40MS	0;	3
82	MS-99-7	5MR	70MS	0;	0;
83	MS-99-19	0	60MS	0;	0;
84	D-99-4	0	10R	4	0
85	D-99-6	0	10R	4	3
86	D-99-10	5MR	0	2CN	0;
87	D-99-18	0	10MR	4	0;1CN
88	Bolani (Suceptible check)	100S	100S	4	4

S= Susceptible MS= Moderate Susceptible MR= Moderate Resistant R= Resistant



(A)



(B)

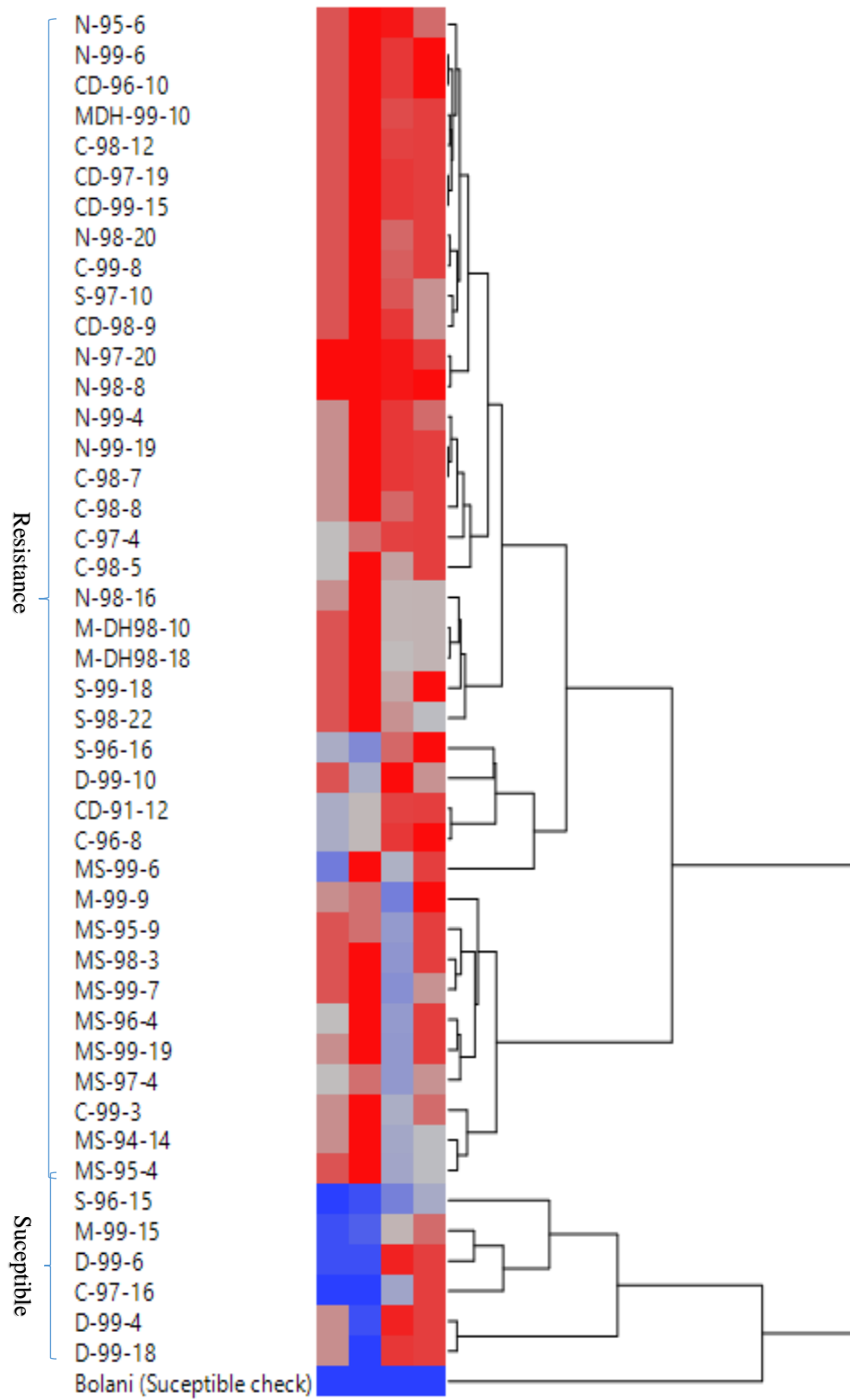
شکل ۱. دندروگرام نقشه دمایی به همراه تجزیه و تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی با روش Wards (A) و نمودار درختچه‌ای روابط بین واکنش ارقام تجاری گندم نسبت به نژادهای بیمارگر زنگ زرد (B)

Figure 1. Dendrogram of the heatmap along with hierarchical cluster analysis by Wards method (A) and tree diagram of relationships between commercial cultivars' response to yellow rust pathogenic races (B)

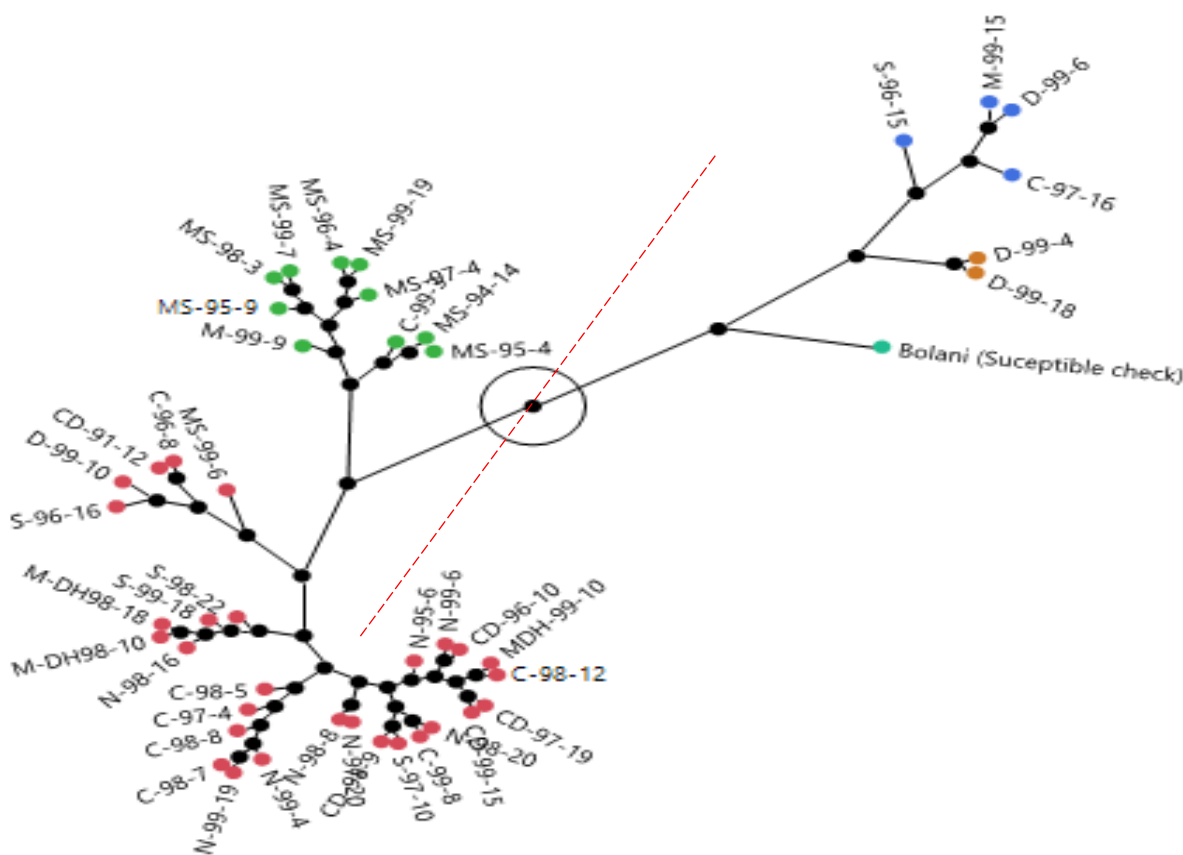
مؤثر و پایدار یکی از راه‌هایی است که می‌تواند منجر به تقلیل خسارت بیماری‌ها و کاهش مصرف بی‌رویه سموم در اراضی اقلیم گرم و مرطوب شمال از جمله دشت مغان شود. در تحقیق حاضر تعداد ارقام و لاین‌های امیدبخش گندم دارای واکنش مقاومت به نژادهای زنگ زرد مورد مطالعه بیشتر از تعداد ارقام و لاین‌های دارای واکنش حساسیت و نیمه حساسیت بود که بیانگر این مطلب می‌باشد که ژن‌های مقاومت مؤثر در لاین‌های جدید گندم در برنامه‌های به‌نژادی وارد شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

نتیجه‌گیری کلی

مجموع روش‌های به‌زراعی و شیمیایی به‌تنهایی کارایی لازم برای کنترل بیماری‌های قارچی زنگ‌ها را ندارند. بهترین راهکار استفاده تلفیقی از مجموع این روش‌ها با مقاومت‌های ژنتیکی (ارقام مقاوم)، بهترین روش مدیریت زنگ‌ها به‌شمار می‌آید. براساس نتایج این تحقیق استفاده از ترکیب‌های ژن‌های مقاومت *Yr15*، *Yr10*، *Yr5*، *Yr1* و *YrSP* و *YrSU*، *Yr24* نسبت به نژادهای زنگ زرد جهت استفاده در برنامه‌های به‌نژادی به‌منظور ایجاد مقاومت‌های



(C)



(D)

شکل ۲. دندروگرام نقشه دمایی به همراه تجزیه و تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی با روش Wards (C) و نمودار درختی روابط بین واکنش لاین‌های امیدبخش گندم نسبت به نژادهای بیمارگر زنگ زرد (D)

Figure 2. Dendrogram of the heatmap along with hierarchical cluster analysis by Wards method (C) and tree diagram of relationships between promising wheat lines response to yellow rust pathogenic races (D)

سپاس‌گزاری

این تحقیق مستخرج از نتایج پروژه ملی با کد مصوب ۰۱۰۷۵۳-۰۱۱-۰۳-۰۳-۰۰ می‌باشد. بدین وسیله از ریاست محترم موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، ریاست بخش تحقیقات غلات، همکاران واحد پاتولوژی آن موسسه و همچنین از آقایان و خانم‌های مهندس زهره حسن بیات، الهام الاحسنی، جعفر میکائیلی، داود رنجبر، اسمعیل ابراهیمی و خانم دکتر سمیرا حسینیان بابت مساعدت در انجام این پروژه، تشکر و قدردانی می‌گردد.

لاین‌های جدید گندم علاوه بر داشتن عملکرد بالا و خصوصیات زراعی مطلوب حتماً بایستی نسبت به مهم‌ترین بیماری‌های گندم (زنگ‌ها) مقاومت قابل قبولی داشته باشند تا به‌عنوان رقم تجاری معرفی شوند در صورت نداشتن مقاومت بایستی حذف شوند زیرا در طول فصل زراعی شرایط محیطی برای فعالیت بیمارگر زنگ‌ها به‌ویژه زنگ زرد اگر فراهم گردد، خسارت بسیار چشم‌گیر خواهد بود. از لاین‌های مقاوم شناسایی شده می‌توان در برنامه‌های به‌نژادی تهیه ارقام گندم مقاوم به زنگ زرد به‌عنوان منابع مقاومت استفاده نمود.

References

- Afshari, F. (2013). Race analysis of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in Iran. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 46, 1785-1796.
- Ali, S., & Hodson, D. (2017). Wheat Rust Surveillance: Field Disease Scoring and Sample Collection for Phenotyping and Molecular Genotyping. In: Periyannan, S. (eds) Wheat Rust Diseases. *Methods in Molecular Biology*, vol 1659. Humana Press, New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7249>
- Ali, S., Gladieux, P., Leconte, M., Gautier, A., Justesen, A.F., Hovmoller, M.S., Enjalbert, J., & de Vallavieille-Pope. C. (2014). Origin, migration routes and worldwide population genetic structure of the wheat yellow rust pathogen *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*. *PLoS Pathog*, 10, e1003903. <https://doi.org/10.1371/1003903>
- 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*, 202-2021. <http://dx.doi.org/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 and Applied Genetics*, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03967-z>
- Chen, X.M. (2020). Pathogens which threaten food security: *Puccinia striiformis*, the wheat stripe rust pathogen. *Food Security*, 12(2), 239-251. <https://doi.org/10.1007/s12571-020-01016-z>
- Dadrezaei, S.T., Delfan, S., & Allahassani, E. (2022). 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 with English abstract)
- Dadrezaei, S.T., Dehghan, M.A., Safavi, S., Dalvand, M., & Shahbazi, K. (2023). 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 with English abstract)
- 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 and Plant Improvement journal*, 33(3), 20-40. (In Persian with English abstract)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2015.01.001>
- Downie, R.C., Lin, M., Borsi, B., Ficke, A., Lillemo, M., Oliver, R.P., Phan, H., Tan, K.C., & Cockram, J. (2020). Septoria nodorum blotch of wheat: disease management and resistance breeding in the face of shifting disease dynamics and a changing environment. *Phytopathology*, 10, 1-18. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-20-0280-RVW>
- Ellis, J.G., Lagudah, E.S., Spielmeier, W., & Dodds, P.N. (2014). The past, present and future of breeding rust resistant wheat. *Frontiers in plant science*, 5, 641. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00641>
- Figuroa, M., Dodds, P.N., & Henningsen, E.C. (2020). Evolution of virulence in rust fungi multiple solutions to one problem. *Current opinion in plant biology*, 56, 20-27. <https://doi.org/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. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(72\)80096-2](https://doi.org/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. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00824>

Hovmoller, M.S., Rodriguez-Algaba, M.P.J., Thach, T., Sorensen, C.K., Justesen A.F., & Hansen, J.G. (2022). GRRC report of yellow and stem rust genotyping and race analyses 2021. *Global Rust Reference Center*. Aarhus Au University.

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. <https://doi.org/10.1111/ppa.12433>

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. <https://doi.org/10.22124/CR.2024.26308.1801>

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 and Applied Genetics*, 135(5), 1541-1550. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1080/07060661.2016>

McCallum, B.D., Reimer, E., McNABB, W.I.N., 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. <https://doi.org/10.1094/PDIS-91-8>

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. <https://doi.org/10.1080/07060661.2021.1888156>

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

Mohammadi, N., Safavi, S.A., Pouralibaba, H.R., Afshari, F., Yassaie, M., Roustaie, M., & Atahoseini, S.M. (2023). Screening of dryland bread wheat genotypes against yellow rust through greenhouse and multi-environmental trials. *Journal of Crop Protection*, 12(1), 43-53.

Nazari K., Torabi M., Hasni M.H., Kashani A., Hooshyar R., & Mogaddam M.S.A. (2000). Evaluation of resistance to yellow rust in advanced wheat lines suitable for dryland areas at seedling and adult-plant stages. *Seed and Plant*, 16, 252-262. (In Persian with English abstract)

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*, 18, 15-25. (In Persian with English summary)

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 with English summary)

Omrani, A. & Dadrezaei, S. T. (2024). Investigation of Resistance Responses in Elite Wheat Lines and Cultivars to Brown Rust (*Puccinia triticina* Eriks.) in the Moghan Plain. *Plant Protection (Scientific Journal of Agriculture)*, 47(1), 1-20. <https://doi.org/10.22055/ppr.2024.46519.1737>

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. <https://doi.org/10.1080/03235408.2013.832865>

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 and Plant Protection*, 46(19), 2341-2355. <https://doi.org/10.1080/03235408.2013.794529>

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 with English summary)

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 with English summary)

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.

Singh R.P., Huerta-Espino, J., Bhavani, S., Herrera-Foessel, S.A., Singh, D., Singh, P.K., Velu, G., Mason, R.E., Jin, Y., Njau, P., & Crossa, J. (2011). Race non-specific resistance to rust diseases in CIMMYT spring wheats. *Euphytica*, 179, 175-186.

Wellings, C.R. (2011). Global status of stripe rust: A review of historical and current threats. *Euphytica*, 179, 129-141. <https://doi.org/10.1007/s10681-011-0360-y>

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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2021.07.004>

Zadoks, J.C., Chang, T.T., & Konzak, C.F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed research*, 14(6), 415-421.



© 2024 by the authors. Licensee SCU, Ahvaz, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).