



University of Guilan  
Faculty of Agricultural Sciences

## Cereal Research

Vol. 14, No. 3, Autumn 2024 (267-290)

doi: 10.22124/CR.2025.28331.1834

pISSN: 2252-0163 eISSN: 2538-6115



RESEARCH PAPER

OPEN ACCESS

### Using double and triple biplots for identification of superior winter wheat genotypes in term of root traits, yield and yield components under rainfed conditions

Ramin Sadegh Ghol Moghadam<sup>1\*</sup>, Jalal Saba<sup>2</sup>, Farid Shekari<sup>3</sup> and Mozafar Roustaii<sup>4</sup>

1. Graduate Ph.D., Department of Plant Genetics and Production, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran (\* Corresponding author: [ramin\\_mo2005@yahoo.com](mailto:ramin_mo2005@yahoo.com))
2. Professor, Department of Plant Genetics and Production, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran
3. Professor, Department of Plant Genetics and Production, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran
4. Research Associate Professor, Dryland Agricultural Research Institute (DARI), Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Maragheh, Iran

#### Comprehensive abstract

##### Introduction

Selection and breeding for yield enhancement has always been one of the main goals of wheat breeders. Since the yield of rainfed wheat depends on the moisture stored in the soil during the rainy season, therefore, different crop varieties should be evaluated in terms of their potential to use the water stored in the soil during long periods of drought in each region. Roots are the main organs to respond, understand and maintain yield in drought conditions, which are known as the hidden half of the plant and their function plays an important role in the growth and yield of plants. On the other hand, selection based on multiple traits increases the suitability of crop varieties for farmers. Genotype  $\times$  trait (GT) and genotype  $\times$  yield  $\times$  trait (GYT) biplots are graphical methods that have been proposed to evaluate and identify favorable genotypes in terms of multiple traits. The objective of the current study was to use the GYT method to investigate the relationships between root traits and yield and yield components, to rank wheat varieties and advanced lines, and to select superior genotypes based on a set of root traits affecting grain yield under rainfed conditions.

##### Materials and methods

In plant materials of this study were 24 bread wheat genotypes including 11 rainfed winter wheat varieties along with 13 advanced lines. The studied genotypes were evaluated in a randomized complete block design with three replications in the research field of Faculty of Agriculture, Zanjan University, Zanjan, Iran, during two cropping years, 2016-2017 and 2017-2018, under rainfed conditions. The measured traits included root length, root diameter, root volume, root area, root biomass, number of grains per spike, 1000-kernel weight, number of spikes per  $m^2$ , and grain yield ( $g.m^{-2}$ ). For statistical analysis, the data were first standardized and then principal component analysis was performed. GT and GYT biplots were used to identify the relationship between root traits and grain yield and yield components and select the best wheat genotypes based on multiple traits.

##### Research findings

The results showed that the use of GYT biplot is more efficient than GT biplot. Based on GYT biplot and superiority index, genotype No. 2 was identified as the superior genotype in term of all yield-trait combinations except yield- root length and area combination at a depth of more than 25 cm. Genotypes No. 10 and 11 were the most favorable genotypes for combination of yield with root length



and area at a depth of more than 25 cm. In the GYT method, root penetration depth, number of spikes per m<sup>2</sup>, root diameter up to 25 cm depth, followed by 1000-kernel weight, root volume, root length, root dry weight and root area up to 25 cm depth and root diameter at a depth of more than 25 cm were identified as the most important traits for determining the genetic progress in breeding programs. In total, considering these traits, genotype No. 2 was the closest genotype to the ideal genotype and can be introduced as the best genotype in this study.

### **Conclusion**

The results of this research showed that there is a potential for simultaneous genetic improvement of grain yield and root traits especially in the surface part of the soil in the studied wheat genotypes. Based on the obtained results of this experiment, it can be said that the GYT graphic method is a new efficient and practical method to identify superior genotypes based on multiple traits in breeding programs.

**Keywords:** Genotype×yield×trait biplot, Genotype×trait biplot, Multi-trait selection, Superiority index

---

Received: July 31, 2024

Accepted: December 10, 2024

### **Cite this article:**

Sadegh Ghol Moghadam, R., Saba, J., Shekari, F., & Roustaii, M. (2024). Using double and triple biplots for identification of superior winter wheat genotypes in term of root traits, yield and yield components under rainfed conditions. *Cereal Research*, 14(3), 267-290. doi: [10.22124/CR.2025.28331.1834](https://doi.org/10.22124/CR.2025.28331.1834).



## استفاده از بای پلات‌های دوگانه و سه‌گانه جهت تعیین ژنوتیپ‌های مطلوب گندم پاییزه از لحاظ صفات ریشه‌ای، عملکرد و اجزای عملکرد تحت شرایط دیم

رامین صادق قول‌مقدم<sup>۱\*</sup>، جلال صبا<sup>۲</sup>، فرید شکاری<sup>۲</sup> و مظفر روستایی<sup>۴</sup>

۱- دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران (\* نویسنده مسئول):

[ramin\\_mo2005@yahoo.com](mailto:ramin_mo2005@yahoo.com)

۲- استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۳- استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۴- دانشیار پژوهش، موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مراغه، ایران

### چکیده جامع

**مقدمه:** انتخاب و اصلاح برای افزایش عملکرد همیشه یکی از اهداف اصلی اصلاح‌گران گندم بوده است. از آنجا که عملکرد گندم دیم وابسته به رطوبت ذخیره شده در خاک در طول دوره بارش است، بنابراین، ارقام مختلف گیاهان زراعی باید برای هر منطقه از لحاظ پتانسیل استفاده از آب ذخیره شده در خاک در دوره‌های طولانی مدت خشک‌سالی ارزیابی شوند. ریشه‌ها اصلی‌ترین اندام‌ها برای پاسخ، درک و حفظ عملکرد در شرایط بروز خشکی بوده که به نیمه پنهان گیاه معروف می‌باشند و عملکرد آن‌ها نقش مهمی در رشد و عملکرد گیاهان دارد. از طرفی انتخاب بر اساس صفات متعدد، شایستگی ارقام زراعی را برای کشاورزان افزایش می‌دهد. بای پلات‌های دوگانه ژنوتیپ × صفت (GT) و سه‌گانه ژنوتیپ × عملکرد × صفت (GYT) از روش‌های گرافیکی هستند که برای ارزیابی و شناسایی ژنوتیپ‌های مطلوب از لحاظ چند صفت ارائه شده‌اند. هدف از این پژوهش، استفاده از روش GYT برای بررسی روابط بین صفات ریشه‌ای و عملکرد و اجزای عملکرد، رتبه‌بندی ارقام و لاین‌های پیشرفته گندم و گزینش ژنوتیپ‌های برتر بر اساس مجموعه صفات ریشه‌ای مؤثر بر عملکرد دانه تحت شرایط دیم بود.

**مواد و روش‌ها:** مواد گیاهی این تحقیق، ۲۴ رقم گندم نان شامل ۱۱ رقم گندم دیم پاییزه به‌همراه ۱۳ لاین پیشرفته گندم نان بود. ژنوتیپ‌های مورد مطالعه در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان طی دو سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ و ۹۸-۱۳۹۷ در شرایط دیم ارزیابی شدند. صفات اندازه‌گیری شده شامل طول ریشه، قطر ریشه، حجم ریشه، سطح ریشه، زیست‌توده ریشه، تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه، تعداد سنبله در متر مربع و عملکرد دانه (گرم در متر مربع) بودند. برای تجزیه و تحلیل آماری، ابتدا داده‌ها استاندارد و سپس تجزیه به مولفه‌های اصلی انجام شد. از بای پلات‌های GT و GYT به منظور شناسایی ارتباط بین صفات ریشه و عملکرد و اجزای عملکرد و انتخاب بهترین ژنوتیپ‌های گندم بر اساس صفات متعدد استفاده شد.

**یافته‌های تحقیق:** نتایج نشان داد که استفاده از بای پلات GYT کارایی بیش‌تری نسبت به بای پلات GT دارد. بر اساس بای پلات GYT و شاخص برتری، ژنوتیپ شماره ۲ با در نظر گرفتن تمامی ترکیبات عملکرد-صفت به‌جز عملکرد-طول و سطح ریشه در عمق بیش‌تر از ۲۵ سانتی‌متر، به‌عنوان ژنوتیپ برتر مشخص شد. ژنوتیپ‌های شماره ۱۰ و ۱۱ ژنوتیپ‌های

مطلوب از لحاظ ترکیب عملکرد با طول و سطح ریشه در عمق بیش از ۲۵ سانتی‌متر بودند. در روش GYT صفات عمق نفوذ ریشه، تعداد سنبله در متر مربع، قطر ریشه تا عمق ۲۵ سانتی‌متر و به‌دنبال آن‌ها وزن هزار دانه، حجم، طول، وزن خشک و سطح ریشه تا عمق ۲۵ سانتی‌متر و قطر ریشه در عمق بیش از ۲۵ سانتی‌متر به‌عنوان مهم‌ترین صفات برای تعیین پیشرفت ژنتیکی در برنامه‌های به‌نژادی شناسایی شدند. در مجموع با در نظر گرفتن این صفات، ژنوتیپ شماره ۲ نزدیک‌ترین ژنوتیپ به ژنوتیپ ایده‌آل بود و می‌تواند به‌عنوان بهترین ژنوتیپ این آزمایش معرفی شود.

**نتیجه‌گیری:** نتایج این تحقیق نشان داد که پتانسیل بهبود ژنتیکی همزمان عملکرد دانه و صفات ریشه به‌ویژه در قسمت سطحی خاک در ژنوتیپ‌های گندم مورد مطالعه وجود دارد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از این آزمایش، می‌توان گفت که روش گرافیکی GYT یک روش جدید کارآمد و کاربردی جهت شناسایی ژنوتیپ‌های برتر بر اساس صفات متعدد در برنامه‌های اصلاحی است.

**واژه‌های کلیدی:** انتخاب بر اساس چند صفت، بای‌پلات ژنوتیپ × صفت، بای‌پلات ژنوتیپ × عملکرد × صفت، شاخص برتری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۰

#### نحوه استناد به این مقاله:

صادق قول‌مقدم، رامین، صبا، جلال، شکاری، فرید، و روستایی، مظفر. (۱۴۰۳). استفاده از بای‌پلات‌های دوگانه و سه‌گانه جهت تعیین ژنوتیپ‌های مطلوب گندم پاییزه از لحاظ صفات ریشه‌ای، عملکرد و اجزای عملکرد تحت شرایط دیم. *تحقیقات غلات*، ۱۴ (۳)، ۲۹۰-۲۶۷. doi: [10.22124/CR.2025.28331.1834](https://doi.org/10.22124/CR.2025.28331.1834)

## مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات غذایی در سراسر جهان است که از لحاظ سطح زیر کشت و میزان تولید، رتبه دوم را در بین گیاهان مختلف زراعی دارا می‌باشد (FAO, 2023). این محصول تقریباً ۲۰ درصد کالری مصرفی انسان را در سطح جهان تأمین می‌کند (Reynolds & Braun, 2022; Wei et al., 2024). امروزه افزایش تولید گندم به‌خاطر مواجه شدن با تقاضای بیش‌تر ناشی از رشد جمعیت در بسیاری از کشورها هنوز یک چالش است (Guo et al., 2020). عملکرد جهانی غلات از سال ۱۹۶۱ تا سال ۲۰۰۷ از ۸۷۷ میلیون تن به ۲۳۵۱ میلیون تن افزایش یافته است، اما برای تأمین تقاضای جمعیت در سال ۲۰۵۰ باید به ۴۰۰۰ میلیون تن افزایش یابد (Friedli et al., 2019). تضمین امنیت غذایی آینده برای جمعیت رو به رشد، با وجود تغییرات آب و هوایی و فشار ناشی از گسترش شهری بر زمین‌های کشاورزی، مستلزم بهبود مداوم شیوه‌های کشاورزی فعلی است. بر اساس مطالعات، بسیاری از محدودیت‌های عملکرد در سیستم‌های کشاورزی مربوط به سیستم ریشه گیاهان است (Wasson et al., 2017).

ریشه‌ها به نیمه پنهان گیاه معروف هستند که در زیر زمین در حال رشد هستند و عملکرد آن‌ها نقش مهمی در رشد و بهره‌وری گیاهان دارد (Xie et al., 2017). اصلاح ارقام زراعی جدید با سیستم‌های ریشه کارآمد پتانسیل بسیار خوبی برای بهبود بهره‌وری از منابع و سازگاری گیاهان با آب و هوای ناپایدار دارد (Jia et al., 2019). تعیین عملکرد یا کارایی صفات ریشه در جذب و دسترسی به منابع و سازگاری با تنش‌های محیطی به‌ویژه در خاک‌های خشک به یک مسئله مهم در تحقیقات و برنامه‌های به‌نژادی تبدیل شده است (Chen et al., 2020). مطالعات زیادی اهمیت سیستم ریشه‌ای عمیق را برای جذب آب و بهبود عملکرد در شرایط محدودیت آب در گیاهان مختلف از جمله سورگوم (Sinclair, 1994)، حبوبات دانه‌ای (Turner et al., 2001)، برنج (Kamoshita et al., 2002) و گندم (Wasson et al., 2017) گزارش کرده‌اند. اهمیت سیستم ریشه به اندازه‌ای است که محققین معتقدند بهبود عملکرد گندم از طریق اصلاح سیستم ریشه می‌تواند به انقلاب سبز

دوم منجر شود، به این دلیل که موجب افزایش جذب منابع و کاهش نیاز کودی می‌شود (Fradgley et al., 2020). بررسی ویژگی‌های فنوتیپی ریشه به اندازه بررسی ویژگی‌های فنوتیپی اندام‌های هوایی اهمیت دارد، زیرا توانایی گیاه برای جذب آب و مواد غذایی به‌طور عمده بستگی به ساختار و نحوه عمل ریشه‌ها دارد (Manschadi et al., 2008; Gupta et al., 2012).

شناسایی ارقام برتر از میان جمعی از ژنوتیپ‌ها، بخش کلیدی اصلاح نباتات است. با این حال ارزیابی ژنوتیپ‌ها با دو چالش کلیدی برهم‌کنش ژنوتیپ و محیط و ارتباط نامطلوب بین صفات کلیدی مواجه است. برای مقابله با چالش اول، بررسی ژنوتیپ‌ها در چند سال و چند مکان (Yan, 2015, 2016)، و برای مقابله با چالش دوم، اخیراً ارزیابی ژنوتیپ بر اساس صفات متعدد پیشنهاد شده است. تجزیه بای‌پلات ژنوتیپ × صفت (Jia et al., 2019) و ژنوتیپ × عملکرد × صفت (GYT) ابزارهای گرافیکی سودمندی هستند که نمای کلی مفید و سودمندی از روابط صفات مختلف و ژنوتیپ‌ها ارائه می‌دهند (Rahmati et al., 2020; Tsenov et al., 2020; Romena et al., 2022; Mohammadi & Geravandi, 2024). روش بای‌پلات GYT ژنوتیپ‌ها را بر اساس سطوح آن‌ها در ترکیب عملکرد با سایر صفات هدف رتبه‌بندی می‌کند و در عین حال مشخصات صفات یعنی نقاط قوت و ضعف آن‌ها را نشان می‌دهد (Yan & Fréreau, 2018). عملکرد دانه مهم‌ترین صفت و اصلاح آن مهم‌ترین هدف برای به‌نژادگران است و سایر صفات هدف فقط وقتی با عملکرد بالا ترکیب شوند، مهم هستند. از طرفی برتری یک ژنوتیپ را باید از طریق رتبه آن در ترکیب عملکرد با سایر صفات هدف و نه از نظر رتبه آن در صفات جداگانه ارزیابی کرد (Kendal, 2019; Yan & Fréreau, 2018; Reid, 2018). ارزیابی ژنوتیپ‌ها بر اساس چندین صفت در ترکیب با عملکرد توسط محققین مختلف در گیاهان مختلف از جمله توسط کندال (Kendal, 2019) و فهیم و همکاران (Faheem et al., 2023) در گندم دوروم، کاراهان و آکگان (Karahan & Akgün, 2020) در جو، مریک و همکاران (Merrick et al., 2020) در گندم بهاره، قلی‌زاده و غفاری (Gholizadeh & Ghaffari, 2023) در آفتابگردان، حسنی و همکاران (Hassani et al., 2024) در چغندرقد و بخشی

گرفت و فضای بین دو لوله با فوم پر شد. داخل این لوله‌ها هم کیسه نایلونی طویل قرار داده شد. لوله‌ها در سه کانال حفاری شده به فاصله ۲/۵ متر از هم و به طول ۱۲ متر و عمق ۱۲۵ سانتی‌متر در خاک قرار داده شدند (شکل ۱).

نیازهای کودی خاک مزرعه با توجه به آزمون خاک و حدود بحرانی گیاه گندم محاسبه و به خاک اضافه شد و لوله‌ها هم با همین خاک پر شدند. در هر لوله تعداد ۱۲ بذر کشت شد که پس از سبز شدن به ۷ عدد (به تناسب ۳۸۰ بوته در مترمربع) تنک شد. از آنجایی که فضای لوله‌ها محدود بوده و بعد از بارندگی خیلی زودتر از خاک مزرعه رطوبت خود را از دست می‌داد، به منظور شبیه‌سازی نسبی رطوبت خاک لوله‌ها با مزرعه جنوبی، به‌طور مستمر طی فصل رشد نمونه‌هایی از هر دو تهیه و پس از تعیین رطوبت، به هر لوله به میزان لازم آب اضافه شد (در صورت وجود اختلاف). در هر واحد آزمایشی برای هر ژنوتیپ دو لوله استفاده شد که در یکی از آن‌ها ارزیابی صفات و عملکرد نهایی بوته‌ها انجام شد و لوله دوم، بعد از مرحله گرده‌افشانی و توقف رشد رویشی از زمین خارج و برای مطالعات ریشه استفاده شد. به‌منظور سهولت در جداسازی ریشه‌ها از خاک و جلوگیری از ایجاد خسارت به ریشه‌های اصلی و فرعی پس از خروج کیسه‌های پلاستیکی از لوله‌های پی‌وی‌سی، ستون خاک همراه با پلاستیک اطراف آن روی صفحه مشبک گذاشته شد و حدود ۱۰ دقیقه در ظرف حاوی آب قرار گرفت (شکل ۱). سپس کیسه پلاستیکی حاوی بستر کاشت و ریشه درون آن به آهستگی از آب خارج و ریشه‌ها با استفاده از فشار ملایم آب شسته و تا زمان اندازه‌گیری صفات مورد نظر در الکل ۵۰ درصد نگهداری شدند.

صفات اندازه‌گیری شده در این آزمایش شامل طول ریشه، قطر ریشه، حجم ریشه، سطح ریشه، بیوماس ریشه، تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه، تعداد سنبله در متر مربع و عملکرد دانه (گرم در متر مربع) شدند. برای اندازه‌گیری قطر ریشه از کولیس دیجیتالی استفاده شد و قطر ریشه در پنج قسمت مختلف ریشه یادداشت و سپس میانگین آن‌ها به‌عنوان قطر ریشه بر حسب میلی‌متر ثبت شد. حجم ریشه‌ها نیز بر اساس جابه‌جایی آب درون استوانه مدرج بعد از وارد کردن ریشه‌های شسته شده به آن اندازه‌گیری شد.

و همکاران (Bakhshi *et al.*, 2023) در کلزا استفاده شده است. در این روش صفاتی که در ترکیب با عملکرد بررسی می‌شوند، می‌توانند هر هدف اصلاحی غیر از عملکرد باشند. این صفات ممکن است شامل صفات زراعی، کیفیت دانه، کیفیت فرآوری، کیفیت تغذیه‌ای و یا حتی مقاومت در برابر بیماری‌ها باشند.

از روش بای‌پلات GYT تا کنون برای بررسی روابط بین صفات ریشه‌ای و عملکرد و اجزای عملکرد دانه استفاده نشده است. هدف از این پژوهش، استفاده از روش GYT برای بررسی روابط بین صفات ریشه‌ای و عملکرد و اجزای عملکرد، رتبه‌بندی ارقام و لاین‌های پیشرفته گندم پاییزه مناطق سرد ایران و گزینش ژنوتیپ‌های برتر بر اساس مجموعه صفات ریشه‌ای مؤثر بر عملکرد دانه تحت شرایط دیم بود.

### مواد و روش‌ها

به‌منظور تعیین ژنوتیپ‌های مطلوب گندم پاییزه با استفاده از بای‌پلات‌های ژنوتیپ × صفت و ژنوتیپ × عملکرد × صفت، ۲۴ ژنوتیپ گندم شامل ۱۱ رقم گندم دیم پاییزه به نام‌های سرداری، هما، آذر ۲، تک‌آب، اوحدی، رصد، هشت‌رود، باران، سائین، صدرا و پراو (جدول ۱) به‌همراه ۱۳ لاین پیشرفته گندم نان (ژنوتیپ‌های ۱۲ تا ۲۴) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار طی دو سال زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۷ و ۱۳۹۸-۱۳۹۷ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان، واقع در ۳۶ درجه و ۴۱ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۲۷ دقیقه طول شرقی و ارتفاع ۱۶۲۰ متر از سطح دریا، تحت شرایط دیم کشت و ارزیابی شدند. لاین‌های پیشرفته مورد مطالعه در این آزمایش، پیش‌تر با تلاقی بین ۱۶ لاین گندم داخلی و خارجی به دو صورت تلاقی‌های متقارب (برای تشکیل یک جمعیت منبع) و دو به دو (برای تشکیل هشت جمعیت) توسط صبا و همکاران (Saba *et al.*, 2018) تهیه و سپس طی چندین سال گزینش در جمعیت‌های حاصل به‌روش بالک-شجره‌ای، این لاین‌ها به‌دست آمدند.

جهت بررسی سیستم ریشه‌ای در این آزمایش از لوله‌های پی‌وی‌سی با قطرهای ۲۰ سانتی‌متر و طول ۱۲۰ سانتی‌متر استفاده شد. برای تسهیل در خارج کردن لوله‌ها از خاک در انتهای فصل، داخل آنها لوله‌هایی با قطر ۱۵ سانتی‌متر قرار

جدول ۱- مشخصات ژنوتیپ‌های گندم مورد مطالعه

Table 1. Characteristics of the studied wheat cultivars

Code	Genotype	Pedigree	Release year	Growth habit	Grain yield (kg/ha)	Plant height (cm)	1000-kernel weight (g)	Reaction to yellow rust <sup>†</sup>	Reaction to leaf rust <sup>†</sup>	Grain protein (%)	Drought tolerance <sup>†</sup>
G1	Sardari	Local variety	1931	Winter	1860	63	33-39	S	Sensitive	10.9	R
G2	Homa	Sardari-39	2009	Winter	1932	81	44	S	Sensitive	11.1	R
G3	Azar2	KVZ/Ym71/3/Maya"S"/Bb/Inia/4/Sefid	2000	Winter	2140	76	35	MS	MR-MS	10.2	T
G4	Takab	Manning/Sdv1//Dogu88	2012	Winter	2230	73	38	MR	MR	12	T
G5	Ohadi	14Gene Bank	2010	Winter	2230	78	71	S	Sensitive	12.2	R
G6	Rasad	Fenkang15// Sefid	2007	Winter	2430	81	39	MR-MS	MR-MS	12.3	T
G7	Hashtrood	M374/Sx//2897/Porsuk/3/Plk70/Lira/5/Jup/4/Clf/3/Ii14.53/Odin//Ci1/6/Lov26//Lfn/Sdy(Es84-24)/3/Seri/4/Seri IRW2000-01-096-0MAR-0MAR-0MAR-8MAR-0MAR	2015	Winter	1937	75	37	MS	MS	11.6	R
G8	Baran	PTZ.NISKA/UTI556-170//UNKNOWN	2014	Winter	2383	83	37	MS	MS	11.2	T
G9	Saein	Azar2/82Zhang291-99	2015	Winter	1604	67	32	R	Resistant	11.2	T
G10	Sadra	Azadi/Azar//Sardari	2017	Winter	2051	80	35	MS	MS	11.3	R
G11	Paraw	SABALAN/4/VRZ/3/ORF1.148/TDL/BLO	2017	Winter	2735	85	34.4	MR	MR	13.4	T

<sup>†</sup> R, Resistant; S, Sensitive; T, Tolerant; MR, Moderate resistant; MS, Moderate sensitive.



شکل ۱- الف) جاگذاری لوله‌ها در کانل‌ها، ب) خارج کردن لوله‌ها از زمین به منظور مطالعه سیستم ریشه، ج) تقسیم ستون خاک به دو بخش تا عمق ۲۵ سانتی‌متر و بیش از ۲۵ سانتی‌متر، د) شست و شوی ریشه‌ها با استفاده از فشار آب.

Figure 1. A) Placement of tubes in the channels, B) Taking the tubes out of the ground to study the root system, C) Dividing the soil column into two parts, up to 25 cm depth and more than 25cm, D) Washing the roots using water pressure.

واحد و مقیاس متفاوتی بودند، بنابراین ابتدا استانداردسازی داده‌ها با استفاده از رابطه (۳) انجام شد (Yan & Frégeau-Reid, 2018):

$$P_{ij} = \frac{T_{ij} - \bar{T}_j}{S_j} \quad (3)$$

که در آن،  $P_{ij}$  عدد استاندارد شده ژنوتیپ  $i$  برای ترکیب عملکرد-صفت  $j$ ، داده اولیه ژنوتیپ  $i$  برای ترکیب عملکرد-صفت  $j$ ،  $\bar{T}_j$  میانگین تمام ژنوتیپ‌ها برای ترکیب عملکرد-صفت  $j$  و  $S_j$  انحراف معیار ترکیب عملکرد-صفت  $j$  در تمام ژنوتیپ‌ها است (جدول ۴). در انتها بر اساس داده‌های استاندارد شده، بای‌پلات GYT بر مبنای دو مؤلفه اصلی اول و دوم و با استفاده از نرم‌افزار GGE-biplot رسم شد. متوسط شاخص برتری (SI) نیز با جمع تمام مقادیر استاندارد ترکیب-صفت-عملکرد برای هر ژنوتیپ محاسبه و سپس میانگین شاخص برتری برای هر ژنوتیپ محاسبه شد.

مجموع طول ریشه و سطح کل ریشه به ترتیب به کمک روابط (۱) و (۲) اندازه‌گیری شدند (Kokko *et al.*, 1992):

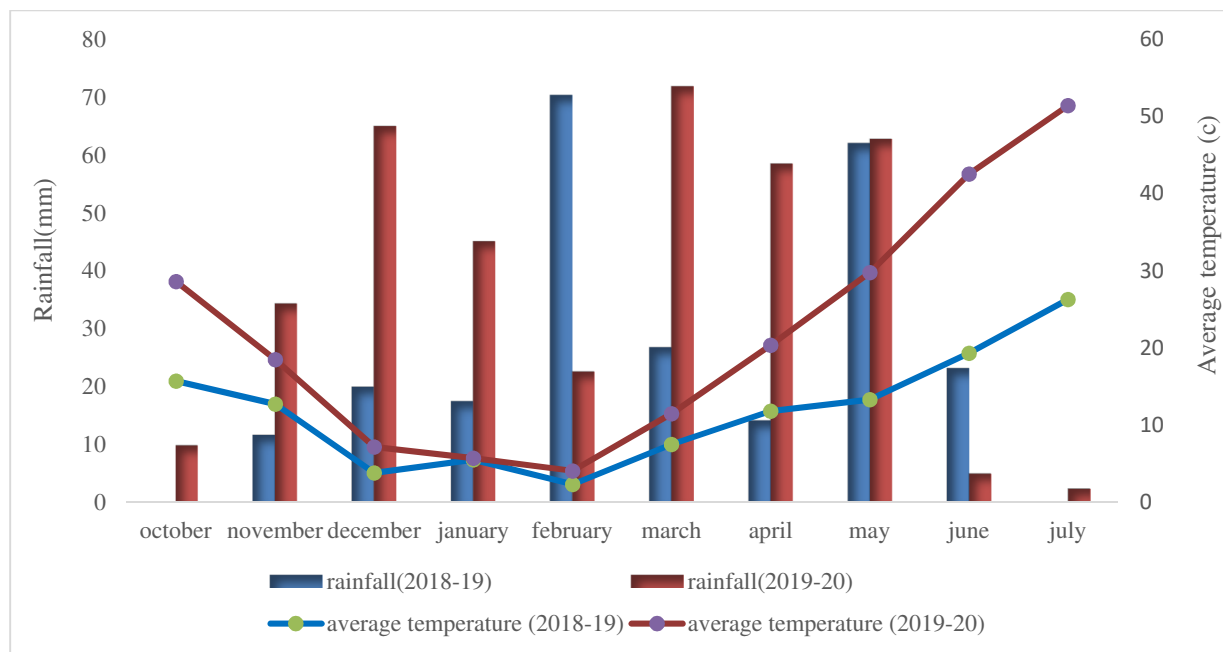
$$L = \frac{V}{\pi r^2} \quad (1)$$

$$S = 2\pi rL \quad (2)$$

که در آن،  $L$  طول ریشه بر حسب متر،  $S$  مساحت ریشه بر حسب متر مربع،  $V$  حجم ریشه بر حسب میلی‌لیتر (سانتی‌متر مکعب) و  $r$  قطر ریشه بر حسب میلی‌متر است.

برای اندازه‌گیری وزن خشک ریشه، ریشه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای  $70^\circ\text{C}$  خشک شدند، سپس به کمک ترازو با دقت یک ده هزارم توزین شدند.

بعد از اندازه‌گیری صفات مورد مطالعه، ابتدا میانگین صفات برای ژنوتیپ‌ها محاسبه شد (جدول ۲). برای تشکیل جدول GYT تمامی صفات در عملکرد دانه ضرب شدند (جدول ۳). با توجه به این که صفات مورد مطالعه دارای



شکل ۲- میانگین دما و بارندگی در دو فصل زراعی

Figure 2. Average temperature and rainfall during two cropping seasons



جدول ۲- میانگین صفات اندازه‌گیری شده در ژنوتیپ‌های گندم مورد مطالعه طی دو سال (ژنوتیپ × صفت<sup>†</sup>)

Table 2. Mean of the measured traits in the studied wheat genotypes during two years (genotype × trait<sup>†</sup>)

Genotype	Yield (g/m <sup>2</sup> )	TKW (g)	NS	NGS	V <sub>1</sub> (ml)	V <sub>2</sub> (ml)	D <sub>1</sub> (mm)	D <sub>2</sub> (mm)	DW <sub>1</sub> (g)	DW <sub>2</sub> (g)	L <sub>1</sub> (m)	L <sub>2</sub> (m)	A <sub>1</sub> (cm <sup>2</sup> )	A <sub>2</sub> (cm <sup>2</sup> )	DP (cm)
G1	309.66	25.83	754.90	16.57	3.74	4.45	0.31	0.23	0.92	0.96	54.48	161.87	494.08	934.70	80.62
G2	462.06	22.06	1078.43	20.96	3.52	4.45	0.31	0.27	1.24	0.97	43.69	114.11	437.00	788.00	86.02
G3	290.96	19.02	833.33	18.91	3.05	4.17	0.30	0.24	0.95	0.95	43.09	277.53	404.88	1069.65	85.85
G4	314.51	17.56	872.55	21.58	2.86	4.64	0.32	0.23	0.94	1.13	42.08	133.69	380.06	876.27	86.97
G5	300.40	20.03	745.10	22.38	4.12	3.48	0.32	0.28	1.15	0.79	48.38	104.60	497.40	654.17	85.30
G6	242.55	18.18	754.90	18.77	1.81	4.14	0.28	0.27	0.65	0.73	34.21	149.01	273.98	819.91	73.68
G7	281.45	18.31	960.78	16.55	2.74	4.55	0.30	0.21	0.77	0.92	39.83	197.93	366.27	1028.94	88.23
G8	300.09	24.04	970.59	14.56	3.31	4.29	0.30	0.26	0.97	0.85	46.18	125.53	432.73	808.00	85.03
G9	260.85	19.55	901.96	16.18	2.90	5.12	0.29	0.26	0.96	0.91	43.99	140.64	399.91	931.43	82.87
G10	311.54	21.62	950.98	16.98	3.07	6.64	0.31	0.22	0.85	1.39	42.12	274.09	398.27	1473.08	85.77
G11	238.80	17.99	1284.31	12.63	2.67	6.74	0.30	0.22	0.97	1.16	39.36	258.55	362.31	1450.63	86.87
G12	259.85	25.22	627.45	16.48	2.69	4.21	0.26	0.23	0.91	1.09	52.11	164.25	416.35	890.13	82.58
G13	298.59	23.75	1225.49	12.73	3.17	5.74	0.31	0.23	0.72	1.30	43.14	197.23	411.93	1168.22	86.88
G14	288.00	23.93	901.96	14.35	2.67	4.88	0.26	0.22	0.68	1.26	50.17	224.89	406.83	1103.37	83.35
G15	248.22	21.63	715.69	16.14	1.98	4.26	0.26	0.23	0.74	0.82	42.94	196.13	320.26	941.74	76.57
G16	363.70	16.28	1029.41	23.31	3.36	4.95	0.36	0.25	0.97	1.01	37.70	115.76	396.57	836.29	86.22
G17	273.21	21.37	1137.25	12.38	2.64	4.69	0.25	0.22	0.70	1.05	56.86	218.40	429.83	1078.05	82.57
G18	375.44	24.54	931.37	16.78	2.64	4.62	0.30	0.21	0.98	1.16	36.45	200.15	346.47	1049.04	81.65
G19	244.63	18.45	892.16	16.38	2.88	5.74	0.30	0.21	0.91	1.26	42.23	253.45	389.01	1308.56	86.78
G20	233.45	21.79	578.43	18.26	2.07	4.24	0.28	0.22	0.58	0.82	43.69	118.56	330.11	778.16	79.75
G21	329.00	15.50	1009.80	22.55	3.29	6.40	0.31	0.24	0.90	1.30	46.85	206.83	437.54	1255.35	90.58
G22	248.98	20.39	745.10	16.40	2.55	5.76	0.28	0.23	0.71	0.98	41.00	285.45	350.19	1364.63	80.95
G23	228.66	19.80	460.78	23.78	1.88	3.83	0.26	0.26	0.63	0.76	45.85	123.48	318.77	730.86	74.12
G24	281.05	20.69	617.65	21.32	2.24	4.21	0.24	0.25	0.88	1.00	50.44	97.45	375.76	710.82	83.33

<sup>†</sup> Yield, grain yield; NS, number of spikes per m<sup>2</sup>; NGS, number of grains per spike; TKW, 1000-kernel weight; V<sub>1</sub>, root volume at a depth of 25 cm, V<sub>2</sub>, root volume at a depth of more than 25 cm; D<sub>1</sub>, root diameter at a depth of 25 cm, D<sub>2</sub>, root diameter at a depth of more than 25 cm; DW<sub>1</sub>, root dry weight at a depth of 25 cm, DW<sub>2</sub>, root dry weight at a depth of more than 25 cm; L<sub>1</sub>, root length at a depth of 25 cm, L<sub>2</sub>, root length at a depth of more than 25 cm; A<sub>1</sub>, root area at a depth of 25 cm, A<sub>2</sub>, root area at a depth of more than 25 cm; DP, depth of root penetration.

جدول ۳- میانگین ژنوتیپ × عملکرد × صفت (GYT) برای ۲۴ ژنوتیپ گندم طی دو سال<sup>†</sup>Table 3. Mean of genotype × yield × trait (GYT) for 24 wheat genotypes during two years<sup>†</sup>

Genotype	TKW*Y	NS*Y	NGS*Y	V <sub>1</sub> *Y	V <sub>2</sub> *Y	D <sub>1</sub> *Y	D <sub>2</sub> *Y	DW <sub>1</sub> *Y	DW <sub>2</sub> *Y	L <sub>1</sub> *Y	L <sub>2</sub> *Y	A <sub>1</sub> *Y	A <sub>2</sub> *Y	DP*Y
G1	7999.79	233764.27	5131.54	1157.55	1378.73	97.29	70.71	284.70	298.58	16871.18	50123.81	152996.85	289439.74	24963.90
G2	10194.75	498298.73	9686.59	1628.21	2057.26	145.16	123.60	570.93	447.55	20187.16	52725.68	201919.61	364101.12	39744.76
G3	5535.19	242463.24	5500.70	886.72	1212.32	87.69	69.34	277.28	276.58	12538.00	80750.32	117801.49	311221.51	24978.56
G4	5522.80	274425.22	6785.83	898.60	1460.22	101.78	71.07	296.54	356.38	13233.84	42045.27	119532.85	275596.25	27351.87
G5	6016.85	223825.26	6723.22	1237.35	1044.24	95.13	83.44	345.45	237.99	14534.23	31421.66	149416.69	196510.24	25623.87
G6	4409.95	183104.43	4552.71	438.91	1004.87	67.31	66.67	158.31	178.06	8297.45	36142.82	66454.46	198873.42	17872.18
G7	5153.53	270408.98	4656.61	770.63	1279.91	84.90	59.92	216.79	258.76	11209.23	55705.30	103085.85	289592.07	24832.93
G8	7214.89	291266.87	4369.19	993.17	1286.11	90.28	76.90	291.03	255.06	13858.70	37670.82	129857.80	242476.45	25517.92
G9	5100.08	235279.12	4221.78	757.72	1335.32	75.94	68.11	250.14	236.99	11474.66	36687.36	104317.77	242967.06	21616.01
G10	6735.13	296272.35	5290.61	956.89	2069.54	97.18	69.32	265.93	431.83	13121.36	85389.89	124079.76	458930.06	26720.10
G11	4295.48	306699.15	3015.40	636.81	1609.08	70.58	52.57	231.03	277.52	9398.71	61743.57	86520.59	346416.31	20744.10
G12	6554.33	163041.91	4282.72	699.11	1095.07	68.43	60.92	235.97	282.56	13540.14	42680.44	108186.47	231297.60	21459.12
G13	7091.66	365916.96	3801.69	945.53	1713.33	93.64	67.56	216.11	388.58	12881.99	58889.56	122997.76	348815.55	25942.34
G14	6891.45	259760.28	4131.97	767.99	1405.69	75.52	62.64	196.42	363.08	14449.68	64767.98	117164.83	317765.32	24004.39
G15	5368.28	177644.56	4006.41	490.52	1057.87	65.29	58.09	182.98	204.66	10657.67	48683.17	79493.52	233755.27	19005.05
G16	5919.62	374398.07	8476.76	1221.00	1801.19	130.73	92.54	352.68	368.68	13710.39	42103.18	144233.51	304159.95	31357.09
G17	5837.86	310704.73	3383.33	722.04	1281.47	68.98	60.98	191.95	287.60	15534.99	59666.86	117433.40	294529.81	22557.70
G18	9214.31	349675.61	6300.60	992.24	1734.18	111.59	80.46	366.77	437.15	13684.06	75146.38	130079.00	393854.31	30654.77
G19	4512.38	218250.43	4006.98	704.77	1403.72	72.85	51.92	223.04	307.07	10330.43	62001.66	95163.65	320115.33	21230.01
G20	5087.66	135032.54	4262.66	483.57	989.37	65.43	52.33	136.10	192.12	10198.51	27676.41	77061.79	181657.57	18617.32
G21	5099.01	332220.54	7420.21	1080.98	2107.14	100.34	79.28	296.97	427.79	15412.11	68044.45	143949.33	413005.38	29801.47
G22	5076.10	185511.15	4082.84	634.29	1434.57	69.99	56.33	177.12	244.74	10207.32	71068.87	87189.29	339760.21	20154.57
G23	4527.90	105361.50	5438.39	430.09	876.52	59.07	59.99	143.03	173.55	10483.43	28234.91	72890.02	167115.59	16947.28
G24	5814.04	173589.10	5992.52	629.01	1184.42	68.00	70.77	247.09	280.14	14176.77	27387.85	105606.48	199774.03	23420.75

<sup>†</sup> Yield, grain yield; NS, number of spikes per m<sup>2</sup>; NGS, number of grains per spike; TKW, 1000-kernel weight; V<sub>1</sub>, root volume at a depth of 25 cm, V<sub>2</sub>, root volume at a depth of more than 25 cm; D<sub>1</sub>, root diameter at a depth of 25 cm, D<sub>2</sub>, root diameter at a depth of more than 25 cm; DW<sub>1</sub>, root dry weight at a depth of 25 cm, DW<sub>2</sub>, root dry weight at a depth of more than 25 cm; L<sub>1</sub>, root length at a depth of 25 cm, L<sub>2</sub>, root length at a depth of more than 25 cm; A<sub>1</sub>, root area at a depth of 25 cm, A<sub>2</sub>, root area at a depth of more than 25 cm; DP, depth of root penetration.

جدول ۴- داده‌های استاندارد شده ژنوتیپ × عملکرد × صفت (GYT) و میانگین شاخص برتری برای ۲۴ ژنوتیپ گندم در طی دو سال<sup>†</sup>

Table 4. Standardized genotype × yield × trait (GYT) data and mean superiority index for 24 wheat genotypes during two years<sup>†</sup>

Genotype	TKW*Y	NS*Y	NGS*Y	V <sub>1</sub> *Y	V <sub>2</sub> *Y	D <sub>1</sub> *Y	D <sub>2</sub> *Y	DW <sub>1</sub> *Y	DW <sub>2</sub> *Y	L <sub>1</sub> *Y	L <sub>2</sub> *Y	A <sub>1</sub> *Y	A <sub>2</sub> *Y	DP*Y	Mean SI
G1	1.34	-0.29	-0.06	1.12	-0.09	0.53	0.09	0.31	-0.02	1.52	-0.11	1.27	-0.01	0.12	0.41
G2	2.85	2.76	2.77	2.78	1.88	2.80	3.58	3.48	1.79	2.80	0.05	2.89	0.99	3.09	2.46
G3	-0.35	-0.19	0.17	0.16	-0.57	0.08	0.00	0.23	-0.29	-0.15	1.72	0.10	0.28	0.12	0.09
G4	-0.36	0.18	0.97	0.21	0.15	0.75	0.11	0.44	0.68	0.12	-0.59	0.15	-0.19	0.60	0.23
G5	-0.02	-0.40	0.93	1.40	-1.06	0.43	0.93	0.99	-0.76	0.62	-1.22	1.15	-1.25	0.25	0.14
G6	-1.13	-0.87	-0.42	-1.41	-1.17	-0.88	-0.18	-1.09	-1.49	-1.78	-0.94	-1.61	-1.22	-1.31	-1.11
G7	-0.61	0.14	-0.36	-0.24	-0.37	-0.05	-0.62	-0.44	-0.51	-0.66	0.22	-0.39	-0.01	0.09	-0.27
G8	0.80	0.38	-0.54	0.54	-0.36	0.20	0.50	0.38	-0.55	0.36	-0.85	0.50	-0.64	0.23	0.07
G9	-0.65	-0.27	-0.63	-0.29	-0.21	-0.47	-0.08	-0.07	-0.77	-0.55	-0.91	-0.35	-0.63	-0.55	-0.46
G10	0.47	0.43	0.04	0.41	1.91	0.53	0.00	0.11	1.60	0.08	1.99	0.31	2.25	0.47	0.76
G11	-1.20	0.55	-1.38	-0.72	0.58	-0.73	-1.11	-0.28	-0.28	-1.35	0.58	-0.94	0.75	-0.73	-0.45
G12	0.35	-1.10	-0.59	-0.50	-0.91	-0.83	-0.56	-0.23	-0.22	0.24	-0.55	-0.22	-0.78	-0.59	-0.46
G13	0.72	1.24	-0.89	0.37	0.88	0.36	-0.12	-0.45	1.07	-0.01	0.41	0.27	0.78	0.31	0.35
G14	0.58	0.01	-0.68	-0.25	-0.01	-0.49	-0.45	-0.66	0.76	0.59	0.76	0.08	0.37	-0.08	0.04
G15	-0.47	-0.93	-0.76	-1.23	-1.02	-0.98	-0.75	-0.81	-1.17	-0.87	-0.19	-1.18	-0.75	-1.08	-0.87
G16	-0.09	1.33	2.02	1.34	1.14	2.11	1.53	1.07	0.83	0.31	-0.59	0.98	0.19	1.40	0.97
G17	-0.14	0.60	-1.15	-0.42	-0.37	-0.80	-0.56	-0.71	-0.16	1.01	0.46	0.08	0.06	-0.37	-0.18
G18	2.17	1.05	0.67	0.54	0.94	1.21	0.73	1.22	1.66	0.30	1.38	0.50	1.39	1.26	1.07
G19	-1.05	-0.46	-0.76	-0.48	-0.02	-0.62	-1.15	-0.37	0.08	-1.00	0.60	-0.66	0.40	-0.63	-0.44
G20	-0.66	-1.42	-0.60	-1.26	-1.22	-0.97	-1.13	-1.33	-1.32	-1.05	-1.45	-1.26	-1.45	-1.16	-1.16
G21	-0.65	0.85	1.36	0.85	2.02	0.68	0.65	0.45	1.55	0.96	0.96	0.97	1.64	1.09	0.96
G22	-0.67	-0.84	-0.71	-0.72	0.07	-0.75	-0.86	-0.88	-0.68	-1.04	1.14	-0.92	0.66	-0.85	-0.50
G23	-1.04	-1.76	0.13	-1.44	-1.54	-1.27	-0.62	-1.25	-1.55	-0.94	-1.41	-1.40	-1.64	-1.49	-1.23
G24	-0.16	-0.98	0.47	-0.74	-0.65	-0.85	0.09	-0.10	-0.25	0.49	-1.46	-0.31	-1.21	-0.19	-0.42

<sup>†</sup> Yield, grain yield; NS, number of spikes per m<sup>2</sup>; NGS, number of grains per spike; TKW, 1000-kernel weight; V<sub>1</sub>, root volume at a depth of 25 cm, V<sub>2</sub>, root volume at a depth of more than 25 cm; D<sub>1</sub>, root diameter at a depth of 25 cm, D<sub>2</sub>, root diameter at a depth of more than 25 cm; DW<sub>1</sub>, root dry weight at a depth of 25 cm, DW<sub>2</sub>, root dry weight at a depth of more than 25 cm; L<sub>1</sub>, root length at a depth of 25 cm, L<sub>2</sub>, root length at a depth of more than 25 cm; A<sub>1</sub>, root area at a depth of 25 cm, A<sub>2</sub>, root area at a depth of more than 25 cm; DP, depth of root penetration.

## نتایج

## تجزیه واریانس و عملکرد ژنوتیپ‌ها

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد که اثر سال برای تمام صفات اندازه‌گیری شده به‌جز قطر ریشه تا عمق ۲۵ سانتی‌متر معنی‌دار بود (جدول ۵). با توجه به این که دو سال زراعی از نظر بارندگی (حداقل و حداکثر بارندگی در دو سال به ترتیب ۲۴۵/۷ و ۳۷۷/۲ میلی‌متر و مقدار بارندگی متفاوت) و دما (حداقل و حداکثر دما در دو سال به ترتیب ۰/۲۱ و ۲۶/۳ درجه سلسیوس و میانگین دما در دو سال به ترتیب ۱۱/۸۲ و ۱۰/۱۴ درجه سلسیوس) متفاوت بودند، به طوری که در سال اول بارندگی با پراکنش نسبتاً مناسب تا خرداد ماه ادامه داشت و همچنین روند افزایش دما به صورت تدریجی بود، اما در سال دوم اجرای آزمایش میزان بارندگی در اوایل فصل رشد زیاد بود، ولی بلافاصله بعد از مرحله گرده‌افشانی گیاهان به شدت کاهش پیدا کرد و علاوه بر این، دما نیز بعد از مرحله گرده‌افشانی با شدت

بیش‌تری افزایش یافت (شکل ۲)، بنابراین این نتیجه قابل انتظار بود. همچنین، نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بین ژنوتیپ‌های گندم مورد مطالعه از لحاظ تمام صفات اندازه‌گیری شده به‌جز قطر ریشه در عمق بیش‌تر از ۲۵ سانتی‌متر اختلاف معنی‌داری وجود داشت که نشان دهنده تنوع موجود بین آن‌ها از لحاظ این صفات است. معنی‌دار شدن برهمکنش ژنوتیپ × سال برای کلیه صفات به‌غیر از قطر ریشه در عمق بیش‌تر از ۲۵ سانتی‌متر نیز نشان دهنده واکنش متفاوت ژنوتیپ‌های مورد بررسی به تغییرات شرایط اقلیمی سال‌ها از لحاظ صفات مزبور است. نتایج نشان داد که میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها از ۱۱۸/۹۴ گرم در متر مربع (برای ژنوتیپ ۲۳ در سال دوم) تا ۵۵۵/۳۵ گرم در متر مربع (برای ژنوتیپ شماره ۲ در سال اول) متغیر بود. بیش‌ترین و کم‌ترین ضریب تغییرات از ۸/۲۳ تا ۷۸/۴ به ترتیب برای صفات عمق نفوذ ریشه و مجموع طول ریشه در عمق بیش‌تر از ۲۵ سانتی‌متر، متغیر بود.

جدول ۵- تجزیه واریانس مرکب عملکرد و اجزای عملکرد و صفات ریشه در ژنوتیپ‌های گندم

Source of variation †	df	Yield	NS	NGS	TKW	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>
Year (Y)	1	1017408.4**	540657.4*	219**	9792.5**	222.5**	599.9**	0.007 <sup>ns</sup>	0.55**
Error 1	4	2025.9	62764.3	9.6	12	0.4	8.7	0.008	0.009
Genotype (G)	23	16978.5**	246911.7**	70.1**	48**	1.7**	4.2**	0.004*	0.002 <sup>ns</sup>
G × Y	23	12114.7**	119615.3**	20.8**	27**	1.4*	4.3**	0.003*	0.002 <sup>ns</sup>
Error 2	92	4449.3	26106.1	6.8	10	0.79	1.8	0.002	0.002
CV (%)	-	22.9	18.4	6.14	15.3	31.4	27.9	16.4	21.5

Table 5. Continued

جدول ۵- ادامه

Source of variation	df	DW <sub>1</sub>	DW <sub>2</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	DP
Year (Y)	1	0.38*	36.8**	76727.5**	2903836.3**	4933858.5**	48739712.7**	18924.5**
Error 1	4	0.05	0.20	1989.7**	23673.1	40403.1	13841	58.5
Genotype (G)	23	0.15**	0.21**	1488.1	53765.4**	49084.9**	470968.8**	108.2 <sup>ns</sup>
G × Y	23	0.10*	0.19**	1468.6**	54090.7**	43408.1**	458343.1**	85.7*
Error 2	92	0.05	0.05	537.9	22622.5	18317	131353.7	47.1
CV (%)	-	27.1	23.7	48.9	78.4	33.7	36.3	8.2

† <sup>ns</sup>, \* and \*\* Not-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively. Yield, grain yield; NS, number of spikes per m<sup>2</sup>; NGS, number of grains per spike; TKW, 1000-kernel weight; V<sub>1</sub>, root volume at a depth of 25 cm, V<sub>2</sub>, root volume at a depth of more than 25 cm; D<sub>1</sub>, root diameter at a depth of 25 cm, D<sub>2</sub>, root diameter at a depth of more than 25 cm; DW<sub>1</sub>, root dry weight at a depth of 25 cm; DW<sub>2</sub>, root dry weight at a depth of more than 25 cm; L<sub>1</sub>, root length at a depth of 25 cm, L<sub>2</sub>, root length at a depth of more than 25 cm; A<sub>1</sub>, root area at a depth of 25 cm, A<sub>2</sub>, root area at a depth of more than 25 cm; DP, depth of root penetration.

**تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای داده‌های GT**

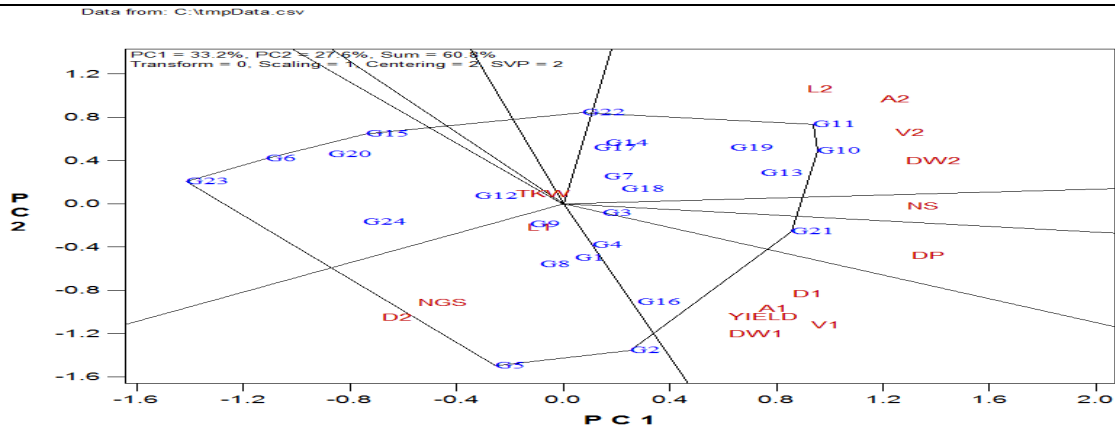
نتایج حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی با در نظر گرفتن مقادیر ویژه بزرگ‌تر از یک، صفات مورد بررسی را در سه مؤلفه اصلی گروه‌بندی کرد و این سه مؤلفه در مجموع ۷۶ درصد از تغییرات (داریانس) کل داده‌ها را توجیه کردند (جدول ۶). مؤلفه اصلی اول دارای ضرایب بزرگ برای صفات تعداد سنبله در متر مربع، حجم ریشه، وزن خشک ریشه و سطح ریشه در عمق بیش‌تر از ۲۵ سانتی‌متر و عمق نفوذ ریشه بود و ۳۳/۶ درصد از تغییرات داده‌ها توسط این مؤلفه توجیه شد. مؤلفه اصلی دوم نیز دارای ضرایب بزرگ و منفی برای صفات عملکرد دانه، حجم ریشه، قطر ریشه، وزن خشک ریشه و سطح ریشه تا عمق ۲۵ سانتی‌متر و قطر ریشه در عمق بیش‌تر از ۲۵ سانتی‌متر و ضریب بزرگ و مثبت برای طول ریشه در عمق بیش‌تر از ۲۵ سانتی‌متر بود. این مؤلفه ۲۷/۴ درصد از واریانس کل بین داده‌ها را توجیه کرد. مؤلفه اصلی سوم نیز که ۱۵ درصد از واریانس کل داده‌ها را توجیه کرد، دارای ضرایب بزرگ برای صفات وزن هزار دانه، طول و سطح ریشه تا عمق ۲۵ سانتی‌متر با علامت مثبت و تعداد دانه در سنبله با علامت منفی بود.

**بای پلات GT برای گروه‌بندی ژنوتیپ‌های گندم**

از بای پلات GT برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر از لحاظ چند صفت استفاده شد. در این بای پلات ژنوتیپ‌های قرار گرفته در هر رأس چندضلعی، بهترین ژنوتیپ از لحاظ صفات قرار گرفته در آن بخش هستند. بر اساس تجزیه دو ساله بای پلات GT (شکل ۳)، ژنوتیپ‌های ۲۲، ۱۱، ۱۰، ۲۱، ۲، ۵، ۲۳، ۶ و ۱۵ در رأس چندضلعی قرار گرفتند. ژنوتیپ‌های ۱۱ و ۱۰ مطلوب‌ترین ژنوتیپ‌ها از لحاظ صفات مربوط به ریشه در عمق خاک شامل طول، سطح، حجم و وزن خشک ریشه در عمق بیش از ۲۵ سانتی‌متر بودند. ژنوتیپ ۲۱ در رأس بخش قرار گرفت و بیش‌ترین عمق نفوذ ریشه را دارا بود. ژنوتیپ ۲ نیز بالاترین مقادیر را برای صفات مربوط به ریشه در خاک سطحی شامل قطر، سطح، حجم و وزن خشک ریشه تا عمق ۲۵ سانتی‌متر داشت. این ژنوتیپ بیش‌ترین مقدار عملکرد دانه را نیز داشت. ژنوتیپ ۵ در رأس بخش حاوی صفات تعداد دانه در سنبله و طول ریشه تا عمق ۲۵ سانتی‌متر قرار گرفت و مطلوب‌ترین ژنوتیپ از لحاظ این صفات بود. از طرفی ژنوتیپ‌های ۲۲، ۲۳، ۶ و ۱۵ از لحاظ هیچ‌یک از صفات مطالعه شده ژنوتیپ‌های مطلوبی نبودند.

جدول ۶- مقادیر ویژه ماتریس همبستگی برای صفات اندازه‌گیری شده در ژنوتیپ‌های گندم زمستانه با استفاده از روش مؤلفه اصلی  
Table 6. Eigen value of the correlation matrix for the estimated variables of winter wheat genotypes using principal component analysis

Trait	PC1	PC2	PC3
Grain yield	0.171	-0.334	-0.035
1000-kernel weight	-0.042	0.019	0.538
Number of spikes per m <sup>2</sup>	0.359	-0.018	-0.058
Number of grains per spike	-0.157	-0.284	-0.32
Root volume at a depth of 25 <sup>cm</sup>	0.259	-0.357	0.142
Root volume at a depth of more than 25 <sup>cm</sup>	0.349	0.197	-0.152
Root diameter at a depth of 25 <sup>cm</sup>	0.237	-0.274	-0.267
Root diameter at a depth of more than 25 <sup>cm</sup>	-0.223	-0.308	-0.144
Root dry weight at a depth of 25 <sup>cm</sup>	0.173	-0.379	-0.021
Root dry weight at a depth of more than 25 <sup>cm</sup>	0.365	0.116	0.064
Root length at a depth of 25 <sup>cm</sup>	-0.032	-0.074	0.569
Root length at a depth of more than 25 <sup>cm</sup>	0.26	0.321	0.003
Root surface at a depth of 25 <sup>cm</sup>	0.206	-0.31	0.368
Root area at a depth of more than 25 <sup>cm</sup>	0.336	0.292	-0.055
Depth of root penetration	0.365	-0.157	-0.035
Eigen value	5.0414	4.1104	2.2498
Variance percentage	0.336	0.274	0.15
Cumulative variance percentage	0.336	0.61	0.76



شکل ۳- نمودار چندضلعی بای پلات ژنوتیپ × صفت جهت تعیین بهترین ژنوتیپ از نظر صفات مختلف

Figure 3. Polygon diagram of the genotype × trait biplot to determine the best genotype in terms of different traits. Yield, grain yield; NS, number of spikes per m<sup>2</sup>; NGS, number of grains per spike; TKW, 1000-kernel weight; V<sub>1</sub>, root volume at a depth of 25 cm, V<sub>2</sub>, root volume at a depth of more than 25 cm; D<sub>1</sub>, root diameter at a depth of 25 cm, D<sub>2</sub>, root diameter at a depth of more than 25 cm; DW<sub>1</sub>, root dry weight at a depth of 25 cm; DW<sub>2</sub>, root dry weight at a depth of more than 25 cm; L<sub>1</sub>, root length at a depth of 25 cm, L<sub>2</sub>, root length at a depth of more than 25 cm; A<sub>1</sub>, root area at a depth of 25 cm, A<sub>2</sub>, root area at a depth of more than 25 cm; DP, depth of root penetration.

کرد و این مؤلفه اصلی شامل ترکیب صفات وزن هزار دانه، تعداد سنبله در متر مربع، حجم، قطر، وزن خشک، طول و سطح ریشه تا عمق ۲۵ سانتی‌متر، قطر و وزن خشک ریشه در عمق بیش از ۲۵ سانتی‌متر و عمق نفوذ ریشه با عملکرد بود. دومین مؤلفه اصلی شامل ترکیب صفات تعداد دانه در سنبله، حجم، طول و سطح ریشه در عمق بیش تر از ۲۵ سانتی‌متر با عملکرد بود که ۱۶/۶ درصد از کل تغییرات داده‌ها را به‌خود اختصاص داد.

بر اساس نتایج تجزیه گرافیکی GYT فاکتورهای اصلی اول و دوم به ترتیب ۶۹/۸ و ۱۶/۶ درصد و در مجموع ۸۶/۴ درصد از کل واریانس داده‌ها را به‌خود اختصاص دادند. با توجه به این‌که این دو فاکتور بیش از ۷۰ درصد از واریانس داده‌ها را توجیه کردند، این موضوع نشان‌دهنده اعتبار بالای بای پلات‌های به‌دست آمده از این مطالعه در توصیف تغییرات صفات مورد مطالعه در تجزیه گرافیکی GYT می‌باشد. باید توجه داشت که اگر مجموع دو فاکتور اصلی اول اکثریت تغییرات داده‌ها را به‌خود اختصاص ندهد، ماهیت تجزیه گرافیکی را پیچیده می‌کند، اما اعتبار بای پلات را باطل نمی‌کند.

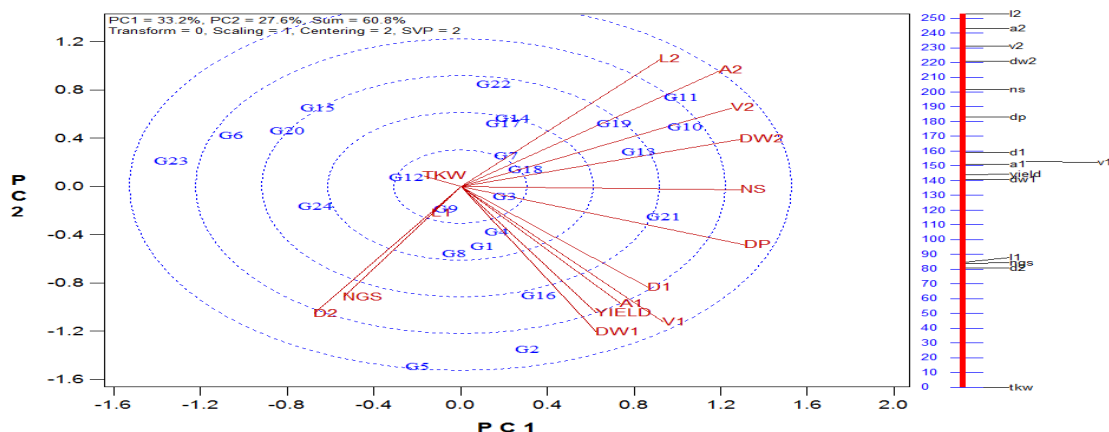
### نمایش روابط بین صفات با استفاده از بای پلات GT

ارتباط بین صفات ریشه‌ای و عملکرد و اجزای عملکرد دانه در میانگین دو سال با استفاده از بای پلات GT در شکل ۴ ارائه شده است. به‌علت وجود زاویه کوچک‌تر از ۹۰ درجه، همبستگی مثبت و قوی بین عملکرد دانه و تعداد سنبله در واحد سطح با صفات ریشه تا عمق ۲۵ سانتی‌متر مشاهده شد، اگرچه همبستگی بین عملکرد دانه و تعداد سنبله با صفات ریشه در عمق بیش از ۲۵ سانتی‌متر نیز مثبت بود. همبستگی بین وزن هزار دانه با صفات ریشه‌ای به‌غیر از قطر ریشه در عمق بیش از ۲۵ سانتی‌متر منفی بود. صفت تعداد دانه در سنبله نیز همبستگی قوی و مثبتی را با طول ریشه تا عمق ۲۵ سانتی‌متر و قطر ریشه در عمق بیش از ۲۵ سانتی‌متر نشان داد.

### تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای داده‌های GYT

نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای داده‌های GYT در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج نشان داد که دو مؤلفه اصلی اول با داشتن مقادیر ویژه بزرگ‌تر از یک، ۸۶/۴ درصد از کل واریانس بین داده‌ها را توجیه کردند. اولین مؤلفه اصلی ۶۹/۸ درصد از تغییرات کل داده‌ها را توجیه

Data from: C:\tmpData.csv



شکل ۴- نمای برداری بای پلات ژنوتیپ در صفت برای نشان دادن روابط بین صفات

Figure 4. Vector view of the genotype  $\times$  trait biplot to show relationships between traits. Yield, grain yield; NS, number of spikes per  $m^2$ ; NGS, number of grains per spike; TKW, 1000-kernel weight;  $V_1$ , root volume at a depth of 25 cm,  $V_2$ , root volume at a depth of more than 25 cm;  $D_1$ , root diameter at a depth of 25 cm,  $D_2$ , root diameter at a depth of more than 25 cm;  $DW_1$ , root dry weight at a depth of 25 cm,  $DW_2$ , root dry weight at a depth of more than 25 cm;  $L_1$ , root length at a depth of 25 cm,  $L_2$ , root length at a depth of more than 25 cm;  $A_1$ , root area at a depth of 25 cm,  $A_2$ , root area at a depth of more than 25 cm; DP, depth of root penetration.

جدول ۷- مقادیر ویژه ماتریس همبستگی برای ترکیبات عملکرد  $\times$  صفت ژنوتیپ‌های گندم زمستانه با استفاده از روش مؤلفه اصلی

Table 7. Eigen value of the correlation matrix for the estimated yield  $\times$  trait combinations of winter wheat genotypes using the principal component analysis

Variable	PC1	PC2
Yield* TKW (1000-kernel weight)	0.248	-0.082
Yield*NS (number of spike per $m^2$ )	0.283	0.134
Yield*NGS (number of grains per spike)	0.242	-0.268
Yield* $V_1$ (root volume at a depth of 25 cm)	0.301	-0.112
Yield* $V_2$ (root volume at a depth of more than 25 cm)	0.257	0.322
Yield* $D_1$ (root diameter at a depth of 25 cm)	0.303	-0.071
Yield* $D_2$ (root diameter at a depth of more than 25 cm)	0.28	-0.264
Yield* $DW_1$ (root dry weight at a depth of 25 cm)	0.295	-0.165
Yield* $DW_2$ (oot dry weight at a depth of more than 25 cm)	0.274	0.261
Yield* $L_1$ (root length at a depth of 25 cm)	0.262	-0.167
Yield* $L_2$ (root length at a depth of more than 25 cm)	0.111	0.564
Yield* $A_1$ (root area at a depth of 25 cm)	0.301	-0.127
Yield* $A_2$ (root area at a depth of more than 25 cm)	0.202	0.503
Yield* DP (depth of root penetration)	0.315	-0.036
Eigen value	9.7745	2.322
Proportion (%)	0.698	0.166
Cumulative (%)	0.698	0.864

۱۰، ۲، ۵ و ۲۳ در رأس این چند ضلعی قرار گرفته‌اند. تمامی ترکیبات عملکرد-صفت شامل عملکرد-حجم، قطر، طول، سطح و وزن خشک ریشه تا عمق ۲۵ سانتی‌متر و عملکرد-حجم، قطر و وزن خشک ریشه در عمق بیش از ۲۵ سانتی‌متر و عملکرد-وزن هزار دانه، عملکرد-تعداد دانه در سنبله و عملکرد-تعداد سنبله در متر مربع به‌جز

### بای پلات GYT برای گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها

نمودار چندضلعی بای پلات از متصل کردن دورترین ژنوتیپ‌ها (از مبدأ بای پلات) به یکدیگر ایجاد شده است (شکل ۵). بر این اساس می‌توان ژنوتیپ‌های برتر از لحاظ ترکیب عملکرد-صفت را شناسایی کرد. در این بای پلات هفت بخش قابل مشاهده است. ژنوتیپ‌های شماره ۱۱،

سطح و وزن خشک ریشه تا عمق ۲۵ سانتی‌متر، قطر ریشه در عمق بیش از ۲۵ سانتی‌متر، عمق نفوذ ریشه، تعداد دانه در سنبله و وزن هزار دانه قوی‌تر از ترکیبات عملکرد- صفت سمت مقابل محور بود.

### بای‌پلات GYT برای نشان دادن ارتباط بین ترکیبات مختلف عملکرد-صفت

ارتباط بین ترکیبات مختلف عملکرد-صفت از طریق زاویه‌ای که بین آن‌ها در بای‌پلات وجود دارد، تعیین می‌شود (شکل ۷). از آنجایی که تمام ترکیبات عملکرد-صفت، عملکرد را به‌عنوان یک جزء دارند، تمایل دارند ارتباط مثبت با هم داشته باشند. این موضوع با زاویه‌های حاده قابل مشاهده است. این یک ویژگی مهم بای‌پلات GYT در مقابل بای‌پلات GT است، زیرا به ژنوتیپ‌ها اجازه رتبه‌بندی بر اساس عملکرد-صفت داده می‌شود.

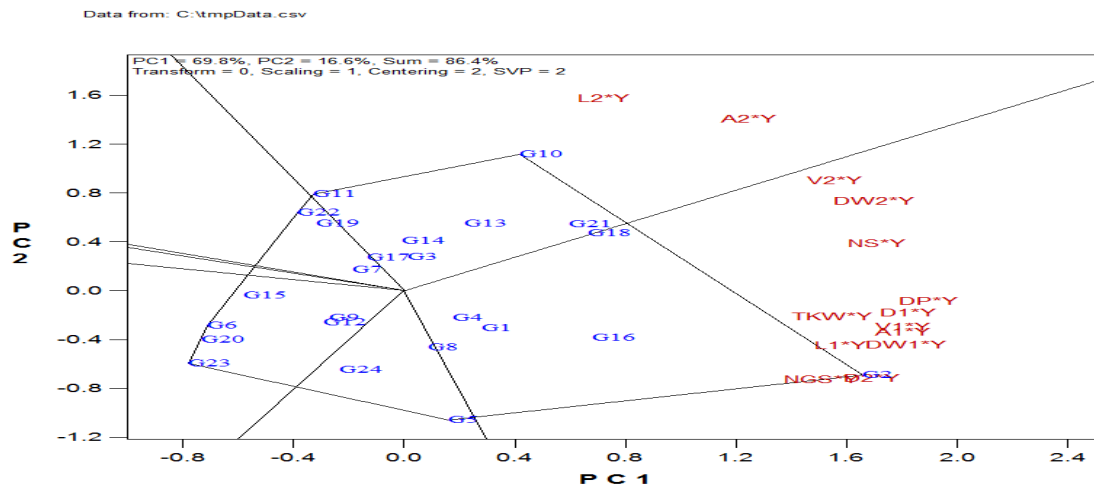
### بای‌پلات GYT به‌منظور مقایسه ژنوتیپ‌های مورد مطالعه با ژنوتیپ ایده‌آل

بر اساس بای‌پلات شکل ۸، لاین شماره ۲ نزدیک‌ترین ژنوتیپ به ژنوتیپ ایده‌آل بود و پس از آن ژنوتیپ‌های شماره ۱۶، ۱۸ و ۲۱ در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

عملکرد-طول و سطح ریشه در عمق بیش از ۲۵ سانتی‌متر، در بخشی قرار گرفته‌اند که لاین شماره ۲ در رأس آن قرار دارد. بنابراین لاین شماره ۲ بهترین ژنوتیپ از لحاظ این صفات بوده است. پس از لاین شماره ۲، ارقام تک‌آب و رصد و لاین‌های شماره ۴، ۱ و ۸ نیز لاین‌های خوب از لحاظ این صفات بودند. ژنوتیپ‌های شماره ۱۰ و ۱۱ در رأس بخشی قرار دارند که ترکیب عملکرد با طول و سطح ریشه در عمق بیش از ۲۵ سانتی‌متر در آن بخش قرار دارد و از این‌رو این دو ژنوتیپ، ژنوتیپ‌های مطلوب از نظر این دو صفت بودند. در مقابل، هیچ صفتی در داخل بخش‌هایی که ژنوتیپ‌های ۵ و ۲۳ در رأس آن قرار گرفته‌اند، وجود ندارد، به این معنی که این ژنوتیپ‌ها از لحاظ هیچ‌کدام از ترکیبات عملکرد-صفت برتری نداشتند.

### بای‌پلات GYT برای مقایسه ژنوتیپ‌ها

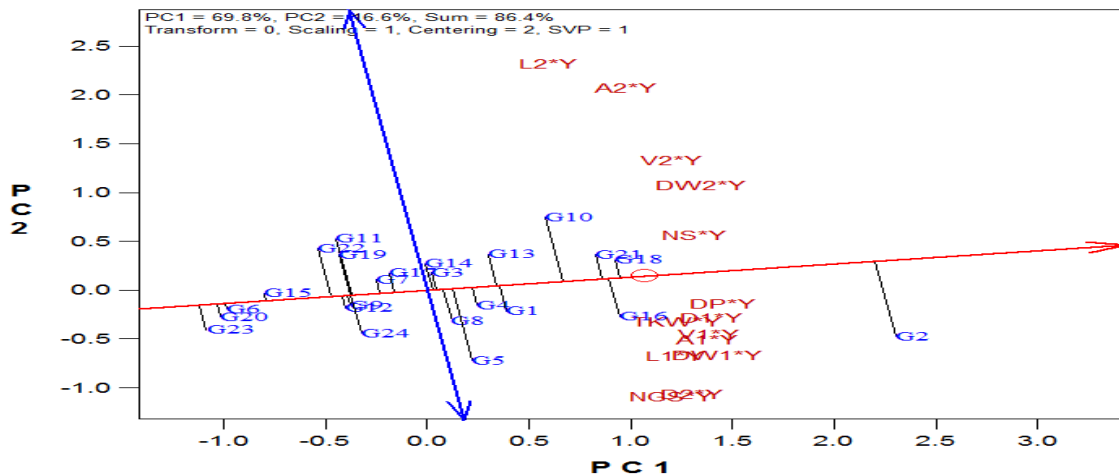
بای‌پلات شکل ۶ بر اساس ارزش مجزای هر ژنوتیپ به‌منظور مقایسه ژنوتیپ‌ها رسم شده است. بر اساس این بای‌پلات، ژنوتیپ‌های دارای بالاترین و پایین‌ترین رتبه بر اساس صفات مورد بررسی، به ترتیب ژنوتیپ‌های ۲ و ۲۳ بودند. لاین شماره ۲ به‌عنوان بهترین ژنوتیپ در بین ژنوتیپ‌های مورد نظر برای ترکیبات عملکرد-صفت سمت خود شامل ترکیب عملکرد با صفات حجم، قطر، طول،



شکل ۵- نمودار چند ضلعی بای‌پلات ژنوتیپ × صفت × عملکرد (GYT) برای تعیین بهترین ژنوتیپ از لحاظ ترکیب عملکرد-صفت. Figure 5. Polygon diagram of the genotype × yield × trait biplot (GYT) to determine the best genotype in terms of yield-trait combination. Y, grain yield; NS, number of spikes per m<sup>2</sup>; NGS, number of grains per spike; TKW, 1000-kernel weight; V<sub>1</sub>, root volume at a depth of 25 cm, V<sub>2</sub>, root volume at a depth of more than 25 cm; D<sub>1</sub>, root diameter at a depth of 25 cm, D<sub>2</sub>, root diameter at a depth of more than 25 cm; DW<sub>1</sub>, root dry weight at a depth of 25 cm; DW<sub>2</sub>, root dry weight at a depth of more than 25 cm; L<sub>1</sub>, root length at a depth of 25 cm, L<sub>2</sub>, root length at a depth of more than 25 cm; A<sub>1</sub>, root area at a depth of 25 cm, A<sub>2</sub>, root area at a depth of more than 25 cm; DP, depth of root penetration.



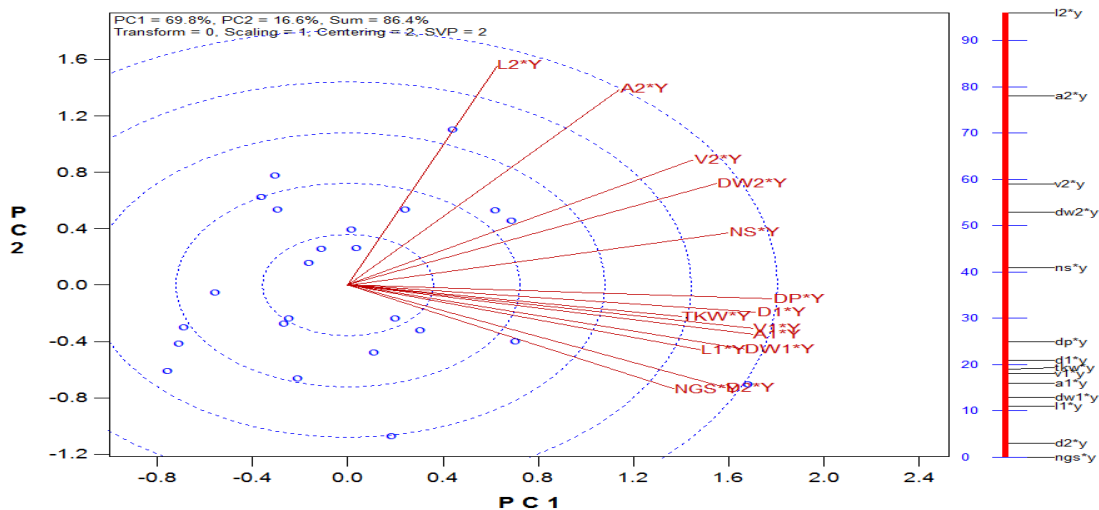
Data from: C:\tmpData.csv



شکل ۶- نمای (ATC) بای پلات ژنوتیپ × عملکرد × صفت (GYT) برای رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها

Figure 6. Average tester coordinate (ATC) view of the genotype × yield × trait (GYT) biplot. Y, grain yield; NS, number of spikes per m<sup>2</sup>; NGS, number of grains per spike; TKW, 1000-kernel weight; V<sub>1</sub>, root volume at a depth of 25 cm, V<sub>2</sub>, root volume at a depth of more than 25 cm; D<sub>1</sub>, root diameter at a depth of 25 cm, D<sub>2</sub>, root diameter at a depth of more than 25 cm; DW<sub>1</sub>, root dry weight at a depth of 25 cm; DW<sub>2</sub>, root dry weight at a depth of more than 25 cm; L<sub>1</sub>, root length at a depth of 25 cm, L<sub>2</sub>, root length at a depth of more than 25 cm; A<sub>1</sub>, root area at a depth of 25 cm, A<sub>2</sub>, root area at a depth of more than 25 cm; DP, depth of root penetration.

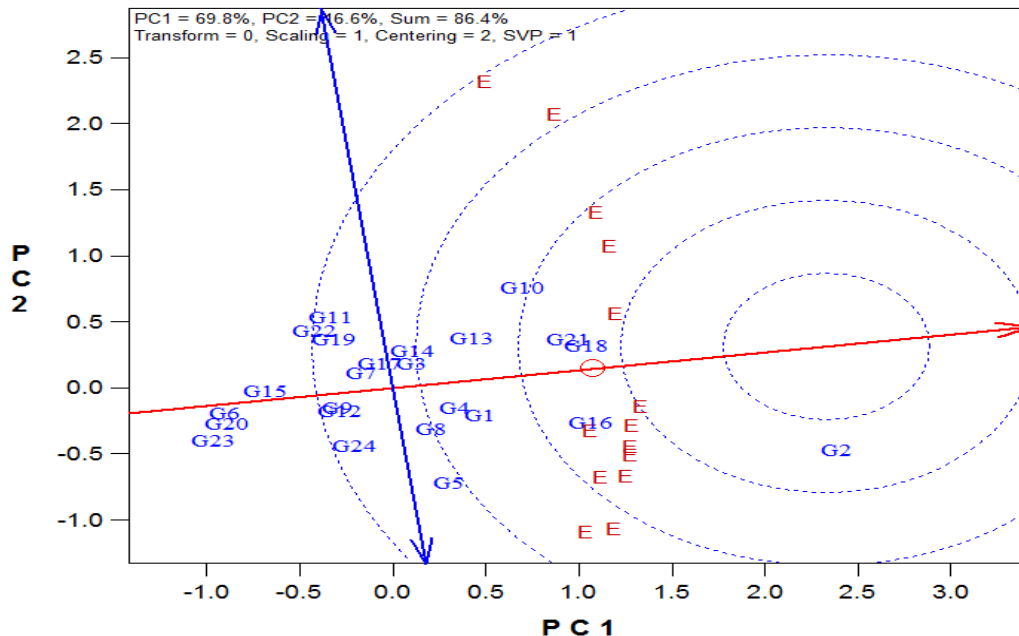
Data from: C:\tmpData.csv



شکل ۷- نمای برداری بای پلات ژنوتیپ × صفت × عملکرد (GYT) و نمودار همبستگی بین ترکیبات مختلف عملکرد- صفت

Figure 7. Vector view of the genotype × yield × trait biplot (GYT) and correlation diagram between different yield- trait combinations. Y, grain yield; NS, number of spikes per m<sup>2</sup>; NGS, number of grains per spike; TKW, 1000-kernel weight; V<sub>1</sub>, root volume at a depth of 25 cm, V<sub>2</sub>, root volume at a depth of more than 25 cm; D<sub>1</sub>, root diameter at a depth of 25 cm, D<sub>2</sub>, root diameter at a depth of more than 25 cm; DW<sub>1</sub>, root dry weight at a depth of 25 cm; DW<sub>2</sub>, root dry weight at a depth of more than 25 cm; L<sub>1</sub>, root length at a depth of 25 cm, L<sub>2</sub>, root length at a depth of more than 25 cm; A<sub>1</sub>, root area at a depth of 25 cm, A<sub>2</sub>, root area at a depth of more than 25 cm; DP, depth of root penetration.

Data from: D:\85\gvt.csv



شکل ۸- تعیین ژنوتیپ‌های ایده‌آل از لحاظ ترکیب عملکرد-صفت

Figure 8. Identification of ideal genotypes based on yield x trait combination

## بحث

از آنجایی که عملکرد گندم دیم وابسته به رطوبت ذخیره شده در خاک در طول دوره بارش است (Oberholzer *et al.*, 2017)، بررسی تغییرپذیری صفات ریشه و اساس ژنتیکی پاسخ‌های ریشه در شرایط متغیر خاک برای مشارکت این صفات در بهبود سازگاری گیاهان به تنش خشکی ضروری است (Placido *et al.*, 2020). بنابراین، اصلاح ارقام زراعی جدید با سیستم‌های ریشه کارآمد، پتانسیل بسیار خوبی برای بهبود بهره‌وری از منابع و سازگاری گیاهان با آب و هوای ناپایدار دارد (Jia *et al.*, 2019). مطالعه صفات ریشه مانند اصلاح برای ویژگی‌های اندام‌های هوایی می‌تواند سبب شناخت عوامل مؤثر بر افزایش عملکرد شود و در شرایط تنش، موفقیت تولید را تضمین کند (Hu *et al.*, 2015). به این ترتیب، اصلاح صفات ریشه‌ای می‌تواند در کنار عملکرد به‌عنوان اولین هدف برنامه‌های اصلاحی در نظر گرفته شود (Reynolds & Langridge, 2016). دو روش گرافیکی تجزیه ژنوتیپ-عملکرد (Jia *et al.*, 2019) و ژنوتیپ-عملکرد-صفت (GYT) برای انتخاب ژنوتیپ برتر با در نظر گرفتن صفات متعدد برای غلبه بر مشکل برهم‌کنش صفات-

ژنوتیپ با محیط و ارتباط منفی بین صفات مطلوب، پیشنهاد شده است (Yan & Frégeau-Reid, 2018; Merrick *et al.*, 2020; Faheem *et al.*, 2021). این‌حال، انتخاب ژنوتیپ بر اساس صفات متعدد در چند سال غالباً تحت تأثیر شرایط غیرقابل پیش‌بینی دیم قرار می‌گیرد (Mohammadi, 2019).

در مطالعه حاضر از روش‌های GT و GYT برای انتخاب ژنوتیپ مطلوب و پروفایل صفات ریشه‌ای در کنار عملکرد و اجزای عملکرد در ارقام گندم دیم پاییزه و لاین‌های پیشرفته گندم بر اساس داده‌های چندصفتی و چند ساله در شرایط دیم ایران استفاده شد که بر اساس بررسی‌های انجام شده تا به حال از این روش‌ها برای بررسی ژنوتیپ‌های گندم با در نظر گرفتن ترکیب عملکرد با صفات ریشه‌ای استفاده نشده است. نتایج نشان داد که بای‌پلات GYT ۸۴/۹ درصد و بای‌پلات GT ۶۱ درصد از کل واریانس داده‌ها را توجیه کردند که نشان دهنده اعتبار و دقت بیش‌تر بای‌پلات GYT در نمایش پروفایل صفات می‌باشد. اعتبار بیش‌تر بای‌پلات GYT در تحقیقات متعدد دیگر هم گزارش شده است (Kendal, 2020; Merrick *et al.*, 2020; Rahmati, 2020; Faheem *et al.*, 2021; Peixoto *et al.*, 2022; Gholizadeh &

حجم، طول، وزن خشک و سطح ریشه در عمق بیش از ۲۵ سانتی‌متر بود. کوتاه‌تر بودن طول بردار برای ژنوتیپ ۲۱ در این بای‌پلات نشان دهنده نوسان کم‌تر این ژنوتیپ از لحاظ صفات مذکور بود. ژنوتیپ ۲ نیز مطلوب‌ترین ژنوتیپ از لحاظ صفات عملکرد، حجم، قطر، سطح، وزن خشک و طول ریشه تا عمق ۲۵ سانتی‌متر و تعداد دانه در سنبله بود. در این بای‌پلات ژنوتیپ ۲۳ کم‌ترین مقدار عملکرد را داشت. در بای‌پلات ATC در روش GYT تعداد ۱۲ ژنوتیپ از ژنوتیپ‌های مورد بررسی عملکردی بیش‌تر از متوسط و ۱۲ ژنوتیپ نیز عملکردی کم‌تر از متوسط داشتند. در این روش ژنوتیپ ۲ به‌عنوان بهترین ژنوتیپ تعیین شد که بیش‌ترین مقدار را برای ترکیب صفات تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه، عمق نفوذ ریشه و حجم، قطر، وزن خشک و سطح ریشه تا عمق ۲۵ سانتی‌متر و قطر ریشه در عمق بیش‌تر از ۲۵ سانتی‌متر با عملکرد دانه داشت. طول بردار زیاد برای این ژنوتیپ نشان دهنده نوسان این ژنوتیپ از لحاظ صفات مذکور طی دو سال آزمایش بود. ژنوتیپ‌های ۱۶، ۱۸ و ۲۱ به‌ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند و طول بردار کوتاه‌تری نسبت به ژنوتیپ ۲ داشتند، اما این ژنوتیپ‌ها دارای مقدار متوسط شاخص برتری (SI) کم‌تری بودند (جدول ۴). این موضوع نشان می‌دهد که اگرچه این ژنوتیپ‌ها دارای پایداری و تعادل بیش‌تری بودند، اما در سطح بهینه عملکرد مناسبی نداشتند. ارزیابی بیش‌تر این ژنوتیپ‌ها در آزمایش‌های چندمکانی می‌تواند تصویر بهتری از پایداری و سودمندی ژنوتیپ‌ها با توجه به شرایط مختلف محیطی ارائه دهد. کم‌ترین مقدار عملکرد در این بای‌پلات نیز مربوط به ژنوتیپ ۲۳ بود.

برتری ژنوتیپ شماره ۲ از لحاظ صفات عملکرد و صفات ریشه در خاک سطحی در بای‌پلات GT و ترکیب صفات ریشه‌ای در خاک سطحی با عملکرد در بای‌پلات GYT در این مطالعه می‌تواند به این دلیل باشد که با توجه به شرایط این آزمایش، گسترش ریشه در سطح خاک منجر به استفاده بهینه گیاه از بارندگی‌های کم و پراکنده شده است. مطابق نتایج به‌دست آمده از مطالعه حاضر، پاسیورا (Passioura, 1983) و ژو و ژانگ (Zhu & Zhang, 2013) نیز عنوان کردند که سطحی بودن سیستم ریشه در شرایط محدودیت آب می‌تواند تأثیر مثبتی بر عملکرد دانه داشته باشد. در عین حال، ژنوتیپ‌هایی که دارای سیستم ریشه‌ای بزرگ در خاک

(Ghaffari, 2023). حسنی و همکاران (Hassani et al., 2024) نیز نشان دادند که حدود ۸۵/۴۹ درصد از تغییرات کل داده‌ها در بای‌پلات GYT توسط دو مؤلفه اول و دوم به‌ترتیب با ۵۰/۵۳ درصد و ۳۴/۹۶ درصد توصیف شد.

بر اساس نتایج حاصل از تجزیه GT، ژنوتیپ‌های ۱۱ و ۱۰ مطلوب‌ترین ژنوتیپ‌ها از لحاظ صفات مربوط به ریشه در عمق خاک شامل طول، سطح، حجم و وزن خشک ریشه در عمق بیش از ۲۵ سانتی‌متر بودند. ژنوتیپ ۲۱ بالاترین مقدار را برای صفت عمق نفوذ ریشه داشت. ژنوتیپ ۲ نیز بالاترین مقادیر را برای عملکرد دانه و صفات مربوط به ریشه در خاک سطحی شامل قطر، سطح، حجم و وزن خشک ریشه تا عمق ۲۵ سانتی‌متر دارا بود. ژنوتیپ ۵ مطلوب‌ترین ژنوتیپ از لحاظ صفات تعداد دانه در سنبله و طول ریشه تا عمق ۲۵ سانتی‌متر بود. در مقابل، نتایج تجزیه GYT نشان داد که ژنوتیپ شماره ۲ (به‌جز ترکیبات عملکرد-طول و سطح ریشه در عمق بیش از ۲۵ سانتی‌متر، از لحاظ سایر ترکیبات عملکرد-صفت شامل عملکرد-حجم، قطر، طول، سطح و وزن خشک ریشه تا عمق ۲۵ سانتی‌متر، عملکرد-حجم، قطر و وزن خشک ریشه در عمق بیش از ۲۵ سانتی‌متر و عملکرد-وزن هزار دانه، تعداد دانه در سنبله و تعداد سنبله در متر مربع مطلوب‌ترین ژنوتیپ بود. ژنوتیپ‌های شماره ۱۰ و ۱۱ نیز ژنوتیپ‌های مطلوب از لحاظ ترکیب عملکرد با طول و سطح ریشه در عمق بیش از ۲۵ سانتی‌متر بودند. دور بودن ژنوتیپ‌های ۱۰ و ۱۱ به‌ویژه ژنوتیپ ۱۱ از ژنوتیپ ایده‌آل، احتمالاً به این دلیل بود که این ژنوتیپ‌ها در عمق بیش از ۲۵ سانتی‌متر، سیستم ریشه گسترده‌تری داشتند و چون گسترش ریشه و نفوذ آن در خاک نیازمند صرف انرژی است، از این‌رو این موضوع باعث کاهش عملکرد در این ارقام شد و با در نظر گرفتن این‌که عملکرد مهم‌ترین صفت تعیین‌کننده ژنوتیپ ایده‌آل است، بنابراین دور بودن این ژنوتیپ‌ها از ژنوتیپ ایده‌آل قابل توجیه است.

در بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی، ژنوتیپ شماره ۲ بالاترین مقدار شاخص برتری مثبت را برای صفات داشت. رتبه‌بندی ژنوتیپ‌ها بر اساس صفات مورد بررسی در بای‌پلات ATC و روش GT نشان داد که عملکرد ۱۴ ژنوتیپ بیش‌تر از متوسط و عملکرد ۱۰ ژنوتیپ کم‌تر از متوسط بود. ژنوتیپ‌های ۲۱ و ۲ بیش‌ترین مقدار عملکرد را داشتند، به‌طوری‌که ژنوتیپ ۲۱ مطلوب‌ترین ژنوتیپ از لحاظ صفات تعداد سنبله در متر مربع، عمق نفوذ ریشه،

بود (Kano-Nakata *et al.*, 2019). این نتیجه نشان می‌دهد که رقم انعطاف‌پذیر از لحاظ سیستم ریشه می‌تواند ساختار ریشه خود را با نوسانات میزان رطوبت خاک تطبیق دهد.

با توجه به این‌که نتایج تجزیه GT در مطالعه حاضر صفت عمق نفوذ ریشه را به‌عنوان ایده‌آل‌ترین صفت برای تفکیک ژنوتیپ‌ها تعیین کرد، در این روش ژنوتیپ‌های ۲۱ و ۱۶ نیز به‌عنوان نزدیک‌ترین ژنوتیپ به ژنوتیپ ایده‌آل شناسایی شدند. اما در روش GYT ترکیب صفات عمق نفوذ ریشه، تعداد سنبله در متر مربع، قطر ریشه تا عمق ۲۵ سانتی‌متر و بعد از آن‌ها وزن هزار دانه، حجم، طول، وزن خشک و سطح ریشه تا عمق ۲۵ سانتی‌متر و قطر ریشه در عمق بیش‌تر از ۲۵ سانتی‌متر، به‌عنوان ایده‌آل‌ترین ترکیبات صفت با عملکرد دانه برای تفکیک ژنوتیپ‌ها تعیین شدند. بر این اساس، در بین ژنوتیپ‌های مورد مطالعه، ژنوتیپ شماره ۲ به‌عنوان نزدیک‌ترین ژنوتیپ به ژنوتیپ ایده‌آل شناسایی شد.

بررسی روابط بین صفات در روش GT نشان‌دهنده همبستگی بالای عملکرد دانه با حجم، قطر، سطح و وزن خشک ریشه تا عمق ۲۵ سانتی‌متر و همبستگی منفی عملکرد با طول و سطح ریشه در عمق بیش از ۲۵ سانتی‌متر بود. بر خلاف نتایج حاصل از ضریب همبستگی بین وزن هزار دانه و عملکرد دانه ( $r = 0.71^{**}$ )، در این بای‌پلات وزن هزار دانه همبستگی منفی با عملکرد دانه داشت و طول بردار آن نیز کوتاه بود که ممکن است به‌دلیل ضعف برازش بای‌پلات GT باشد. با این‌حال، مطابق نتایج به‌دست آمده از ضریب همبستگی، در بای‌پلات GT نیز بین وزن هزار دانه با بیش‌تر صفات ریشه به‌جز قطر ریشه در عمق بیش از ۲۵ سانتی‌متر، همبستگی منفی مشاهده شد. با توجه به این‌که رشد و گسترش ریشه و نفوذ آن در خاک نیاز به انرژی دارد، به‌ویژه در شرایط دیم که خاک خشک و فشرده است و نفوذ ریشه در خاک نیاز به انرژی بیش‌تری دارد، در نتیجه صرف انرژی برای رشد و گسترش ریشه در عمق خاک باعث کاهش مواد ذخیره‌ای برای پرکردن دانه و در نهایت منجر به کاهش عملکرد دانه شده است (Bengough, 2012; Jin *et al.*, 2013; Ruiz *et al.*, 2015, 2016; Colombi *et al.*, 2017, 2019). در روش بای‌پلات GYT همبستگی بین ترکیب صفات با عملکرد به‌غیر از ترکیب عملکرد با طول ریشه در عمق بیش‌تر از ۲۵ سانتی‌متر، مثبت و معنی‌دار

سطحی هستند، باید بتوانند در خلال بارندگی‌های بهاره، آب را از سطح خاک جذب و از آن برای پر کردن دانه استفاده کنند (Palta *et al.*, 2011; Ehdaie *et al.*, 2012). علاوه بر این یک سیستم ریشه‌ای نیرومند در خاک سطحی، امکان جذب مواد غذایی که بیش‌تر در لایه‌های سطحی خاک متمرکز هستند را فراهم می‌کند (Manske & Vlek, 2002). با این حال، نوسان صفات ریشه در ژنوتیپ ۲ می‌تواند بیانگر این موضوع باشد که ساختار سیستم ریشه به‌طور چشم‌گیری با نوسان رطوبت خاک تغییر می‌کند. چنین تغییراتی در ساختار سیستم ریشه ناشی از درجات مختلف انعطاف‌پذیری است که عمدتاً در ریشه‌های گره و ریشه‌های ثانویه از نوع L (ریشه‌های ثانویه بلند، ضخیم و منشعب) وجود دارد. با توجه به تعامل پیچیده بین صفات ریشه و تنوع بالای شرایط هیدرولوژیکی، ترون و همکاران (Tron *et al.*, 2015) برای بررسی این فرضیه که آیا یک سیستم ریشه سازگار عمومی برای شرایط تنش خشکی وجود دارد یا این‌که راندمان جذب آب سیستم‌های ریشه تابعی از شرایط خاص هیدرولوژیکی است، آزمایشی انجام داده و ۴۸ ساختار مختلف ریشه را در ۱۶ حالت تنش خشکی در خاک‌های با بافت متفاوت، توزیع بارندگی و در دسترس بودن رطوبت اولیه متفاوت خاک مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که کارایی جذب آب توسط ساختار ریشه کاملاً به وضعیت هیدرولوژیکی خاک بستگی دارد. حتی سیستم‌های ریشه‌ای مترکم و عمیق از نظر جذب آب تحت همه وضعیت‌های هیدرولوژیکی، برتر نبودند. نتایج مطالعه آن‌ها همچنین نشان داد که صرفاً توصیف ساختار ریشه برای یافتن سیستم‌های عملکردی بهینه کافی نیست. در محیط‌هایی با بارندگی کافی قبل از فصل رشد، عمق ریشه به‌ویژه در خاک‌های با بافت ریز، بیانگر صفت اصلی اکتشاف آب‌های ذخیره شده شناخته می‌شود. در عوض چگالی ریشه به‌ویژه در نزدیکی سطح خاک، مهم‌ترین صفت برای بهره‌برداری از رطوبت خاک در زمانی است که آب عمدتاً از طریق بارندگی‌های همگام با توسعه ریشه تأمین می‌شود. نتایج مطالعه این محققین نشان داد که اصلاح صفات مرتبط با سیستم ریشه باید با توجه به سیستم ریشه‌ای سازگار با شرایط هیدرولوژیکی محیط هدف انجام شود. نتایج یک مطالعه دیگر نیز نشان داد که رقمی که دارای سیستم ریشه انعطاف‌پذیر بود در توزیع ریشه در لایه‌های عمیق خاک موفق‌تر از ارقام دیگر

نشان داد که روش GYT در مقایسه با روش GT تصویر جامع‌تری از تغییرات صفات در ژنوتیپ‌های گندم دیم پاییزه ارائه داد و روش کارآمدتری برای ارزیابی ژنوتیپ‌ها از لحاظ صفات متعدد و تعیین ژنوتیپ برتر بود. در این روش جامع و مؤثر، ژنوتیپ‌ها بر اساس سطح ترکیب عملکرد با صفات مختلف، رتبه‌بندی می‌شوند و به‌طور هم‌زمان نقاط قوت و ضعف ژنوتیپ‌ها مشخص می‌شود.

### تضاد منافع

نویسندگان تایید می‌کنند که این تحقیق در غیاب هرگونه روابط تجاری یا مالی می‌تواند به عنوان تضاد منافع بالقوه تعبیر شود، انجام شده است.

### رعایت اخلاق در نشر

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

### اجازه انتشار مقاله

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

بود. علاوه بر این، همه ترکیبات صفت-عملکرد دارای طول بردار بلندتری نیز بودند که این موضوع به‌دلیل یکی از ویژگی‌های بارز روش GYT است که نشان می‌دهد یک صفت تنها زمانی ارزش خود را به‌دست می‌آورد که با سطح معنی‌داری از عملکرد ترکیب شود. نتایج به‌دست آمده از مطالعات دیگر نیز به ضعف بای پلات GT در نمایش همبستگی بین صفات اشاره کردند و در مقابل، همبستگی مثبت بین ترکیب صفات با عملکرد در بای پلات GYT را مورد تایید قرار دادند (Yan & Frégeau-Reid, 2018; Faheem et al., 2023).

### نتیجه‌گیری کلی

نتایج این مطالعه بر اساس هر دو روش GT و GYT ژنوتیپ شماره ۲ را به‌عنوان ژنوتیپ برتر از لحاظ عملکرد دانه شناسایی کردند. این ژنوتیپ دارای سیستم ریشه گسترده در خاک سطحی بود و حجم، قطر، وزن خشک و سطح ریشه تا عمق ۲۵ سانتی‌متر در این ژنوتیپ نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها بیش‌تر بود. با توجه به نتایج این آزمایش می‌توان گفت که در شرایط دیم که رشد گیاه وابسته به رطوبت موجود در خاک است، در صورت وجود بارندگی‌های پراکنده طی رشد اندام‌های هوایی و ریشه، گسترش ریشه در سطح خاک سبب استفاده کارآمد از این بارندگی‌ها و شب‌نم صبح‌گاهی موجود در سطح خاک می‌شود. با این‌که گسترش ریشه به اعماق خاک ممکن است به جذب آب موجود در اعماق خاک کمک کند، اما رشد ریشه نیاز به صرف انرژی و اسمیلات‌ها دارد و دسترسی و انتقال آن‌ها به دانه را محدود می‌سازد. همچنین، نتایج این مطالعه

### References

- Bakhshi, B., Amiri Oghan, H., Rameeh, V., Zeinalzadeh Tabrizi, H., Askari, A., Faraji, A., Ghodrati, G., Fanaei, H. R., Danaei, A. K., Khatoon Kazerani, N., Payghamzadeh, K., Kiani, D., Sadeghi, H., Shariati, F., Dalili, A., & Aghajani Nasab Afrouzi, M. A. (2023). Trait profiling and genotype selection in oilseed rape using genotype by trait and genotype by yield×trait approaches. *Food Science & Nutrition*, 11(6), 3083-3095. doi: [10.1002/fsn3.3290](https://doi.org/10.1002/fsn3.3290).
- Bengough, A. G. (2012). Root elongation is restricted by axial but not by radial pressures: So what happens in field soil? *Plant & Soil*, 360(1), 15-18. doi: [10.1007/s11104-012-1428-8](https://doi.org/10.1007/s11104-012-1428-8).
- Chen, Y., Palta, J., Prasad, P. V. V., & Siddique, K. H. M. (2020). Phenotypic variability in bread wheat root systems at the early vegetative stage. *BMC Plant Biology*, 20(1), 185. doi: [10.1186/s12870-020-02390-8](https://doi.org/10.1186/s12870-020-02390-8).
- Colombi, T., Herrmann, A. M., Vallenback, P., & Keller, T. (2019). Cortical cell diameter is key to energy costs of root growth in wheat. *Plant Physiology*, 180(4), 2049-2060. doi: [10.1104/pp.19.00262](https://doi.org/10.1104/pp.19.00262).
- Colombi, T., Kirchgeßner, N., Walter, A., & Keller, T. (2017). Root tip shape governs root elongation rate under increased soil strength. *Plant Physiology*, 174(4), 2289-2301. doi: [10.1104/pp.17.00357](https://doi.org/10.1104/pp.17.00357).

- Ehdaie, B., Layne, A. P., & Waines, J. G. (2012). Root system plasticity to drought influences grain yield in bread wheat. *Euphytica*, 186, 219-232. doi: [10.1007/s10681-011-0585-9](https://doi.org/10.1007/s10681-011-0585-9).
- Faheem, M., Arain, S., Sial, M. A., Laghari, K. A., & Qayyum, A. (2023). Genotype by yield×trait (GYT) biplot analysis: A novel approach for evaluating advance lines of durum wheat. *Cereal Research Communications*, 51(2), 447-456. doi: [10.1007/s42976-022-00298-7](https://doi.org/10.1007/s42976-022-00298-7).
- Faheem, M., Laghari, K. A., Khalil-Ur Rehman, M., Arain, S., & Sial, M. A. (2021). Selection of wheat ideotype based on multiple traits using genotype by yield-trait approach. *International Journal of Agriculture & Biology*, 25(6), 1367-1374. doi: [10.17957/IJAB/15.1799](https://doi.org/10.17957/IJAB/15.1799).
- FAO. (2023). Food and agricultural data; Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. Available online: <http://www.fao.org/faostat/en/#home>.
- Fradgley, N., Evans, G., Biernaskie, J. M., Cockram, J., Marr, E. C., Oliver, A. G., Ober, E., & Jones, H. (2020). Effects of breeding history and crop management on the root architecture of wheat. *Plant & Soil*, 452(1), 587-600. doi: [10.1007/s11104-020-04585-2](https://doi.org/10.1007/s11104-020-04585-2).
- Friedli, C. N., Abiven, S., Fossati, D., & Hund, A. (2019). Modern wheat semi-dwarfs root deep on demand: response of rooting depth to drought in a set of Swiss era wheats covering 100 years of breeding. *Euphytica*, 215(4), 85. doi: [10.1007/s10681-019-2404-7](https://doi.org/10.1007/s10681-019-2404-7).
- Gholizadeh, A., & Ghaffari, M. (2023). Genotype by yield×trait (GYT) biplot analysis: A novel approach for phenotyping sunflower single cross hybrids based on multiple traits. *Food Science & Nutrition*, 11(10), 5928-5937. doi: [10.1002/fsn3.3524](https://doi.org/10.1002/fsn3.3524).
- Guo, X., Svane, S. F., Füchtbauer, W. S., Andersen, J. R., Jensen, J., & Thorup-Kristensen, K. (2020). Genomic prediction of yield and root development in wheat under changing water availability. *Plant Methods*, 16(1), 90. doi: [10.1186/s13007-020-00634-0](https://doi.org/10.1186/s13007-020-00634-0).
- Gupta, K., Gupta, B., Ghosh, B., & Sengupta, D. N. (2012). Spermidine and abscisic acid-mediated phosphorylation of a cytoplasmic protein from rice root in response to salinity stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 34(1), 29-40. doi: [10.1007/s11738-011-0802-0](https://doi.org/10.1007/s11738-011-0802-0).
- Hassani, M., Mahmoudi, S. B., Saremirad, A., & Taleghani, D. (2024). Genotype by environment and genotype by yield×trait interactions in sugar beet: Analyzing yield stability and determining key traits association. *Scientific Reports*, 13(1), 23111. doi: [10.1038/s41598-023-51061-9](https://doi.org/10.1038/s41598-023-51061-9).
- Hu, C., Ding, M., Qu, C., Sadras, V., Yang, X.-Y., & Zhang, S. (2015). Yield and water use efficiency of wheat in the Loess Plateau: Responses to root pruning and defoliation. *Field Crops Research*, 179, 6-11. doi: [10.1016/j.fcr.2015.03.026](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.026).
- Jia, Z., Liu, Y., Gruber, B. D., Neumann, K., Kilian, B., Graner, A., & von Wirén, N. (2019). Genetic dissection of root system architectural traits in spring barley. *Frontiers in Plant Science*, 10, 400. doi: [10.3389/fpls.2019.00400](https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00400).
- Jin, K., Shen, J., Ashton, R. W., Dodd, I. C., Parry, M. A. J., & Whalley, W. R. (2013). How do roots elongate in a structured soil? *Journal of Experimental Botany*, 64(15), 4761-4777. doi: [10.1093/jxb/ert286](https://doi.org/10.1093/jxb/ert286).
- Kokko, E. G., Volkmar, K. M., Gowen, B. E., & Entz, T. (1993). Determination of total root surface area in soil core samples by image analysis. *Soil & Tillage Research*, 26(1), 33-43. doi: [10.1016/0167-1987\(93\)90084-3](https://doi.org/10.1016/0167-1987(93)90084-3).
- Kamoshita, A., Zhang, J., Siopongco, J., Sankarung, S., Nguyen, H. T., & Wade, L. J. (2002). Effects of phenotyping environment on identification of quantitative trait loci for rice root morphology under anaerobic conditions. *Crop Science*, 42(1), 255-265. doi: [10.2135/cropsci2002.2550](https://doi.org/10.2135/cropsci2002.2550).
- Kano-Nakata, M., Nakamura, T., Mitsuya, S., & Yamauchi, A. (2019). Plasticity in root system architecture of rice genotypes exhibited under different soil water distributions in soil profile. *Plant Production Science*, 22, 1-9. doi: [10.1080/1343943X.2019.1608836](https://doi.org/10.1080/1343943X.2019.1608836).
- Karahan, T., & Akgün, I. (2020). Selection of barley (*Hordeum vulgare*) genotypes by GYT (genotype×yield×trait) biplot technique and its comparison with GT (genotype×trait). *Applied Ecology & Environmental Research*, 11(8), 1347-1359. doi: [10.15666/aeer/1801\\_13471359](https://doi.org/10.15666/aeer/1801_13471359).
- Kendal, E. (2019). Comparing durum wheat cultivars by genotype×yield×trait and genotype×trait biplot method. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 79(4), 512-522. doi: [10.4067/S0718-58392019000400512](https://doi.org/10.4067/S0718-58392019000400512).
- Kendal, E. (2020). Evaluation of some barley genotypes with genotype by yield×trait (GYT) biplot method. *Agriculture & Forestry*, 66(2), 137-150. doi: [10.17707/AgricultForest.66.2.13](https://doi.org/10.17707/AgricultForest.66.2.13).

- Manschadi, A. M., Hammer, G. L., Christopher, J. T., & DeVoil, P. (2008). Genotypic variation in seedling root architectural traits and implications for drought adaptation in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant & Soil*, 303, 115-129. doi: [10.1007/s11104-007-9492-1](https://doi.org/10.1007/s11104-007-9492-1).
- Manske, G., & Vlek, P. (2002). Root architecture-Wheat as a model plant. In: Waisel, Y., Eshel, A., & Kafkafi, U. (Eds.). *Plant Roots: The Hidden Half*. Marcel Dekker Inc., New York. pp. 249-259. doi: [10.1201/9780203909423.ch15](https://doi.org/10.1201/9780203909423.ch15).
- Merrick, L. F., Glover, K. D., Yabwalo, D., & Byamukama, E. (2020). Use of genotype by yield×trait (GYT) analysis to select hard red spring wheat with elevated performance for agronomic and disease resistance traits. *Crop Breeding, Genetics & Genomics*, 2(2), e200009. doi: [10.20900/cbgg20200009](https://doi.org/10.20900/cbgg20200009).
- Mohammadi, R. (2019). Genotype by yield×trait biplot for genotype evaluation and trait profiles in durum wheat. *Cereal Research Communications*, 47(3), 541-551. doi: [10.1556/0806.47.2019.32](https://doi.org/10.1556/0806.47.2019.32).
- Mohammadi, R., & Geravandi, M. (2024). Multi-trait selection for agronomic performance and drought tolerance among durum wheat genotypes evaluated under rainfed and irrigated environments. *Experimental Agriculture*, 60, e3. doi: [10.1017/S0014479723000273](https://doi.org/10.1017/S0014479723000273).
- Oberholzer, S., Prasuhn, V., & Hund, A. (2017). Crop water use under Swiss pedoclimatic conditions - Evaluation of lysimeter data covering a seven-year period. *Field Crops Research*, 211, 48-65. doi: [10.1016/j.fcr.2017.06.003](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.06.003).
- Palta, J. A., Chen, X., Milroy, S. P., Rebetzke, G. J., Dreccer, M. F., & Watt, M. (2011). Large root systems: Are they useful in adapting wheat to dry environments? *Functional Plant Biology*, 38(5), 347-354. doi: [10.1071/FP11031](https://doi.org/10.1071/FP11031).
- Passioura, J. B. (1983). Roots and drought resistance. In: Stone, J. F., & Willis, W. O. (Eds.). *Developments in Agricultural and Managed Forest Ecology*. Vol. 12. pp. 265-280. Elsevier. doi: [10.1016/B978-0-444-42214-9.50025-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42214-9.50025-9).
- Peixoto, M., Santana, J., Coelho, I., Luiz, P., Farias, F., Teodoro, P., & Bhering, L. (2022). Genotype selection based on multiple traits in cotton crops: The application of genotype by yield×trait biplot. *Acta Scientiarum Agronomy*, 44(1), e54136. doi: [10.4025/actasciagron.v44i1.54136](https://doi.org/10.4025/actasciagron.v44i1.54136).
- Placido, D. F., Sandhu, J., Sato, S. J., Nersesian, N., Quach, T., Clemente, T. E., Staswick, P. E., & Walia, H. (2020). The *Lateral Root Density* gene regulates root growth during water stress in wheat. *Plant Biotechnology Journal*, 18(9), 1955-1968. doi: [10.1111/pbi.13355](https://doi.org/10.1111/pbi.13355).
- Rahmati, M. (2020). Assessment of relationships among traits and selection of superior bread wheat genotypes using genotype by yield×trait biplot method. *Cereal Research*, 10(1), 61-72. [In Persian]. doi: [10.22124/cr.2020.15458.1551](https://doi.org/10.22124/cr.2020.15458.1551).
- Rahmati, M., Hosseinpour, T., & Ahmadi, A. (2020). Assessment of interrelationship between agronomic traits of wheat genotypes under rain-fed conditions using double and triple biplots of genotype, trait and yield. *Iranian Dryland Agronomy Journal*, 9(1), 1-20. [In Persian]. doi: [10.22092/idaj.2020.122220.284](https://doi.org/10.22092/idaj.2020.122220.284).
- Reynolds, M. P., & Braun, H. J. (2022). *Wheat Improvement: Food Security in a Changing Climate*. Springer Cham. 629 p. doi: [10.1007/978-3-030-90673-3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-90673-3).
- Reynolds, M. P., & Langridge, P. (2016). Physiological breeding. *Current Opinion in Plant Biology*, 31, 162-171. doi: [10.1016/j.pbi.2016.04.005](https://doi.org/10.1016/j.pbi.2016.04.005).
- Romena, M., Najaphy, A., Saeidi, M., & Khoramivafa, M. (2022). Identification of superior wheat genotypes using multiple-trait selection methods based on agronomic characters and grain protein content under rain-fed conditions. *Genetika*, 54(1), 15-26. doi: [10.2298/GENSR2201015R](https://doi.org/10.2298/GENSR2201015R).
- Ruiz, S., Or, D., & Schymanski, S. J. (2015). Soil penetration by earthworms and plant roots-Mechanical energetics of bioturbation of compacted soils. *PLoS ONE*, 10(6), e0128914. doi: [10.1371/journal.pone.0128914](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0128914).
- Ruiz, S., Straub, I., Schymanski, S. J., & Or, D. (2016). Experimental evaluation of earthworm and plant root soil penetration-Cavity expansion models using cone penetrometer analogs. *Vadose Zone Journal*, 15(3), 1-14. doi: [10.2136/vzj2015.09.0126](https://doi.org/10.2136/vzj2015.09.0126).
- Saba, J., Tavana, Sh., Qorbanian, Z., Shadan, E., Shekari, F., & Jabbari, F. (2018). Canonical correlation analysis to determine the best traits for indirect improvement of wheat grain yield under terminal drought stress. *Journal of Agricultural Science & Technology*, 20(5), 1037-1048. doi: [20.1001.1.16807073.2018.20.5.10.0](https://doi.org/10.1001.1.16807073.2018.20.5.10.0).

- Sinclair, T. R. (1994). Limits to crop yield? In: Boote, K. J., Bennett, J. M., Sinclair, T. R., & Paulsen, G. M. (Eds.). *Physiology and Determination of Crop Yield*. American Society of Agronomy, Inc. pp. 509-532. doi: [10.2134/1994.physiologyanddetermination.c33](https://doi.org/10.2134/1994.physiologyanddetermination.c33).
- Tron, S., Bodner, G., Laio, F., Ridolfi, L., & Leitner, D. (2015). Can diversity in root architecture explain plant water use efficiency? A modeling study. *Ecological Modelling*, 312, 200-210. doi: [10.1016/j.ecolmodel.2015.05.028](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.05.028).
- Tsenov, N., Gubatov, T., & Yanchev, I. (2020). Genotype selection for grain yield and quality based on multiple traits of common wheat (*Triticum aestivum* L.). *Cereal Research Communications*, 49, 1-6. doi: [10.1007/s42976-020-00080-7](https://doi.org/10.1007/s42976-020-00080-7).
- Turner, N. C., Wright, G. C., & Siddique, K. H. M. (2001). Adaptation of grain legumes (pulses) to water-limited environments. *Advances in Agronomy*, 71, 193-231. doi: [10.1016/S0065-2113\(01\)71015-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(01)71015-2).
- Wasson, A. P., Chiu, G. S., Zwart, A. B., & Binns, T. R. (2017). Differentiating wheat genotypes by bayesian hierarchical nonlinear mixed modeling of wheat root density. *Frontiers in Plant Science*, 8, 282. doi: [10.3389/fpls.2017.00282](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00282).
- Wasson, A. P., Richards, R. A., Chatrath, R., Misra, S. C., Prasad, S. V., Rebetzke, G. J., Kirkegaard, J. A., Christopher, J., & Watt, M. (2012). Traits and selection strategies to improve root systems and water uptake in water-limited wheat crops. *Journal of Experimental Botany*, 63(9), 3485-3498. doi: [10.1093/jxb/ers111](https://doi.org/10.1093/jxb/ers111).
- Wei, X., Guo, S., Ma, B., Palta, J. A., Ma, Y., & Li, P. (2024). Wheat yield improvement is associated with altered root systems during cultivar replacement. *European Journal of Agronomy*, 154, 127101. doi: [10.1016/j.eja.2024.127101](https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127101).
- Xie, Q., Fernando, K. M. C., Mayes, S., & Sparkes, D. L. (2017). Identifying seedling root architectural traits associated with yield and yield components in wheat. *Annals of Botany*, 119(7), 1115-1129. doi: [10.1093/aob/mcx001](https://doi.org/10.1093/aob/mcx001).
- Yan, W. (2015). Mega-environment analysis and test location evaluation based on unbalanced multiyear data. *Crop Science*, 55(1), 113-122. doi: [10.2135/cropsci2014.03.0203](https://doi.org/10.2135/cropsci2014.03.0203).
- Yan, W. (2016). Analysis and handling of G×E in a practical breeding program. *Crop Science*, 56(5), 2106-2118. doi: [10.2135/cropsci2015.06.0336](https://doi.org/10.2135/cropsci2015.06.0336).
- Yan, W., & Frégeau-Reid, J. (2018). Genotype by yield×trait (GYT) biplot: A novel approach for genotype selection based on multiple traits. *Scientific Reports*, 8(1), 8242. doi: [10.1038/s41598-018-26688-8](https://doi.org/10.1038/s41598-018-26688-8).
- Zhu, L., & Zhang, D.-Y. (2013). Donald's ideotype and growth redundancy: A pot experimental test using an old and a modern spring wheat cultivar. *PLoS ONE*, 8(7), e70006. doi: [10.1371/journal.pone.0070006](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0070006).