Journal of Agroecology
Homepage: http://agry.um.ac.ir

Research Article
Vol. 18, No. 2, 2026, p. 247-269

Evaluation of Yield and Yield Stability of Evolutionary Populations and Dynamic Mixtures of Rainfed Wheat (*Triticum aestivum* L.) in Iran

Maedeh Salimi[1], Alireza Koocheki[1*], Mehdi Nassiri Mahallati[1], Sayyed Alireza Beheshti[2], Stefania Grando[3] and Salvatore Ceccarelli[3]

1- Department of Agrotechnology, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
2- Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Khorasan Razavi Province, Mashhad, Iran
3- Independent Consultant, Ascoli Piceno, Italy
(*- Corresponding author's Email: akooch@um.ac.ir)

Received: 03-06-2026
Revised: 29-07-2026
Accepted: 15-08-2026
Available Online: 22-06-2026

How to cite this article:
Salimi, M., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Beheshti, S. A., Grando, S., & Ceccarelli, S. (2026). Evaluation of yield and yield stability of evolutionary populations and dynamic mixtures of rainfed wheat (*Triticum aestivum* L.) in Iran. *Journal of Agroecology, 18*(2), 247-269. (In Persian)
https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.99067.1273

Introduction

Wheat (*Triticum aestivum* L.) is one of the most important staple crops worldwide and plays a crucial role in food security in Iran. A large proportion of wheat production in the country occurs under rainfed conditions, where yields are highly sensitive to drought, climatic variability, and limited genetic diversity among cultivated varieties. In semi-arid regions, the increasing frequency of dry years associated with climate change has further intensified yield instability and production risks in rainfed wheat systems. Under such conditions, reliance on genetically uniform improved cultivars typically developed under relatively stable environments may limit the adaptive capacity of cropping systems. Increasing intraspecific genetic diversity through heterogeneous populations has therefore been proposed as an alternative strategy to enhance resilience in variable environments. Evolutionary populations and dynamic mixtures represent practical approaches within the framework of evolutionary plant breeding, in which genetically diverse populations are cultivated in farmers' fields and allowed to evolve over time under natural selection and local environmental conditions. The high level of genetic diversity maintained in these populations can enhance buffering capacity against environmental stresses and contribute to improved yield stability across environments. However, evaluating their performance requires analytical approaches that consider not only mean yield but also yield variability and production risk. Among the available stability measures, the reliability index combines mean performance with environmental variance and provides an estimate of the minimum yield expected under unfavorable conditions. The objective of this study was to evaluate the agronomic performance, yield stability, and reliability of wheat evolutionary populations and dynamic mixtures compared with landraces and improved varities under rainfed conditions in Iran.

Materials and Methods

Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.99067.1273

This study was conducted over three consecutive cropping seasons (2019–2021) at four rainfed locations in Iran: Ravansar–Moradabad in Kermanshah province, Firoozabad and Naqsh-e Rostam in Fars province, and Faruj in North Khorasan province, Iran. These sites represent a range of environmental conditions typical of rainfed wheat production systems in Iran. Sixteen wheat genotypes were evaluated, including twelve evolutionary populations and dynamic mixtures, two landraces (Sardari and Kal Heydari), and two improved cultivars (Azar 2 and Chamran 2). The experiment was arranged in a randomized complete block design with three replications at each location. In each season, part of the harvested seed from each genotype was replanted in the following year to maintain the evolutionary process within the heterogeneous populations. Several agronomic and morphological traits were measured during the growing season, including grain yield, biomass yield, straw yield, harvest index, thousand kernel weight, plant height, and spike length. In addition, selected traits were assessed at the individual plant level to evaluate within-population variability. The data were analysed using a mixed model; the significance of tested effects was assessed using F-tests, and mean comparisons among entries were performed using the Bonferroni test. To assess genotype stability across environments, five stability indices were calculated: cultivar superiority, environmental variance, Wricke's ecovalence, mean ranks, and variance of ranks. In addition, the reliability index was calculated for grain yield, biomass yield, straw yield, and plant height. This index combines mean performance with environmental variance and estimates the minimum yield expected under most environmental conditions, thus providing an indicator of yield risk.

Results and Discussion

The mixed-model analysis showed significant year × location effects for all measured traits, indicating strong environmental heterogeneity across the rainfed testing environments. The main effect of entry was not significant for most plot-level yield traits, including grain yield and biomass yield, while harvest index and some plant-level traits, particularly spike length and kernel number per spike, showed significant entry effects. Mean grain yield and biomass yield of the evolutionary populations and dynamic mixtures were not significantly different from those of the landraces and improved cultivars, indicating that increased within-crop genetic diversity did not reduce average performance. However, several evolutionary populations and dynamic mixtures ranked higher in stability and reliability indices than the reference landraces and improved cultivars. In particular, EP-Sharareh and MIX-4096 showed higher grain-yield reliability than Sardari, while MIX-6097, MIX-Sararood and MIX-6093 outperformed Azar 2 in reliability. These findings suggest that evolutionary populations and dynamic mixtures should be evaluated not only by mean yield, but also by genotype × environment responses, stability and reliability under variable rainfed conditions.

Conclusion

Overall, the results of this study demonstrate that increasing intraspecific genetic diversity through evolutionary populations and dynamic mixtures can enhance yield stability and reduce production risk in rainfed wheat systems. Although the mean yield of these populations was not significantly different from that of landraces and improved cultivars, some populations showed clear advantages in terms of stability and reliability indices. These findings suggest that heterogeneous wheat populations may provide a promising strategy for improving the resilience of rainfed cropping systems under increasing climatic variability.

Keywords: Genetic diversity, Heterogeneous populations, Local adaptation, Reliability

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: http://agry.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۸، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، ص ۲۶۹-۲۴۷

ارزیابی عملکرد و ثبات عملکرد جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویای گندم (*Triticumaestivum* L.) دیم در ایران

مائده سلیمی[۱]، علیرضا کوچکی[۱*]، مهدی نصیری محلاتی[۱]، سید علیرضا بهشتی[۲]، استفانیا گراندو[۳] و سالواتوره چکرلی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۴

چکیده

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از محصولات اصلی ایران است و تولید آن به‌ویژه در شرایط دیم، طی سال‌های اخیر تحت تأثیر خشکسالی‌های مکرر، نوسانات اقلیمی و محدودیت تنوع ژنتیکی قرار گرفته است. افزایش تنوع ژنتیکی از طریق به‌کارگیری جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا می‌تواند راهبردی مؤثر برای افزایش تاب‌آوری و ثبات عملکرد در شرایط متغیر محیطی و اقلیمی باشد. در این پژوهش، عملکرد زراعی، ثبات و قابلیت اطمینان ۱۶ ژنوتیپ شامل ۱۲ جمعیت تکاملی و مخلوط پویا (جمعیت تکاملی پرتویی، جمعیت تکاملی سیفی، جمعیت تکاملی رستمی، جمعیت تکاملی شراره، مخلوط پویا نیک‌فرجام، مخلوط پویا کشکولی، مخلوط پویا ۶۰۹۷، ۶۰۹۳ مخلوط پویا، مخلوط پویا ۱۰۰۹۶، مخلوط پویا ۴۰۹۶، مخلوط پویا سرارود و مخلوط پویا دوروم) به‌همراه دو رقم بومی (سرداری و کل حیدری) و دو رقم اصلاح‌شده (آذر ۲ و چمران) طی سه سال زراعی (۱۴۰۱-۱۳۹۹) در چهار منطقه دیم شامل روانسر در استان کرمانشاه، فیروزآباد و نقش‌رستم در استان فارس و فاروج در استان خراسان شمالی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار بررسی شد. در هر سال و مکان، بخشی از بذر برداشت‌شده از هر ژنوتیپ برای کشت سال بعد مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های صفات زراعی و ریخت‌شناسی با استفاده از مدل آمیخته تحلیل شدند و ثبات ژنوتیپ‌ها با پنج شاخص ثبات و شاخص قابلیت اطمینان در سطح ۸۵ درصد ارزیابی گردید. برهم‌کنش سال × مکان برای همه صفات معنی‌دار بود، درحالی‌که اثر اصلی ژنوتیپ بر عملکرد دانه، زیست‌توده و کاه معنی‌دار نشد. میانگین عملکرد دانه چهار جمعیت تکاملی در محدوده‌ای قابل مقایسه با ارقام بومی و اصلاح‌شده قرار داشت. با وجود این، توده‌های ناهمگن هفت رتبه نخست ثبات کلی را به خود اختصاص دادند و مخلوط پویا ۶۰۹۷، مخلوط پویا دوروم و جمعیت تکاملی شراره به‌ترتیب در رتبه‌های اول تا سوم قرار گرفتند. جمعیت تکاملی شراره با شاخص قابلیت اطمینان عملکرد دانه حدود ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار، بالاترین مقدار را در بین ژنوتیپ‌ها داشت و مخلوط پویا ۴۰۹۶ با مقدار ۳۷۳ کیلوگرم در هکتار در رتبه دوم قرار گرفت؛ مقادیر هر دو ژنوتیپ از ارقام شاهد بیشتر بود. میانگین عملکرد شراره از نظر عددی از ارقام آذر ۲ و کل حیدری بیشتر و به رقم سرداری نزدیک بود. عملکرد، ثبات و قابلیت اطمینان مطلوب شراره، که از تنوع ژنتیکی اولیه بالایی برخوردار بود و پیش از آغاز آزمایش در محیط دیگری کشت نشده بود، در کنار نتایج به‌دست‌آمده از جمعیت‌های تکاملی پرتویی، سیفی و رستمی نشان داد که پاسخ جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا احتمالاً افزون‌بر میزان تنوع ژنتیکی اولیه، تحت تأثیر تاریخچه کشت، سازگاری محلی و فشارهای انتخابی پیش قرار دارد. پاسخ مواد ناهمگن علاوه‌بر تنوع ژنتیکی اولیه، احتمالاً تحت تأثیر تاریخچه کشت و فشارهای انتخابی پیشین نیز قرار دارد. بنابراین جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا می‌توانند ضمن حفظ میانگین عملکردی قابل مقایسه، ثبات بیشتر و ریسک افت عملکرد کمتری را فراهم کنند و به‌عنوان یکی از رویکردهای اگرواکولوژیک برای تقویت پایداری تولید در کشاورزی دیم مورد توجه قرار گیرند.

۱- گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، مشهد، ایران
۳- مشاور مستقل، آسکولی پیچنو، ایتالیا
(*- نویسنده مسئول: Email: akooch@um.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.99067.1273

واژه‌های کلیدی: تنوع ژنتیکی، جمعیت‌های ناهمگن، سازگاری محلی، قابلیت اطمینان

مقدمه

جهان امروز با چالش‌هایی همچون تغییر اقلیم، افزایش شدت و گسترش خشکسالی‌ها، تخریب بوم‌نظام‌ها و کاهش تنوع زیستی روبه‌رو است. تغییر اقلیم، افزون‌بر دگرگون کردن الگوهای بارش و دما موجب تغییر در نوع، پراکنش و شیوه گسترش آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز نیز می‌شود. از سوی دیگر، اتکای کشاورزی مدرن به کشت تعداد محدودی از گونه‌ها و ارقام زراعی و گسترش یکنواختی ژنتیکی، به فرسایش تنوع گونه‌ای و ژنتیکی انجامیده است. مجموعه این چالش‌ها، پایداری بوم‌نظام‌های زراعی را تحت تأثیر قرار داده و امنیت غذایی را تهدید می‌کند (FAO, 2025; IPPC, 2023; Isbell et al., 2015).

ایران نیز به‌عنوان کشوری گرم و خشک، به‌شدت تحت تأثیر این چالش‌ها قرار دارد و در برابر تغییر اقلیم و خشکسالی بسیار آسیب‌پذیر است. پژوهش‌های مختلف، کاهشِ معنادار بارندگی و افزایش دما را در مناطق مختلف گزارش کرده و پیش‌بینی‌ها از تشدید این روندها در دهه‌های آینده حکایت دارد (Derakhshandeh et al., 2024). در این بین، بخش کشاورزی به‌ویژه کشاورزی دیم، که وابسته به بارش‌های طبیعی است و در برابر نوسانات اقلیمی آسیب‌پذیر است، به‌شدت بیشتری تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Akbari et al., 2022).

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات زراعی ایران محسوب می‌شود و براساس آخرین آمار رسمی وزارت جهاد کشاورزی، در حدود ۵۸ درصد از اراضی زراعی کشور تحت نظام دیم و آبی کشت می‌شود. این محصول با اختصاص ۷۳ درصد از اراضی دیم (حدود ۴/۸ میلیون هکتار)، حدود ۷/۷ میلیون تن تولید داشته و متوسط عملکرد آن ۱/۶ تن در هکتار بوده است. در بخش آبی نیز گندم با تولید حدود ۱۰/۸۳ میلیون تن، سهمی معادل ۱۳/۵۷ درصد از کل تولید محصولات آبی کشور داشته و متوسط عملکرد آن ۳/۸ تن در هکتار گزارش شده است (Ministry of Agriculture Jihad, 2023). با وجود افزایش عملکرد گندم در ایران طی دهه‌های اخیر، ثبات عملکرد آن به روند رو به کاهش همراه بوده است (Nassiri Mahallati & Koocheki, 2014). افزون‌بر این، عملکرد گندم دیم به‌طور قابل توجهی پایین‌تر از پتانسیل واقعی آن است و انتظار می‌رود که تغییر اقلیم، این شکاف عملکرد موجود را تشدید کند (Amirifar et al., 2011).

در ایران، دو برنامه مستقل به‌نژادی گندم برای مناطق آبی و دیم وجود دارد. مطالعات مختلف بین‌المللی نشان می‌دهد که توجه بیشتر به رویکرد انتخاب غیرمتمرکز، بهره‌گیری مؤثر از تعامل ژنوتیپ × محیط، افزایش تنوع ژنتیکی و توسعه ارقام جدید با سازگاری اختصاصی کارآیی برنامه‌های به‌نژادی را به‌ویژه در شرایط دیم بهبود می‌بخشد (Ceccarelli & Grando, 2007). به همین دلیل، تقویت همزمان بهره‌وری، ثبات، تاب‌آوری و تنوع زیستی کشاورزی به‌عنوان یک ضرورت راهبردی مهم مطرح می‌شود (Krug et al., 2023).

در پاسخ به این چالش‌ها، برنامه‌های به‌نژادی غیرمتمرکز و مشارکتی که در آن کشاورزان به‌طور فعال در فرآیند انتخاب شرکت می‌کنند، راه‌حل‌هایی نویدبخش به شمار می‌روند. این رویکردها با تأکید بر همکاری نزدیک با کشاورزان، افزایش تنوع ژنتیکی در سطح مزارع و انتخاب در محیط واقعی مزرعه، به‌ویژه در نظام‌های کم‌نهاده و حاشیه‌ای مانند کشاورزی دیم مؤثر است (Ceccarelli & Grando, 2007). افزایش تنوع ژنتیکی با استفاده از روش‌های مختلف مانند کشت مخلوط ارقام و به‌نژادی تکاملی گیاهان (EPB[1]) می‌تواند ضمن ارتقای ثبات، به بهبود عملکرد در محیط‌های کم‌نهاده و پرتنش کمک نماید (Döring et al., 2015; Krug et al., 2023).

در روش به‌نژادی تکاملی گیاهان زراعی از جمعیت‌های تکاملی (EPs[2]) و مخلوط‌های تکاملی/ پویا (MIXs[3]) استفاده می‌شود. جمعیت‌های تکاملی از تلاقی چندین ژنوتیپ مختلف از یک گونه زراعی و ترکیب بذر نسل‌های اولیه (F_1 یا F_2) ایجاد می‌شوند (Suneson, 1956)؛ درحالی‌که مخلوط‌های تکاملی و یا پویا از ترکیب ارقام و یا لاین‌های اصلاحی مختلف تشکیل می‌شوند و در آن‌ها بخشی از بذر برداشت‌شده برای کشت سال بعد استفاده می‌شود[4]

1- Evolutionary plant breeding
2- Evolutionary populations
3- Dynamic mixtures
۴- مخلوط‌ها از ترکیب ارقام و لاین‌های اصلاحی مختلف تشکیل می‌شوند و بسته به شیوه مدیریت، دو نوع ایستا و پویا هستند. در مخلوط‌های ایستا، هرساله مقدار مشخصی از بذرها با یکدیگر مخلوط شده و کشت می‌شوند، ولی در مخلوط‌های پویا، بخشی از بذر برداشت‌شده برای کشت سال بعد استفاده می‌شود (Salimi et al., 2023).

(Salimi et al., 2023). جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های تکاملی / پویا (که در این پژوهش به‌طورکلی با عنوان جمعیت‌های تکاملی از آن‌ها یاد می‌شود) با اصطلاحاتی چون جمعیت‌های توده‌ای[1] و مخلوط‌های تلاقی مرکب[2] هم‌معنی بوده و در مقالات علمی از هر سه واژه استفاده می‌شود (Ceccarelli & Grando, 2020).

انتخاب طبیعی، نقش مهمی در سازگاری تدریجی این جمعیت‌ها با شرایط اقلیمی، محیطی و مدیریتی ایفا می‌کند (Suneson, 1956). این جمعیت‌ها از قابلیت سازگاری پویا برخوردارند و می‌توانند به‌تدریج ویژگی‌های فنولوژیک و عملکردی خود را در پاسخ به شرایط محیطی تطبیق دهند (Goldringer et al., 2006). نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد که جمعیت‌های تکاملی در نظام‌های کم‌نهاده و پُرتنش مانند کشت دیم، عملکرد و ثبات قابل قبولی نشان می‌دهند (Murphy et al., 2004; Raggi et al., 2017). در به‌نژادی تکاملی، فرآیند سازگاری در بستر انتخاب طبیعی و در تعامل با شرایط محیطی، اقلیمی و مدیریتی محل کشت رخ می‌دهد و در صورت تداوم کشت در یک محیط مشخص می‌تواند به غلبه انتخاب جهت‌دار و شکل‌گیری سازگاری محلی یا اختصاصی منجر شود؛ فرآیندی که طی آن، جمعیت به‌تدریج برای شرایط محیطی غالب بهینه می‌شود. ازاین‌رو، در چارچوب این روش، عملکرد و ثبات جمعیت‌های تکاملی حاصل برهم‌کنش بین تنوع ژنتیکی، پیشینه ژنتیکی والدین، انتخاب طبیعی و تاریخچه کشت آن‌ها در محیط‌های مختلف است (Ceccarelli & Grando, 2020).

تاکنون پژوهش‌های مختلفی در خصوص استفاده از روش به‌نژادی تکاملی گیاهان زراعی در محصولات مختلف از جمله گندم، جو (*Hordeum vulgare* L.)، برنج (*Oryza sativa* L.) و لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) شده است (Ceccarelli & Grando, 2024). نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از این روش و بهره‌گیری از تنوع ژنتیکی می‌تواند نقش کلیدی در افزایش و ثبات عملکرد (Raggi et al., 2017)، مقاومت به آفات و بیماری‌ها (Neupane et al., 2025) و مهار علف‌های هرز (Ceccarelli & Grando, 2024) داشته باشد و روشی مورد اطمینان برای شرایط کم‌نهاده و دیم محسوب می‌شود (Murphy et al., 2004).

در ایران، فعالیت‌های مرتبط با به‌نژادی تکاملی، ابتدا با آغاز کشت جمعیت جو تکاملی در سال ۱۳۸۷ شروع شد و سپس به گندم (در سال ۱۳۸۸) و برنج (در سال ۱۳۹۲) گسترش یافت (Ceccarelli et al., 2022). با وجود استفاده از این روش به مدت نسبتاً طولانی در سطح مزارع کشاورزان، ارزیابی علمی جمعیت‌های تکاملی در ایران از سال ۱۳۸۹ آغاز شده و تاکنون شامل بررسی پایداری صفات زراعی جمعیت‌های تکاملی جو در شرایط دیم (Salimi et al., 2023)، ارزیابی عملکرد دو جمعیت تکاملی جو تحت تنش شوری آب و خاک (Pirasteh et al., 2023) و بررسی صفات زراعی مخلوط‌های پویا در ارقام بومی برنج ایران (Nasiri et al., 2024) بوده است.

با وجود اهمیت راهبردی گندم در نظام‌های زراعی کشور، مطالعات مربوط به ارزیابی جمعیت‌های تکاملی این محصول در شرایط دیم ایران هنوز بسیار محدود است. ازاین‌رو هدف این پژوهش، ارزیابی عملکرد زراعی و ثبات عملکرد گندم در جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا تحت شرایط دیم ایران بود. برای این منظور، چهار جمعیت تکاملی، هشت مخلوط پویا، دو رقم بومی و دو رقم اصلاح‌شده در چهار منطقه و طی سه سال مورد ارزیابی قرار گرفتند. این مطالعه با هدف بررسی نقش تنوع ژنتیکی در بهبود ثبات عملکرد و کاهش ریسک تولید در نظام‌های دیم انجام شد.

مواد و روش‌ها

مناطق اجرای آزمایش و داده‌های هواشناسی

این پژوهش طی سه سال زراعی متوالی (۱۳۹۸-۱۳۹۹ تا ۱۴۰۱-۱۴۰۰) در چهار منطقه با شرایط محیطی متفاوت در استان‌های کرمانشاه، فارس و خراسان شمالی اجرا گردید. آزمایش‌ها در شرایط واقعی مزرعه کشاورزان انجام شدند. مزارع منتخب، از جمله مزارعی بودند که به‌طور متداول برای اجرای پژوهش‌های مزرعه‌ای[3] توسط مراکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و سازمان جهاد کشاورزی استان‌های مربوطه مورد استفاده قرار می‌گرفتند. مناطق اجرای آزمایش شامل روستای مرادآباد در شهرستان روانسر از استان کرمانشاه، روستای حسین‌آباد در شهرستان مرودشت (نقش‌رستم) در استان فارس، روستای مهکویه بالا در شهرستان فیروزآباد در استان فارس و روستای نجف‌آباد در شهرستان فاروج از استان خراسان شمالی بودند.

1- Bulk populations
2- Composite crosses populations
3- On-farm

جدول ۱- بارندگی ماهانه در مکان‌های آزمایش طی سال‌های اجرای آزمایش (مهر تا تیر)

Table 1- Monthly rainfall at the experimental sites during the experimental seasons (October–June)

مکان Location	سال زراعی Crop season	متغیر Variable	مهر Oct.	آبان Nov.	آذر Dec.	دی Jan.	بهمن Feb.	اسفند Mar.	فروردین Apr.	اردیبهشت May	خرداد Jun.
روانسر Ravansar	2019–2020	بارش Rainfall (mm)	53	13	58	30	119	114	67	3	0
	2020–2021		0	150	36	30	72	27	2	4	0
	2021–2022		3	49	24	74	89	42	44	19	0
نقش‌رستم Naghshe Rostam	2019–2020	بارش Rainfall (mm)	6	36	56	117	6	84	76	1	0
	2020–2021		0	59	51	0	33	8	4	1	0
	2021–2022		0	4	34	89	15	3	4	1	0
فیروزآباد Firuzabad	2019–2020	بارش Rainfall (mm)	7	1	92	111	27	84	87	0	0
	2020–2021		0	47	107	1	48	4	6	0	0
	2021–2022		0	1	58	150	22	7	5	0	0
فاروج Farouj	2019–2020	بارش Rainfall (mm)	11	13	16	15	31	56	150	22	0
	2020–2021		0	47	107	0	5	35	17	56	0
	2021–2022		16	10	7	11	40	47	20	53	3

میانگین ده‌ساله بارندگی سالانه و متوسط دماهای حداقل و حداکثر، براساس داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به هر مکان آزمایش، شامل ایستگاه روانسر برای روستای مرادآباد، ایستگاه تخت‌جمشید برای حسین‌آباد مرودشت (نقش‌رستم)، ایستگاه فیروزآباد برای مهکویه بالا و ایستگاه فاروج برای نجف‌آباد، نشان می‌دهد که میانگین بارندگی سالانه در مناطق مورد مطالعه بین ۲۶۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر متغیر بوده است. به‌طوری که بیشترین میانگین بارندگی سالانه در روانسر با ۵۰۰ میلی‌متر، و کمترین آن در نقش‌رستم با ۲۶۰ میلی‌متر ثبت شده است. همچنین متوسط دمای حداکثر از ۲۱ درجه سانتی‌گراد در فاروج تا ۲۷ درجه سانتی‌گراد در فیروزآباد و متوسط دمای حداقل از ۵/۷ درجه سانتی‌گراد در فاروج تا ۱۴/۵ درجه سانتی‌گراد در فیروزآباد متغیر بوده است.

داده‌های بارندگی دوره مهر تا خرداد، منطبق با فصل رشد گندم، نیز از همان ایستگاه‌های هواشناسی استخراج شد و جزئیات آن در جدول ۱ ارائه شده است. براساس این داده‌ها، سال زراعی ۱۳۹۹–۱۳۹۸ در بیشتر مناطق مرطوب‌ترین و سال زراعی ۱۴۰۰–۱۳۹۹ خشک‌ترین سال دوره اجرای آزمایش بود، همچنین در نقش‌رستم بارندگی طی دو سال پایانی آزمایش پایین بود.

مواد گیاهی

مواد ژنتیکی مورد استفاده در این پژوهش، انواعی از جمعیت‌های ناهمگن (جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا) به همراه ارقام بومی و اصلاح‌شده گندم بودند که در ادامه از آن‌ها با عنوان ژنوتیپ نام برده می‌شود. در مجموع، ۱۶ ژنوتیپ در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت که شامل چهار جمعیت تکاملی (پرتویی، سیفی، رستمی و شراره)، هشت مخلوط پویا (نیک‌فرجام، کشکولی، ۶۰۹۷، ۶۰۹۳، ۱۰۰۹۶، ۴۰۹۶، سرارود و دوروم)، دو رقم بومی (سرداری و کل حیدری) و دو رقم اصلاح‌شده (آذر۲ و چمران۲) بود. جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا مورد استفاده در این پژوهش، پیش از آغاز آزمایش حاضر، در دیم‌زارهای مناطق مختلف کشور سابقه کشت داشته‌اند و مدت کشت آن‌ها بین یک تا چند دهه متغیر بوده است. مشخصات کامل این جمعیت‌ها، به‌همراه ارقام اصلاح‌شده و ارقام بومی که به‌عنوان شاهد در این آزمایش استفاده شدند، در جدول ۲ ارائه شده است. ارقام بومی و اصلاح‌شده مورد استفاده در این پژوهش دارای سابقه کشت طولانی در مناطق مختلف کشور هستند و از مناطق اصلی کشت آن‌ها تهیه شدند.

جدول ۲- مشخصات ۱۶ ژنوتیپ مورد استفاده در پژوهش

Table 2- Specifications of the 16 genotypes used in the study

ژنوتیپ‌های گندم Wheat genotypes	مشخصات Description
جمعیت تکاملی پرتویی EP-Partoee	این جمعیت منشأ گرفته از نخستین جمعیت پایه گندم تکاملی ایران (۱۳۸۸) است که پس از کشت مداوم در کرندغرب (۱۳۹۲–۱۳۸۸)، به روستای مرادآباد در روانسر منتقل شد و تحت شرایط دیم در مزرعه کشاورز کشت شد (۱۳۹۲–۱۳۹۷). This population originated from Iran’s first base evolutionary wheat population (2009), which, after continuous cultivation in Kerend-e Gharb (in 2009–2013), was transferred to Moradabad village in Ravansar and cultivated under rainfed conditions in a farmer’s field (in 2013–2018).
جمعیت تکاملی رستمی EP-Rostami	این جمعیت منشأ گرفته از نخستین جمعیت پایه گندم تکاملی ایران (۱۳۸۸) است که طی سال‌های ۱۳۹۲–۱۳۸۸ در کرندغرب، طی سال‌های ۱۳۹۳–۱۳۹۲ در روانسر و طی سال‌های ۱۳۹۷–۱۳۹۳ در مسجدسلیمان تحت شرایط دیم بسیار گرم و پُرتنش کشت شد. This population originated from Iran’s first base evolutionary wheat population (2009) and was cultivated in Kerend-e Gharb in 2009–2013, Ravansar in 2013–2014, and under hot and stress-prone rainfed conditions in Masjed Soleyman in 2014–2018.
جمعیت تکاملی سیفی EP-Seyfi	این جمعیت منشأ گرفته از نخستین جمعیت پایه گندم تکاملی ایران (۱۳۸۸) است که طی سال‌های ۱۳۸۸–۱۳۹۲ در کرندغرب، طی سال‌های ۱۳۹۳–۱۳۹۲ در روانسر و طی سال‌های ۱۳۹۷–۱۳۹۳ در مراغه تحت شرایط دیم سرد و نیمه‌مرطوب کشت شد. This population originated from Iran’s first base evolutionary wheat population (2009) and was cultivated in Kerend-e Gharb in 2009–2013, in Ravansar in 2013–2014, and in Maragheh,in 2014–2018 under cold, semi-humid and rainfed conditions.
جمعیت تکاملی شراره EP-Sharareh	این جمعیت در سال ۱۳۹۷ از ترکیب مقادیر مساوی بذر تمامی جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا استفاده‌شده در این پژوهش و توسط محقق ایجاد شد و تخمین زده می‌شود که شامل حدود ۴۰۰ ژنوتیپ باشد. This population was created by the researcher in 2018 by combining equal amounts of seed from all evolutionary populations and dynamic mixtures used in this study and is estimated to include approximately 400 genotypes.

مخلوط پویا نیک‌فرجام MIX-Nikfarjam	این مخلوط پویا در سال ۱۳۹۱ از ترکیب ۱۵ ژنوتیپ برتر گندم در مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم سرارود تهیه شد و طی سال‌های ۱۳۹۳–۱۳۹۱ در دالاهو و طی سال‌های ۱۳۹۷–۱۳۹۳ در مرودشت تحت شرایط دیم همراه با یک تا دو نوبت آبیاری تکمیلی کشت گردید. This dynamic mixture was developed in 2012 by combining 15 superior wheat genotypes at the Sararud Dryland Agricultural Research Institute and was cultivated in Dalahoo in 2012–2014 and in Marvdasht in 2014–2018 under rainfed conditions with one to two supplemental irrigations.
مخلوط پویا کشکولی MIX-Kashkooli	این مخلوط پویا در سال ۱۳۹۱ از ترکیب ۱۵ ژنوتیپ برتر گندم در مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم سرارود تهیه شد و طی سال‌های ۱۳۹۳–۱۳۹۱ در دالاهو و طی سال‌های ۱۳۹۷–۱۳۹۳ در فیروزآباد استان فارس به‌صورت دیم کشت گردید. This dynamic mixture was developed in 2012 by combining 15 superior wheat genotypes at the Sararud Dryland Agricultural Research Institute and was cultivated in Dalahoo in 2012–2014 and in Firouzabad, Fars Province in 2014–2018 under rainfed conditions.
مخلوط پویا ۶۰۹۳ MIX-6093	این مخلوط در سال ۱۳۹۳ از ترکیب ۶۰ ژنوتیپ برتر گندم با همکاری مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم سرارود و کشاورزان بومی ایجاد شد و طی سال‌های ۱۳۹۷–۱۳۹۳ به‌صورت دیم در روستای مرادآباد روانسر کشت گردید. This mixture was created in 2014 by combining 60 superior wheat genotypes in collaboration with the Sararud Dryland Agricultural Research Institute and local farmers and was cultivated under rainfed conditions in Moradabad village, Ravansar in 2014–2018.
مخلوط پویا ۶۰۹۷ MIX-6097	این مخلوط از ترکیب ۶۰ ژنوتیپ برتر گندم در مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم سرارود و با مشارکت یکی از کشاورزان پیشرو در سال ۱۳۹۷ تهیه شد. This mixture was prepared by combining 60 superior wheat genotypes at the Sararud Dryland Agricultural Research Institute, with the participation of a leading farmer in 2018.
مخلوط پویا سرارود MIX - Sararood	این مخلوط در سال ۱۳۹۳ توسط یک کشاورز پیشرو از طریق برداشت مستقیم از سنبله مستقیم از ۲۰ کرت آزمایشی مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم سرارود تهیه شد و به‌مدت چهار سال پیاپی در روانسر کشت گردید. This mixture was created in 2014 by a leading farmer through direct spike selection from 20 experimental plots at the Sararud Dryland Agricultural Research Institute, and was cultivated in Ravansar for four consecutive years.
مخلوط پویا ۴۰۹۶ MIX-4096	این مخلوط در سال ۱۳۹۶ برپایه نتایج آزمایش‌های آن‌فارم مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم سرارود و با مشارکت کشاورزان بومی از ۴۰ ژنوتیپ برتر گندم تهیه شد و در سال زراعی ۱۳۹۷–۱۳۹۶ به‌صورت دیم در روستای مرادآباد روانسر کشت گردید. This mixture was prepared in 2017 from 40 superior wheat genotypes based on the results of on-farm trials conducted by the Sararud Dryland Agricultural Research Institute and with the participation of local farmers and was cultivated under rainfed conditions in Moradabad village, Ravansar, in the 2017–2018 cropping season.
مخلوط پویا ۱۰۰۹۶ MIX-10096	این مخلوط از ترکیب ۱۰۰ رقم و لاین گندم در مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم سرارود تهیه شد و در سال زراعی ۱۳۹۷–۱۳۹۶ به‌صورت دیم در روانسر (استان کرمانشاه) کشت گردید. This mixture was prepared from 100 wheat cultivars and lines at the Sararud Dryland Agricultural Research Institute and was cultivated under rainfed conditions in Ravansar (Kermanshah Province) in the 2017–2018 cropping season.
مخلوط پویا دوروم MIX-Durum	این مخلوط در سال ۱۳۹۴ با استفاده از تمامی ارقام موجود گندم دوروم در منطقه کرمانشاه تهیه شد. پس از آن، به‌مدت سه سال پیاپی (۱۳۹۴–۱۳۹۷) در مزارع استان کرمانشاه تحت شرایط دیم کشت گردید. This mixture was prepared in 2015 from all available durum wheat cultivars in the Kermanshah region. Then it was subsequently cultivated for three consecutive years (2015–2018) under rainfed conditions across Kermanshah Province.
رقم بومی سرداری Sardari	یکی از لاین‌های بومی شاخص گندم ایران، متحمل به خشکی و سرما و رایج در مناطق دیم غرب و شمال‌غرب کشور است و سطح زیرکشت آن حدود دو میلیون هکتار برآورد می‌شود (Soofi et al., 2017; Haghparast et al., 2013). This prominent Iranian wheat landrace is drought- and cold-tolerant and widely cultivated in rainfed western and northwestern Iran, with an estimated area of ~2 million ha (Soofi et al., 2017; Haghparast et al., 2013).
رقم بومی کل حیدری Kal Heydari	رقم بومی پابلند، متحمل به خشکی و سازگار با شرایط دیم استان فارس است که حساسیت قابل توجهی به زنگ زرد دارد و بیش از ۷۰ سال است که در این منطقه کشت می‌شود (Pouryousefi et al., 2022). This tall local landrace is drought-tolerant, adapted to rainfed conditions in Fars Province, but highly susceptible to yellow rust, with over 70 years of cultivation (Pouryousefi et al., 2022).
رقم اصلاح شده آذر۲ Azar 2	رقم دیم مناسب مناطق سرد و معتدل است که از تلاقی «سرداری» با یک ژنوتیپ خارجی در مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر ایجاد شده، و دارای عملکرد متوسط ۲۱۴۳ کیلوگرم در هکتار و سطح زیرکشت حدود یک میلیون هکتار در کشور می‌باشد (Jasemi et al., 2017). This rainfed cultivar, adapted to cold and temperate regions, was developed from a “Sardari” × international genotype cross, with an average yield of 2,143 $kg.ha^{-1}$ and ~1 million ha under cultivation (Jasemi et al., 2017).
رقم اصلاح‌شده چمران۲ Chamran2	رقم اصلاحی مناسب شرایط آبی است که از تلاقی «چمران» با Attila/Bacanora در برنامه ملی اصلاح گندم به دست آمده و با وجود آبی بودن، به‌دلیل پیش‌بینی آبیاری تکمیلی، به‌عنوان شاهد در این پژوهش استفاده شد. This improved irrigated variety (“Chamran” × Attila/Bacanora), developed under the national wheat breeding program, was used as a check due to the planned supplemental irrigation at some experimental sites.

طراحی و اجرای آزمایش

این آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد و اندازه هر کرت در تمام مکان‌ها و سال‌ها برابر با ۲۰ مترمربع (۴ ×۵ متر) در نظر گرفته شد. تصادفی‌سازی تیمارها برای هر ترکیب سال و مکان به‌طور مستقل انجام شد و برای این منظور از نرم‌افزار DiGGer استفاده گردید؛ نرم‌افزاری که برای تولید طرح‌های کارآمد آزمایش‌های غیرعاملی با آرایش کرت‌ها در ردیف‌ها و ستون‌ها به کار می‌رود (Coombes, 2009). به‌دلیل وقوع خشکسالی شدید در سال دوم آزمایش (جدول ۱) در منطقه نقش‌رستم و کاهش مقدار بذر در دسترس برای برخی ژنوتیپ‌ها، در سال سوم اجرای آزمایش در این مکان امکان اجرای سه تکرار برای همه ژنوتیپ‌ها وجود نداشت؛ بنابراین در آن سال و در آن مکان از طرح با تکرار ناقص[1] استفاده شد.

کاشت به‌صورت دستی و هم‌زمان با آغاز بارندگی‌های پاییزه در هر سال انجام شد. مقدار بذر مصرفی در همه تیمارها ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار و یکسان برای تمامی ژنوتیپ‌ها در نظر گرفته شد. مدیریت زراعی شامل وجین و کوددهی، مطابق با شیوه‌های مرسوم کشاورزان هر منطقه انجام شد. در طول اجرای آزمایش، هیچ نهاده‌ای استفاده نگردید، جز در منطقه روانسر که به‌صورت حداقلی و مطابق با عرف محلی، پس از کاشت، حدود ۲۴ کیلوگرم در هکتار کود فسفات (سوپر فسفات تریپل) و ۱۲ کیلوگرم در هکتار کود نیترات (نیترات آمونیوم) به کار رفت. تمام آزمایش‌ها در شرایط دیم و بدون آبیاری تکمیلی انجام شد. در هر منطقه و سال، بخشی از بذر برداشت‌شده برای کشت در سال بعد مورد استفاده قرار گرفت. ناهم‌زمانی رسیدگی در جمعیت‌های تکاملی از طریق برداشت کل جمعیت در زمان متناسب با شرایط و هدف تولید هر منطقه مدیریت شد؛ به‌گونه‌ای که تکرار این شیوه برداشت، همراه با انتخاب طبیعی و مدیریت کشاورز، به‌تدریج فراوانی ژنوتیپ‌های دارای زمان رسیدگی سازگار با محیط را افزایش می‌دهد.

صفات مورد ارزیابی شامل عملکرد دانه، عملکرد زیست‌توده، عملکرد کاه، شاخص برداشت، وزن هزار دانه، تعداد پنجه بارور، ارتفاع بوته، طول سنبله، تعداد دانه در سنبله بودند. به‌منظور برآورد میزان تنوع فنوتیپی گیاهان در داخل هر کرت، انحراف معیار ارتفاع بوته و انحراف معیار طول سنبله محاسبه شد، زیرا این صفات در سطح بوته اندازه‌گیری شده و امکان ارزیابی پراکنش فنوتیپی گیاهان در داخل هر کرت را فراهم می‌کنند.

برای اندازه‌گیری صفات عملکردی، در هر کرت سه نمونه یک مترمربعی برداشت شد. در هر نمونه، ابتدا وزن کل زیست‌توده اندازه‌گیری شد، سپس دانه‌ها از کاه جدا شدند و وزن دانه تعیین گردید. عملکرد زیست‌توده و عملکرد دانه براساس وزن زیست‌توده و وزن دانه در هر نمونه محاسبه شدند و عملکرد کاه از تفاضل این دو مقدار به دست آمد. مقدار نهایی این سه صفت به‌صورت میانگین سه نمونه در هر کرت گزارش شد. شاخص برداشت نیز به‌صورت نسبت عملکرد دانه به عملکرد زیست‌توده و ضرب آن در ۱۰۰ محاسبه گردید.

وزن هزار دانه با استفاده از دانه‌های به‌دست‌آمده از نمونه‌های برداشت عملکرد و به‌صورت میانگین سه نمونه، هر یک شامل ۲۵۰ دانه، اندازه‌گیری شد. تعداد پنجه بارور در مترمربع تنها در سال‌های اول و دوم آزمایش و در یکی از نمونه‌های یک مترمربعی مورد استفاده برای اندازه‌گیری عملکرد دانه و زیست‌توده شمارش گردید.

برای اندازه‌گیری صفات سطح بوته، در هر کرت ۲۰ بوته به‌صورت تصادفی انتخاب شد. ارتفاع بوته از سطح خاک تا محل اتصال سنبله به ساقه اندازه‌گیری گردید و طول سنبله از ابتدای سنبله تا انتهای آن، بدون در نظر گرفتن ریشک‌ها، تعیین شد. تعداد دانه در سنبله نیز با شمارش دانه‌های همان ۲۰ سنبله انتخاب‌شده و تنها در سال‌های اول و دوم آزمایش اندازه‌گیری شد. داده‌های مربوط به ارتفاع بوته، طول سنبله و تعداد دانه در سنبله در سطح بوته ثبت شدند و برای تحلیل این صفات، ساختار نمونه‌برداری بوته‌ها در مدل آماری لحاظ گردید.

تجزیه و تحلیل داده‌ها و مدل‌های آماری مورد استفاده

در این پژوهش، داده‌های نامتوازن با استفاده از مدل آمیخته[2] در نرم‌افزار GenStat نسخه ۲۴ (VSN International, 2022) تحلیل شدند و معنی‌داری اثرات مورد بررسی با استفاده از آزمون F ارزیابی شد. با توجه به تفاوت در مقیاس اندازه‌گیری صفات، برای صفات اندازه‌گیری‌شده در سطح کرت و صفات اندازه‌گیری‌شده در سطح بوته،

1- Partially replicated design

2- Mixed effects model

دو ساختار متفاوت از مدل آمیخته به کار رفت. این رویکرد با ساختار پیشنهادی برای تحلیل آزمایش‌های ترکیبی چندساله و چندمکانی هم خوان است؛ ساختاری که در آن اثرهای سال، مکان، برهم‌کنش سال × مکان، تکرار درون ترکیب سال × مکان، ژنوتیپ و برهم‌کنش‌های ژنوتیپ با عوامل محیطی در مدل لحاظ می‌شوند (Moore & Dixon, 2015). در این تحلیل، ژنوتیپ به‌عنوان اثر ثابت در نظر گرفته شد. در مدل مربوط به صفات اندازه‌گیری‌شده در سطح کرت، سال، مکان و تکرار درون ترکیب سال × مکان به‌عنوان اثرات تصادفی وارد مدل شدند. در مدل مربوط به صفات اندازه‌گیری‌شده در سطح بوته، علاوه بر اثرات تصادفی یادشده، اثر بوته درون ژنوتیپ نیز به‌عنوان یک اثر تصادفی در مدل لحاظ شد. منظور از ژنوتیپ، هر یک از مواد ژنتیکی مورد ارزیابی شامل ارقام، جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا بود که در بازه سه‌ساله آزمایش به‌عنوان واحدهای مشخص و قابل مقایسه تحلیل شدند؛ رویکردی که با ارزیابی چندمحیطی و چندساله مواد حاصل از به‌نژادی تکاملی هم‌خوانی دارد (Raggi et al., 2017).

برای صفات اندازه‌گیری‌شده در سطح کرت شامل عملکرد دانه، عملکرد زیست‌توده، عملکرد کاه، شاخص برداشت، وزن هزار دانه، تعداد پنجه بارور در مترمربع و شاخص‌های تنوع فنوتیپی گیاهان در داخل کرت از معادله ۱ استفاده شد.

معادله (۱)
$$Y_{ijkr} = \mu + Y_i + L_j + (YL)_{ij} + R_{r(ij)} + G_k + (YG)_{ik} + (LG)_{jk} + (YLG)_{ijk} + \varepsilon_{ijkr}$$

که در آن، Y_{ijkr}: مقدار مشاهده‌شده صفت برای ژنوتیپ k در سال i، مکان j و تکرار r است. μ: میانگین کل، Y_i: اثر سال، L_j: اثر مکان، $(YL)_{ij}$: اثر سال × مکان، $R_{r(ij)}$: اثر تکرار درون ترکیب سال × مکان، G_k: اثر ژنوتیپ، $(YG)_{ik}$: اثر سال × ژنوتیپ، $(LG)_{jk}$: اثر مکان × ژنوتیپ، $(YLG)_{ijk}$: اثر سال × مکان × ژنوتیپ و ε_{ijkr}: خطای باقی‌مانده مدل است.

برای صفات اندازه‌گیری‌شده در سطح بوته شامل ارتفاع بوته، طول سنبله و تعداد دانه در سنبله از معادله ۲ استفاده شد. در این ساختار، اثر بوته درون ژنوتیپ به مدل افزوده شد تا تغییرات ناشی از نمونه‌برداری بوته‌ها درون هر ژنوتیپ در تحلیل لحاظ شود.

معادله (۲)
$$Y_{ijkrm} = \mu + Y_i + L_j + (YL)_{ij} + R_{r(ij)} + G_k + P_{m(k)} + (YG)_{ik} + (LG)_{jk} + (YP)_{im(k)} + (LP)_{jm(k)} + (YLG)_{ijk} + \varepsilon_{ijkrm}$$

که در آن، مقدار مشاهده‌شده صفت برای بوته m از ژنوتیپ k در سال i، مکان j و تکرار r است. $P_{m(k)}$: اثر بوته m درون ژنوتیپ k، $(YP)_{im(k)}$: اثر برهم‌کنش سال با بوته درون ژنوتیپ و $(LP)_{jm(k)}$: اثر برهم‌کنش مکان با بوته درون ژنوتیپ را نشان می‌دهد. سایر اجزای مدل مشابه معادله ۱ تعریف می‌شوند.

مقایسه میانگین ژنوتیپ‌ها با استفاده از آزمون بونفرونی برای مقایسه‌های چندگانه و در نسخه ۲۴ نرم افزار GenStat انجام شد (VSN International, 2022) تا خطای نوع اول در مقایسه‌های چندگانه کنترل شود. در این تحلیل، صفات عملکرد دانه، زیست‌توده و کاه، شاخص برداشت، وزن هزاردانه، تعداد پنجه بارور در مترمربع، ارتفاع بوته، طول سنبله، تعداد دانه در سنبله و انحراف معیار ارتفاع و طول سنبله مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند.

ثبات عملکرد، یکی از مهم‌ترین شاخصه‌های ارزیابی سازگاری ژنوتیپ‌ها در محیط‌های متغیر است، امّا ازآنجاکه مفهومی چندبعدی دارد، نمی‌توان آن را تنها با یک شاخص منفرد توصیف کرد. هر یک از شاخص‌های ثبات برمبنای مدل آماری و دیدگاه مفهومی خاصی تعریف شده‌اند و جنبه متفاوتی از رفتار ژنوتیپ را نسبت به تغییرات محیطی منعکس می‌کنند (Becker & Léon, 1988). ازاین‌رو، برای دستیابی به درکی جامع‌تر از ثبات عملکرد ژنوتیپ‌ها، در این پژوهش از مجموعه‌ای از شاخص‌های مکمل استفاده شد که هریک بیانگر یکی از جنبه‌های ثبات ایستا یا پویا هستند و در کنار آن از شاخص قابلیت اطمینان عملکرد نیز برای ارزیابی ریسک شکست عملکرد استفاده گردید (Döring et al., 2015).

در این پژوهش برای ارزیابی ثبات عملکرد از چهار شاخص آماری شامل برتری رقم (CS^1)، واریانس محیطی (EV^2)، شاخص اکوالانس ریک (W_i^3) و واریانس رتبه‌های ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف[4] استفاده شد. علاوه‌بر این شاخص‌ها، شاخص قابلیت اطمینان عملکرد (Ij^5) نیز به‌عنوان شاخص مکمل برای ارزیابی ریسک شکست عملکرد محاسبه گردید. منظور از محیط در این پژوهش، ترکیب سال و مکان آزمایش بود که در مجموع شامل ۱۲ محیط مختلف است.

شاخص **برتری رقم** (Lin & Binns, 1988) بیانگر نزدیکی عملکرد یک ژنوتیپ به بیشترین عملکرد در هر محیط است. این

1- Cultivar superiority
2- Environmental variance
3- Wricke's Ecovalence
4- Variance of entry ranks across environments
5- Kataoka reliability index

شاخص براساس مجموع مربعات اختلاف عملکرد هر ژنوتیپ با بیشترین عملکرد مشاهده‌شده در هر محیط و تقسیم آن بر دو برابر تعداد محیط‌ها محاسبه می‌شود. ژنوتیپ‌هایی با مقدار کمتر این شاخص، عملکردی نزدیک به بیشینه محیط‌ها دارند (Döring et al., 2015). شاخص واریانس محیطی عملکرد ژنوتیپ‌ها (Römer, 1917) معیاری از پایداری ایستا است و ژنوتیپ‌هایی را مشخص می‌کند که عملکردی یکنواخت‌تر در محیط‌های مختلف دارند. این شاخص به‌دلیل استقلال از سایر ژنوتیپ‌ها، تعمیم‌پذیری بالایی دارد (Döring et al., 2015). شاخص اکوالانس ریک (Wricke, 1962) سهم هر ژنوتیپ را در مجموع مربعات اثر متقابل ژنوتیپ × محیط نشان می‌دهد؛ مقادیر پایین‌تر بیانگر واکنش یکنواخت‌تر ژنوتیپ‌ها به تغییرات محیطی هستند. شاخص واریانس رتبه‌ای (Nassar & Hühn, 1987)، واریانس رتبه عملکرد ژنوتیپ‌ها در میان محیط‌های مختلف را اندازه‌گیری می‌کند؛ مقدار صفر نشان‌دهنده بیشترین ثبات و نوسان کمتر در رتبه‌ها است.

این چهار شاخص ثبات تنها برای صفاتی محاسبه شدند که داده‌های آن‌ها در همه ۱۲ ترکیب سال و مکان موجود بود؛ بنابراین صفات تعداد پنجه بارور در مترمربع و تعداد دانه در سنبله به‌دلیل کامل نبودن داده‌ها در همه محیط‌ها از این بخش از تحلیل حذف شدند. برای هر یک از هفت صفت باقی‌مانده، ژنوتیپ‌ها براساس مقدار هر شاخص از رتبه ۱ (باثبات‌ترین) تا رتبه ۱۶ (بی‌ثبات‌ترین) مرتب شدند و میانگین رتبه‌های حاصل از این چهار شاخص به‌عنوان معیار کلی ثبات برای هر صفت در نظر گرفته شد.

شاخص قابلیت اطمینان عملکرد نیز با استفاده از معادله ۳ محاسبه شد. این شاخص براساس میانگین و واریانس محیطی عملکرد در محیط‌های مختلف محاسبه می‌شود و کمترین عملکرد مورد انتظار هر ژنوتیپ را در یک سطح احتمال مشخص برآورد می‌کند (Kataoka, 1963). این شاخص، ترکیبی از میانگین عملکرد و واریانس محیطی است و ژنوتیپ‌هایی را شناسایی می‌کند که علاوه‌بر میانگین عملکرد بالا، احتمال شکست عملکرد کمتری دارند. در نتیجه، این شاخص، امکان ارزیابی همزمان سطح عملکرد و قابلیت اطمینان آن را فراهم کرده و ابزاری کارآمد برای انتخاب ژنوتیپ‌هایی است که علاوه‌بر میانگین عملکرد بالا، خطر شکست عملکرد کمتری را در محیط‌های متغیر دارند (Döring et al., 2015).

معادله (۳)
$$I_i = m_j - Z_{(P)} \sqrt{EV_j}$$

که در آن، m_j: میانگین عملکرد ژنوتیپ j، EV_j: واریانس محیطی ژنوتیپ j و $Z_{(P)}$: صدک توزیع نرمال استاندارد در سطح احتمال P است که بیانگر احتمال پایین‌ترین عملکرد است. در این پژوهش، مقدار P برابر با ۰/۸۵ در نظر گرفته شد و مقدار متناظر آن در توزیع نرمال استاندارد، یعنی مقدار Z، برابر با ۱/۰۳۶۴۳ است. بدین ترتیب، مقدار I_i نشان‌دهنده کمترین عملکرد مورد انتظار هر ژنوتیپ در ۸۵ درصد شرایط محیطی است. این مقدار، امکان تمایز میان شرایط شکست محصول (برای برخی ژنوتیپ‌ها با عملکرد مورد انتظار منفی) و شرایط دارای عملکرد مثبت را فراهم می‌کند.

این شاخص برای صفات عملکردی شامل عملکرد دانه، زیست‌توده و کاه و همچنین ارتفاع بوته محاسبه و گزارش شد. ارتفاع بوته نیز به‌عنوان یکی از صفات مهم در برداشت مکانیکی در نظر گرفته شد، زیرا کاهش آن در سال‌های خشک می‌تواند عملیات برداشت را دشوار کرده و میزان اتلاف محصول را افزایش دهد (Ceccarelli et al., 1996). در این بخش، رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها براساس مقدار این شاخص انجام شد؛ به‌طوری که ژنوتیپ با بیشترین مقدار این شاخص رتبه ۱ و ژنوتیپ با کمترین مقدار آن رتبه ۱۶ را دریافت کرد.

محاسبه تمامی شاخص‌های مورد استفاده برای ارزیابی ثبات عملکرد با استفاده از دستور GEstability در نسخه ۲۴ نرم‌افزار GenStat انجام شد (VSN International, 2022). این نرم‌افزار به‌دلیل توانایی بالا در تحلیل‌های چندمحیطی و محاسبه شاخص‌های مختلف ثبات و قابلیت اطمینان عملکرد انتخاب گردید و مقادیر هر شاخص برای تمامی ژنوتیپ‌ها در ۱۲ محیط آزمایشی محاسبه شد.

نتایج و بحث

همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، سه سال اجرای آزمایش با نوسانات قابل توجه بارندگی همراه بود. سال نخست، با مجموع بارندگی ۳۰۰ تا ۴۵۰ میلی‌متر در چهار مکان، نسبت به دو سال بعد شرایط مرطوب‌تری داشت، درحالی‌که دو سال پایانی خشک‌تر بودند. اگرچه دوره آزمایش کوتاه بود، امّا همین بازه توانست بخشی از نوسانات اقلیمی کوتاه‌مدتی را بازتاب دهد که زراعت گندم دیم در ایران با آن مواجه است. این موضوع به‌ویژه برای نظام‌های کشاورزی دیم اهمیت دارد، زیرا پیش‌بینی‌های اقلیمی از افزایش

فراوانی سال‌های خشک و تشدید نوسانات بارندگی حکایت دارند (Lobell et al., 2011)و مطالعات شبیه‌سازی عملکرد نیز کاهش قابل توجه عملکرد محصولات زراعی را در سناریوهای مختلف تغییر اقلیم گزارش کرده‌اند (Rezaei et al., 2023).

نتایج آزمون F حاصل از مدل آمیخته خطی نشان داد که در هر دو مقیاس اندازه‌گیری یعنی صفات سطح کرت (جدول ۳) و صفات سطح بوته (جدول ۴)، برهم‌کنش سال × مکان برای همه صفات معنی‌دار بود؛ بنابراین ترکیب‌های مختلف سال و مکان، محیط‌های آزمون متفاوتی را برای رشد، عملکرد و بیان صفات مورفولوژیک گندم ایجاد کردند. در صفات سطح کرت، اثر اصلی ژنوتیپ برای بیشتر صفات عملکردی از جمله عملکرد دانه، عملکرد زیست‌توده، عملکرد کاه، وزن هزار دانه و تعداد پنجه بارور معنی‌دار نشد و تنها شاخص برداشت تفاوت معنی‌دار ژنوتیپی نشان داد. بااین‌حال، معنی‌داری برهم‌کنش مکان × ژنوتیپ برای عملکرد دانه و برهم‌کنش سه‌گانه سال × مکان × ژنوتیپ برای بیشتر صفات سطح کرت نشان می‌دهد که تفاوت میان ژنوتیپ‌ها در قالب یک اثر ثابت و یکنواخت در همه محیط‌ها ظاهر نشده، بلکه به شرایط خاص هر محیط وابسته بوده است. در صفات سطح بوته نیز اثر سال بر ارتفاع بوته و تعداد دانه در سنبله، و اثر مکان بر طول سنبله و تعداد دانه در سنبله معنی‌دار شد. همچنین اثر ژنوتیپ بر طول سنبله و تعداد دانه در سنبله بسیار معنی‌دار بود، امّا بر ارتفاع بوته معنی‌دار نشد. برهم‌کنش‌های سال × ژنوتیپ و مکان × ژنوتیپ برای طول سنبله و تعداد دانه در سنبله معنی‌دار شدند، درحالی‌که برهم‌کنش سه‌گانه سال × مکان × ژنوتیپ فقط برای ارتفاع بوته معنی‌دار بود.

معنی‌دار نشدن اثر اصلی ژنوتیپ برای بیشتر صفات عملکردی سطح کرت، هم‌زمان با معنی‌داری برهم‌کنش مکان × ژنوتیپ برای عملکرد دانه و برهم‌کنش سال × مکان × ژنوتیپ برای بیشتر صفات سطح کرت نشان می‌دهد که تفاوت میان ژنوتیپ‌ها بیش از آنکه به‌صورت برتری ثابت و یکنواخت در همه محیط‌ها ظاهر شود، در پاسخ متفاوت آن‌ها به ترکیب‌های خاص سال—مکان و محیط‌های انتخابی متغیر بروز کرده است. این الگو برای تفسیر جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا این مواد برخلاف ارقام یکنواخت، از اجزای ژنتیکی متفاوت تشکیل شده‌اند و ارزش آن‌ها تنها در برتری میانگین عملکرد در همه محیط‌ها خلاصه نمی‌شود، بلکه در توان پاسخ به فشارهای انتخابی متغیر، حفظ تنوع درون‌جمعیتی، کاهش ریسک عملکرد و سازگاری تدریجی با محیط‌های محلی معنا پیدا می‌کند (Ceccarelli & Grando, 2007; Raggi et al., 2017). در چنین موادی، تنوع درون‌جمعیتی می‌تواند از طریق ظرفیت بافری ژنتیکی، بخشی از نوسانات عملکرد را تعدیل کند؛ به این معنا که افت عملکرد برخی اجزای حساس‌تر در یک محیط خاص، ممکن است تا حدی با عملکرد بهتر اجزای سازگارتر همان جمعیت جبران شود و در نتیجه تفاوت‌های عملکردی در سطح کرت ممکن است کمتر از تفاوت‌های موجود در صفات ساختاری، زایشی یا اجزای عملکرد آشکار گردد (Allard & Bradshaw, 1964; Allard & Hansche, 1964).

بررسی نتایج میانگین صفات زراعی و ریخت‌شناسی ژنوتیپ‌های مورد استفاده در این آزمایش (جدول ۵) نشان می‌دهد که میانگین عملکرد دانه، زیست‌توده و کاه بین ژنوتیپ‌ها اختلاف معنی‌دار نداشت، امّا دامنه تفاوت بین بیشترین و کمترین مقادیر مشاهده‌شده به‌ترتیب حدود ۴۰ درصد برای عملکرد دانه، ۳۲ درصد برای زیست‌توده و ۳۳ درصد برای کاه بود. بالاترین میانگین عملکرد دانه مربوط به جمعیت تکاملی پرتویی بود و آذر۲ در بین ارقام اصلاح‌شده بالاترین میانگین را داشت؛ عملکرد دانه جمعیت تکاملی پرتویی نیز حدود ۲۸ درصد بیشتر از آذر ۲ بود. از نظر شاخص برداشت، بین ژنوتیپ‌ها اختلاف معنی‌دار مشاهده شد، هرچند مقادیر این شاخص به‌طور کلی پایین بود که احتمالاً ناشی از خشکسالی شدید در دو سال پایانی آزمایش است. در بین ژنوتیپ‌ها، مخلوط پویا ۴۰۹۶ بالاترین شاخص برداشت را داشت که تنها نسبت به مخلوط پویا دوروم به‌طور معنی‌داری بیشتر بود. مقادیر وزن هزار دانه در این آزمایش پایین بود که احتمالاً بازتاب تنش خشکی، به‌ویژه در دوره پُرشدن دانه است. در بین ژنوتیپ‌ها، مخلوط پویا ۴۰۹۶ بیشترین وزن هزار دانه را به خود اختصاص داد و با بیشتر جمعیت‌های تکاملی و ارقام بومی و اصلاح‌شده تفاوت معنی‌داری نشان نداد؛ بااین‌حال وزن هزار دانه آن به‌طور معنی‌داری بیشتر از جمعیت تکاملی رستمی، مخلوط پویا ۱۰۰۹۶ و مخلوط پویا دوروم بود. بااین‌حال، تفاوت معنی‌داری بین جمعیت تکاملی سیفی و جمعیت تکاملی پرتویی از یک سو و جمعیت تکاملی رستمی (با منشأ مشابه امّا محیط متفاوت) از سوی دیگر مشاهده شد.

جدول ۳- نتایج آزمون F حاصل از مدل آمیخته برای صفات اندازه‌گیری‌شده ژنوتیپ‌های دیم در سطح کرت

Table 3- F-test results from the mixed model for wheat genotypes in plot-level traits

منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	عملکرد دانه Grain yield	عملکرد بیولوژیک Biomass yield	عملکرد کاه Straw yield	شاخص برداشت Harvest index	وزن هزار دانه Thousand-kernel weight	تعداد پنجه بارور Fertile tillers	انحراف معیار ارتفاع بوته Standard deviation of plant height	انحراف معیار طول سنبله Standard deviation of spike length
سال Year	2	0.75	6.44*	17.30**	0.98	0.30	2.66	2.84	4.41
مکان Location	3	1.12	0.93	1.67	1.92	0.72	0.84	1.27x	4.77*x
مکان×سال Year × location	6	104.73***	65.53***	23.29***	31.55***	29.18***	45.92***	20.39***	5.22**
تکرار درون ترکیب سال × مکان REP (year, location)	25	2.39***	2.42***	3.98***	1.99**	—	—	—	—
ژنوتیپ Entry (genotype)	15	1.92	1.08	1.26	2.63*	1.81	1.34	1.30	0.89
ژنوتیپ×سال Year × entry	30	0.95	1.02	0.94	1.02	0.78	1.00	1.27	1.14
ژنوتیپ×مکان Location × entry	45	1.52*	0.75	1.12	0.87	0.92	1.08	1.10	1.39
ژنوتیپ × مکان×سال Year × location × entry	90	1.84***	1.34*	1.50**	2.06***	3.70***	4.10***	1.47**	1.28

علامت‌های *، ** و ***: به‌ترتیب نشان‌دهنده معنی‌داری در سطوح $P < 0.05$، $P < 0.01$ و $P < 0.001$ هستند.

*: P <0.05; **: P <0.01; ***: P <0.001

جدول ٤- نتایج آزمون F حاصل از مدل آمیخته برای صفات اندازه‌گیری‌شده ژنوتیپ‌های گندم در سطح بوته

Table 4- F-test results from the mixed model for wheat genotypes in plant-level traits

منبع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	ارتفاع بوته Plant height	طول سنبله Spike length	تعداد دانه در سنبله Kernel number per spike
سال Year	2	6.42*	2.71	8.11*
مکان Location	3	2.19	4.83*	5.10*
مکان×سال Year × location	6	94.44***	46.60***	42.55***
تکرار درون ترکیب سال × مکان REP (year, location)	25	–	–	–
ژنوتیپ Entry (genotype)	15	1.23	5.69***	6.00***
بوته درون ژنوتیپ Plant (entry)	304	–	–	–
ژنوتیپ×سال Year × entry	30	1.44	2.39***	7.04***
ژنوتیپ×مکان Location × entry	45	1.19	2.59***	4.71***
بوته درون ژنوتیپ×سال Year × plant (entry)	608	1.33***	–	–
بوته درون ژنوتیپ×مکان Location × plant (entry)	912	1.51***	–	–
ژنوتیپ × مکان×سال Year × location × entry	90	4.64***	1.11	1.24

علامت‌های *، ** و ***: به‌ترتیب نشان‌دهنده معنی‌داری در سطوح $P < 0.05$، $P < 0.01$ و $P < 0.001$ هستند.

*: P<0.05; **: P<0.01; ***: P<0.001.

برای صفات ارتفاع بوته و طول سنبله نیز بین ژنوتیپ‌ها تفاوت‌های معنی‌داری وجود داشت (جدول ۵)، هرچند دامنه اختلاف زیاد نبود. دو جمعیت تکاملی شراره و جمعیت تکاملی رستمی و مخلوط پویا ۴۰۹۶ به‌طور معنی‌داری بلندتر از دو رقم بومی سرداری و کل حیدری، دو رقم اصلاح‌شده آذر۲ و چمران ۲ و مخلوط پویا کشکولی بودند. در بین ژنوتیپ‌ها، رقم کل حیدری بیشترین طول سنبله را داشت که به‌طور معنی‌دار از چمران۲، سرداری، جمعیت تکاملی پرتویی و مخلوط پویا دوروم بلندتر بود. با وجود طول زیاد سنبله در کل حیدری؛ تعداد دانه در آن کمتر از سایر ژنوتیپ‌ها بود و این تفاوت احتمالاً به‌دلیل سنبله‌های باز و کم‌تراکم این رقم است. دو مخلوط با منشأ مشابه، یعنی مخلوط پویا کشکولی و نیک‌فرجام نیز از نظر تعداد دانه در سنبله تفاوت معنی‌داری نشان دادند. در این بین، مخلوط پویا ۱۰۰۹۶ بیشترین تعداد دانه در سنبله را داشت و از نظر آماری به‌طور معناداری بیشتر از آذر۲ و سرداری بود. در بین دو شاخص مربوط به تنوع فنوتیپی درون کرت (براساس انحراف معیار ارتفاع بوته و انحراف معیار طول سنبله)، تنها شاخص مبتنی بر ارتفاع بوته بین ژنوتیپ‌ها اختلاف معنی‌دار نشان داد. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، دو رقم اصلاحی (آذر۲ و چمران ۲) یکنواخت‌ترین جمعیت‌ها بودند، هرچند با برخی از جمعیت‌های تکاملی و مخلوط تفاوت معنی‌دار نداشتند. در مقابل، جمعیت و مخلوط‌هایی مانند جمعیت تکاملی رستمی، مخلوط پویا ۱۰۰۹۶، مخلوط پویا سرارود، مخلوط پویا ۶۰۹۷ و مخلوط پویا ۶۰۹۳ دارای تنوع فنوتیپی درون کرت بیشتری بودند.

در مجموع، اگرچه میانگین عملکرد دانه، زیست‌توده و کاه میان ژنوتیپ‌ها تفاوت معنی‌داری نشان نداد، نتایج جدول ۵ بیانگر آن است که ارزیابی جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا نباید فقط بر میانگین عملکرد متکی باشد. در چارچوب به‌نژادی تکاملی، موفقیت یک جمعیت بیش از آنکه صرفاً با بیشینه‌سازی عملکرد تعریف شود، با توان آن در حفظ عملکرد پایدار، پاسخ به شرایط متغیر، کاهش ریسک و حفظ تنوع ژنتیکی درون‌جمعیتی سنجیده می‌شود (Merrick et

(Ceccarelli & Grando, 2020 ;al., 2020) و پذیرش یا رد یک جمعیت زراعی ناهمگن معمولاً برپایه مجموعه‌ای از معیارها و فراتر از میانگین عملکرد صورت می‌گیرد (Salimi et al., 2023). بنابراین رسیدن عملکرد یک جمعیت تکاملی یا مخلوط پویا به سطح ارقام اصلاح‌شده، حتی در نبود تفاوت معنی‌دار، می‌تواند از نظر اصلاحی و اگرواکولوژیک مهم باشد؛ زیرا چنین موادی علاوه‌بر عملکرد قابل مقایسه، می‌توانند از مزایای تنوع ژنتیکی از جمله ثبات عملکرد (Borg et al., 2018)، مقاومت بهتر به آفات و بیماری‌ها (Murphy et al., 2004)، سازگاری بیشتر با تغییر اقلیم (Ceccarelli & Grando, 2020) و توانایی بالاتر در رقابت با علف‌های هرز (Ceccarelli & Grando, 2024) نیز برخوردار باشند.

تحلیل شاخص‌های چندگانه ثبات (جدول ۶) برای هفت صفت زراعی در طول سه سال آزمایش و در بین ۱۶ ژنوتیپ نشان داد که ثبات ژنوتیپ‌ها به صفت مورد ارزیابی وابسته است، به‌گونه‌ای که هر ژنوتیپ می‌تواند برای یک صفت بسیار باثبات و برای صفتی دیگر بی‌ثبات باشد. لازم به ذکر است که در این جدول، رتبه‌ها براساس مقادیر نسبی صفات و شاخص‌های ثبات محاسبه شده‌اند و وابسته به معنی‌داری آماری تفاوت میانگین‌ها نیستند. ازاین‌رو حتی در مواردی که اختلاف معنی‌داری بین ژنوتیپ‌ها مشاهده نشده است، رتبه‌ها برای امکان مقایسه نسبی ژنوتیپ‌ها و ترکیب چند شاخص در رتبه‌بندی نهایی محاسبه شده‌اند (Nassar & Hühn, 1987).

بر همین اساس، مخلوط پویا ۶۰۹۷، برای عملکرد دانه رتبه نخست ثبات را داشت، امّا برای طول سنبله در رتبه پایین‌تری قرار گرفت. بااین‌حال، ارزیابی کلی برپایه میانگین رتبه‌ها نشان داد که هفت ژنوتیپ شامل مخلوط پویا ۶۰۹۷، مخلوط پویا دوروم، جمعیت تکاملی شراره، مخلوط پویا کشکولی، مخلوط پویا نیک‌فرجام، مخلوط پویا سرارود و مخلوط پویا ۶۰۹۳، در مقایسه با ارقام شاهد بومی و اصلاح‌شده، ثبات بالاتری را در مجموعه صفات زراعی مورد بررسی نشان دادند. این نتیجه با شواهد گسترده‌ای که تنوع ژنتیکی درون محصولی را یکی از مؤثرترین راهبردها برای تثبیت عملکرد در شرایط پُرتنش معرفی می‌کند، هم‌خوانی دارد (Döring et al., 2015). آلارد و برادشاو (Allard & Bradshaw, 1964) و آلارد و هانش (Allard & Hansche, 1964) از نخستین پژوهشگرانی بودند که نشان دادند جمعیت‌های ناهمگن، به‌واسطه ظرفیت بافری بالاتر، واکنش باثبات‌تری نسبت به تغییرات محیطی از خود نشان می‌دهند.

در مقابل، سه جمعیت تکاملی پرتویی، سیفی و رستمی که همگی از یک جمعیت پایه واحد منشأ گرفته بودند، در رتبه‌بندی کلی شاخص‌های ثبات در زمره ژنوتیپ‌های بی‌ثبات قرار گرفتند. تبیین این الگو مستلزم توجه دقیق به تاریخچه کشت و پیشینه تکاملی این جمعیت‌ها است (جدول ۲). این جمعیت‌های تکاملی طی حدود یک دهه در مزارع و محیط‌های مشخص، تحت فشار انتخاب طبیعی مداوم و شرایط اقلیمی و محیطی متفاوتی قرار داشته‌اند. چنین فرآیندی می‌تواند به شکل‌گیری سازگاری محلی و اختصاصی منجر شود؛ به‌گونه‌ای که جمعیت‌ها به‌تدریج برای شرایط محیطی محل کشت اولیه خود بهینه شده و دامنه پاسخ ژنتیکی آن‌ها در مواجهه با محیط‌های جدید یا متفاوت محدود گردد. در نتیجه، این جمعیت‌ها علی‌رغم برخورداری از تنوع درون‌گونه‌ای، در محیط‌های آزمایشی حاضر نتوانسته‌اند که الگوی ثبات مطلوبی از خود نشان دهند. هم‌سویی این الگو با نتایج شاخص قابلیت اطمینان (جدول ۷)، که برای برخی از این ژنوتیپ‌ها حداقل عملکرد تضمین‌شده پایین‌تری را نشان می‌دهد، از این تفسیر پشتیبانی می‌کند. در این زمینه، چکرلی و گراندو (Ceccarelli & Grando, 2020) بیان می‌کنند که جمعیت‌های تکاملی در اثر انتخاب طبیعی مداوم در محل کشت، به‌صورت تدریجی به شرایط همان محیط خاص پاسخ داده و مسیر تکاملی آن‌ها به‌طور فزاینده‌ای تحت تأثیر فشارهای انتخابی محلی قرار می‌گیرد. همچنین مریک و همکاران (Merrick et al., 2020) نشان دادند که در توده‌های دارای تنوع درون‌گونه‌ای، عواملی نظیر سابقه کشت طولانی‌مدت در یک محیط مشخص و غلبه انتخاب جهت‌دار در یک دامنه تنش معین، می‌تواند منجر به کاهش دامنه پاسخ ژنتیکی به محیط‌های جدید شده و در نهایت به ثبات کلی پایین‌تر در مقیاس چند مکانی بینجامد.

مقایسه نتایج جدول ۵ و جدول ۷ نشان می‌دهد که رتبه‌بندی براساس میانگین عملکرد لزوماً با رتبه‌بندی براساس ریسک عملکرد هم‌راستا نیست و برخی ژنوتیپ‌ها با وجود میانگین‌های نسبتاً بالا، در برخی محیط‌ها عملکرد پایین‌تری نشان می‌دهند. شاخص قابلیت اطمینان (جدول ۷) که ریسک عملکرد ژنوتیپ‌ها را براساس سطح عملکردی که در ۸۵ درصد محیط‌ها قابل دستیابی است برآورد می‌کند، تمایز روشنی میان ژنوتیپ‌ها از نظر ریسک عملکرد نشان می‌دهد.

جدول ۵- میانگین صفات زراعی و ریخت‌شناسی در ۱۶ ژنوتیپ گندم در سال‌ها و مکان‌های مختلف

Table 5- Averaged over years and locations of agronomic and morphological traits in sixteen wheat genotypes

نام ژنوتیپ Name of entry	عملکرد دانه Grain yield (kg.ha^{-1})	عملکرد زیست‌توده Biomass yield (kg.ha^{-1})	عملکرد کاه Straw yield (kg.ha^{-1})	شاخص برداشت Harvest index (%)	وزن هزار دانه Thousand- kernel weight (g)	تعداد پنجه بارور Number of fertile tillers (number m^{-2})	ارتفاع بوته Plant height (cm)	طول سنبله Spike length (cm)	تعداد دانه در سنبله Kernel number per spike (number m^{-2})	انحراف معیار ارتفاع بوته Standard deviation of plant height	انحراف معیار طول سنبله Standard deviation of spike length
مخلوط پویا-۶۰۹۷ MIX-6097	1156	4340	3183	28 ab*	39.4 abc	431	72.2 ab	7.2 abc	19.3 abcd	8.959 ab	1.860
مخلوط پویا-۶۰۹۳ MIX-6093	1201	4570	3368	28 ab	39.3 abc	422	72.4 ab	7.2 abc	20.8 ab	8.808 ab	1.392
مخلوط پویا-سرآرود Mix-Sararood	1027	4384	3357	23 ab	37.4 abcd	444	72.0 abc	7.2 abc	20.0 abc	8.977 ab	1.892
مخلوط پویا-۴۰۹۶ MIX-4096	1238	4296	3058	31 a	40.9 a	439	73.0 a	7.1 abc	19.4 abcd	8.303 ab	1.448
جمعیت تکاملی پرتویی EP-Partoee	1412	5288	3875	26 ab	40.0 ab	418	71.7 abc	6.9 c	19.6 abcd	8.126 ab	1.259
مخلوط پویا کشکولی MIX-Kashkooli	1094	4000	2907	27 ab	39.7 ab	486	70.0 cd	7.2 abc	16.7 ef	8.415 ab	1.415
مخلوط پویا نیک‌فرجام MIX-Nikfarjam	1396	4677	3278	26 ab	39.3 abcd	474	72.0 abc	7.1 abc	18.1 de	8.689 ab	1.328
جمعیت تکاملی رستمی EP-Rostami	1160	4549	3412	24 ab	35.0 d	417	72.7 a	7.3 ab	19.4 abcd	9.367 a	1.552
جمعیت تکاملی سیفی EP-Seyfi	1127	4630	3502	24 ab	40.0 ab	474	71.6 abc	7.1 abc	18.3 cde	8.193 ab	1.699
کل حیدری Kal Heydari	1092	4264	3170	26 ab	39.7 ab	489	68.8 d	7.4 a	15.4 f	7.916 ab	1.442
سرداری Sardari	1217	4487	3268	29 ab	39.8 ab	458	70.5 bcd	6.9 bc	18.4 cde	8.126 ab	1.363
آذر ۲ Azar 2	1099	4183	3107	27 ab	39.7 ab	435	70.2 bcd	7.0 abc	19.2 bcd	7.323 b	1.523
چمران ۲ Chamran2	1014	4011	2997	27 ab	39.1 abcd	421	68.8 d	6.9 bc	19.8 abcd	7.575 ab	1.308
مخلوط پویا-۱۰۰۹۶ MIX-10096	1071	4200	3128	25 ab	35.3 cd	371	71.9 abc	7.2 abc	21.2 a	9.362 a	1.565
مخلوط پویا-دوروم MIX-Durum	1008	4401	3392	23 b	36.4 bcd	414	72.4 ab	6.3 d	19.6 abcd	7.931 ab	1.450
جمعیت تکاملی شراره EP-Sharareh	1186	4298	3111	28 ab	39.35 abc	377	72.9 a	7.3 ab	20.6 ab	7.931 ab	1.429
ضریب تغییرات C.V. (%)	66.56	40.6	47.74	35.56	12.88	34.01	15.13	29.95	41.36	28.17	90.55

* میانگین‌هایی که دارای حرف(های) مشترک هستند، براساس آزمون چندگانه بونفرونی در سطح احتمال ۰/۰۵ از نظر آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

* Means followed by the same letter(s) are not significantly different based on Bonferroni test for multiple comparisons at p = 0.05.

جدول ٦- طبقه‌بندی ١٦ ژنوتیپ گندم (شامل ١٢ جمعیت تکاملی و مخلوط پویا، دو رقم بومی و دو رقم اصلاح‌شده) براساس میانگین رتبه در پنج شاخص ثبات (شاخص برتری رقم، واریانس محیطی، ضریب اکوالانس ریک، میانگین رتبه‌ها و واریانس رتبه‌ها) برای برخی صفات زراعی گندم

Table 6- Classification of 16 entries (twelve evolutionary populations, two landraces and two improved varieties) according to the mean ranking for five stability indices (cultivar superiority, environmental variance, Wricke's ecovalence, mean ranks and variance of ranks), calculated for some agronomic traits of wheat

نام ژنوتیپ Name of entry	عملکرد دانه Grain yield	عملکرد زیست‌توده Biomass yield	عملکرد کاه Straw yield (SY)	شاخص برداشت Harvest index	وزن هزار دانه Thousand kernel weight	ارتفاع بوته Plant height	طول سنبله Spike length	میانگین Average	رتبه‌بندی کلی Overall ranking
مخلوط پویا-۶۰۹۷ MIX-6097	1	2	6	2	2	3	14	4.29	1
مخلوط پویا-۶۰۹۳ MIX-6093	4	13	12	3	3	14	7	8.00	7
مخلوط پویا-سرارود Mix-Sararood	10	4	7	10	8	7	8	7.71	6
مخلوط پویا-۴۰۹۶ MIX-4096	14	16	14	5	5	6	6	9.43	12
جمعیت تکاملی پرتویی EP-Partoee	13	10	9	8	13	10	11	10.57	15
مخلوط پویا کشکولی MIX-Kashkooli	7	14	11	1	4	11	5	7.57	4
مخلوط پویا نیک‌فرجام MIX-Nikfarjam	11	5	3	4	10	5	15	7.57	5
جمعیت تکاملی رستمی EP-Rostami	16	11	1	14	16	4	3	9.29	11
جمعیت تکاملی سیفی EP-Seyfi	6	6	8	15	14	15	4	9.71	13
کل حیدری Kal Heydari	12	8	10	11	15	8	1	9.29	10
سرداری Sardari	3	7	5	9	12	13	12	8.71	9
آذر ۲ Azar 2	15	3	2	6	1	16	13	8.00	8
چمران ۲ Chamran2	9	15	15	16	11	9	16	13.00	16
مخلوط پویا-۱۰۰۹۶ MIX-10096	5	9	16	13	6	12	10	10.14	14
مخلوط پویا-دوروم MIX-Durum	8	1	4	12	7	2	9	6.14	2
جمعیت تکاملی شراره EP-Sharareh	2	12	13	7	9	1	2	6.57	3

براساس نتایج این جدول، شاخص قابلیت اطمینان عملکرد دانه در جمعیت تکاملی شراره و مخلوط پویا ۴۰۹۶ بالاتر از رقم بومی سرداری بوده و مخلوط‌های پویا ۶۰۹۷، سرارود و ۶۰۹۳ نیز مقادیر بالاتری نسبت به رقم اصلاح‌شده آذر۲ نشان دادند. این نتیجه نشان می‌دهد که برخی مواد ناهمگن، حتی در صورت نداشتن برتری معنی‌دار در میانگین عملکرد، از نظر کاهش ریسک عملکرد نسبت به شاهدهای رایج وضعیت مطلوب‌تری داشتند.

جمعیت تکاملی شراره در اغلب صفات بررسی‌شده از حداقل عملکرد تضمین‌شده بالاتری نسبت به ارقام شاهد بومی و اصلاح‌شده برخوردار بوده و در نتیجه، ریسک شکست عملکرد آن در دامنه نوسانات محیطی کمتر است، الگویی که با مفهوم کاهش ریسک عملکرد از طریق افزایش حداقل عملکرد تضمین‌شده در توده‌های متنوع ژنتیکی هم‌خوانی دارد (Döring et al., 2015). این جمعیت از نظر قابلیت اطمینان عملکرد دانه و ارتفاع بوته بالاترین مقادیر را به خود اختصاص داد و از نظر قابلیت اطمینان عملکرد بیولوژیک نیز بهتر از تمامی ارقام شاهد عمل کرد؛ همچنین از نظر عملکرد کاه در سطح قابل قبولی قرار داشت. در صفت ارتفاع بوته، که در شرایط دیم و به‌ویژه در سال‌های خشک اهمیت کاربردی دارد، جمعیت تکاملی شراره بیشترین قابلیت اطمینان را نشان داد، درحالی‌که ارقام اصلاح‌شده آذر۲ و چمران۲ کمترین مقادیر این شاخص را به خود اختصاص دادند. افزون‌بر این، مخلوط‌های پویا سرارود، ۶۰۹۷ و دوروم نیز در اغلب صفات، سطوح مناسبی از قابلیت اطمینان عملکرد را نشان دادند.

در مقابل، مخلوط پویا نیک‌فرجام و جمعیت‌های تکاملی پرتویی و رستمی کمترین مقادیر شاخص قابلیت اطمینان عملکرد دانه را به خود اختصاص دادند؛ به‌گونه‌ای که در جمعیت تکاملی رستمی، در سطح احتمال انتخاب‌شده، حتی احتمال بروز عملکرد بسیار پایین و شکست محصول نیز وجود دارد. این الگو می‌تواند ناشی از سابقه کشت طولانی‌مدت این جمعیت در یک محیط خاص و پُرتنش و غلبه انتخاب جهت‌دار باشد که به تقویت سازگاری خصوصی و کاهش توان پاسخ در محیط‌های جدید منجر شده است (Ceccarelli & Grando,2020).

بررسی ژنوتیپ‌هایی با منشأ مشترک نشان داد که این مواد از نظر قابلیت اطمینان عملکرد رفتار یکنواختی ندارند؛ به‌طوری که شاخص قابلیت اطمینان عملکرد دانه در مخلوط پویا کشکولی تقریباً چهار برابر بیشتر از مخلوط پویا نیک‌فرجام بود. همچنین در بین جمعیت‌های تکاملی هم‌منشأ، جمعیت تکاملی پرتویی از نظر قابلیت اطمینان عملکرد کاه ضعیف‌تر از جمعیت‌های تکاملی رستمی و سیفی ظاهر شد، درحالی‌که جمعیت تکاملی سیفی از نظر قابلیت اطمینان عملکرد دانه وضعیت بهتری نسبت به دو جمعیت دیگر نشان داد. بروز این تفاوت‌ها، علی‌رغم منشأ ژنتیکی مشابه، می‌تواند بازتاب شرایط اقلیمی، محیطی و مدیریتی متفاوتی باشد که این جمعیت‌ها و مخلوط‌ها پیش از آغاز این مطالعه در آن‌ها تکامل یافته‌اند، این نتیجه‌گیری با اطلاعات منشأ و تاریخچه کشت ژنوتیپ‌ها (جدول ۲) هم‌خوانی دارد و با نقش فشارهای انتخابی محلی در شکل‌دهی سازگاری خصوصی و محدود شدن دامنه پاسخ در محیط‌های جدید قابل تبیین است (Ceccarelli & Grando,2020; Merrick et al., 2020).

در چارچوب تفسیر نتایج به‌دست‌آمده، این الگو نشان می‌دهد که به‌نژادی تکاملی نه یک مسیر خطی به‌سوی بیشینه‌سازی عملکرد، بلکه نوعی راهبرد پویا برای مدیریت ریسک، حفظ عملکرد حداقلی و افزایش تاب‌آوری در شرایط عدم قطعیت اقلیمی است. هم‌زمان، هم‌گرایی الگوی حاصل از شاخص‌های چندگانه ثبات و شاخص قابلیت اطمینان عملکرد نشان داد که شماری از ژنوتیپ‌های ناهمگن، به‌ویژه جمعیت تکاملی شراره و مخلوط‌های پویا ۶۰۹۷ و ۴۰۹۶، در مقایسه با توده شاهد بومی و ارقام اصلاح‌شده، عملکرد باثبات‌تر و ریسک شکست کمتری را در دامنه نوسانات محیطی نشان دادند. این برتری نسبی نه به‌معنای افزایش یکنواخت میانگین عملکرد، بلکه بیانگر توان بالاتر این مواد ژنتیکی در حفظ حداقل عملکرد قابل اتکا و پاسخ انعطاف‌پذیر به تغییرپذیری محیطی است. از منظر تاریخچه تکاملی نیز عملکرد مطلوب‌تر این جمعیت‌ها/مخلوط‌ها می‌تواند تا حدی با این واقعیت تبیین شود که هرچند این جمعیت‌ها/مخلوط‌ها پیش از آغاز آزمایش حاضر ایجاد شده بودند، امّا برخلاف برخی جمعیت‌های هم‌منشأ که برای دوره‌های طولانی در محیط‌های خاص و تحت فشار انتخاب طبیعی مداوم قرار داشته‌اند، کمتر در معرض مسیرهای تکاملی محدودکننده ناشی از سازگاری اختصاصی و غلبه انتخاب جهت‌دار بوده‌اند؛ در نتیجه، ظرفیت پاسخ تطبیقی آن‌ها در مواجهه با مجموعه‌ای متنوع از شرایط محیطی حفظ شده و به بروز الگوی ثبات و قابلیت اطمینان بالاتر در مقیاس چند مکانی منجر شده است.

جدول ۷- شاخص قابلیت اطمینان عملکرد برای صفات عملکردی و ارتفاع بوته در ۱۶ ژنوتیپ گندم

Table 7- Yield reliability index for yield-related traits and plant height in sixteen wheat genotypes

نام ژنوتیپ Name of entry	عملکرد دانه Grain yield	عملکرد زیست‌توده Biomass yield	عملکرد کاه Straw yield	ارتفاع بوته Plant height
مخلوط پویا-۶۰۹۷ MIX-6097	316.80 (6)	1380.17 (7)	755.76 (10)	46.36 (4)
مخلوط پویا-۶۰۹۳ MIX-6093	323.59 (5)	1257.06 (12)	668.37 (11)	45.00 (12)
مخلوط پویا-سرارود Mix-Sararood	337.89 (4)	1852.92 (1)	775.43 (8)	46.33 (5)
مخلوط پویا-۴۰۹۶ MIX-4096	373.00 (2)	1183.56 (14)	646.40 (12)	45.56 (9)
جمعیت تکاملی پرتویی EP-Partoee	0.69 (15)	699.75 (16)	622.90 (15)	45.73 (7)
مخلوط پویا کشکولی MIX-Kashkooli	289.36 (9)	1518.41 (4)	570.99 (16)	45.95 (6)
مخلوط پویا نیک‌فرجام MIX-Nikfarjam	65.38 (14)	1316.00 (10)	763.34 (9)	45.24 (10)
جمعیت تکاملی رستمی EP-Rostami	-38.99 (16)	1320.09 (8)	847.08 (2)	46.49 (3)
جمعیت تکاملی سیفی EP-Seyfi	249.85 (11)	1289.63 (11)	810.52 (6)	44.50 (13)
کل حیدری Kal Heydari	294.45 (8)	1125.84 (15)	641.73 (14)	44.47 (14)
سرداری Sardari	371.08 (3)	1319.98 (9)	837.22 (3)	45.04 (11)
آذر ۲ Azar 2	297.56 (7)	1223.91 (13)	777.94 (7)	43.36 (15)
چمران ۲ Chamran2	279.21 (10)	1408.25 (6)	893.49 (1)	42.87 (16)
مخلوط پویا-۱۰۰۹۶ MIX-10096	247.67 (12)	1848.20 (2)	643.06 (13)	45.59 (8)
مخلوط پویا-دوروم MIX-Durum	205.15 (13)	1792.67 (3)	813.83 (5)	47.35 (2)
جمعیت تکاملی شراره EP-Sharareh	400.53 (1)	1458.17 (5)	814.28 (4)	48.38 (1)

* اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده رتبه ژنوتیپ‌ها براساس شاخص قابلیت اطمینان هستند و رتبه کمتر بیانگر قابلیت اطمینان بیشتر است. اعداد خارج از پرانتز مقدار شاخص قابلیت اطمینان را نشان می‌دهند؛ این مقادیر برای صفات عملکردی با واحد کیلوگرم در هکتار و برای ارتفاع بوته با واحد سانتی‌متر بیان شده‌اند.

*** Numbers in parentheses indicate the ranking of genotypes based on the reliability index, where a lower rank represents higher reliability. Values outside the parentheses represent the reliability index values; these are expressed in kilograms per hectare for yield traits and in centimeters for plant height.**

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که برخی از جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا، به‌واسطه تنوع ژنتیکی درون‌گونه‌ای، می‌توانند از ظرفیت مناسبی برای حفظ عملکرد، کاهش ریسک شکست محصول و بروز ثبات نسبی در شرایط دیم و پُرتنش برخوردار باشند. مقایسه این مواد ژنتیکی با ارقام یکنواخت اصلاح‌شده و برخی ارقام بومی نشان داد که مزیت اصلی آن‌ها الزاماً در افزایش میانگین عملکرد ظاهر نمی‌شود، بلکه بیشتر در ثبات عملکرد و بهبود حداقل عملکرد قابل اتکا در دامنه نوسانات محیطی نمود پیدا می‌کند. در بین ژنوتیپ‌ها، جمعیت تکاملی پرتویی با میانگین ۱۴۱۲ کیلوگرم در هکتار

بیشترین میانگین عددی عملکرد دانه و همچنین بیشترین عملکرد زیست‌توده و کاه را داشت، هرچند اختلاف عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها معنی‌دار نبود. مخلوط پویا ۴۰۹۶ نیز بیشترین شاخص برداشت و وزن هزار دانه و مخلوط پویا ۱۰۰۹۶ بیشترین تعداد دانه در سنبله را به خود اختصاص دادند. براساس میانگین رتبه حاصل از پنج شاخص ثبات، مخلوط پویا ۶۰۹۷ رتبه نخست ثبات عملکرد دانه و ثبات کلی صفات را به دست آورد و جمعیت تکاملی شراره از نظر ثبات عملکرد دانه در رتبه دوم قرار گرفت. همچنین براساس شاخص قابلیت اطمینان در سطح احتمال ۸۵ درصد، شراره با مقدار ۴۰۰/۵۳ کیلوگرم در هکتار بالاترین حداقل عملکرد قابل اتکای دانه و مخلوط پویا ۴۰۹۶ با مقدار ۳۷۳ کیلوگرم در هکتار رتبه دوم را داشت. این نتایج نشان داد که بیشترین میانگین عملکرد الزاماً با بیشترین ثبات و قابلیت اطمینان همراه نیست. نتایج همچنین نشان داد که ثبات و دامنه سازگاری جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا تحت تأثیر ساختار ژنتیکی درونی و تاریخچه فشارهای انتخاب (طبیعی و مدیریتی) قرار می‌گیرد. ازاین‌رو نمی‌توان انتظار داشت که هر جمعیت تکاملی یا مخلوط پویا در تمامی شرایط اقلیمی، محیطی و مدیریتی عملکردی مشابه نشان دهد. جمعیت‌های پرتویی، سیفی و رستمی هر یک برای چندین سال در یک محیط مشخص، امّا متفاوت از دیگری و تحت شرایط مدیریتی متفاوت کشت شده بودند، درحالی‌که جمعیت شراره در آغاز پژوهش از اختلاط همه جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا مورد استفاده در این آزمایش ایجاد شد و بدون سابقه کشت و انتخاب در یک محیط خاص، به صورت مستقیم در مکان‌های آزمایشی ارزیابی گردید. این جمعیت، علاوه‌بر کسب رتبه دوم ثبات عملکرد دانه و رتبه نخست قابلیت اطمینان عملکرد دانه، با میانگین عملکرد ۱۱۸۶ کیلوگرم در هکتار، از نظر عددی عملکرد بیشتری نسبت به ارقام شاهد آذر ۲ و کل حیدری نشان داد و عملکرد آن تنها اندکی کمتر از رقم بومی سرداری بود؛ هرچند تفاوت عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها از نظر آماری معنی‌دار نبود. بنابراین، وضعیت مطلوب شراره از نظر عملکرد نسبی، ثبات و قابلیت اطمینان می‌تواند با تنوع ژنتیکی اولیه گسترده و نبود سابقه انتخاب جهت‌دار در یک محیط خاص مرتبط باشد. براساس نتایج این پژوهش به نظر می‌رسد که معرفی و گسترش این توده‌های ناهمگن به مناطق جدید مستلزم رویکردی هدفمند باشد. جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویای تازه تشکیل‌شده می‌توانند از مراحل ابتدایی در محیط هدف مستقر شوند تا مسیر تکامل و سازگاری خود را در همان منطقه طی کنند. همچنین در صورت تبادل این مواد میان مناطق، انجام تبادل در نسل‌های ابتدایی‌تر و میان نواحی دارای شرایط اقلیمی، محیطی و مدیریتی مشابه می‌تواند احتمال سازگاری موفق آن‌ها را افزایش دهد. علاوه‌بر این کشاورزان هر منطقه نیز می‌توانند به‌صورت مشارکتی مخلوط پویا متناسب با منطقه خود را ایجاد کرده و به کشت آن بپردازند. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که به‌نژادی تکاملی صرفاً مسیری برای بیشینه‌سازی عملکرد نیست، بلکه راهبردی پویا برای مدیریت ریسک، حفظ عملکرد قابل اتکا و افزایش تاب‌آوری در شرایط عدم قطعیت اقلیمی و تنش‌های محیطی محسوب می‌شود. بدین ترتیب، جمعیت‌های تکاملی و مخلوط‌های پویا، در صورت به‌کارگیری هدفمند، می‌توانند به‌عنوان یکی از رویکردهای اگرواکولوژیک، از طریق افزایش تنوع ژنتیکی و تقویت ظرفیت سازگاری، در افزایش ثبات تولید در کشاورزی دیم و تقویت به امنیت غذایی ایفای نقش کنند.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی مؤسسه توسعه پایدار و محیطزیست (سنستا)، صندوق بین‌المللی توسعه کشاورزی (IFAD[1]) و اتحاد بیوورسیتی اینترنشنال[2] و مرکز بین‌المللی کشاورزی گرمسیری (CIAT[3])انجام شده است. از همکاری و همراهی همکاران اجرایی در فعالیت‌های میدانی، به‌ویژه مبینا نورمحمودیان امیری، مهدی اسماعیلی، هانیه مغانی و سهیل حسین‌زاده صمیمانه قدردانی می‌شود. همچنین از مریم رحمانیان و دکتر رضا حق‌پرست برای حمایت‌های علمی و فنی در مراحل طراحی، اجرا و تحلیل آزمایش‌ها سپاسگزاری می‌شود. سپاس ویژه از کشاورزان همکار، بابک کشکولی، امیر کشکولی، ناصر پرتویی، فرزاد استخری و حسین نعمتی که با در اختیار گذاشتن زمین و امکانات، اجرای این پژوهش را ممکن ساختند، ابراز می‌گردد. در پایان، این اثر به یاد و احترام زنده‌یاد دکتر خدیجه کاترین رضوی، مدیرعامل فقید سازمان توسعه پایدار و محیطزیست تقدیم می‌شود.

1- International Fund for Agricultural Development
2- Bioversity international
3- International Center for Tropical Agriculture

References

1. Akbari, M., Rezaee, A., Shirani Bidabadi, F., & Eshraghi, F. (2022). Investigating the relationship between climate change and total factor productivity growth of rainfed barley in Iran. *Agricultural Economics, 16*(1), 81-97. (In Persian) https://doi.org/10.22034/IAES.2022.540042.1877
2. Allard, R. W., & Bradshaw, A. D. (1964). Implications of genotype–environmental interactions in applied plant breeding. *Crop Science, 4*(5), 503–508. https://doi.org/10.2135/cropsci1964.0011183X000400050021x
3. Allard, R. W., Hansche, P. E. (1964). Some parameters of population variability and their implications in plant breeding. *Advances in Agronomy, 16*, 281–325. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60027-9
4. Amirifar, E., Aghaee Sarbarze, M., Haghparast, R., & Khosroushahli, M. (2011). Yield stability, bread-making quality, and drought tolerance in bread wheat genotypes. *Seed and Plant Improvement Journal, 27*(1–2), 233–255. (In Persian). https://doi.org/10.22092/spij.2017.111061
5. Becker, H.C., & Léon, J. (1988), Stability analysis in plant breeding. *Plant Breeding, 101*: 1-23. https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.1988.tb00261.x
6. Borg**,** J., Kiær, L. P., Lecarpentier, C., Goldringer, I., Gauffreteau, A., Saint-Jean, S., Barot, S., & Enjalbert, J. (2018). Unfolding the potential of wheat cultivar mixtures: A meta-analysis perspective and identification of knowledge gaps. *Field Crops Research, 221***,** 298–313. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.09.006
7. Ceccarelli, S., Grando, S., & Booth, R. H. (1996). International breeding programmes and resource-poor farmers: Crop improvement in difficult environments. In P. Eyzaguirre & M. Iwanaga (Eds.), *Participatory Plant Breeding: Proceedings of A Workshop on Participatory Plant Breeding*, 26–29 July 1995, Wageningen, The Netherlands. pp. 99–116. IPGRI.
8. Ceccarelli, S., & Grando, S. (2007). Decentralized-participatory plant breeding: An example of demand-driven research**.** *Euphytica, 155***,** 349–360. https://doi.org/10.1007/s10681-006-9336-8
9. Ceccarelli, S., & Grando, S. (2020). Evolutionary plant breeding as a response to the complexity of climate change**.** *iScience, 23*(12), 101815. https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101815
10. Ceccarelli, S., Grando, S., Salimi, M., & Razavi, K. (2022). Evolutionary populations for sustainable food security and food sovereignty. In Y. Nishikawa & M. Pimbert (Eds.), *Seeds for diversity and inclusion: Agroecology and Endogenous Development* (pp. 121–136). Palgrave Macmillan. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89405-4_8
11. Ceccarelli, S., & Grando, S. (2024). Diversity as a plant breeding objective. *Agronomy, 14*(3)**,** 550. https://doi.org/10.3390/agronomy14030550
12. Coombes, N. E. (2009). DiGGer design search tool in R. Retrieved May 16, 2021, from http://nswdpibiom.org/austatgen/software
13. Derakhshandeh, A., Khoorani, A., & Rezazadeh, M. (2024). Projecting spatiotemporal changes of precipitation over Iran using CORDEX regional climate models until 2100. *Journal of Earth System Science, 133*(7). https://doi.org/10.1007/s12040-023-02212-z
14. Döring, T. F., Annicchiarico, P., Clarke, S., Haigh, Z., Jones, H. E., Pearce, H., Snape, J., Zhang, J., & Wolfe, M. S. (2015). Comparative analysis of performance and stability among composite cross populations, variety mixtures, and pure lines of winter wheat in organic and conventional cropping systems. *Field Crops Research, 183*, 235–245. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.08.009
15. FAO. (2025). *Global Report on Food Crises*. FAO. https://www.fsinplatform.org/grfc2025
16. Goldringer**,** I., Prouin, C., Rousset, M., Galic, N., & Bonnin, I. (2006). Rapid differentiation of experimental populations of wheat for heading time in response to local climatic conditions. *Annals of Botany, 98***,** 805–817. https://doi.org/10.1093/aob/mcl160
17. Haghparast, R., Ceccarelli, S., Pourdad, S. S., Rahmanian, M., Taheri, A., Rajabi, R., Razavi, K. K., Salimi, M., Mohammadi, R.& Moradi, J. (2013). Importance of evolutionary breeding of rainfed cereals in tackling with climate change. In Proceedings of the Second National Conference on Climate Change and Its Impact on Agriculture and Environment. Urmia, Iran. (In Persian).
18. IPCC. (2023). Food, Fibre and Other Ecosystem Products. In Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 713–906). chapter, Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009325844.007

19. Isbell, F., Craven, D., Connolly, J., Loreau, M., Schmid, B., Beierkuhnlein, C., Bezemer, T. M., Bonin, C., Bruelheide, H., de Luca, E., Ebeling, A., Griffin, J. N., Guo, Q., Hautier, Y., Hector, A., Jentsch, A., Kreyling, J., Lanta, V., Manning, P., Meyer, S. T., Mori, A. S., Naeem, S., Niklaus, P. A., Polley, H. W., Reich, P. B., Roscher, C., Seabloom, E. W., Smith, M. D., Thakur, M. P., Tilman, D., Tracy, B. F., van der Putten, W. H., van Ruijven, J., Weigelt, A., Weisser, W. W., Wilsey, B., & Eisenhauer, N (2015). Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature, 526*(7574), 574–577. https://doi.org/10.1038/nature15374
20. Jasemi, S. Sh., Naghipoor, F., Sanjani, S., Esfandyari-Pour, E., Khorsandi, H., & Najafian, G. (2017). Evaluation of grain quality characteristics of four bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars in wheat-producing provinces of Iran. *Iranian Journal of Crop Sciences, 19*(2), 102-115. (In Persian). http://agrobreedjournal.ir/article-1-755-en.html.
21. Kataoka, S. (1963). A stochastic programming model. *Econometrica, 31*(2), 181–196. https://doi.org/10.2307/1910956
22. Krug, A. S., Drummond, E. B. M., Van Tassel, D. L., & Warschefsky, E. J. (2023). The next era of crop domestication starts now. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 120*(14), e2205769120. https://doi.org/10.1073/pnas.2205769120
23. Lin, C. S., & Binns, M. R. (1988). **A** superiority measure of cultivar performance for cultivar × location data. *Canadian Journal of Plant Science, 68*(1), 193–198. https://doi.org/10.4141/cjps88-018
24. Lobell, D. B., Schlenker, W., & Costa-Roberts, J., (2011). Climate trends and global crop production since 1980. *Science, 333*(6042), 616-620. doi: 10.1126/*Science*.1204531
25. Merrick, R. F., Carter, A. H., Jones, S. S., & Anderson, J. A. (2020). Utilization of evolutionary plant breeding increases wheat yield stability under drought stress. *Sustainability, 12*(15), 6036.
26. Ministry of Agriculture Jihad. (2023). Agricultural Satistics: Field Crops. Vol 1. p. 10-28. Retrieved August 2025, from https://dpe.maj.ir
27. Moore, K. J., & Dixon, P. M. (2015). Analysis of combined experiments revisited. *Agronomy Journal, 107*(2), 763–771. https://doi.org/10.2134/agronj13.0485
28. Murphy, K., Lammer, D., Lyon, S., Carter, B., & Jones, S. S. (2004). Breeding for organic and low-input farming systems: An evolutionary-participatory breeding method for inbred cereal grains. *Renewable Agriculture and Food Systems, 20*(1), 48–55. https://doi.org/10.1079/raf200486
29. Neupane, S. P., Joshi, B. K., Ayer, D., Karkee, A., Ghimire, K. H., Gauchan, D., Mengistu, D. K., Ceccarelli, S., & Grando, S. (2025). Dynamic mixtures reduce the severity of a number of diseases in rice and bean in low-input mountain farming systems of Nepal. *Euphytica, 221*, 91. https://doi.org/10.1007/s10681-025-03488-6
30. Nasiri, M., Salimi, M., Agha Maleki, M. T., Khosravi, V., Amoogholi Tabari, M., Fathi, N., Kheiri, N., Erfanimoghaddam, R., Mohammadpour, H., Alinajad, E., & Ehsani Ameli, B. (2024). Final report of the research project: Agronomic and quality assessment of Iranian local rice genotypes and establishment of evolutionary populations for biodiversity conservation and adaptation to climate change. Ministry of Agriculture Jihad, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Rice Research Institute of Iran – Deputy of Mazandran. Amol, Iran. (In Persian).
31. Nassar, R., & Hühn, M. (1987). Studies on estimation of phenotypic stability: Tests of significance for nonparametric measures of phenotypic stability. *Biometrics, 43*(1), 45–53. https://doi.org/10.2307/2531947
32. Nassiri Mahallati, M., & Koocheki, A. (2014). Long Term Evaluation of Yield Stability Trend for Cereal Crops in Iran. *Journal of Agroecology, 6*(3), 607–621. (In Persian). https://doi.org/10.22067/jag.v6i3.26802
33. Pirasteh A. H., Ranjbar, G., Tabatabaei, S. A., Shiran Tafteh, M., Salimi, M., Parvizi, H., & Parnian, A. (2023). Final report of the research project: Comparison of the yield stability of two evolutionary barley populations with check genotypes under saline conditions. Ministry of Agriculture Jihad, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), National Salinity Research Center, Yazd, Iran. (In Persian).
34. Pouryousefi, K., Pourtabrizi, S., Mohamadi-Nejad, G., Ghaderi, M. G., Nakhoda, B., & Abdolshahi, R. (2022). Transferring four yellow rust resistance genes to wheat cv. Kalhaydari using marker assisted backcrossing. *Iranian Journal of Plant Pathology, 57*(4), 291–301. (In Persian). https://doi.org/ 10.22034/ijpp.2022.545750.377
35. Raggi, L., Ciancaleoni, S., Torricelli, R., Terzi, V., Ceccarelli, S., & Negri, V. (2017). Evolutionary breeding for sustainable agriculture: Selection and multi-environment evaluation of barley populations and lines. *Field Crops*

Research, *204*, 76–88. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.011

36. Rezaei, E.E., Webber, H., Asseng, S., Boote, K., Durand, J. L., Ewert, F., Martre, P., & MacCarthy, D. S., (2023), Climate change impacts on crop yields. *Nature Reviews Earth & Environmen*, *4*(12), 831-846. https://doi.org/10.1038/s43017-023-00491-0
37. Römer, T. (1917). Sind die ertragdreichen Sorten ertragssicherer? *Mitteilungen der Deutschen Landwirtschafts Gesellschaft*, *32*, 87–89.
38. Salimi, M., Razavi, K. C., Amiri, M. N., Esmaeili, M., Khorramdel, S., Moghani, H., Grando, S., & Ceccarelli, S. (2023). Stability of agronomic traits of barley evolutionary populations under drought conditions in Iran. *Agronomy*, *13*(7), 1931. https://doi.org/10.3390/agronomy13071931
39. Soofi, L., Heidari, G., Siosemardeh, A., & Hosseinpanahi, F. (2017). The effect of zinc sulfate foliar spray on yield and yield components of Sardari wheat ecotypes. *Plant Production Technology*, *16*(2), 69–86. (In Persian)
40. Suneson, C. A. (1956). An evolutionary plant breeding method. *Agronomy Journal*, *48*(4), 188–191. https://doi.org/10.2134/agronj1956.00021962004800040012x
41. VSN International. (2022). GenStat for Windows (24th Ed.). VSN International. https://www.genstat.co.uk
42. Wricke, G. (1962). Über eine Methode zur Erfassung der ökologischen Streubreite in Feldversuchen. *Zeitschrift für Pflanzenzüchtung*, *47*, 92–96.