



واکنش برخی از ژنوتیپ های گندم نان آبی برنامه های ملی به نژادی اقلیم های معتدل و گرم و مرطوب شمال نسبت به زنگ های زرد و ساقه در مرحله گیاهچه ای و گیاه بالغ

Reaction of Some Irrigated Bread Wheat Genotypes of the National Breeding Programs for Temperate and Northern Warm and Humid Agro-climatic Zones to Yellow and Stem Rusts at the Seedling and Adult Plant Stages

صفرعلی صفوی^{۱*}، فرزاد افشاری^۲ و علی ملیحی پور^۳

۱- دانشیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران.

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

۳- دانشیار، بخش تحقیقات غلات، موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰

چکیده

صفوی، ص. ع.، افشاری، ف. د. و ملیحی پور، ع. ۱۴۰۳. واکنش برخی از ژنوتیپ های گندم نان آبی برنامه های ملی به نژادی اقلیم های معتدل و گرم و مرطوب شمال نسبت به زنگ های زرد و ساقه در مرحله گیاهچه ای و گیاه بالغ. نهال و بذر ۴۰: ۴۵۶-۴۲۵

عدم وجود مقاومت پایدار در ارقام گندم تجاری، عامل اصلی در بروز همه گیری های زنگ زرد و زنگ ساقه است که می تواند تولید گندم را در مناطق مختلف جهان به شدت تحت تأثیر قرار دهد. این پژوهش با هدف شناسایی منابع مقاومت در مراحل گیاهچه ای و گیاه بالغ در میان برخی از ژنوتیپ های گندم نان تولید شده در برنامه های ملی به نژادی گندم برای اقلیم های معتدل و گرم و مرطوب شمال کشور انجام شد. چهار و چهار ژنوتیپ گندم نان (شامل ۱۹ ژنوتیپ از برنامه به نژادی اقلیم معتدل و ۲۵ ژنوتیپ از برنامه به نژادی اقلیم گرم و مرطوب شمال) به همراه شاهد های حساس، در مراحل گیاهچه ای (در گلخانه در کرج) و گیاه بالغ (مزرعه) در دو سال زراعی متوالی (۱۳۹۷-۹۸ و ۱۳۹۸-۹۹) در ایستگاه تحقیقات کشاورزی اردبیل برای واکنش به بیماری های زنگ زرد و ساقه مورد ارزیابی قرار گرفتند تا سازوکارهای مختلف مقاومت در آنها شناسایی شوند. مقاومت در مرحله گیاه بالغ با استفاده از معیارهای همه گیری بیماری شامل: ضریب آلودگی، شدت نهایی بیماری و مقدار نسبی سطح زیر منحنی پیشرفت بیماری در شرایط مزرعه و در برابر جمعیت های محلی ارزیابی شد. همچنین واکنش های گیاهچه ای در شرایط کنترل شده در برابر دو پاتوتیپ زنگ زرد و چهار پاتوتیپ زنگ ساقه در گلخانه انجام شد. نتایج نشان داد که ۱۲ (۲۷/۲٪)، ۲۰ (۴۵/۴٪) و ۱۲ (۲۷/۲٪) ژنوتیپ به ترتیب دارای مقاومت تدریجی، مقاومت گیاهچه ای یا تمام مرحله ای و مقاومت در مرحله گیاه بالغ به زنگ زرد بودند. در مورد زنگ ساقه، ۱۲ ژنوتیپ (۲۷/۲٪) دارای مقاومت تدریجی، دو ژنوتیپ (۴/۵٪) دارای مقاومت گیاهچه ای و ۳۰ ژنوتیپ (۶۸٪) حساس بودند. یافته های این پژوهش طیف وسیعی از واکنش های مقاومتی را نشان داد. ژنوتیپ هایی که در مرحله گیاهچه ای نسبت به حداقل یک پاتوتیپ حساس، اما در مرحله گیاه بالغ واکنش های نیمه مقاوم تا نیمه حساس همراه با شدت بیماری پایین را نشان دادند، احتمالاً حامل چندین ژن مقاومت گیاه بالغ یا مقاومت تدریجی هستند. این ژنوتیپ ها می توانند به عنوان منابع ژنتیکی ارزشمند در برنامه های به نژادی برای تولید ارقام جدید با مقاومت پایدار مورد استفاده قرار گیرند.

واژه های کلیدی: گندم نان، مقاومت نژاد-اختصاصی، مقاومت غیر نژاد-اختصاصی، مقاومت تدریجی، مقاومت پایدار.

تلفن: ۰۰۹۸۴۵۱۲۶۶۳۴۰۷

* نگارنده مسئول: Safaralisafavi@yahoo.com



2024© Seed and Plant. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

مقدمه

گندم نان (*Triticum aestivum* L.) یکی از اساسی ترین محصولات کشاورزی جهان به شمار می رود که نقش عمده ای در تأمین امنیت غذایی میلیاردها نفر، به ویژه در مناطق آسیای مرکزی، غرب آسیا و شمال آفریقا از جمله ایران ایفا می کند. در ایران، سطح زیر کشت گندم حدود ۶/۹ میلیون هکتار و تولید سالانه آن حدود ۱۳/۲۸ میلیون تن برآورد شده است (Anonymous, 2023).

با وجود اهمیت فراگیر گندم، عملکرد دانه این محصول به طور چشمگیری تحت تأثیر تنش های زیستی و غیرزیستی قرار دارد. در این میان، زنگ های گندم از مهمترین عوامل محدود کننده تولید محسوب می شوند. زنگ زرد یا نواری و زنگ ساقه یا سیاه که به ترتیب توسط قارچ های *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* (Pst) و *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* (Pgt) ایجاد می شوند، خسارت های اقتصادی قابل توجهی را، در مقیاس جهانی، بر تولید گندم ایجاد می کنند (Ali et al., 2017; Kumar et al., 2020; Meyer et al., 2021).

بیماری زنگ زرد همچنان یکی از جدی ترین تهدیدها برای تولید جهانی گندم محسوب می شود و اغلب به عنوان یک عامل محدود کننده کلیدی برای عملکرد دانه آن شناخته می شود (Chen et al., 2014, Chen, 2020).

همه گیری های این بیماری معمولاً هر پنج تا ۱۰ سال یک بار در سطح جهانی به وقوع پیوسته و به

کاهش عملکرد دانه گندم بین ۱۰ تا ۷۰ درصد منجر می شوند. این در حالی است که در شرایط طغیان شدید این بیماری نابودی کامل محصول (خسارت صد درصد) قابل تصور است (Chen, 2005, 2020; Aggarwal et al., 2018). براساس گزارش ها، خسارت سالانه ناشی از زنگ زرد در گندم در جهان حدود ۵/۵ میلیون تن برآورد شده است (Beddow et al., 2015).

در دهه های اخیر، همه گیری های زنگ زرد در بسیاری از مناطق عمده کشت گندم از جمله آسیای مرکزی و آفریقا مشاهده شده است (Ezzahiri et al., 2009; Rahmatov et al., 2012). گسترش و تکرار این همه گیری ها عمدتاً ناشی از تکامل سریع بیمارگر، جابه جایی دوربرد اوردوسپورها و ظهور نژادها/پاتوتیپ های پرآزار (Virulent) جدید است (Wellings, 2007; Hovmøller et al., 2016; Hovmøller and Justesen, 2007; Brown and Hovmøller, 2002; Rodriguez-Algaba et al., 2014). این فرآیندها به شکل گیری همه گیری های وسیع منجر شده و تهدیدی جدی برای تولید پایدار گندم در سطح جهان محسوب می شوند. در میان عوامل مؤثر در تکامل و ظهور پاتوتیپ های جدید بیمارگر از جمله جهش، مهاجرت و نوترکیبی ناشی از تولیدمثل جنسی، نقش جهش از اهمیت بیشتری برخوردار است (Chen, 2020; Chen and Kang, 2017).

جمعیت های پویا و در حال تغییر قارچ های عامل زنگ زرد و زنگ سیاه گندم تهدید جدی

قارچ کش برای جلوگیری از کاهش عملکرد دانه بودند (Chen, 2020).

از میان ۸۶ ژن مقاومت نام گذاری شده نسبت به زنگ زرد، تنها ۱۹ ژن از جمله *Yr29*, *Yr18*, *Yr30*, *Yr36*, *Yr39*, *Yr46*, *Yr48*, *Yr49*, *Yr52*, *Yr54*, *Yr55*, *Yr58*, *Yr59*, *Yr62*, *Yr68*, *Yr71*, *Yr75*, *Yr77* و *Yr78* با مقاومت غیرنژاد-اختصاصی یا مقاومت تدریجی مرتبط هستند (Zhu *et al.*, 2023). در مطالعات انجام گرفته در ایران و از میان ژن های مختلف مقاومت، ژن های *Yr5*, *Yr10*, *Yr15*, *Yr16*, *YrCV*، *YrSD* و *YrND* به عنوان ژن های موثر شناسایی شده اند که عمدتاً نژاد-اختصاصی هستند (Afshari, 2008; Safavi, 2019).

زنگ ساقه گندم، نیز یکی از مخرب ترین بیماری های این محصول است که در سال های همه گیری می تواند خسارت های شدید تا ۱۰۰ درصد عملکرد دانه را در ارقام حساس ایجاد کند (Admassu *et al.*, 2012; Denbel *et al.*, 2013). این قارچ به عنوان انگل اجباری با ایجاد اختلال در فتوسنتز و انتقال آب و مواد غذایی، موجب کاهش شدید عملکرد دانه می شود (Roelfs *et al.*, 1992). ژن مقاومت *Sr31* که از چاودار مشتق و به طور گسترده در برنامه های بین المللی به نژادی گندم مورد استفاده قرار گرفته بود، تا پیش از ظهور نژاد Ug99 (TTKSK) در اوگاندا در سال ۱۹۹۹، مقاومت مؤثری را در برابر زنگ ساقه فراهم می کرد. اما این نژاد توانست بر مقاومت ناشی از این ژن مقاومت غلبه نماید

برای امنیت غذایی در مناطق گندم خیز ایران محسوب می شوند و خسارات مالی قابل توجهی را به کشاورزی این کشور وارد کرده اند (Afshari, 2008; Safavi and Malihipour, 2020; Malihipour and Esmailzadeh Moghaddam, 2023; Omrani *et al.*, 2024;). این چالش، بخشی از یک مسئله جهانی گسترده تر است، جایی که تکیه ی انحصاری بر ارقام تجاری دارای مقاومت نژاد-اختصاصی (Race-specific)، اغلب به همه گیری های بزرگ پس از شکسته شدن این مقاومت منجر گردیده است (Huerta-Espino *et al.*, 2020; Dawana *et al.*, 2024). یک نقطه ضعف اصلی این راهبرد، عمر کوتاه کارایی آن است، چرا که ارقام اصلاح شده، خیلی زود پس از معرفی، در اثر ظهور پاتوتیپ های جدید و سازگار بیمارگر، مقاومت خود را از دست می دهند (Hovmøller *et al.*, 2016; Chen and Kang, 2017).

در ایران، زنگ زرد یکی از مهم ترین عوامل محدود کننده کشت گندم در مناطق اکولوژیک-زراعی است. این بیماری به ویژه در نواحی مرطوب حاشیه دریای خزر همه گیری های شدید و مکرر با تناوب سه تا چهار ساله را ایجاد کرده است. به عنوان مثال، در فاصله سال های ۱۹۹۳ تا ۱۹۹۵، همه گیری بیماری زنگ زرد در ایران به ترتیب موجب کاهش ۱/۵ و ۱ میلیون تنی محصول گندم شد (Torabi *et al.*, 1995) و در سال ۲۰۱۰ بیش از ۷۵۰ هزار هکتار از مزارع گندم در ایران، نیازمند استفاده از

(Pretorius *et al.*, 2000).

از آن زمان به بعد، گروه نژادی Ug99 به چندین تغییر یافته (واریانت) تکامل یافته و تا سال ۲۰۲۲ در کشورهای مختلفی گسترش یافت (Olivera *et al.*, 2022). در سال‌های اخیر، نژاد TKTTF موجب طغیان‌های شدید بیماری زنگ سیاه گندم در اتیوپی شد و بر مقاومت رقم Digalu غلبه کرد (Olivera *et al.*, 2015). همچنین نژاد TTTTF خسارت‌های قابل توجهی به گندم دوروم در ایتالیا وارد و نگرانی‌هایی را در اروپا برانگیخت (Bhattacharya, 2017). این رخدادها ضرورت پایش مستمر جمعیت‌های بیمارگر و توسعه راهبردهای متنوع مقاومت به بیماری زنگ سیاه گندم را برجسته می‌سازند.

تا سال ۲۰۱۵، بیش از ۷۲ ژن مقاومت به زنگ ساقه شناسایی شده بود که اغلب به صورت نژاد-اختصاصی و در تمام مراحل رشد عمل می‌کنند (Singh *et al.*, 2015). با این حال، مقاومت نژاد-اختصاصی معمولاً به دلیل تکامل سریع نژادهای پرآزار جدید و کشت وسیع ارقام تجاری حاوی تک‌ژن‌های مقاومت (R)، پایداری خود را از دست می‌دهد (Singh *et al.*, 2011). در مقابل، مقاومت غیرنژاد-اختصاصی (Non-race-specific resistance) که غالباً چندژنی بوده و عمدتاً در گیاهان بالغ بیان می‌شود، مقاومت بادوام‌تری را ایجاد می‌کند. این نوع مقاومت که به نام‌های "مقاومت تدریجی (Slow rusting resistance)" یا "مقاومت نسبی (Partial resistance)" نیز شناخته می‌شود، به

کاهش سرعت پیشرفت بیماری و دوام طولانی‌تر مقاومت منجر می‌شود (Herrera-Foessel *et al.*, 2011; Chen and Kang, 2017). بیش از ۷۰ ژن مقاومت نسبت به بیماری زنگ ساقه گندم، تنها پنج ژن *Sr2*، *Sr55*، *Sr56*، *Sr57* و *Sr58* مقاومت در مرحله گیاه بالغ را ایجاد می‌کنند (Singh *et al.*, 2015).

با توجه به چالش‌های موجود، برنامه‌های به‌نژادی گندم باید تمرکز اصلی خود را بر تولید ارقام با مقاومت غیرنژاد-اختصاصی معطوف نمایند. این نوع مقاومت می‌تواند هم به صورت مستقل و هم در ترکیب با ژن‌های مقاومت اختصاصی مورد استفاده قرار گیرد. شواهد پژوهشی نشان می‌دهد که تجمیع (Pyramiding) چندین ژن مقاومت غیرنژاد-اختصاصی، راهکار مؤثری است. برای زنگ زرد، تجمع چهار تا پنج ژن، و برای زنگ ساقه، تجمع پنج تا شش ژن از این نوع، می‌تواند سطوح بسیار بالایی از مقاومت در گیاه ایجاد کند (Singh *et al.*, 2011; Huerta-Espino *et al.*, 2020).

بنابراین، با توجه به محدودیت‌های مقاومت نژاد-اختصاصی، به کارگیری راهبردهای ژنتیکی مبتنی بر ترکیب ژن‌های مقاومت نژاد-اختصاصی یا گیاهچه‌ای (All stage resistance or Seedling resistance) و غیرنژاد-اختصاصی یا تدریجی به عنوان گزینه‌ای پایدارتر در مدیریت بیماری‌های زنگ گندم توصیه می‌شود (Singh *et al.*, 2011; Chen, 2013).

مقاومت ژنتیکی همچنان کارآمدترین،

اقتصادی ترین و سازگارترین شیوه با محیط زیست برای مدیریت بیماری های زنگ گندم به شمار می رود (Singh *et al.*, 2011; Chen, 2020). از این رو، شناسایی و به کارگیری منابع جدید مقاومت پایدار از اهداف اساسی در برنامه های به نژادی گندم است. دستیابی به این هدف نیازمند ارزیابی ژنوتیپ های متنوع و شناسایی سازوکارهای گوناگون مقاومت است. در سال های اخیر، مطالعات متعددی در ایران به ارزیابی واکنش ژنوتیپ های مختلف گندم نسبت به بیماری های زنگ زرد و زنگ ساقه به صورت جداگانه پرداخته و ژنوتیپ های مقاوم در مراحل گیاهچه ای و گیاه کامل را معرفی کرده اند (Safavi and Afshari, 2017; Mohammadi *et al.*, 2023; Malihipour and Esmaeilzadeh Moghaddam, 2023; Omrani *et al.*, 2024). با این حال، تاکنون پژوهش جامعی که به ارزیابی هم زمان واکنش ژنوتیپ ها نسبت به این دو بیماری مهم با استفاده از معیارهای همه گیری انجام شده باشد، وجود ندارد.

هدف این پژوهش، ارزیابی واکنش ۴۴ ژنوتیپ گندم نان تولید شده در برنامه های ملی به نژادی گندم نان برای اقلیم های معتدل و گرم و مرطوب شمال ایران در برابر بیماری های زنگ زرد و زنگ ساقه بود. ارزیابی در دو مرحله گیاهچه ای (در شرایط کنترل شده) و گیاه بالغ (در شرایط مزرعه ای ایستگاه تحقیقات آلاروق اردبیل) و در برابر جمعیت های محلی عامل این بیماری ها انجام شد. تأکید بر ارزیابی این مواد ژنتیکی در استان

اردبیل به دلیل اهمیت این منطقه به عنوان یکی از کانون های اصلی کشت گندم و وقوع مکرر زنگ زرد و سیاه در آن بود. هدف نهایی، شناسایی ژنوتیپ های دارای مقاومت پایدار (تدریجی یا مقاومت در مرحله گیاه بالغ) به عنوان منابع ژنتیکی ارزشمند برای استفاده در برنامه های ملی به نژادی گندم نان بود.

مواد و روش ها

مواد گیاهی

در مجموع ۴۴ ژنوتیپ گندم با تیپ رشد بهاره، (شامل ۱۹ ژنوتیپ حاصل از برنامه به نژادی گندم آبی اقلیم معتدل با شماره های M-97-1 تا M-97-20 و ۲۵ ژنوتیپ حاصل از برنامه به نژادی گندم آبی برای اقلیم گرم و مرطوب شمال کشور با شماره های N-97-1 تا N-97-25)، از بخش تحقیقات غلات مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر تهیه شد. جزئیات مربوط به تلاقی ها و شجره نامه آن ها در جدول ۱ ارائه شده است. کلیه ژنوتیپ ها همراه با شاهد های حساس از نظر مقاومت به زنگ زرد و زنگ ساقه در مراحل گیاهچه ای (در گلخانه در کرج) و گیاه بالغ (مزرعه) در دو سال زراعی متوالی (۱۳۹۷-۹۸ و ۱۳۹۸-۹۹) در ایستگاه تحقیقات کشاورزی اردبیل برای واکنش به بیماری های زنگ زرد و ساقه مورد ارزیابی قرار گرفتند تا سازوکارهای مختلف مقاومت در آنها شناسایی شوند.

پاتوتیپ‌های زنگ زرد و زنگ ساقه در مرحله گیاهچه‌ای

در مرحله گیاهچه‌ای به ترتیب از دو و چهار پاتوتیپ Pst و Pgt که معرف گروه‌های پاتوتیپی غالب در ایران بودند، استفاده شد. ویژگی‌های پرآزاری و ناپرآزاری این پاتوتیپ‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. این آزمایش در گلخانه‌های کنترل‌شده واحد بیماری‌های غلات، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، در کرج انجام شد.

ارزیابی مقاومت گیاهچه‌ای نسبت به زنگ زرد
برای بررسی مقاومت در مرحله گیاهچه‌ای نسبت به زنگ زرد، ژنوتیپ‌ها در گلدان‌های حاوی مخلوط خاک و پیت‌ماس (۷۰:۳۰، حجم: حجم) کشت شدند (شش بذر در هر گلدان). آلوده‌سازی با روش پودر پاشی (با نسبت ۱ به ۴) در مرحله دو برگگی (GS12) به صورت مجزا برای هر پاتوتیپ با استفاده از یورودیوسپور دو پاتوتیپ 174E150A+, Yr27 (جدا شده از زرقان، فارس) و 14E158A+, Yr27 (جدا شده از کرج) انجام شد (جدول ۲). پس از مایه‌زنی، گیاهان به مدت ۲۴ ساعت در اتاقک شب‌بنم (Dew chamber) در دمای ۷-۹ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نزدیک به اشباع نگهداری و سپس به گلخانه به ترتیب با دمای ۱۵ و ۱۸ درجه سانتی‌گراد برای شب و روز منتقل شدند. تیپ آلودگی (Infection type = IT) گیاهچه‌ها چهارده روز پس از مایه‌زنی و بر اساس مقیاس ۰ تا ۴ توصیف شده توسط استاکمن و همکاران

(Stakman et al., 1962)، اصلاح شده توسط مک‌اینتاش و همکاران (McIntosh et al., 1995) ارزیابی شد. آزمایش با دو تکرار مستقل برای هر ترکیب ژنوتیپ-پاتوتیپ انجام شد.

ارزیابی مقاومت گیاهچه‌ای نسبت به زنگ ساقه
برای بررسی واکنش در مرحله گیاهچه‌ای نسبت به زنگ ساقه، چهار تا شش بذر از هر ژنوتیپ در گلدان‌های با قطر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر حاوی مخلوط خاک و پیت‌ماس (۷۰:۳۰، حجم: حجم) کشت شدند. در مرحله هشت تا ۱۰ روزگی بعد از کاشت، زمانی که برگ‌های اولیه کاملاً توسعه یافته بودند، آلوده‌سازی با چهار پاتوتیپ زنگ ساقه شامل: TTTTF (جدا شده از بروجرد، لرستان)، PTRTF (جدا شده از کلاردشت، مازندران)، TKTTF (جدا شده از کلاردشت، مازندران) و TTKTK (جدا شده از شاور، خوزستان) انجام شد (جدول ۲). مایه‌زنی با استفاده از سوسپانسیون یورودیوسپور در روغن Soltrol 170 با غلظت ۱۰ میلی‌گرم اسپور در ۱۰ میلی‌لیتر روغن انجام شد (Malihipour and Esmaeilzadeh, 2023). گیاهان مایه‌زنی شده به مدت ۲۴ ساعت در اتاقک شب‌بنم در دمای ۱۸±۲ درجه سانتی‌گراد و تاریکی کامل قرار گرفتند و سپس به گلخانه‌ای با دمای ۲۲±۲ درجه سانتی‌گراد و دوره نوری ۱۶ و ۸ ساعت برای روز و شب منتقل شدند. تیپ‌های آلودگی (ITs) گیاهچه‌ها چهارده روز پس از مایه‌زنی بر اساس

جدول ۱- کد و شجره ژنوتیپ های گندم نان ارزیابی شده

Table 1. Codes and Pedigrees of evaluated bread wheat genotypes

ردیف No.	کد ژنوتیپ Genotype code	Name/Pedigree	نام/شجره
1	M-97-1	Rakhshan	
2	M-97-2	Baharan	
3	M-97-3	M-93-11	
4	M-97-4	M-94-14 (Amin)	
5	M-97-5	M-84-12/3/Dove"S"/Buc"S"/2*Darab/4/OASIS/SKAUZ//4*BCN*2/3/PASTOR	
6	M-97-6	PBW343*2/KUKUN(50Y)//Yaco/2*Parus/3/PRL/2*PASTOR	
7	M-97-7	VEE/PJN//2*KAUZ/3/SHUHA-4/FOW-2	
8	M-97-8	BABAX/LR42//BABAX/3/ER2000/4/2*MUNAL	
9	M-97-9	SOKOLL/3/PASTOR//HXL7573/2*BAU/4/PASTOR//MILAN/KAUZ/3/BAV92	
10	M-97-10	PRL/2*PASTOR/6/WBLL1*2/4/SNI/TRAP#1/3/KAUZ*2/TRAP//KAUZ/5/KACHU	
11	M-97-11	TUKURU//BAV92/RAYON/6/NG8201/KAUZ/4/SHA7//PRL/VEE#6/3/FASAN/5/MILAN/KAUZ...	
12	M-97-12	VEE/MJI//2*TUI/3/2*PASTOR/4/BERKUT/5/2*BAVIS (Bamdad)	
13	M-97-14	KAUZ//ALTAR 84/AOS/3/MILAN/KAUZ/4/SAUAL/5/SERI.1B//KAUZ/HEVO/3/AMAD*2/4/KIRITATI	
14	M-97-15	KAUZ//ALTAR4/AOS/3/MILAN/KAUZ/4/SAUAL/5/PBW343*2/KUKUNA//PARUS/3/PBW343*2/KUKUNA/6	
15	M-97-16	PASTOR//HXL7573/2*BAU/3/SOKOLL/WBLL1/6/2*OASIS/5*BORL95/5/CNDO/R143//ENTE/...	
16	M-97-17	CROC_1/AE.SQUARROSA (224)//OPATA/3/PASTOR/4/2*SOKOLL/3/PASTOR//HXL7573/2*BAU	
17	M-97-18	W15.92/4/PASTOR//HXL7573/2*BAU/3/WBLL1/6/VEE/MJI//2*TUI/3/2*PASTOR/4/BERKUT/5/...(Sepehr)	
18	M-97-19	ELVIRA/5/CNDO/R143//ENTE/MEXI75/3/AE.SQ/4/2*OCI/6/VEE/PJN//KAUZ/3/PASTOR/7/2*PBW343*2/KUKUNA...	
19	M-97-20	SUP152*2/PFUNYE #1	
20	N-97-1	Tirgan	
21	N-97-2	Ehsan	
22	N-97-3	CHAMRAN/4/OASIS/SKAUZ//4*BCN	
23	N-97-4	H-S C/2*VORB	
24	N-97-5	MERCATO/OUP.3065.2001	
25	N-97-6	SOKOLL/3/PASTOR//HXL7573/2*BAU*2/4/VORB	
26	N-97-7	MERCATO/3/1447/PASTOR//KRICHAUFF/4/BAVIS	
27	N-97-8	ND643/2*WAXWING/5/BABAX/LR42//BABAX*2/4/SNI	
28	N-97-9	BABAX/LR42//BABAX/3/ER2000/4/KA/NAC//TRCH/5/SOKOLL	
29	N-97-10	MUTUS//ND643/2*WBLL1	
30	N-97-11	BABAX/LR42//BABAX/3/ER2000/4/KA/NAC//TRCH/5/SOKOLL.	
31	N-97-12	SOKOLL/3/PASTOR//HXL7573/2*BAU/4/SOKOLL//PBW343	
32	N-97-13	PFAU/MILAN/5/CHEN/AEGILOPS SQUARROSA (TAUS)//BCN	
33	N-97-14	KACHU/SAUAL/3/TRCH/SRTU//KACHU	
34	N-97-15	SUP152/3/TRCH/SRTU//KACHU	
35	N-97-16	ROLF07/3/TRCH/SRTU//KACHU/4/SAUAL/MUTUS	
36	N-97-17	ROLF07/SAUAL/5/SERI.1B//KAUZ/HEVO/3/AMAD*2/4/KIRITATI	
37	N-97-18	SUP152/7/TUKURU//BAV92/RAYON/6/NG8201/KAUZ/4/SHA7	
38	N-97-19	CROC_1/AE.SQUARROSA (205)//BORL95/3/PRL/SARA//TSI	
39	N-97-20	PASTOR//HXL7573/2*BAU/3/SOKOLL/WBLL1/4/HUW234+LR34/	
40	N-97-21	W15.92/4/PASTOR//HXL7573/2*BAU/3/WBLL1*2	
41	N-97-22	BECARD*2/PFUNYE #1	
42	N-97-23	CHIBIA//PRLII/CM65531/3/MISR2, EGY*2/4/HUW23	
43	N-97-24	ROLF07/SAUAL/5/SERI.1B//KAUZ/HEVO/3/AMAD*2/4	
44	N-97-25	HD2206/Hork//Bul/6/CMH80A.253/2/M2A/CML//Ald/3/Ald*4/5/BH1146	
-	Check	Morocco (for yellow rust)	
-	Check	McNear + CD-90-12 (for stem rust)	

جدول ۲- پاتوتیپ‌های زنگ نواری (*Pst*) و زنگ ساقه (*Pgt*) مورد استفاده در غربالگری ژنوتیپ‌های گندم نان برای مقاومت در مرحله گیاهچه ای

Table 2. Stripe (*Pst*) and stem (*Pgt*) rust pathotypes used for screening bread wheat genotypes for resistance at the seedling stage

Pathotype	پاتوتیپ	Avirulence pattern	الگوی ناپرآزاری	Virulence pattern	الگوی پرآزاری
		Yellow rust	زنگ زرد	Yellow rust	زنگ زرد
174E150A ⁺ , Yr27		<i>Yr1, Yr4, Yr5, Yr10, Yr15, Yr24, Yr26, Yr32, YrSU, YrND, YrCV, YrSP</i>		<i>Yr2, Yr3, Yr6, Yr7, Yr8, Yr9, Yr17, Yr18, Yr20, Yr21, Yr25, Yr27, Yr28, Yr29, Yr31, YrSD, YrA</i>	
14E158A ⁺ , Yr27		<i>Yr1, Yr4, Yr5, Yr10, Yr15, Yr24, YrSD, YrCV, YrSU, YrSP</i>		<i>Yr2, Yr3, Yr6, Yr7, Yr8, Yr9, Yr17, Yr18, Yr20, Yr21, Yr25, Yr26, Yr27, Yr28, Yr29, Yr31, Yr32, YrND, YrA</i>	
		Stem rust	زنگ ساقه	Stem rust	زنگ ساقه
TTTTF (94-8)		<i>Sr24, Sr25, Sr26, Sr31, Sr32, Sr39, Sr40</i>		<i>Sr5, Sr6, Sr7b, Sr8a, Sr9a, Sr9b, Sr9d, Sr9e, Sr9g, Sr10, Sr11, Sr17, Sr21, Sr30, Sr36, Sr38, SrMcN, SrTmp</i>	
PTRTF		<i>Sr7a, Sr21, Sr22, Sr23, Sr24, Sr26, Sr30, Sr31, Sr32, Sr33, Sr40</i>		<i>Sr5, Sr6, Sr7b, Sr8a, Sr9a, Sr9b, Sr9d, Sr9e, Sr9g, Sr10, Sr11, Sr17, Sr36, Sr38, SrMcN, SrTmp</i>	
TKTTF		<i>Sr13, Sr22, Sr24, Sr25, Sr26, Sr27, Sr31, Sr32, Sr33, Sr39, Sr40</i>		<i>Sr5, Sr6, Sr7b, Sr8a, Sr9a, Sr9b, Sr9d, Sr9e, Sr9g, Sr10, Sr17, Sr21, Sr30, Sr36, Sr38, SrMcN, SrTmp</i>	
TTKTK		<i>Sr13, Sr22, Sr24, Sr25, Sr26, Sr27, Sr32, Sr35, Sr36, Sr39, Sr40</i>		<i>Sr5, Sr6, Sr7b, Sr8a, Sr9a, Sr9b, Sr9d, Sr9e, Sr9g, Sr10, Sr11, Sr17, Sr21, Sr30, Sr31, Sr38, SrMcN, SrTmp</i>	

منابع: ملیحی پوری و اسماعیل زاده مقدم (Malihipour and Esmaeilzadeh Moghaddam, 2023) و عمرانی و همکاران (Omrani *et al.*, 2024).

Sources: Malihipour and Esmaeilzadeh Moghaddam (2023) and Omrani *et al.* (2024)

مقیاس صفر تا چهار توصیف شده توسط استاکمن و همکاران (Stakman *et al.*, 1962)، اصلاح شده توسط مک‌اینش و همکاران (McIntosh *et al.*, 1995) ارزیابی شد. این آزمایش دارای دو تکرار مستقل برای هر ترکیب ژنوتیپ-پاتوتیپ بود.

ارزیابی مقاومت گیاه بالغ در شرایط مزرعه‌ای

این آزمایش در دو سال زراعی متوالی (۹۸-۱۳۹۷ و ۹۹-۱۳۹۸) در ایستگاه تحقیقات کشاورزی اردبیل (۳۸°۵۹' عرض شمالی، ۴۸°۳۹'۵۸" طول شرقی؛ ارتفاع ۱۳۶۵ متر از سطح دریا) اجرا شد. بررسی واکنش مرحله گیاه بالغ نسبت به زنگ‌های زرد و ساقه، به ترتیب در شرایط آلودگی مصنوعی و طبیعی برای زنگ‌های زرد و ساقه انجام شد.

در اواسط پاییز، هر ژنوتیپ در کرت‌هایی شامل دو ردیف به طول یک متر (دو خط بر روی هر پشته) با فاصله بین ردیف‌ها ۳۰ سانتی‌متر و فاصله بین کرت‌ها ۶۰ سانتی‌متر کشت گردید. به منظور تسهیل در گسترش بیماری، شاهد‌های حساس شامل مخلوطی از ارقام McNair و CD-90-12 برای زنگ ساقه و رقم Morocco برای زنگ زرد، پس از هر ده ژنوتیپ آزمایشی و نیز در حاشیه مزرعه کشت شدند. عملیات زراعی شامل آبیاری، وجین و کوددهی مطابق دستورالعمل‌های استاندارد انجام گرفت. برای ایجاد شرایط آلودگی مصنوعی زنگ زرد، مخلوطی از یورودیوسپورهای جمع‌آوری شده از سال‌های قبل (از اردبیل) به همراه پودر تالک (به نسبت ۱ به ۲۰)، بین مراحل پنجه‌زنی و ظهور برگ پرچم و به روش پودرپاشی استفاده شد (دو

بار به فاصله هر ۱۵ روز یک بار). این زادمایه حاوی مجموعه‌ای از جمعیت پاتوتیپی پرآزار علیه ژن‌های مقاومت Yr1، Yr2، Yr6، Yr7، Yr9، Yr17، Yr22، Yr23، Yr24، Yr25، Yr26، Yr27، YrA، Yr21، Yr31، Yr32 و YrSU و ناپرآزار بر علیه Yr5، Yr10، Yr15، Yr16، YrCV، YrSD و YrND بود (Safavi, 2019). برای زنگ ساقه، ارزیابی تحت شرایط آلودگی طبیعی توسط جمعیت‌های محلی و فعال بیمارگر که دارای پرآزاری بر علیه ژن‌های Sr5، Sr6، Sr7a، Sr9f، Sr9e، Sr13، Sr23، Sr28، Sr29، Sr30، Sr33، Sr34، Sr37، SrDP2، SrGT، SrPL، SrWLD، SrH و SrTmp بودند (Safavi and Malihipour, 2018)، انجام شد.

یادداشت‌برداری از شدت بیماری و تیپ آلودگی (Infection type = IT) برای زنگ زرد هر شش تا هفت روز و برای زنگ ساقه هر هشت تا نه روز انجام شد. آغاز ارزیابی‌ها زمانی بود که شاهد‌های حساس به شدت ۳۰ تا ۴۰ درصد آلودگی در برگ پرچم رسیدند. از شدت بیماری با استفاده از مقیاس اصلاح شده کاب (Peterson *et al.*, 1948) و تیپ آلودگی بر اساس روش رولفز و همکاران (Roelfs *et al.*, 1992) سه بار یادداشت‌برداری شد. آخرین یادداشت‌برداری شدت نهایی زنگ (Final rust severity = FRS) در تاریخ‌های ۲۴ و ۲۷ خرداد برای زنگ زرد و ۱۷ و ۲۲ تیر برای زنگ ساقه، به ترتیب در دو فصل زراعی متوالی ۹۸-۱۳۹۷ و ۹۹-۱۳۹۸ ثبت شد. در نهایت، برای تسهیل تعیین تیپ آلودگی ژنوتیپ‌ها

در مرحله گیاه بالغ، ژنوتیپ‌ها بر اساس شدت نهایی
 بیماری زنگ، در گروه‌های مختلفی (جدول ۳)
 دسته‌بندی شدند (Singh *et al.*, 2008; Huerta-
 Espino *et al.*, 2020)

جدول ۳- تیپ آلودگی ژنوتیپ‌ها گندم نان بر اساس شدت نهایی زنگ در مرحله گیاه بالغ
 Table 3. Infection type of bread wheat genotypes based on final rust severity at the
 adult plant stage

Infestation type	تیپ آلودگی	شدت نهایی زنگ Final rust severity
Resistance (R)	مقاوم	5-10%
Resistance to moderately resistance (R-MR)	مقاوم تا نیمه مقاوم	15-20%
Moderately resistance (MR)	نیمه مقاوم	30%
Moderate (M)	نیمه مقاوم تا نیمه حساس	40%
Moderately susceptible (MS)	نیمه حساس	50-60%
Moderately susceptible to susceptible (MS-S)	نیمه حساس تا حساس	70-80%
Susceptible (S)	حساس	90-100%

ارزیابی‌های متوالی می‌باشند.
 سطح نسبی زیر منحنی پیشرفت بیماری
 (Relative area under the disease progress
 curve = rAUDPC) نیز برای هر ژنوتیپ بر اساس
 رابطه ۲ محاسبه شد:
 رابطه (۲)

$rAUDPC = (AUDPC \text{ of genotype} / AUDPC \text{ of susceptible control}) \times 100$
 ضرایب همبستگی‌های خطی بین معیارهای
 مقاومت تدریجی در مرحله گیاه بالغ و تیپ‌های
 آلودگی گیاهچه‌ای با استفاده از نرم‌افزار SPSS
 (نسخه ۱۸) محاسبه شد.

گروه‌بندی انواع مقاومت با تلفیق واکنش‌های گیاهچه و گیاه بالغ

ژنوتیپ‌ها با تلفیق واکنش‌های آلودگی در
 مرحله گیاهچه‌ای و مقادیر نسبی سطح زیر منحنی

ضریب آلودگی (Coefficient of infection
 CI) = با ضرب شدت بیماری در ضرایب
 اختصاص یافته به هر واکنش میزبان (شامل):
 $Immune = 0, R = 0.2, MR = 0.4, M = 0.6$
 $MS = 0.8, MSS = 0.9, S = 1$ محاسبه شد
 (Stubbs *et al.*, 1986)

برای برآورد پیشرفت بیماری در طول زمان،
 سطح زیر منحنی پیشرفت بیماری (Area under
 the disease progress curve = AUDPC)
 اساس روش پیشنهادی میلوس و لاین (Milus
 and Line, 1986) بر اساس رابطه ۱ محاسبه شد:
 رابطه (۱)

$$AUDPC = [N_1(X_1 + X_2)/2] + [N_2(X_2 + X_3)/2]$$

در این رابطه، X_1 ، X_2 و X_3 به ترتیب
 نشان‌دهنده شدت بیماری زنگ یادداشت‌برداری
 شده در تاریخ‌های اول، دوم و سوم ارزیابی
 و N_1 و N_2 فواصل زمانی (به روز) بین این

گیاهچه‌ای تفاوت‌های آشکاری را نشان داد. برخی از ژنوتیپ‌ها نسبت به یک یا چند پاتوتیپ Pgt و Pst واکنش حساسیت را نشان دادند. این در حالی بود که تعدادی حساسیت همزمان به چندین پاتوتیپ هر دو بیماری را بروز دادند. هیچ‌یک از ژنوتیپ‌ها در مرحله گیاهچه‌ای، مقاومت کامل (واکنش ایمن) را نسبت به تمامی نژادهای مورد آزمایش هر یک از دو بیماری نشان ندادند. بر این اساس، این مجموعه ژنوتیپی به‌عنوان مواد آزمایشی برای ارزیابی‌های مزرعه‌ای و مطالعه مقاومت تدریجی در مرحله گیاه بالغ نیز انتخاب شدند.

در واکنش به پاتوتایپ 174E150A+, Yr27 زنگ زرد (دارای طیف پرآزاری وسیع)، ۲۲ ژنوتیپ واکنش حساسیت (تیپ آلودگی ۳-۴) و ۲۲ ژنوتیپ واکنش مقاومت (تیپ آلودگی ۲-۰) را نشان دادند. در مواجهه با نژاد 14E158A+, Yr27 زنگ زرد (دارای طیف پرآزاری محدود)، ۲۲ ژنوتیپ حساس و ۲۲ ژنوتیپ مقاوم بودند. در خصوص زنگ ساقه، به جز دو ژنوتیپ، بقیه ژنوتیپ‌ها به حداقل یکی از چهار نژاد مورد بررسی حساسیت نشان دادند. از میان آن‌ها، به ترتیب ۲۳، ۸، ۲۹ و ۱۰ ژنوتیپ در برابر نژادهای TTTTF، PTRTF، TKTTF و TTKTK واکنش مقاومت (تیپ آلودگی ۲-۰+) را نشان دادند. نتایج کامل ارزیابی گیاهچه‌ای برای ۴۴ لاین امیدبخش به همراه شاهد‌های حساس در جدول‌های ۴ (برای زنگ زرد) و ۵ (برای زنگ سیاه) ارائه شده است.

پیشرفت بیماری (rAUDPC) در مرحله گیاه بالغ، با الهام و اصلاحات جزئی در روش‌های به کار گرفته شده در مطالعات باکس و همکاران (Bux et al., 2012) و زنگ و همکاران (Zeng et al., 2014) گروه بندی شدند:

- گروه دارای مقاومت در مرحله گیاهچه‌ای یا تمام مراحل رشد (All-stage resistance = ASR): دارای واکنش مقاومت به تمام پاتوتایپ‌های استفاده شده در مرحله گیاهچه‌ای.
- گروه دارای مقاومت گیاه بالغ (Adult plant resistance = APR): دارای واکنش حساسیت حداقل نسبت به یک پاتوتیپ در مرحله گیاهچه‌ای، و مقادیر پایین سطح نسبی زیر منحنی پیشرفت بیماری (صفر تا ۱۰) در شرایط مزرعه.
- گروه دارای مقاومت تدریجی (Slow rusting = SR): دارای واکنش حساسیت حداقل نسبت به یک پاتوتیپ در مرحله گیاهچه‌ای و مقادیر متوسط سطح نسبی زیر منحنی پیشرفت بیماری (۱۱-۳۰) در شرایط مزرعه.
- گروه حساس (Susceptible): دارای مقادیر بالای سطح نسبی زیر منحنی پیشرفت بیماری (< 30) در شرایط مزرعه، بدون در نظر گرفتن واکنش در مرحله گیاهچه‌ای.

نتایج و بحث

واکنش گیاهچه‌ای نسبت به زنگ‌های زرد و ساقه واکنش ژنوتیپ‌های گندم نان به پاتوتیپ‌های زنگ زرد و زنگ ساقه در مرحله

جدول ۴- واکنش زنوتیپ های گندم نان نسبت به زنگ نواری در مراحل گیاهچه ای و گیاه بالغ در دو فصل زراعی ۱۳۹۷-۹۸ و ۱۳۹۸-۹۹

Table 4. Reactions of bread wheat genotypes against stripe rust at the seedling and adult plant stages in two cropping seasons 2018-2019 and 2019-2020

ردیف No.	ژنوتیپ Genotype	واکنش گیاهچه ای ^۱ Seedling reaction ¹		شاخص های مقاومت تدریجی در مرحله گیاه بالغ ^۲ Slow rusting resistance parameters at the adult plant stage ²						میانگین شاخص های مقاومت تدریجی Average of slow rusting resistance parameters		
				2018-19			2019-20					
		174E150A+, Yr27	14E158A+, Yr27	FRS & IT ³	CI	rAUDPC	FRS & IT	CI	rAUDPC	CI	rAUDPC	Type of resistance ³
1	Rakhshan	4	3	10R	2	9	20RMR	6	19	4	14	SR
2	Baharan	3	3	30MR	12	24	30MR	12	33	12	29	SR
3	M-97-3	0;	0;	30MR	12	24	40M	24	33	18	29	ASR
4	Amin	0;	0;	10R	2	8	30MR	12	28	7	18	ASR
5	M-97-5	0;	;2CN	5R	1	6	30MR	12	17	7	12	ASR
6	M-97-6	4	3	10R	2	9	50MS	40	36	21	23	SR
7	M-97-7	0;	0;	5R	1	2	20RMR	6	17	4	10	ASR
8	M-97-8	4	4	5R	1	6	30MR	12	21	7	14	SR
9	M-97-9	4	3	5R	1	5	10R	2	11	2	8	APR
10	M-97-10	4	3	5R	1	6	20RMR	6	14	4	10	APR
11	M-97-11	2C	0	5R	1	2	20RMR	6	25	4	14	ASR
12	Bamdad	4	;2CN	10R	2	9	30MR	12	28	7	19	SR
13	M-97-14	4	4	20RMR	6	15	10R	2	10	4	9	APR
14	M-97-15	4	0;C	10R	2	11	10R	2	11	2	10	APR
15	M-97-16	4	3	10R	2	12	40M	24	22	13	17	SR
16	M-97-17	4	3	20RMR	6	18	20RMR	6	19	6	19	SR
17	Sepehr	;1C	0;C	10R	2	9	10R	2	11	2	10	ASR
18	M-97-19	3	3	20RMR	6	18	20RMR	6	28	6	23	SR
19	M-97-20	4	4	20RMR	6	21	10R	2	22	4	22	SR
20	Tirgan	;CN	;1CN	10R	2	11	10R	2	11	2	8	ASR
21	Ehsan	;CN	;1CN	10R	2	8	20RMR	6	14	4	9	ASR
22	N-97-3	3	3	5R	1	2	10R	2	10	2	6	APR
23	N-97-4	3	3	30MR	12	26	10R	2	7	7	17	SR
24	N-97-5	0;	0	10R	2	11	10R	2	7	2	9	ASR
25	N-97-6	;2C	3	5R	1	7	10R	2	7	2	7	APR
26	N-97-7	4	3	5R	1	6	30MR	12	22	7	14	SR
27	N-97-8	;1C	0;CN	5R	1	5	10R	2	7	2	6	ASR
28	N-97-9	;1CN	0;CN	5R	1	6	10R	2	7	2	7	ASR
29	N-97-10	;1CN	3	5R	1	2	10R	2	7	2	5	APR
30	N-97-11	2CN	0;CN	10R	2	9	20RMR	6	13	4	11	ASR
31	N-97-12	4	4	5R	1	5	10R	2	9	2	7	APR
32	N-97-13	;2C	;2CN	5R	1	6	20RMR	6	17	4	12	ASR
33	N-97-14	;1CN	;1CN	5R	1	2	10R	2	9	2	6	ASR

Continued. Table 4.

ادامه جدول ۴-

ردیف No.	ژنوتیپ Genotype	واکنش گیاهچه ای ^۱ Seedling reaction ¹		شاخص های مقاومت تدریجی در مرحله گیاه بالغ ^۲ Slow rusting resistance parameters at the adult plant stage ²						میانگین شاخص های مقاومت تدریجی Average of slow rusting resistance parameters		
		174E150A+,Yr27	14E158A+,Yr27	2018-19			2019-20			CI	rAUDPC	Resistance type ⁴
				FRS & IT ³	CI	rAUDPC	FRS & IT	CI	rAUDPC			
34	N-97-15	;CN	;2CN	5R	1	6	10R	2	9	2	8	ASR
35	N-97-16	;1CN	;1CN	5R	1	6	20RMR	6	17	4	12	ASR
36	N-97-17	;1CN	;1CN	5R	1	5	10R	2	10	2	8	ASR
37	N-97-18	0;	0;	10R	2	9	10R	2	9	2	9	ASR
38	N-97-19	4	3	5R	1	5	10R	2	11	2	8	APR
39	N-97-20	4	3	5R	1	2	10R	2	9	2	6	APR
40	N-97-21	4	3	10R	2	9	10R	2	11	2	10	APR
41	N-97-22	4	3	5R	1	6	20RMR	6	17	4	12	SR
42	N-97-23	4	3	5R	1	2	10R	2	9	2	6	APR
43	N-97-24	;1CN	0;CN3	10R	2	11	30MR	12	31	7	21	ASR
44	N-97-25	;CN	0	5R	1	5	30MR	12	31	7	18	ASR
-	Check (Morocco)	4	3	100S	100	100	100S	100	100	100	100	S

^۱ براساس نوع واکنش گیاهچه ای که توسط استکمن و همکاران (Stakman *et al.*, 1962) توصیف شد.

^۲ FRS: شدت نهایی زنگ، CI: ضریب آلودگی، rAUDPC: سطح نسبی زیر منحنی پیشرفت بیماری.

^۳ IT: نوع آلودگی بر اساس گروه بندی سینگ و همکاران (Singh *et al.*, 2011) تعیین شد: R (مقاوم)، MR (نیمه مقاوم)، M (نیمه مقاوم تا نیمه حساس)، MS (نیمه حساس)، MSS (نیمه حساس تا حساس)، S (حساس).

^۴ نوع مقاومت: SR: مقاومت تدریجی، ASR: مقاومت در تمام مراحل (گیاهچه ای، گیاه بالغ)، APR: مقاومت در مرحله گیاه بالغ.

¹Based on the seedling reaction types described by Stakman *et al.* (1962).

²FRS: final rust severity, CI: coefficient of infection, rAUDPC: relative area under the disease progress curve.

³Infection types (IT) were classified according to Singh *et al.* (2011) as follows: R (Resistance), MR (moderately resistant, small pustules), M (moderately resistant to moderately susceptible), MS (moderately susceptible), MSS (moderately susceptible to susceptible), S (susceptible).

⁴Resistance type: SR: Slow rusting resistance, ASR: All-stage resistance (Seedling, Adult plant), APR: Adult plant resistance.

جدول ۵- واکنش ژنوتیپ های گندم نان نسبت به زنگ ساقه در مراحل گیاهچه ای و گیاه بالغ در دو فصل زراعی ۱۳۹۷-۹۸ و ۱۳۹۸-۹۹

Table 5. Reactions of bread wheat genotypes to stem rust at the seedling and adult plant stages in two cropping seasons 2018-2019 and 2019-2020

ردیف No.	ژنوتیپ Genotypes	واکنش گیاهچه ای ^۱ Seedling reaction ¹				شاخص های مقاومت تدریجی در مرحله گیاه بالغ ^۲ Slow rusting resistance parameters at adult plant stage ²						میانگین شاخص های مقاومت تدریجی Average of slow rusting resistance parameters		
						2018/19			2019-20					
		TTTTF	PTRTF	TKTTF	TTKTK	FRS & IT ³	CI	rAUDPC	FRS & IT	CI	rAUDPC	CI	rAUDPC	Resistance type ⁵
1	Rakhshan	3-	2+	1	2-	50MS	40	30	50MS	40	30	40	30	SR
2	Baharan	2	3	ND	3+	50MS	40	41	50MS	40	35	40	38	S
3	M-97-3	3	3	2+	3+	70MSS	63	49	70MSS	63	47	63	48	S
4	Amin	3	3	2+	3	60MS	48	46	70MSS	63	50	56	48	S
5	M-97-5	3	3	2+	2+	50MS	40	49	60MS	48	35	44	42	S
6	M-97-6	3	3	2+	3	60MS	48	49	50MS	40	44	44	47	S
7	M-97-7	1	3	1	3	50MS	40	30	50MS	40	30	40	30	SR
8	M-97-8	2	1	1	;	30MR	12	21	40M	24	23	18	22	ASR
9	M-97-9	3+	3	2+	3+	60MS	48	44	80MSS	72	50	60	47	S
10	M-97-10	3	3	2C	3	50MS	40	37	60MS	48	35	44	36	S
11	M-97-11	3	3+	2+	3	70MSS	63	52	50MS	40	35	52	44	S
12	Bamdad	3	2	1+	2+	60MS	48	49	50MS	40	41	44	45	S
13	M-97-14	1	3-	1	;	50MS	40	28	50MS	40	27	40	28	SR
14	M-97-15	;1	3-	2+	2	50MS	40	28	50MS	40	30	40	29	SR
15	M-97-16	1	1	2+	2	50MS	40	33	60MS	48	33	44	33	ASR
16	M-97-17	1	3	2+	3	50MS	40	27	50MS	40	30	40	29	SR
17	Sepehr	1	3	2+	3+	60MS	48	28	40M	24	24	36	26	SR
18	M-97-19	1	3-	1	3+	50MS	40	33	60MS	48	44	44	39	S
19	M-97-20	3	3	2C	3	50MS	40	33	60MS	48	44	44	39	S
20	Tirgan	3	3	3	3+	40M	24	27	50MS	40	30	32	29	SR
21	Ehsan	2+	2+	2C	3+	60MS	48	57	60MS	48	56	48	57	S
22	N-97-3	2+	3	2C	3+	60MS	48	57	60MS	48	47	48	52	S
23	N-97-4	;1	3	;1	3	40M	24	26	50MS	40	32	32	29	SR
24	N-97-5	4	3+	3	3	70MSS	63	62	60MS	48	62	56	62	S
25	N-97-6	3+	3+	3	3	60MS	48	52	50MS	40	50	44	51	S
26	N-97-7	2+	3	1+	3	40M	24	24	60MS	48	32	36	28	SR
27	N-97-8	3	3-	2+	3	80MSS	72	63	50MS	40	47	56	55	S
28	N-97-9	0;	3	3	3+	50MS	40	35	50MS	40	41	40	38	S
29	N-97-10	3-	3	3	3	70MSS	63	62	40M	24	44	44	53	S
30	N-97-11	0;	3-	ND	3	50MS	40	24	40M	24	27	32	26	SR
31	N-97-12	0;	3-	3	3	70MSS	63	54	40M	24	41	44	48	S
32	N-97-13	3	3	2+	3	60MS	48	44	50MS	40	35	44	40	S
33	N-97-14	0;	3-	2+	3	70MSS	63	41	50MS	40	38	52	40	S
34	N-97-15	3	3	3	2+	60MS	48	38	60MS	48	65	48	52	S

ادمه جدول ۵-

Continued. Table 5.

ردیف No.	ژنوتیپ Genotype	واکنش گیاهچه ای ^۱ Seedling reaction ¹				شاخص های مقاومت تدریجی در مرحله گیاه بالغ ^۲ Slow rusting resistance parameters ² at adult plant stage									میانگین شاخص های مقاومت تدریجی Average of slow rusting resistance parameters		
						2018-19			2019-20								
		TTTTF	PTRTF	TKTTF	TKTK	FRS & IT ³	CI	rAUDPC	FRS & IT	CI	rAUDPC	CI	rAUDPC	Resistance type ⁴			
35	N-97-16	2+	2+	2+	3+	60MS	48	44	60MS	48	67	48	56	S			
36	N-97-17	2+	3	3	3+	50MS	40	25	40M	24	31	32	28	SR			
37	N-97-18	3+	3	3	4	60MS	48	36	70MSS	63	79	56	58	S			
38	N-97-19	2+	3	3	2+	60MS	48	47	60MS	48	67	48	57	S			
39	N-97-20	3	3	2C	1	70MSS	63	52	60MS	48	65	56	59	S			
40	N-97-21	1	1	2+	3	70MSS	63	60	50MS	40	56	52	58	S			
41	N-97-22	2+	3	3	3+	70MSS	63	49	50MS	40	44	52	47	S			
42	N-97-23	3	3	4	3	60MS	48	49	70MSS	63	67	56	58	S			
43	N-97-24	1	2	3	3	50MS	40	27	40M	24	24	32	26	SR			
44	N-97-25	3+	3	2+	3	50MS	40	33	50MS	40	40	40	37	S			
-	Check	3+	3+	3+	4	100S	100	100	100S	100	100	100	100	S			

(McNear + CD-90-12)

^۱ براساس نوع واکنش گیاهچه ای که توسط استکمن و همکاران (Stakman *et al.*, 1962) توصیف شد.^۲ FRS: شدت نهایی زنگ، CI: ضریب آلودگی، rAUDPC: سطح نسبی زیر منحنی پیشرفت بیماری.^۳ IT: نوع آلودگی بر اساس گروه بندی سینگ و همکاران (Singh *et al.*, 2011) تعیین شد: R (مقاوم)، MR (نیمه مقاوم)، M (نیمه مقاوم تا نیمه حساس)، MS (نیمه حساس)، MSS (نیمه حساس تا حساس)، S (حساس).^۴ نوع مقاومت: SR: مقاومت تدریجی، ASR: مقاومت در تمام مراحل (گیاهچه ای، گیاه بالغ)، APR: مقاومت در مرحله گیاه بالغ.¹Based on the seedling reaction types described by Stakman *et al.* (1962).²FRS: final rust severity, CI: coefficient of infection, rAUDPC: relative area under the disease progress curve.³Infection types (IT) were classified according to Singh *et al.* (2011) as follows: R (Resistance), MR (moderately resistant, small pustules), M (moderately resistant to moderately susceptible), MS (moderately susceptible), MSS (moderately susceptible to susceptible), S (susceptible).⁴Resistance type: SR: Slow rusting resistance, ASR: All-stage resistance (Seedling, Adult plant), APR: Adult plant resistance.

ارزیابی مقاومت تدریجی در مرحله گیاه بالغ

مقاومت تدریجی (نسبی) ژنوتیپ های گندم نان در مرحله گیاه بالغ در شرایط آلودگی مصنوعی و طبیعی برای زنگ زرد و آلودگی طبیعی برای زنگ ساقه در مزرعه ارزیابی شد. واکنش میزبان و شاخص های اپیدمیولوژیک شامل ضریب آلودگی (CI)، شدت نهایی بیماری (FRS) و مقدار نسبی سطح زیر منحنی پیشرفت بیماری (rAUDPC) به عنوان معیارهای اصلی سنجش مقاومت به کار گرفته شد. نتایج در جدول های ۴ و ۵ و طبقه بندی کلی در جدول های ۶ و ۷ ارائه شده است.

گروه بندی انواع مقاومت

واکنش های متنوع ۴۴ ژنوتیپ گندم نان ارزیابی شده نسبت به زنگ های زرد و ساقه در گروه های چهارگانه زیر دسته بندی شدند. نتایج مربوط به هر بیماری در ادامه ارائه شده است.

گروه دارای مقاومت در مرحله گیاه بالغ (APR)، دوازده ژنوتیپ (۲۷/۲ درصد) شامل M-97-9، M-97-10، M-97-14، M-97-15، N-97-3، N-97-6، N-97-10، N-97-12، N-97-19، N-97-20، N-97-21 و N-97-23 از مقاومت گیاه کامل (APR) برای زنگ زرد، برخوردار بودند (جدول ۴ و ۶). برای زنگ ساقه، هیچ کدام از ژنوتیپ ها مقاومت در مرحله گیاه کامل در برابر پاتوتیپ های غالب مکان آزمایش

مزرعه ای را نشان ندادند (جدول ۵ و ۷).

گروه دارای مقاومت تدریجی (SR):

برای زنگ زرد ۱۲ ژنوتیپ (۲۷/۲ درصد) شامل ارقام رخشان، بهاران و بامداد و لاین های M-97-6، M-97-8، M-97-16، M-97-17، M-97-19، M-97-20، N-97-4، N-97-7 و N-97-22 در این گروه طبقه بندی شدند (جدول ۴ و ۶). همچنین برای زنگ ساقه ۱۲ ژنوتیپ (۲۷/۲ درصد) از ژنوتیپ ها در این گروه قرار گرفتند (جدول ۵ و ۷).

گروه دارای مقاومت گیاهچه ای یا تمام مرحله ای (ASR): برای زنگ زرد، ۲۰ ژنوتیپ (۴۵/۴ درصد) از جمله ارقام امین و سپهر و لاین های M-97-3، M-97-5، M-97-7، M-97-11 و چند لاین از N-97 متعلق به این گروه بودند (جدول ۴). این در حالی بود که برای زنگ ساقه تعداد بسیار کمی از ژنوتیپ ها (دو ژنوتیپ M-97-16 و M-97-8) مقاومت گیاهچه ای نسبت به تمام پاتوتیپ ها نشان دادند (جدول ۵).

گروه حساس (S): برای زنگ زرد، شاهد حساس نمونه اصلی در این گروه بود و بقیه ژنوتیپ ها تیپ های آلودگی مختلف مقاومت را نشان دادند (جدول ۶). اما برای زنگ ساقه، اکثر مواد آزمایشی (۳۰ ژنوتیپ معادل ۶۸ درصد) و شاهد حساس، در این گروه قرار گرفتند (جدول ۷).

جدول ۶- نوع مقاومت ژنوتیپ های گندم نان در برابر زنگ نواری در مراحل گیاهچه ای و گیاه بالغ
Table 6. Resistance type of bread wheat genotypes to stripe rust at the seedling and adult plant stages

نوع مقاومت*	تعداد	ژنوتیپ
Resistance type*	Number	Genotype
ASR	20	M-97-3, Amin, M-97-5, M-97-7, M-97-11, Sepehr, Tirgan, Ehsan, N-97-5, N-97-8, N-97-9, N-97-11, N-97-13, N-97-14, N-97-15, N-97-16, N-97-17, N-97-18, N-97-24, N-97-25
APR	12	M-97-9, M-97-10, M-97-14, M-97-15, N-97-3, N-97-6, N-97-10, N-97-12, N-97-19, N-97-20, N-97-21, N-97-23
SR	12	Rakhshan, Baharan, M-97-6, M-97-8, Bamdad, M-97-16, M-97-17, M-97-19, M-97-20, N-97-4, N-97-7, N-97-22
Susceptible	1	Check (Morocco)

*نوع مقاومت: SR: مقاومت تدریجی، ASR: مقاومت در تمام مراحل (گیاهچه ای، گیاه بالغ)، APR: مقاومت در مرحله گیاه بالغ.
*Resistance type: ASR: SR: Slow rusting resistance, All-stage resistance (Seedling, Adult plant), APR: Adult plant resistance.

جدول ۷- نوع مقاومت ژنوتیپ های گندم نان در برابر زنگ ساقه در مراحل گیاهچه ای و گیاه بالغ
Table 7. Resistance type of bread wheat genotypes to stem rust at the seedling and adult plant stages

نوع مقاومت*	تعداد	ژنوتیپ
Resistance type*	Number	Genotype
ASR	2	M-97-8, M-97-16
APR	0	None
SR	12	Rakhshan, M-97-7, M-97-14, M-97-15, M-97-17, Sepehr, Tirgan, N-97-4, N-97-7, N-97-11, N-97-17, N-97-24
Susceptible	30 + 1	Baharan, M-97-3, Amin, M-97-5, M-97-6, M-97-9, M-97-10, M-97-11, Bamdad, M-97-19, M-97-20, Ehsan, N-97-3, N-97-5, N-97-6, N-97-8, N-97-9, N-97-10, N-97-12, N-97-13, N-97-14, N-97-15, N-97-16, N-97-18, N-97-19, N-97-20, N-97-21, N-97-22, N-97-23, N-97-25, Check (McNear + CD-90-12)

*نوع مقاومت: SR: مقاومت تدریجی، ASR: مقاومت در تمام مراحل (گیاهچه ای، گیاه بالغ)، APR: مقاومت در مرحله گیاه بالغ.
*Resistance type: SR: Slow rusting resistance, ASR: All-stage resistance (Seedling, Adult plant), APR: Adult plant resistance.

ارتباط بین معیارهای مقاومت در مرحله گیاهچه ای و مقاومت تدریجی گیاه بالغ

در این مطالعه، رابطه بین شاخص های مختلف مقاومت در مرحله گیاه بالغ در ۴۴ ژنوتیپ گندم به همراه شاهد های حساس برای هر دو بیماری، بررسی شد. ضریب آلودگی (CI) به عنوان یک معیار کلیدی برای چنین

ارزیابی هایی به طور گسترده استفاده شده است (Ali *et al.*, 2007; Hei *et al.*, 2015; Safavi and Afshari, 2017; Srinivas *et al.*, 2023). همبستگی مثبت، قوی و بسیار معنی دار بین معیارهای مقاومت در مرحله گیاه بالغ مشاهده شد. به طور خاص، برای زنگ زرد، CI همبستگی بسیار قوی ای ($r = 0.967^{**}$) با

شدت نهایی زنگ (FRS) و با rAUDPC نشان داد ($r = 0.961^{**}$). به طور مشابه، برای زنگ ساقه، CI همبستگی قوی ای ($r = 0.95^{**}$) با FRS و با rAUDPC ($r = 0.881^{**}$) داشت (جدول ۸). علاوه بر این، ارتباط بین تیپ آلودگی (IT) در مرحله گیاهچه ای و معیارهای مقاومت در مرحله گیاه بالغ مورد بررسی قرار گرفت. همبستگی بسیار پایین و غیر معنی داری بین واکنش های مرحله گیاهچه و تمامی شاخص های همه گیری اعم از FRS، CI و rAUDPC برای هر دو زنگ یافت شد (جدول ۸).

جدول ۸- ضرایب همبستگی های بین شاخص های مقاومت در مرحله گیاهچه ای و گیاه بالغ نسبت به زنگ زرد و زنگ ساقه در ۴۴ ژنوتیپ گندم نان با یک شاهد های حساس

Table 8. Correlation coefficients between resistance parameters to yellow rust and stem rust at the seedling and adult plant stages in 44 bread wheat genotypes and a susceptible check

شاخص ^۱ Parameter ¹	زنگ زرد Yellow rust			زنگ ساقه Stem rust		
	FRS	CI	Seedling IT	FRS	CI	Seedling IT
CI	0.967**	-		0.95**	-	
Seedling IT	0.127	0.157	-	0.172	0.204	-
rAUDPC	0.969**	0.961**	0.185	0.848**	0.881**	0.088

^۱FRS: شدت نهایی زنگ، CI: ضریب آلودگی، rAUDPC: سطح نسبی زیر منحنی پیشرفت بیماری، CI: ضریب آلودگی، Seedling IT: نوع آلودگی گیاهچه ای.

^۱FRS: final rust severity, rAUDPC: relative area under the disease progress curve: CI: coefficient of infection, Seedling IT: seedling infection type.

** : Significant at the 1% probability level.

** : معنی دار در سطح احتمال یک درصد.

rAUDPC به دلیل همبستگی با چندین مؤلفه مقاومت همچون فراوانی آلودگی، طول دوره نهفتگی، اندازه جوش و ظرفیت اسپورزایی در واحد سطح برگ، ارزش ویژه و ممتازی را در ارزیابی های مزرعه ای دارا می باشد (Milus and Line, 1986; Sandoval-Islas *et al.*, 2007). یافته های پژوهش حاضر نشان داد که همبستگی مثبت و قوی میان معیارهای یادشده وجود دارد که با نتایج گزارش شده در سایر پاتوسیستم های غلات-زنگ نیز همخوانی دارد (Sandoval-Islas *et al.*, 2007; Safavi and

در این پژوهش سه معیار کلیدی شامل ضریب آلودگی (CI)، شدت نهایی زنگ (FRS) و سطح نسبی زیر منحنی پیشرفت بیماری (rAUDPC) برای ارزیابی مقاومت در مرحله گیاه بالغ مورد استفاده قرار گرفت. هرچند کاربرد این سه شاخص برای تعیین مقاومت معرفی و به طور گسترده ای به کار گرفته شده اند (Sandoval-Islas *et al.*, 2007; Ali *et al.*, 2007; Safavi and Afshari, 2017; Huerta-Espino *et al.*, 2020; Srinivas *et al.*, 2023; Dawana *et al.*, 2024)، به نظر می رسد معیار

روند جهانی است که در آن استقرار وسیع ژنوتیپ های دارای مقاومت نژاد-اختصاصی بارها موجب همه گیری های شدید پس از غلبه بیمارگر بر این ژن ها شده است (Huerta-Espino *et al.*, 2020; Srinivas *et al.*, 2023; Dawana *et al.*, 2024). لازم به ذکر است که ژنوتیپ های متکی بر این نوع مقاومت معمولاً مدت کوتاهی پس از آزادسازی رقم، به دلیل تکامل سریع پاتوتیپ های پرازار جدید، حساس می شوند (Hovmøller *et al.*, 2016; Chen and Kang, 2017). از این رو، لزوم مطالعات وراثتی گسترده تر و به کارگیری نشانگرهای مولکولی برای شناسایی ژن های مقاومت، به ویژه برای انتخاب به کمک نشانگر (MAS)، توصیه می شود.

بر اساس الگوهای بیماری زایی جمعیت های غالب بیمارگر (ارائه شده در جدول ۲)، به نظر می رسد مقاومت گیاهچه ای در ژنوتیپ های گندم نان مورد بررسی عمدتاً توسط ژن هایی نظیر *Yr4*، *Yr5*، *Yr10*، *Yr15*، *YrSP*، *YrCV* و *YrSD* در برابر زنگ زرد و *Sr24*، *Sr26*، *Sr32*، *Sr40*، در برابر زنگ ساقه کنترل می شود که با گزارش های پیشین همخوانی دارد (Bux *et al.*, 2012; Malihipour and Esmailzadeh Moghaddam, 2023; Omrani *et al.*, 2024). اثربخشی این ژن ها در شرایط مزرعه ای ایران نیز پیش تر تأیید شده است (Safavi, 2019; Afshari, 2008). با این حال، تأیید قطعی حضور آن ها مستلزم انجام تجزیه و تحلیل های ژنتیکی

(Afshari, 2017; Srinivals *et al.*, 2023) در مقابل، همبستگی پایینی بین تیپ آلودگی (IT) در مرحله گیاهچه ای و معیارهای مقاومت در مرحله گیاه بالغ مشاهده شد. این اختلاف احتمالاً ناشی از تفاوت های بنیادی در سازوکارهای مقاومت در مراحل گیاهچه ای و گیاه بالغ بوده، اهمیت ارزیابی های مزرعه ای را برجسته تر می سازد (Sandoval-Islas *et al.*, 2007).

به طور کلی در برنامه های به نژادی گندم نان، توجه صرف به «مقاومت گیاهچه ای» کافی نیست و یک رقم معرفی شده (با توجه به نوع اقلیم منطقه) باید دارای هر دو نوع مقاومت گیاهچه ای و گیاه بالغ (برای اقلیم های نیمه گرم) یا حداقل دارای «مقاومت گیاه بالغ» (برای اقلیم های معتدل و سرد) باشد. در سال های آیدمی در مناطق نیمه گرمسیر، در صورتی که رقم دارای مقاومت گیاه بالغ در مرحله گیاهچه حساس باشد، بایستی آلودگی به بیماری زنگ در مراحل گیاهچه نیز مدیریت و کنترل شود (Chen and Kang, 2017; Chen, 2020).

جمعیت های در حال تکامل عامل بیماری های Pgt و Pst چالش های جدی برای تولید گندم در استان های مختلف ایران ایجاد کرده و در بسیاری موارد منجر به بروز خسارت های اقتصادی چشمگیری شده اند (Safavi and Malihipour, 2020; Malihipour and Esmailzadeh Moghaddam, 2023; Omrani *et al.*, 2024). این وضعیت بازتابی از

دقیق‌تر با استفاده از نشانگرهای مولکولی و آزمون‌های گیاهچه‌ای در برابر چندین پاتوتیپ است.

مطابق با یافته‌های پیشین (Singh *et al.*, 2011; Huerta-Espino *et al.*, 2020) اساس واکنش ژنوتیپ‌ها در مرحله گیاه بالغ در برابر زنگ زرد با تیپ‌های آلودگی مقاوم تا نیمه مقاوم (R/MR)، به نظر می‌رسد ۲۰ ژنوتیپ (مانند رقم امین، سپهر، تیرگان، احسان و لاین‌های M-97-3، M-97-5، M-97-7، N-97-8، N-97-9، N-97-11) (جدول‌های ۴ و ۶) حامل ژن‌های مقاومت نژاد-اختصاصی یا ترکیبی از آن‌ها باشند که در برابر ژن‌های پرآزاری پاتوتیپ‌های زنگ زرد کارایی دارند. این ژنوتیپ‌ها احتمالاً دارای مقاومت گیاهچه‌ای یا مقاومت تمام‌مرحله‌ای (All-stage resistance) بوده و ژن‌هایی مانند *Yr5*، *Yr4*، *YrSu*، *YrCV*، *YrSP*، *Yr24*، *Yr15*، *Yr10* یا سایر ژن‌های مقاومت ناشناخته در آن‌ها دخیل هستند. افزون بر این، برخی از ژنوتیپ‌هایی که در مرحله گیاهچه‌ای واکنش مقاومت را نشان دادند، ممکن است واجد ژن‌های مقاومت غیرنژاد-اختصاصی نیز باشند. این احتمال وجود دارد که اثر این ژن‌ها بواسطه غالب بودن ژن‌های مقاومت نژاد-اختصاصی در مرحله گیاهچه‌ای پوشیده شده باشد (Chen and Kang; Dadrezaei *et al.*, 2024).

ارزیابی‌های مزرعه‌ای نشان داد که جمعیت‌های محلی عامل بیماریزنگ ساقه (Pgt)

در بیشتر ژنوتیپ‌های گندم نان مورد بررسی بیماری‌زا بودند. این در حالی است که تنها تعداد محدودی از ژنوتیپ‌ها در برابر عامل زنگ زرد (Pst) واکنش حساسیت شدید را بروز دادند. ژنوتیپ‌هایی که در استان اردبیل واکنش مقاوم یا نیمه‌مقاوم در برابر جمعیت‌های محلی زنگ زرد نشان دادند، در سایر مناطق کشور شامل استان‌های فارس (زرقان)، خراسان رضوی (مشهد)، البرز (کرج) و مازندران (ساری) نیز در سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ واکنش مشابهی داشتند (بر اساس داده‌های منتشر نشده). این تفاوت‌ها را می‌توان به راهبرد‌های برنامه‌های گسترده به‌نژادی ملی نسبت داد که در سال‌های گذشته مقاومت نسبت به زنگ زرد را در اولویت قرار داده و در نتیجه، ژنوتیپ‌های دارای مقاومت بالاتر به زنگ زرد در نسل‌های بعدی انتخاب و تثبیت شده‌اند.

با مقایسه شدت آلودگی در دو سال مختلف برای برخی ژنوتیپ‌ها (مانند M-97-6) نسبت به زنگ زرد، مشاهده می‌شود که در سال دوم، درصد آلودگی روی این ژنوتیپ افزایش یافت و تیپ آلودگی نیز تغییر کرد (از واکنش 10R به 50MS). چنین شرایطی در مطالعات سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است (Safavi and Afshari, 2017; Huerta-Espino *et al.*, 2020; Omrani *et al.*, 2024). دلیل این پدیده، وقوع پرآزاری برای ژن‌های مقاومت جدید توسط یک پاتوتیپ زنگ زرد است که در سال اول به دلیل جمعیت پایین (یا عدم حضور) قادر

ژن های شناخته شده یا ناشناخته دیگر برای زنگ ساقه هستند.

در برخی از ژنوتیپ های گندم نان مورد ارزیابی، واکنش های نیمه حساسی تا حساس (MS-S) مشاهده شد که به احتمال زیاد بیانگر غیرموثر شدن ژن های مهم مقاومت نژاد-اختصاصی در برابر بیماری عامل زنگ ساقه (Pgt) است. این امر نشان می دهد که جمعیت های غالب Pgt در منطقه به سمت پرآزاری نسبت به ژن های مقاومت به کار رفته تکامل یافته اند. بنابراین، شناسایی و بهره برداری از منابع ژنتیکی دارای مقاومت مؤثر در برابر پاتوتیپ های محلی، یک ضرورت اساسی است. ژنوتیپ هایی که در مرحله گیاه بالغ واکنش هایی در حد نیمه مقاوم (MR) یا نیمه حساس (MS) همراه با شدت پایین بیماری را نشان دادند، احتمالاً دارای سازوکارهای مقاومت پایدار هستند. این نوع مقاومت اغلب شامل مقاومت گیاه بالغ در دمای بالا (High temperature adult plant resistance = HTAP) و یا ژن های مقاومت تدریجی است که به دلیل چندژنی بودن، دوام بالاتری را دارا هستند (Brown *et al.*, 2002; Singh *et al.*, 2005, 2011; Chen, 2013).

چندین ژنوتیپ (از جمله ردیف های ۱۰، ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۷ در جدول ۱) در شجره خود از ریخته ژنتیکی ارقامی نظیر Kiritati، Kukuna و Trap برخوردار هستند. این رقم ها دارای مقاومت پایدار نسبت به چند بیماری هستند.

به ایجاد بیماری نبود، ولی در سال دوم روی ژنوتیپ مورد نظر آلودگی ایجاد کرد.

بررسی های مزرعه ای پیشین در استان اردبیل الگوی پرآزاری جمعیت های محلی زنگ را روشن ساخته است. در مورد زنگ زرد، بیماری زایی بر روی رقم ها یا لاین های افتراقی حامل ژن های Yr1، Yr2، Yr6، Yr7، Yr9، Yr17، Yr22، Yr23، Yr24، Yr25، Yr26، YrA، Yr27، Yr31، Yr32 و YrSU گزارش شده است، در حالی که ناپرآزاری در برابر ژن های Yr3v، Yr3a، Yr4a، Yr4، Yr5، Yr10، Yr15، Yr16، YrCV، YrSD و YrND مشاهده شد (Safavi, 2019).

در خصوص زنگ ساقه، جمعیت های محلی اردبیل دارای پرآزاری علیه ژن های Sr5، Sr6، Sr7a، Sr9f، Sr9e، Sr13، Sr23، Sr28، Sr29، Sr30، Sr33، Sr34، Sr37، SrDP2، SrGT، SrPL، SrWLD، SrH و SrTmp بودند، در حالی که ناپرآزاری در برابر ژن های Sr5، Sr13، Sr22، Sr24، Sr26+Sr9G، Sr27، Sr32، Sr35 و Sr36 گزارش شد (Safavi and Malihipour, 2018). بر این اساس، ژنوتیپ هایی که در شرایط مزرعه ای اردبیل واکنش مقاومت را نشان دادند، به احتمال زیاد حامل ژن های مقاومت مؤثر، به ویژه Yr3v، Yr3a، Yr4a، Yr4، Yr5، Yr10، Yr15، Yr16، YrCV، YrSD، YrND و ژن های شناخته شده یا ناشناخته دیگر برای زنگ زرد و Sr5، Sr13، Sr22، Sr24، Sr26+Sr9G، Sr32، Sr35، Sr36 و

یک نشانگر ریخت‌شناختی ارزشمند، در انتخاب اولیه لاین‌های حامل این ژن‌های دارای مقاومت پایدار و چندگانه در برابر بیماری‌ها به کار می‌رود (Singh *et al.*, 2011; Kumar *et al.*, 2019).

یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که ژنوتیپ‌های ارزیابی شده دارای مجموعه متنوعی از ژن‌های مقاومت گیاهچه ای/کلیه مراحل رشد (ASR)، مقاومت گیاه بالغ (APR) و مقاومت تدریجی (SR) مؤثر در مقابل هر دو عامل زنگ زرد و زنگ ساقه هستند. همان‌طور که از مقادیر AUDPC، FRS و CI مشاهده می‌شود، تعدادی از ژنوتیپ‌ها در مرحله گیاه بالغ، مقاومت مؤثری را در برابر زنگ زرد نشان دادند. شناسایی و به کارگیری ژن‌های APR به عنوان یک هدف کلیدی در مدیریت جهانی بیماری‌های زنگ گندم شناخته می‌شود (Huerta-Espino *et al.*, 2020; Srinivas *et al.*, 2023; Dawana *et al.*, 2024). ژنوتیپ‌های دارای سطوح مختلف مقاومت تدریجی نیز به دلیل کاهش نرخ گسترش همه‌گیری بدون اعمال فشار مستقیم بر تکامل بیمارگر، از پایداری بیشتری برخوردارند (Singh *et al.*, 2005; Dawana *et al.*, 2024).

با این وجود، قارچ‌های عامل بیماری زنگ‌های غلات به دلیل توانایی بالای تطابق از طریق جهش، مهاجرت، نو ترکیبی و انتخاب، همچنان به عنوان تهدیدی جدی برای این محصولات محسوب می‌شوند (Hovmøller

مقاومت در این ارقام به واسطه ژن‌های غیرنژاد-اختصاصی (مقاومت تدریجی) حاصل شده است. از جمله ژن‌های مهم در این ارقام می‌توان به Yr18، Yr29، Yr30، Yr36، Yr39، Yr46، Yr48 و Yr52 اشاره کرد که اغلب در ژنوتیپ‌های مشتق شده از ژرم پلاسما مقاوم مانند Kingbird، Chapio و دیگر منابع یافت می‌شوند (Singh *et al.*, 2005; 2011; Chen and Kang, 2017). در سال‌های اخیر، این ارقام به طور فزاینده‌ای در برنامه‌های تلاقی با لاین‌های منتخب گندم ایرانی به کار گرفته شده‌اند (Safavi and Afshari, 2017; Mohammadi *et al.*, 2023).

بسیاری از این ژن‌های مقاومت تدریجی با یکدیگر پیوستگی داشته و دارای اثر چندجانبه (Pleiotropic) می‌باشند که مقاومت در برابر چندین بیماری را به طور همزمان القا می‌کنند. همچنین این ژن‌ها اغلب با نشانگرهای ریخت‌شناختی نظیر سوختگی نوک برگ (Ltn) همراه هستند. به عنوان مثال: بلوک ژنی Yr18/Lr34/Pm38/Sr57/Bdv1/Stb1 با Ltn1، Yr29/Lr46/Sr58/Pm39 با Ltn2، ژن مقاومت Yr30 با ناحیه کروموزومی حامل ژن مقاومت به زنگ ساقه Sr2، و ترکیب ژنی Yr46/Lr67/Sr55/Pm46 با Ltn3 ارتباط و پیوستگی دارند. این ترکیبات ژنتیکی به صورت گسترده در ژرم پلاسما مرکز بین المللی تحقیقات ذرت و گندم (CIMMYT) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. فنوتیپ سوختگی نوک برگ به عنوان

(APR) منجر می شود (Singh *et al.*, 2011; Chen, 2013). شاخص rAUDPC که با نرخ پیشرفت بیماری ارتباط دارد، یک معیار قابل اعتماد برای ارزیابی مقاومت تدریجی به شمار می رود (Sandoval-Islas *et al.*, 2007; Dawana *et al.*, 2024). ژنوتیپ هایی با مقادیر متوسط و پایین این شاخص به احتمال زیاد حامل ژن های مقاومت تدریجی هستند (Safavi and Afshari, 2017; Srinivas *et al.*, 2023; Dawana *et al.*, 2024). ژنوتیپ های دارای این نوع مقاومت، توانایی محدودسازی روند تکامل پاتوتیپ های جدید را به دلیل نیاز برای وقوع جهش های متعدد برای غلبه بر مقاومت های چندژنی دارا هستند (Ali *et al.*, 2007; Singh *et al.*, 2011).

تنوع معنی دار مشاهده شده در شاخص های مقاومت تدریجی و گیاه بالغ، با گزارش های پیشین درباره تنوع ژنتیکی بالا در مقاومت به زنگ زرد و ساقه همخوانی دارد (Ali *et al.*, 2007; Safavi and Afshari, 2017; Hei *et al.*, 2015; Safavi and Malihipour, 20). این تنوع می تواند در برنامه های به نژادی گندم نان به منظور تولید ارقام دارای مقاومت پایدار استفاده شود. هرچند این مطالعه گروه های فنوتیپی مختلفی را مشخص ساخت، اما برای شناسایی ژن های خاص دخیل در این واکنش ها، به تحقیقات بیشتر نیاز است. در این راستا، استفاده از نشانگرهای مولکولی و روش های نقشه یابی ژن برای روشن سازی پایه ژنتیکی این مقاومت و

(Singh *et al.*, 2011; Chen and Kang, 2017) از این رو، راهبردهای به نژادی باید بر استقرار مقاومت غیرنژاد-اختصاصی، به تنهایی یا در ترکیب با ژن های نژاد-اختصاصی، تمرکز داشته باشند. به ویژه، تجمیع (Pyramiding) چهار تا پنج ژن مقاومت برای زنگ زرد و پنج تا شش ژن برای زنگ ساقه می تواند به سطوح بالایی از مقاومت (نزدیک به ایمنی) منجر شود (Singh *et al.*, 2011; Huerta-Espino *et al.*, 2020).

سطوح بالا تا متوسط مقاومت در برابر عامل هر دو زنگ زرد و ساقه در رقم رخشان و لاین های امیدبخش، M-97-7، M-97-14، M-97-15، N-97-4 و N-97-7 مشاهده شد. ژنوتیپ هایی که در مرحله گیاهچه ای نسبت به حداقل یک پاتوتیپ واکنش حساسیت نشان دادند، اما در مرحله گیاه بالغ واکنش هایی در حد نیمه مقاوم (MR) تا نیمه حساسی (MS) همراه با شدت پایین بیماری بروز دادند، احتمالاً دارای چندین ژن مقاومت تدریجی هستند.

مطابق با مطالعات پیشین (Ali *et al.*, 2007; Safavi and Afshari, 2012; Srinivas *et al.*, 2023; Dawana *et al.*, 2024) گندم نان بررسی شده در این پژوهش بر اساس شاخص های CI، rAUDPC و FRS در چهار گروه قرار گرفتند. این گروه بندی نشان داد که ژنوتیپ های نیمه مقاوم احتمالاً دارای ترکیبی از ژن های کوچک اثر (Minor genes) هستند که از طریق تعاملات ژنی به بروز مقاومت گیاه بالغ

تسهیل انتقال آن به ارقام منتخب ضروری است. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع

طبیعی اردبیل برای همکاری‌ها و پشتیبانی‌های

ارزشمندشان در طول اجرای این پروژه‌های

پژوهشی ابراز می‌دارند.

سپاسگزاری

این پژوهش با پشتیبانی مالی مؤسسه تحقیقات

اصلاح و تهیه نهال و بذر از پروژه‌های پژوهشی

مصوب به شماره‌های ۹۷۰۹۹۴-۲۳۹-۰۳-۰۳ و

۹۷۰۹۵۶-۲۳۳-۰۳-۰۳ انجام شد.

نویسندگان مراتب سپاسگزاری صمیمانه خود را

از مدیریت و کلیه همکاران در آن مؤسسه و نیز

تعارض منافع

نگارندگان اعلام می‌دارند که هیچ گونه

تعارض منافی با یکدیگر و سایر اشخاص حقیق

و حقوقی ندارند.

References

- Admassu, B., Friedt, W. and Ordon, F. 2012. Virulence analysis of *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* populations in Ethiopia with special consideration of Ug99. *Plant Pathology*, 61(3), pp.441–447. DOI: 10.1111/j.1365-3059.2011.02531.x
- Afshari, F. 2008. Prevalent pathotypes of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 10, pp.67-78.
- Aggarwal, R., Kulshreshtha, D., Sharma, S., Singh, V.K., Manjunatha, C., Bhardwaj, S.C. and Saharan, M.C. 2018. Molecular characterization of Indian pathotypes of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* and multigene phylogenetic analysis to establish inter- and intraspecific relationships. *Genetics and Molecular Biology*, 41(4), pp.834–842. DOI: 10.1590/1678-4685-gmb-2017-0272
- Ali, S., Rodriguez-Algaba, J., Thach, T., Sørensen, C.K., Hansen, J.G., Lassen, P., Nazari, K., Hodson, D.P., Justesen, A.F. and Hovmøller, M.S. 2017. Yellow rust epidemics worldwide were caused by pathogen races from divergent genetic lineages. *Frontiers in Plant Science*, 8, e1057. DOI: 10.3389/fpls.2017.01057
- Ali, S., Shah, S.J.A. and Ibrahim, M. 2007. Assessment of wheat breeding lines for slow yellow rusting. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 10(19), pp.3440–3444.
- Anonymous. 2023. Agricultural Statistics Yearbook Volume I: Field Crops. Ministry of Agriculture-Jahad Publications. 95 pp.
- Beddow, J.M., Pardey, P.G., Chai, Y., Hurley, T.M., Kriticos, D.J., Braun, H.J., Park, R.F., Cuddy, W.S. and Yonow, T. 2015. Research investment implications of shifts in the global geography of wheat stripe rust. *Nature Plants*, 1, e15132. DOI: 10.1038/nplants.2015.132

- Bhattacharya, S. 2017.** Deadly new wheat disease threatens Europe's crops. *Nature*, 542(7640), pp.145–146. DOI: 10.1038/nature.2017.21424
- Brown, J.K.M. and Hovmøller, M.S. 2002.** Aerial dispersal of fungi on the global and continental scales and its consequences for plant disease. *Science*, 297(5581), pp.537–541. DOI: 10.1126/science.1072678
- Bux, H., Ashraf, M., Hussain, F., Rattu A.U. and Fayyaz, M. 2012.** Characterization of wheat germplasm for stripe rust (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*) resistance. *Australian Journal of Crop Science*, 6(1), pp.116–120.
- Chen, W., Wellings, C., Chen, X. and Liu, T. 2014.** Wheat stripe (yellow) rust caused by *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*. *Molecular Plant Pathology*, 15(5), pp.433–446. DOI: 10.1111/mpp.12116
- Chen, X. 2005.** Epidemiology and control of stripe rust (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*) on wheat. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 27(3), pp.314–337. DOI: 10.1080/07060660509507230
- Chen, X. 2013.** High-temperature adult-plant resistance, key for sustainable control of stripe rust. *American Journal of Plant Sciences*, 4(3), pp.608–627. DOI: 10.4236/ajps.2013.43080
- Chen, X. 2020.** Pathogens which threaten food security: *Puccinia striiformis*, the wheat stripe rust pathogen. *Food Security*, 12(2), pp.239–251. DOI: 10.1007/s12571-020-01016-z
- Chen, X. and Kang, Z. 2017.** *Stripe Rust*. Dordrecht: Springer. 719 pp. DOI: 10.1007/978-94-024-1111-9
- Dadrezaei, S.T., Omrani, A., Malihipour, A., Tabatabaeifard, S.N., Tabib-Ghaffari, S.M. 2024.** Resistance of some wheat commercial cultivars and promising lines to leaf rust (*Puccinia triticina* Eriks.) disease at seedling and adult-plant stages. *Seed and Plant*, 40, pp.151–170 (in Persian). DOI: 10.22092/SPJ.2025.367260.1381
- Dawana, D., Dessie, B., Kebede, M. and Shimelash, D. 2024.** Pathogenicity of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* and quantitative traits on bread wheat landraces in Ethiopia. *Crop Science*, 64(1), pp.1–16. DOI: 10.1002/csc2.21193
- Denbel, W., Badebo, A., Hussein, T. and Singh, R.P. 2013.** Evaluation of Ethiopian wheat lines for slow rusting resistance to stem rust of wheat caused by *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*. *African Crop Science Journal*, 21(2), pp.99–108.
- Ezzahiri, B., Yahyaoui, A. and Hovmøller, M. S. 2009.** An analysis of the 2009 epidemic of yellow rust on wheat in Morocco. In: *Proceedings of the 4th Regional Yellow Rust Conference for Central and West Asia and North Africa*. Antalya, Turkey.

- Hei, N., Shimelis, H.A., Laing, M. and Admassu, B. 2015.** Assessment of Ethiopian wheat lines for slow rusting resistance to stem rust of wheat caused by *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*. *Journal of Phytopathology*, 163(5), pp.353–363. DOI: 10.1111/jph.12330
- Herrera-Foessel, S.A., Lagudah, E.S., Huerta-Espino, J., Hayden, M.J., Bariana, H.S., Singh, D. and Singh, R.P. 2011.** New slow rusting leaf rust and stripe rust resistance genes *Lr67* and *Yr46* in wheat are pleiotropic or closely linked. *Theoretical and Applied Genetics*, 122(1), pp.239–249. DOI: 10.1007/s00122-010-1439-x
- Hovmøller, M.S. and Justesen, A.F. 2007.** Rates of evolution of avirulence phenotypes and DNA markers in a northwest European population of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*. *Molecular Ecology*, 16(21), pp.4637–4647. DOI: 10.1111/j.1365-294X.2007.03544.x
- Hovmøller, M.S., Walter, S., Bayles, R., Hubbard, A., Flath, K., Sommerfeldt, N., Leconte, M., Czembor, P., Rodriguez-Algaba, J., Thach, T., Hansen, J. G., Lassen, P., Justesen, A., Ali, S. and de Vallavieille-Pope, C. 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), pp. 402–411. DOI: 10.1111/ppa.12433
- Huerta-Espino, J., Singh, R.P., Crespo-Herrera, L.A., Villaseñor-Mir, H.E., Rodriguez-Garcia, M.F., Dreisigacker, S., Barcenas-Santana, D. and 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, e824. DOI: 10.3389/fpls.2020.00824
- Kumar, K., Jan, I., Saripalli, G., Sharma, P.K., Mir, R.R., Balyan, H. S. and Gupta, P.K. 2020.** An update on resistance genes and their use in the development of leaf rust resistant cultivars in wheat. *Frontiers in Genetics*, 11, e569824. DOI: 10.3389/fgene.2020.569824
- Malihipour, A. and Esmaeilzadeh Moghaddam, M. 2023.** Reaction of the south warm agro climate zone elite wheat lines of Iran to stem rust at seedling and adult plant stages. *Plant Protection (Scientific Journal of Agriculture)*, 46(2), pp.87–103. DOI: 10.22055/ppr.2023.42776.1674
- McIntosh, R.A., Wellings, C.R. and Park, R.F. 1995.** *Wheat Rusts: An Atlas of Resistance Genes*. East Melbourne: CSIRO Publications. 225 pp.
- Meyer, M., Bacha, N., Tesfaye, T., Alemayehu, Y., Abera, E., Stukenbrock, E.H., McDonald, B.A. and Palma-Guerrero, J. 2021.** Wheat rust epidemics damage Ethiopian wheat production: a decade of field disease surveillance reveals national-scale trends in past outbreaks. *PLOS ONE*, 16(1), e0245697. DOI: 10.1371/journal.pone.0245697
- Milus, E.A. and Line, R.F. 1986.** Gene action for inheritance of durable, high-temperature, adult

- plant resistance to stripe rust in wheat. *Phytopathology*, 76(4), pp 435–441.
- Mohammadi, N., Safavi, S.A., Pouralibaba, H., Afshari, F., Yassaie, M., Roustae, M., and 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), pp.43–53. DOI: 10.22067/jcp.v12i1.82959
- Olivera, P., Newcomb, M., Szabo, L.J., Rouse, M., Johnson, J., Gale, S., Luster, D.G., Hodson, D., Cox, J.A., Burgin, L., Hort, M., Gilligan, C.A., Patpour, M., Justesen, A. F., Hovmøller, M.S., Woldeab, G., Hailu, E., Hundie, B., Tadesse, K., Pumphrey, M., Singh, R.P. and Jin, Y. 2015.** Phenotypic and genotypic characterization of race TKTTF of *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* that caused a wheat stem rust epidemic in southern Ethiopia in 2013-14. *Phytopathology*, 105, pp.917–928. DOI: 10.1094/phyto-11-14-0302-fi.
- Olivera Firpo, P.D., Newcomb, M., Szabo, L.J., Rouse, M.N., Johnson, J., Gale, S.W., Luster, D.G., Wanyera, R., Macharia, G., Bhavani, S., Hodson, D., Patpour, M., Hovmøller, M.S., and Jin, Y. 2022.** *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* population causing recent wheat stem rust epidemics in Kazakhstan is highly diverse and includes novel virulences. *Phytopathology*, 112(11), pp.367-380. DOI: 10.1094/PHYTO-08-21-0320-R
- Omran, A., Afshari, F., Shahbazi, F. and 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(1), pp.79–97. DOI: 10.22055/ppr.2024.48221.1769
- Peterson, R.F., Campbell, A.B. and Hannah, A.E. 1948.** A diagrammatic scale for estimating rust intensity on leaves and stems of cereals. *Canadian Journal of Research*, 26(5), pp.496–500. DOI: 10.1139/cjr48c-033
- Pretorius, Z.A., Singh, R.P., Wagoire, W.W. and Payne, T.S. 2000.** Detection of virulence to wheat stem rust resistance gene *Sr31* in *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* in Uganda. *Plant Disease*, 84(2), pp.203-203. DOI: 10.1094/PDIS.2000.84.2.203B
- Rahmatov, M., Rouse, M.N., Steffenson, B.J., Andersson, S.C., Wanyera, R., Pretorius, Z.A., Houmøller, A. and Johansson, E. 2012.** Sources of stem rust resistance in wheat-alien introgression lines. *Plant Disease*, 100(6), pp.1101–1109. DOI: 10.1094/PDIS-04-15-0392-RE
- Rodriguez-Algaba, J., Walter, S., Sørensen, C.K., Hovmøller, M. S. and Justesen, A.F. 2014.** Sexual structures and recombination of the wheat stripe rust pathogen *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* on *Berberis vulgaris*. *Fungal Genetics and Biology*, 70, pp.77–85.

DOI: 10.1016/j.fgb.2014.07.007

- Roelfs, A.P., Singh, R.P. and Saari, E.E. 1992.** *Rust Diseases of Wheat: Concepts and Methods of Disease Management*. Mexico, D.F.: CIMMYT. 81 pp.
- Safavi, S.A. and Afshari, F. 2012.** Quantitative resistance of some elite wheat lines to *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 45(6), pp.740–749. DOI: 10.1080/03235408.2011.603277
- Safavi, S.A. and Afshari, F. 2017.** A seven-year assessment of resistance durability to stripe rust in some wheat cultivars in Ardabil province, Iran. *Journal of Crop Protection*, 6(3), pp.409–421.
- Safavi, S.A. and Malihipour, A. 2018.** Effective and ineffective resistance genes and reaction of promising wheat lines to stem rust in Ardabil. *Journal of Crop Protection*, 7(4), pp.415–427.
- Safavi, S.A. 2019.** Effectiveness of resistance genes to stripe rust and virulence of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* during two years monitoring in Ardabil. *Applied Researches in Plant Protection*, 8(3), pp.95–107.
- Safavi, S.A. and Malihipour, A. 2020.** Partial resistance of some wheat cultivars and candidate lines against stem rust (*Puccinia graminis* f. sp. *tritici*). *Plant Protection (Scientific Journal of Agriculture)*, 43(2), pp. 31–52. DOI: 10.22055/ppr.2020.31392.1558
- Sandoval-Islas, J.S., Broers, L.H.M., Mora-Aguilera, G., Parlevliet, J.E., Osada, K.S. and Vihar, H.E. 2007.** Quantitative resistance and its components in barley cultivars to yellow rust. *Euphytica*, 153(3), pp.295–308. DOI: 10.1007/s10681-006-9200-x
- Singh, D., Park, R.F. and McIntosh, R.A. 2007.** Characterization of wheat leaf rust resistance gene *Lr34* in Australian wheats using components of resistance and the linked molecular marker *csLV34*. *Australian Journal of Agricultural Research*, 58(11), pp.1106–1114. DOI: 10.1071/AR07131
- Singh, R.P., Huerta-Espino, J. and William, H.M. 2005.** Genetics and breeding for durable resistance to leaf and stripe rusts in wheat. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 29(2), pp. 121–127.
- Singh, R.P., Hodson, D.P., Huerta-Espino, J., Jin, Y., Njau, P., Wanyera, R., Herrera-Foessel, S.A. and Ward, R.W. 2008.** Will stem rust destroy the world's wheat crop? *Advances in Agronomy*, 98, pp.271–309. DOI: 10.1016/S0065-2113(08)00205-8
- 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. and Crossa, J. 2011.** Race non-specific resistance to rust diseases in CIMMYT spring wheats. *Euphytica*, 179(1), pp.175–186. DOI:

10.1007/s10681-010-0322-9

- Singh, R.P., Hodson, D.P., Jin, Y., Lagudah, E.S., Ayliffe, M.A., Bhavani, S., Rouse, M.N., Pretorius, Z.A., Szabo, L.J., Huerta-Espino, J., Basnet, B.R., Lan, C. and Hovmøller, M. S. 2015.** Emergence and spread of new races of wheat stem rust fungus: Continued threat to food security and prospects of genetic control. *Phytopathology*, 105, pp.872–84 DOI: 10.1094/PHYTO-01-15-0030-FI.
- Srinivas, K., Singh, V.K., Srinivas, B., Sameriya, K.K., Kumar, U., Gangwar, O.P., Kumar, S., Prasad, L. and Singh, G.P. 2023.** Documentation of multi-pathotype durable resistance in exotic wheat genotypes to deadly stripe and leaf rust diseases. *Cereal Research Communications*, 52(1), pp.189–201. DOI: 10.1007/s42976-023-00362-w
- Stakman, E.C., Stewart, D.M. and Loegering, W.Q. 1962.** *Identification of Physiologic Races of Puccinia graminis tritici*. USDA-ARS Bulletin E617. 51 pp.
- Stubbs, R.W., Prescott, J.M., Saari, E.E. and Dubin, H.J. 1986.** *Cereal Disease Methodology Manual*. Mexico, D.F.: CIMMYT. 51 pp.
- Torabi, M., Mardoukhi, V., Nazari, K., Afshari, F., Forootan, A.R., Ramai, M.A., Golzar, H. and Kashani, A.S. 1995.** Effectiveness of wheat yellow rust resistance genes in different part of Iran. *Cereal Rust and Powdery Mildew Bulletin*, 23, pp.9-12.
- Wellings, C.R. 2007.** *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in Australia: a review of the incursion, evolution and adaptation of stripe rust in the period 1979–2006. *Australian Journal of Agricultural Research*, 58(6), pp.567–575. DOI: 10.1071/AR07130
- Zeng, Q.D., Han, D.J., Wang, Q.L., Yuan, F.P., Wu, J.H., Zhang, L., Liu, D.J. and Jin, S.L. 2014.** Stripe rust resistance and genes in Chinese wheat cultivars and breeding lines. *Euphytica*, 196(2), pp.271-284. DOI: 10.1007/s10681-013-1029-5
- Zhu, X., Li, Z., Wu, L., Wang, J., Chen, M., Liu, D., Singh, R.P., Li, Y., Xia, X., He, Z. and Lan, C. 2023.** Characterization of *Yr* genes in Chinese wheat cultivars and their application in breeding for stripe rust resistance. *The Crop Journal*, 11(2), pp. 581–589.

RESEARCH ARTICLE

Reaction of Some Irrigated Bread Wheat Genotypes of the National Breeding Programs for Temperate and Northern Warm and Humid Agro-climatic Zones to Yellow and Stem Rusts at the Seedling and Adult Plant Stages

S. A. Safavi^{1*} , F. Afshari²  and A. Malihipour³ 

1. Associate Professor, Field and Horticultural Crops Science Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Ardabil, Iran.

2. Professor, Cereal Research Department, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran.

3. Associate Professor, Cereal Research Department, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran.

ABSTRACT

Safavi, S. A., Afshari, F. and Malihipour, A. 2025. Reaction of some irrigated bread wheat genotypes of the national breeding programs for temperate and northern warm and humid agro-climatic zones to yellow and stem rusts at the seedling and adult plant stages. *Seed and Plant*, 40, pp. 425-456 (in Persian).

Lack of durable resistance in wheat cultivars is a major cause of yellow rust (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*, *Pst*) and stem rust (*Puccinia graminis* f. sp. *tritici*, *Pgt*) epidemics, which severely affecting global wheat production. This study identified resistance sources at the seedling and adult plant stages among 44 wheat genotypes adapted to temperate and northern warm and humid agro-climatic zones of Iran. Seedling evaluation carried-out at glasshouses at Cereal Research Department, Seed and Plant Improvement Institute in Karaj, Iran. Field evaluations were conducted in 2018–19 and 2019–20 at the Ardabil Agricultural Research Station. Adult plant resistance was assessed using epidemiological parameters: coefficient of infection (CI), final rust severity (FRS), and relative area under the disease progress curve (rAUDPC). Seedling reactions were evaluated under controlled conditions against two *Pst* and four *Pgt* pathotypes. For yellow rust, 12 (27.2%), 20 (45.4%), and 12 (27.2%) genotypes exhibited slow-rusting resistance (SR), all-stage resistance (ASR), and adult plant resistance (APR), respectively. For stem rust, 12 (27.2%) showed SR, 2 (4.5%) had ASR, and 30 (68.2%) were susceptible. Genotypes susceptible at the seedling stage but resistant at the adult stage likely carry multiple APR or slow-rusting genes, offering valuable genetic resources for development of bread wheat cultivars with durable resistance.

Keywords: Bread wheat, race-specific resistance, non-race-specific resistance, slow rusting.

Introduction

Bread wheat is a staple food crop and essential for global food security, particularly in Mediterranean regions. In Iran, bread wheat production is consistently challenged by some biotic and abiotic stresses. Rust diseases are among the most devastating biotic stresses. The dynamic and rapid evolution of yellow rust (*Pst*) and stem rust (*Pgt*) populations may overcome race-specific resistance genes those are deployed in commercial cultivars. Periodic epidemics and substantial economic losses are possibly occurred subsequently (Chen, 2020). The emergence of virulent races such as the Ug99 lineage for stem rust has further highlighted the vulnerability of genetically similar commercial cultivars. In contrast, adult plant resistance (APR), often expressed as slow rusting, is typically polygenic and considered more durable (Huerta-Espino *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2011). This type of resistance slows disease development through mechanisms that are not pathogen race-specific. Therefore, the identification and employment of APR sources into breeding programs is a principal strategy to obtain sustainable bread wheat production. This study was designed to phenotypically characterize a collection of Iranian wheat genotypes for both seedling and adult plant resistance to stripe and stem rusts, with the goal of identifying potential donors of durable resistance.

Materials and Methods

The study consisted of controlled seedling tests and field evaluations. Forty-four wheat genotypes from the national bread wheat breeding programs for temperate and northern warm and humid agro-climatic zones were evaluated for their reaction to yellow rust and stem rust at the seedling and adult plant resistances. For seedling resistance screening, plants were inoculated with two *Pst* pathotypes (174E150A+, Yr27 and 14E158A+, Yr27) and four *Pgt* pathotypes (TTTTF, PTRTF, TKTF, TTKTK). Infection types (ITs) were assessed 14 days post-inoculation using a standardized 0–4 scale. Field evaluations were conducted at the Ardabil Agricultural Research Station over two cropping cycles (2018-19 and 2019-20). Stripe rust was evaluated under artificial epiphytotic conditions, while stem rust was assessed under natural infection. Resistance at the adult plant stage was quantified using three significant epidemiological parameters including final rust severity (FRS), coefficient of infection ($CI = FRS \times \text{constant value of host response}$), and the relative area under the disease progress curve (rAUDPC). Genotypes were grouped into four resistance groups: all-stage resistance (ASR), adult plant resistance (APR), slow rusting resistance (SR), and susceptible, based on established thresholds for these parameters (Zeng *et al.*, 2014). Correlation coefficients were calculated to understand the relationships between resistance parameters.

Results and Discussion

Seedling screening tests revealed that none of the bread wheat genotypes exhibited resistance to all pathotypes of both rust diseases under controlled conditions. However,

significant levels of adult plant resistance were observed in field evaluations. For yellow rust, 12 (27.2%), 20 (45.4%), and 12 (27.2%) genotypes exhibited slow-rusting resistance (SR), all-stage resistance (ASR), and adult plant resistance (APR), respectively. For stem rust, 12 (27.2%) showed SR, 2 (4.5%) had ASR, and 30 (68.2%) were susceptible. Bread wheat genotypes M-97-7, M-97-14, M-97-15, N-97-4, and N-97-7 demonstrated promising resistance against both diseases. A strong positive correlation were observed between the APR parameters (FRS, CI, rAUDPC), validating their reliability for assessing quantitative resistance (Hei *et al.*, 2015). However, the correlations between seedling infection types (ITs) and adult plant parameters were non-significant. This finding indicated that APR is genetically independent from all-stage resistance (Singh *et al.*, 2011). The superior performance of certain bread wheat genotypes suggests combinations of non-race-specific APR genes, such as *Yr18/Lr34* or *Yr46/Lr67*, which are known for their durable and pleiotropic effects (Huerta-Espino *et al.*, 2020; Chen, 2020). Consequently, gene pyramiding is highly recommended to develop new bread wheat cultivars with robust and long-lasting resistance. Therefore, reducing reliance on fungicides and mitigating the risk of future epidemics driven by emerging virulent pathogen populations (Singh *et al.*, 2011).

References

- Chen, X. 2020.** Pathogens which threaten food security: *Puccinia striiformis*, the wheat stripe rust pathogen. *Food Security*, 12(2), pp.239–251. DOI: 10.1007/s12571-020-01016-z
- 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. and Crossa, J. 2011.** Race non-specific resistance to rust diseases in CIMMYT spring wheats. *Euphytica*, 179(1), pp.175–186. DOI: 10.1007/s10681-010-0322-9
- Huerta-Espino, J., Singh, R.P., Crespo-Herrera, L.A., Villaseñor-Mir, H.E., Rodriguez-Garcia, M.F., Dreisigacker, S., Barcenas-Santana, D. and 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
- Zeng, Q.D., Han, D.J., Wang, Q.L., Yuan, F.P., Wu, J.H., Zhang, L., Liu, D.J. and Jin, S.L. 2014.** Stripe rust resistance and genes in Chinese wheat cultivars and breeding lines. *Euphytica*, 196(2), pp.271-284. DOI: 10.1007/s10681-013-1029-5

*Corresponding author: Safaralisafavi@yahoo.com

Tel.: +98451266340

Received: 30 November 2024

Accepted: 08 February 2025



2023© Seed and Plant. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.