



The Effect of Salt Stress on Wheat Grain Traits using Advanced Imaging Technology

Mujtaba Sadaat¹ | Mohammadreza Bihamta² | Valiollah Mohammadi³ | Mehrdad Mahlooji⁴

1. Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
2. Corresponding Author, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: mrghanad@ut.ac.ir
3. Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
4. Agriculture and Natural Resources Research Center of Isfahan, Isfahan, Iran.

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: May 24, 2025

Revised: June 30, 2025

Accepted: July 03, 2025

Extended Abstract

Introduction. Wheat (*Triticum aestivum* L.) remains a cornerstone of global food security, yet its productivity is increasingly threatened by soil salinity, which affects over 20% of irrigated lands worldwide. Salinity induces osmotic stress and ion toxicity, leading to a drastic reduction in grain filling duration and efficiency. While traditional breeding focuses on yield components like thousand-kernel weight (TKW), these metrics provide a "black-box" view of grain development. They fail to capture the nuanced changes in grain architecture—such as thickness, sphericity, and surface roughness—which are critical indicators of the physiological health of the plant during the grain-filling stage. The fundamental "Knowledge Gap" in current wheat research lies in the lack of high-throughput, multi-dimensional phenotyping tools capable of screening large germplasm collections. Manual measurements are prone to error and ignore the 3D geometry of the grain. This study addresses this gap by employing a 3D multi-view digital imaging platform to profile the morphometric responses of a massive panel of 320 wheat genotypes. The significance of this study lies in its ability to transition from simple yield-based selection to "Morpho-digital selection," allowing breeders to identify salt-tolerant genotypes based on the stability of their grain architecture rather than just final mass. The objective was to quantify the impact of progressive salinity on 3D grain traits and to establish a diagnostic model using multivariate statistical approaches to identify elite salt-tolerant germplasm.

Materials and Methods. The experimental germplasm consisted of a diverse diversity panel of 320 bread wheat genotypes, comprising 108 modern commercial cultivars and 212 Iranian landraces, representing a wide range of genetic plasticity. The research was conducted at the Kabutarabad Agricultural Research Station, Isfahan, Iran (32°99'N, 51°17'E, 1545 m a.s.l.) during the 2022–2023 season. The field layout followed an alpha-lattice design with two replications. Two distinct irrigation regimes were established: A baseline salinity level ($S1 = 6 \text{ dSm}^{-1}$), which represents the prevailing soil conditions in arid regions, and an elevated salinity stress level ($S2 = 10 \text{ dSm}^{-1}$) to simulate severe stress. Upon physiological maturity, grains were harvested and prepared for high-throughput phenotyping. A standardized imaging pipeline was developed using a Canon EOS 250D digital camera (24.1 MP) mounted on a controlled-lighting rig. For each genotype, grains were imaged from three orthogonal perspectives: dorsal, lateral, and vertical. This multi-view approach allowed for the extraction of 3D-like volumetric data. Image processing was performed using a custom Python script utilizing the OpenCV (Open Computer Vision) and SciPy libraries. The algorithm performed automated thresholding, contour detection, and feature extraction. Measured traits included primary dimensions (Length/Feret, Width/Breadth, Thickness), area-based indices (Area_D, Area_L, Area_V), and derived geometric parameters (Volume, Aspect Ratio, Compactness, and Centroid Affinity Index). Statistical rigor was ensured through a multi-tiered analysis: ANOVA was performed to determine the significance of Genotype $\times$ Environment ($G \times E$) interactions. Linear Discriminant Analysis (LDA) was utilized for group classification, Exploratory Factor Analysis (EFA) for data reduction, and Path Analysis to model the causal relationships between digital traits and final grain mass (TKW). All analyses were conducted in R and SPSS (v.26).

Results and Discussion. The results provided an unprecedented look into the "morphological changes" of wheat grains under severe salinity. ANOVA revealed that salinity stress, genotype, and their interaction ($G \times I$) had a highly significant ($p < 0.0001$) impact on all digital morphometric traits. On average, severe salinity (10 dSm^{-1}) led to a 31.7% reduction in grain volume, which was more pronounced than the reductions in length (26.3%) and width (22.1%). This indicates that salinity primarily inhibits the lateral and vertical expansion of the endosperm, leading to "shriveled" grains. The reduction in mean grain circumference from 43.43 mm to 32.05 mm underscores the inhibition of cell expansion in the grain coat under osmotic pressure. A pivotal finding was the relationship between 3D traits and yield. Correlation analysis showed that while all dimensions decreased, grain thickness emerged as the most reliable predictor of mass, showing a near-perfect correlation with TKW ($r = 0.966, p < 0.01$). This suggests that in salinity-stressed environments, the "thickness" of the grain is a proxy for the plant's ability to maintain sink strength. Exploratory Factor Analysis (EFA) successfully reduced the complex dataset into four latent factors—Size, Shape/Symmetry, Surface Roughness, and Compactness—explaining 83.5% of the total phenotypic variance. This categorization proves that salinity does not just make grains smaller; it fundamentally alters their geometric symmetry and surface texture. The Linear Discriminant Analysis (LDA) model demonstrated extraordinary diagnostic power, classifying genotypes into S1 and S2 groups with 96% accuracy. The high discriminant coefficients for Area_D and the Concentricity Index (CAI) suggest that these digital traits can serve as "bio-signatures" for salinity stress. Furthermore, Path Analysis elucidated the internal mechanism of yield loss: grain volume (Vol_V) exerted the largest direct positive effect on TKW ($\beta = 0.95$), acting as a central mediator for all other dimensional traits. Interestingly, the negative direct effect of thickness on TKW in the path model ($\beta = -0.11$), despite its high raw correlation, suggests a physiological trade-off where the plant sacrifices grain sphericity to maintain some level of mass under stress. Compared to previous studies (e.g., Zhang *et al.*, 2022) which focused on 2D measurements, our 3D multi-view approach captured the "cylindricity" and "volume" more accurately, explaining an additional 15–20% of the variance in grain weight. The identification of the "Ohadi" cultivar (LDA score = 4.678) as a top performer highlights the potential of using Iranian landrace genetics to improve the resilience of modern cultivars.

Conclusion. This study revealed that salinity stress disrupts the 3D architecture of the wheat grain in a predictable and quantifiable manner. Grain thickness and volume were identified as the most critical digital biomarkers for salinity tolerance. The 3D multi-view imaging pipeline developed here offers a non-destructive, rapid, and cost-effective alternative to traditional lab-based measurements. We recommend that breeding programs integrate "Area_D" and "Concentricity Index" into their selection indices to screen for genotypes that maintain grain filling integrity under high-salinity environments. Future research could link these digital phenotypes with SNP markers through Genome-Wide Association Studies (GWAS) to uncover the underlying genetic loci.

Keywords:

Bread wheat, genotype evaluation, multivariate analysis, plant phenotyping, resistance screening, salt tolerance, seed morphometry.

Cite this article: Sadaat, M., Bihamta, M.R., Mohammadi, V., & Mahlooji, M. (2025). The effect of salt stress on wheat grain traits using advanced imaging Technology. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 56(4), 53–74. DOI: 10.22059/ijfcs.2025.395914.655142.



© The Authors.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: [10.22059/ijfcs.2025.395914.655142](https://doi.org/10.22059/ijfcs.2025.395914.655142)



انتشارات دانشگاه تهران

علوم گیاهان زراعی ایران

شماره الکترونیکی: ۸۰۸۲-۲۴۲۳

Homepage: <https://ijfcs.ut.ac.ir/>

بررسی تاثیر تنش شوری بر صفات دانه گندم با استفاده از تصویربرداری پیشرفته

مجتبی سادات^۱ | محمدرضا بی همتا^۲ | ولی الله محمدی^۳ | مهرداد محلوچی^۴

۱. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
۲. نویسنده مسئول، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. mrghnad@ut.ac.ir
۳. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
۴. مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، اصفهان، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۲ کلیدواژه‌ها: ارزیابی ژنوتیپ، تحلیل چندمتغیره، تحمل شوری، غربالگری مقاومت، فنوتیپ سنجی گیاهی، گندم نان، مورفومتری بذر.	تنش شوری به عنوان یکی از چالش‌های اساسی در تولید گندم، باعث کاهش قابل توجه کیفیت و عملکرد محصول از طریق تغییر در ویژگی‌های دانه می‌شود. در این پژوهش، ۳۲۰ ژنوتیپ گندم (شامل ۱۰۸ رقم تجاری و ۲۱۲ لاین بومی ایرانی) در قالب طرح آزمایشی آلفا-لاتیس با دو تکرار مورد ارزیابی قرار گرفتند؛ آب آبیاری با شوری 6 dSm^{-1} به عنوان سطح پایه (شوری ملایم) و آب آبیاری با شوری 1 dSm^{-1} به عنوان سطح افزایش یافته (شوری بالا) به کار گرفته شدند. ویژگی‌های ریخت‌سنجی دانه در سه نما (پشتی، جانبی و عمودی) با استفاده از فناوری پردازش تصویر به دقت اندازه‌گیری شدند. تنش شوری کاهش معنی‌داری در وزن هزار دانه ($28/5\%$)، طول ($26/3\%$)، عرض ($22/1\%$)، حجم ($31/7\%$) و نسبت تغییر شکل دانه ایجاد کرد. تجزیه به‌عوامل‌ها، چهار عامل اصلی (ابعاد، شکل، ناهموازی سطح، تراکم) را شناسایی نمود که $83/5\%$ واریانس را تبیین می‌کردند. تجزیه تفکیک خطی (LDA) با دقت 96% ژنوتیپ‌ها را در دو گروه شور و پایه طبقه‌بندی کرد که نشان‌دهنده تأثیر بارز شوری بر ریخت‌شناسی دانه است. همبستگی قوی بین ضخامت دانه و وزن هزار دانه ($r=0/97$) و نقش کلیدی حجم دانه در تعیین وزن هزار دانه ($r=0/95$) آشکار شد. سامانه تصویربرداری به‌کاررفته در این پژوهش، توانست ژنوتیپ‌هایی مانند «اوحدی» را به‌عنوان ارقام مقاوم به شوری شناسایی کند. به‌کارگیری این فناوری در کنار تحلیل‌های دقیق آماری، روشی مؤثر برای تشخیص و انتخاب ارقام متحمل در برنامه‌های اصلاحی فراهم می‌سازد.

استناد: سادات، م.، بی همتا، م.ر.، محمدی، و.، و محلوچی، م. (۱۴۰۴). بررسی تاثیر تنش شوری بر صفات دانه گندم با استفاده از تصویربرداری پیشرفته. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۳(۴)، ۷۴-۵۳. DOI: 10.22059/ijfcs.2025.395914.655142



© نویسندگان

ناشر: موسسه انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

گندم به عنوان محصولی بنیادین، نقشی محوری در تأمین امنیت غذایی و استواری اقتصادی ایفا می نماید (Mottaleb & Govindan, 2023). این گیاه با قابلیت تولید فرآورده های نانویی تخمیری، به عنوان غذای اصلی در فرهنگ های متعدد شناخته می شود (Sertse *et al.*, 2023). ارزش تغذیه ای بالای گندم، به ویژه محتوای کربوهیدرات ها، پروتئین، فیبر، ویتامین های B و عناصر معدنی، آن را به رکن اساسی سیستم های تغذیه ای جهانی تبدیل نموده است (Latorre *et al.*, 2023; Mao *et al.*, 2023; Basile *et al.*, 2022; Filip *et al.*, 2023; Khalid *et al.*, 2023; Senbeta & Worku, 2023; Silva *et al.*, 2023). با توجه به افزایش جمعیت جهانی، تقاضا برای گندم نیز رو به افزایش نهاده است (Kheiralipour *et al.*, 2024).

تنش شوری ناشی از تغییرات اقلیمی و مدیریت نادرست آبیاری، به عنوان یک چالش رو به فزونی در کشاورزی جهانی، به طور فزاینده ای بر رشد و عملکرد گندم تأثیر می گذارد (Hassani *et al.*, 2021). افزایش شوری خاک، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک، منجر به کاهش جذب آب و مواد معدنی توسط گیاه گندم می شود (Bouras *et al.*, 2019; Hassani *et al.*, 2021; Mukhopadhyay *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2023). این امر، به نوبه خود، باعث اختلال در فرآیند فتوسنتز و کاهش رشد گیاه می شود (Mishra *et al.*, 2023). تنش شوری، با ایجاد اختلال در تعادل یونی، تجمع یون های سمی در بافت گیاه را به همراه دارد (Amiri *et al.*, 2024). این امر، منجر به تغییرات در رشد ریشه و کاهش جذب عناصر ضروری می شود (Qiao *et al.*, 2024). همچنین، شاخص های رشد رویشی از جمله طول ساقه، تعداد پنجه و سطح برگ، به طور قابل توجهی کاهش می یابند (Ain *et al.*, 2024; Giordano *et al.*, 2021; Wei *et al.*, 2023). در شرایط تنش شوری، کاهش تعداد سنبله ها و وزن هزار دانه نیز مشاهده می شود که مستقیماً بر عملکرد نهایی گندم تأثیر می گذارد (Wei *et al.*, 2023). از سوی دیگر، تنش شوری بر بیان ژن های مرتبط با تحمل به شوری در گیاه گندم تأثیر می گذارد (Alsamadany *et al.*, 2024; Cao *et al.*, 2023; Tajdari *et al.*, 2024). این تغییرات در بیان ژن، مکانیسم های مولکولی پیچیده ای را فعال می کند که به گیاه در مقابله با تنش شوری کمک می کند (Li *et al.*, 2024).

علاوه بر این، شوری تأثیرات قابل توجهی بر ویژگی های فیزیکی و ریخت شناسی دانه اعمال می کند (El Sabagh *et al.*, 2021). این تأثیرات که عمدتاً ناشی از اختلال در فرآیند تکثیر و تمایز سلولی در مراحل پر شدن دانه است (Atta *et al.*, 2023)، منجر به کاهش ابعاد دانه (طول، عرض و ضخامت) و وزن هزار دانه، به عنوان شاخص محوری عملکرد می شود (Hussain *et al.*, 2022). جذب ناکافی آب و عناصر غذایی، نمو نامطلوب و کاهش وزن دانه ها را به دنبال دارد (El Sabagh *et al.*, 2021; Zahra *et al.*, 2023). تغییر در شکل دانه، از جمله دگرگونی شاخص های گردی، فشردگی و کروی بودن، کاهش یکنواختی و حجم دانه و افزایش تراکم آن، از دیگر پیامدهای شوری است (Rashid & Nasrin, 2015). سختی و مقاومت دانه نیز در اثر تغییر در ترکیب نشاسته و پروتئین دچار دگرگونی شده و کیفیت آرد و فرآورده های نانویی را تحت تأثیر قرار می دهد (He *et al.*, 2013). این دگرگونی ها در نهایت بر کیفیت خمیر، حجم نان و پایداری آن اثرگذار خواهد بود. با این وجود، میزان این تأثیرات در میان ژنوتیپ های گندم متفاوت است؛ به طوری که برخی ژنوتیپ ها توانایی بیشتری در حفظ ابعاد، وزن و کیفیت فیزیکی دانه در شرایط شور دارند (Abd El-Aleem *et al.*, 2022). این تفاوت ها بیانگر اهمیت اصلاح ژنتیکی و شناسایی ارقام مقاوم به شوری در راستای افزایش بهره وری و حفظ کیفیت محصولات گندمی در شرایط نامساعد محیطی است (Elkot *et al.*, 2023).

تحلیل خصوصیات مورفومتریک دانه، نقشی بنیادین در ارزیابی کمی و کیفی و بهینه سازی عملکرد ژنوتیپ های گوناگون گندم ایفا می نماید (Rabieyan *et al.*, 2022). شیوه های سنتی اندازه گیری نظیر استفاده از کولیس و ترازوهای الکترونیکی، از جمله روش های مرسوم و قابل دسترس برای سنجش ابعاد هندسی و نیز برای تعیین جرم دانه محسوب می شوند (Cervantes *et al.*, 2016; Duc *et al.*, 2023). با این وجود، در دهه های اخیر، روش های پیشرفته مبتنی بر پردازش تصویر، به عنوان ابزاری دقیق و کارآمد در تحلیل ابعاد هندسی و ریخت شناسی دانه، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته اند (Khan *et al.*, 2024). این روش ها با بهره گیری از تصاویر دیجیتال و نرم افزارهای تخصصی، امکان استخراج پارامترهای کمی متنوعی از قبیل نسبت ابعاد طولی به عرضی، میزان کروی بودن، تراکم و تحدب سطح دانه را فراهم می آورند.

(Ghimire et al., 2023). مقایسه روش‌های سنتی و پردازش تصویر، حاکی از برتری روش‌های تصویربرداری در تحلیل جزئیات ساختاری دانه است و علاوه بر کاهش خطای انسانی، امکان بررسی حجم عظیمی از نمونه‌ها را در بازه زمانی کوتاه‌تری مهیا می‌سازند (Cervantes et al., 2016; Di Santo et al., 2021; Morales et al., 2024; Zhou et al., 2021). داده‌های حاصل از این شیوه‌ها، علاوه بر کاربرد در ارزیابی کیفی دانه، می‌توانند در اصلاح ژنتیکی گیاهان و طراحی سامانه‌های نوین کشاورزی، به منظور انتخاب ژنوتیپ‌های برتر و مقاوم به شرایط محیطی مختلف، مورد بهره‌برداری قرار گیرند.

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر تنش شوری بر ویژگی‌های فیزیکی و ساختاری دانه گندم و شناسایی شاخص‌های مؤثر در گزینش ارقام متحمل به شوری انجام شده است. باتوجه به محدودیت مطالعات جامع در این زمینه، تمرکز بر تغییرات ابعاد هندسی، جرم، و سایر ویژگی‌های فیزیکی دانه می‌تواند به درک بهتر سازوکار واکنش ژنوتیپ‌ها نسبت به شرایط شور کمک کند. در این راستا، از فناوری پردازش تصویر به عنوان روشی دقیق‌تر و کم‌خطا تر نسبت به روش‌های سنتی برای استخراج شاخص‌های مورفومتریک استفاده شده است.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. مواد گیاهی و طرح آزمایشی

در این پژوهش، مجموعه‌ای شامل ۳۲۰ ژنوتیپ گندم نان (۱۰۸ رقم زراعی و ۲۱۲ توده بومی خالص‌سازی شده ایرانی) به منظور ارزیابی میزان تحمل به تنش شوری، در قالب طرح آلفا-لاتیس با دو تکرار (هر تکرار شامل ۲۰ بلوک و هر بلوک، ۱۶ پلات بود) در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی کبوترآباد اصفهان (عرض جغرافیایی ۳۲°۹۹' شمالی، طول ۵۱°۱۷' شرقی، ارتفاع ۱۵۴۵ متر از سطح دریا) مورد بررسی قرار گرفتند. هر واحد آزمایشی شامل یک کرت به ابعاد یک در دو متر با چهار خط کاشت به فاصله ردیف ۲۵ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها پنج سانتی‌متر بود. منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم نیمه‌خشک با میانگین بارش سالانه ۱۲۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۶ درجه سانتی‌گراد است. خاک مزرعه از نوع رسی-لومی با pH برابر ۷/۸ و هدایت الکتریکی ۲/۵ دسی‌زیمنس بر متر بود. تنش شوری از مرحله پنجه‌زنی آغاز شد و در دو سطح شوری اعمال گردید: شرایط پایه یا کنترل که با استفاده از چاه شماره یک با هدایت الکتریکی شش دسی‌زیمنس بر متر، و شرایط شور با استفاده از چاه شماره دو با هدایت الکتریکی ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر. فاصله این دو چاه حدود ۵۰۰ متر بود و مشخصات شیمیایی آب آن‌ها پیش از شروع آزمایش اندازه‌گیری و پایش شد. آبیاری اولیه تمام تیمارها با آب رودخانه زاینده‌رود با هدایت الکتریکی ۳/۵ دسی‌زیمنس بر متر انجام شد و سپس آبیاری‌ها بر اساس سطح شوری اختصاص یافته، تا پایان فصل رشد با استفاده از آب چاه مربوطه و به صورت یکنواخت و منظم انجام گرفت. برای بررسی میزان تحمل ژنوتیپ‌ها به شوری، درصد کاهش وزن هزار دانه (TKW) در تیمار شور نسبت به شرایط پایه به عنوان شاخص تحمل به شوری محاسبه شد. همچنین برخی شاخص‌های مرتبط با کاهش حجم، چگالی و سایر پارامترهای مورفومتریک نیز مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۲. اندازه‌گیری صفات

برای ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و مورفومتریک دانه‌های گندم، آماده‌سازی دقیق نمونه‌ها ضروری بود. ابتدا، دانه‌های گندم در مرحله رسیدگی کامل و به صورت یکنواخت برداشت شدند تا از تنوع ناخواسته در نتایج جلوگیری شود. پس از برداشت، دانه‌ها در شرایط کنترل شده و دمای اتاق خشک شدند تا به رطوبت استاندارد (معمولاً حدود ۱۲ تا ۱۴ درصد) برسند. این فرآیند خشک کردن برای جلوگیری از تغییرات در ویژگی‌های فیزیکی دانه‌ها و اطمینان از پایداری نمونه‌ها در طول آنالیزها ضروری بود. پس از خشک شدن، دانه‌ها در ظروف در بسته و در محیط خشک و خنک نگهداری شدند تا از جذب رطوبت و آلودگی‌های محیطی مصون بمانند. این روش‌های استاندارد آماده‌سازی نمونه‌ها، دقت و قابلیت اطمینان نتایج اندازه‌گیری‌های فیزیکی و مورفومتریک دانه‌های گندم را تضمین کردند.

برای ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی دانه‌های گندم با استفاده از عکسبرداری، ابتدا نمونه‌های دانه‌های گندم از هر ژنوتیپ به صورت تصادفی ۳۰ دانه انتخاب شدند. این دانه‌ها در شرایط استاندارد خشک و در دمای اتاق نگهداری شدند تا رطوبت محیط را جذب

نکنند. سپس، دانه‌ها روی سطح صاف و یکنواختی قرار داده شدند و با استفاده از دوربین دیجیتال Canon EOS 250D با سنسور CMOS و رزولوشن ۲۴/۱ مگاپیکسل، تصاویر تهیه شد.

تصاویر به دست آمده با استفاده از کتابخانه‌های پردازش تصویر در پایتون تجزیه و تحلیل شدند. پردازش و جداسازی دانه‌ها از پس‌زمینه با استفاده از روش آستانه‌گذاری خودکار Otsu و الگوریتم تشخیص لبه Canny انجام شد. این روش عکسبرداری و تحلیل تصویر، ارزیابی دقیق، سریع و غیرمخرب ویژگی‌های فیزیکی دانه‌های گندم را فراهم می‌کند. در این مطالعه، ویژگی‌های مورفومتریکی دانه‌ها در سه نمای پشتی (Dorsal)، جانبی (Lateral) و عمودی (Vertical) اندازه‌گیری شدند (جدول ۱).

۲-۳. تجزیه و تحلیل آماری

برای تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از ارزیابی ژنوتیپ‌های گندم تحت شرایط پایه و شور، از نرم‌افزارهای SAS و R استفاده شد. این نرم‌افزارها امکان پردازش داده‌ها، بررسی معنی‌داری تفاوت‌ها، تجزیه همبستگی، مدل‌سازی اثرات شوری، و گروه‌بندی ژنوتیپ‌ها را فراهم کردند. برای ارزیابی اثر شوری بر صفات مختلف، داده‌ها با استفاده از مدل اثرات آمیخته (Mixed-Effects Model) در نرم‌افزار SAS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در این مدل، اثر ژنوتیپ، شوری، و برهم‌کنش ژنوتیپ × شوری به عنوان **اثر ثابت** در نظر گرفته شدند، درحالی‌که اثرات بلوک و تکرار (درون هر سطح شوری) به عنوان **اثر تصادفی** لحاظ گردیدند. معنی‌داری اثر دو سطح شوری (پایه و شور) بر صفات با استفاده از آزمون F از تجزیه واریانس در مدل اثرات آمیخته و در سطح احتمال پنج درصد ارزیابی شد. تجزیه همبستگی پیرسون برای بررسی ارتباط بین ویژگی‌های فیزیکی دانه و شاخص‌های مورفومتریکی به کار رفت. برای بررسی رابطه بین صفات و اثرات شوری، از مدل‌های رگرسیون چندگانه و تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد. پیش‌فرض‌های لازم برای رگرسیون از جمله نرمال بودن باقیمانده‌ها، استقلال خطاها، عدم هم‌خطی بین متغیرها (بررسی با شاخص VIF)، و عدم وجود داده‌های پرت (بررسی با نمودارهای Residual و Cook's Distance) مورد ارزیابی قرار گرفتند. همچنین، تجزیه PCA با استفاده از ماتریس همبستگی (باتوجه به تفاوت مقیاس صفات) انجام شد تا مؤلفه‌های اصلی شناسایی و ابعاد داده‌ها کاهش یابند. برای بررسی توانایی تفکیک ژنوتیپ‌های گندم تحت شرایط آبیاری پایه و شور، از تحلیل تفکیک خطی (LDA) استفاده شد. این روش با هدف جداسازی بهینه بین گروه‌ها بر اساس ترکیب خطی متغیرهای صفات فنوتیپی به کار می‌رود. در این پژوهش، LDA به منظور ارزیابی تمایز فنوتیپی ژنوتیپ‌ها تحت دو شرایط آبیاری اعمال شد. با هدف بررسی ساختار ژنتیکی ژنوتیپ‌ها، ابتدا تحلیل عاملی روی داده‌های فنوتیپی انجام شد و سپس از بارهای عاملی حاصل شده به عنوان ورودی در خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی با روش Ward و فاصله اقلیدسی استفاده گردید و برای بررسی صحت ساختار خوشه‌بندی، ضریب همبستگی کوپهن (Cophenetic Correlation Coefficient) محاسبه گردید. برای بررسی کفایت داده‌ها جهت تحلیل عاملی، از شاخص Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) و آزمون کروی بودن Bartlett استفاده شد. مقدار بالای KMO نشان‌دهنده کفایت نمونه‌گیری و معناداری آزمون Bartlett و بیانگر مناسب بودن همبستگی بین متغیرها برای تحلیل عاملی است.

۳. نتایج پژوهش و بحث

۳-۱. تجزیه واریانس صفات

نتایج ارائه شده در جداول ۳ و ۲ به وضوح نشان می‌دهد که شوری تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های مختلف دانه‌های گندم دارد. به طور خاص، مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در شرایط شوری، کاهش قابل توجهی در صفات ریخت‌شناسی مانند وزن هزار دانه، طول دانه و عرض دانه مشاهده شد. به علاوه، صفات عملکردی مانند عملکرد دانه نیز تحت تأثیر منفی شوری قرار گرفتند. این کاهش‌ها نشان‌دهنده تأثیرات مضر شوری بر رشد و نمو گیاه گندم است.

جدول ۱. شاخص‌ها و پارامترهای مورفومتریک استخراج‌شده از تصاویر دانه بر اساس نماهای مختلف.

Table 1. Morphometric indices and parameters extracted from seed images based on different views.

View	Abbreviation (unit)	English Full Name	Persian Full Name	Description
Dorsal	Perim (mm)	Seed Perimeter	محیط دانه	محیط دانه
	Area (mm ²)	Seed Area	مساحت دانه	مساحت دانه
	MinR (mm)	Inscribed Radius	شعاع محاطی	شعاع کوچک‌ترین دایره محاطی
	MaxR (mm)	Circumscribed Radius	شعاع محیطی	شعاع بزرگ‌ترین دایره محیطی
	Feret (mm)	Maximum Length	طول ماکزیمم	طول بزرگ‌ترین محور
	Breadth (mm)	Maximum Width	عرض ماکزیمم	عرض بزرگ‌ترین محور عمودی نسبت به Feret
	Chull (mm)	Convex Hull Perimeter	محیط محدب	محیط قاب محدب، محاسبه‌شده از مراکز پیکسل
	CArea (mm ²)	Convex Hull Area	مساحت محدب	مساحت قاب محدب
	MBCRadius (mm)	Minimum Bounding Circle Radius	شعاع کوچک‌ترین دایره محیطی	شعاع کوچک‌ترین دایره محیطی
	AspRatio	Aspect Ratio	نسبت طول به عرض	Aspect Ratio = Feret / Breadth
	Circ	Circularity	دایره‌ای بودن	Circularity = $4 \cdot \pi \cdot \text{Area} / \text{Perimeter}^2$
	Roundness	Roundness	گردی	Roundness = $4 \cdot \text{Area} / (\pi \cdot \text{Feret}^2)$
	ArEquivD (mm)	Area Equivalent Diameter	مساحت جعبه محاطی	Area Equivalent Diameter = $\sqrt{((4/\pi) \cdot \text{Area})}$
	PerEquivD (mm)	Perimeter Equivalent Diameter	قطر معادل محیط	Perimeter Equivalent Diameter = Area / π
	EquivEllAr (mm ²)	Equivalent Ellipse Area	مساحت بیضی معادل	Equivalent Ellipse Area = $(\pi \cdot \text{Feret} \cdot \text{Breadth}) / 4$
	Compactness	Compactness	فشرده‌گی	Compactness = $\sqrt{((4/\pi) \cdot \text{Area})} / \text{Feret}$
	Solidity	Solidity	یکپارچگی	Solidity = $\text{Area} / \text{Convex_Area}$
	Concavity	Concavity	انحنا	Concavity = $\text{Convex_Area} - \text{Area}$
	Convexity (mm ²)	Convexity	تحدب	Convexity = $\text{Convex_Hull} / \text{Perimeter}$
	Shape	Shape Factor	فاکتور شکل	Shape Factor = $\text{Perimeter}^2 / \text{Area}$
	RFactor	Convexity Factor	فاکتور محدب	Convexity Factor = $\text{Convex_Hull} / (\text{Feret} \cdot \pi)$
	ModRatio	Modification Ratio	نسبت تغییر شکل	Modification Ratio = $(2 \cdot \text{MinR}) / \text{Feret}$
	Sphericity	Sphericity	کروی بودن	Sphericity = $\text{MinR} / \text{MaxR}$
	ArBBox (mm ²)	Bounding Box Area	مساحت جعبه محاطی	Bounding Box Area = Feret Breadth
	Rectang	Rectangularity	مستطیلی بودن	Rectangularity = $\text{Area} / \text{ArBBox}$
Lateral	Perim.l (mm)	Lateral Perimeter	محیط جانبی	محیط دانه (جانبی)
	Area.l (mm ²)	Lateral Area	مساحت جانبی	مساحت دانه (جانبی)
	ArBBox.l (mm ²)	Lateral Bounding Box Area	مساحت جعبه محاطی جانبی	Lateral Bounding Box Area = Feret Thickness
	Thickness (mm)	Thickness	ضخامت	Thickness = Largest axis perpendicular to Feret

Vertical	Perim.2 (mm)	Vertical Perimeter	محیط عمودی	محیط دانه (عمودی)
	Area.2 (mm ²)	Vertical Area	مساحت عمودی	مساحت دانه (عمودی)
	ArBBox.2 (mm ²)	Vertical Bounding Box Area	مساحت جعبه محاطی عمودی	Vertical Bounding Box Area = Breadth · Thickness
	Volume (mm ³)	Volume	حجم	Volume = (4/3)π(Feret/2)(Breadth/2)(Thickness/2)
	TKW (gr)	Thousand Kernel Weight	وزن هزار دانه	وزن هزار دانه
	TLR	Thickness-to-Length Ratio	نسبت ضخامت به طول	Thickness-to-Length Ratio = Thickness / Feret
	TBR	Thickness-to-Width Ratio	نسبت ضخامت به عرض	Thickness-to-Width Ratio = Thickness / Breadth
	VAR (mm)	Volume-to-Area Ratio	نسبت حجم به مساحت	Volume-to-Area Ratio = Volume / Area
	Density (gr/mm ³)	Density	چگالی	Density = TKW / Volume
	Cylindricity	Cylindricity	استوانه‌ای بودن	Cylindricity = (Breadth + Thickness) / (2 × Feret)
	BBV	Bounding Box Volume Index	شاخص حجم به جعبه محاطی	Bounding Box Volume Index = Volume / (ArBBox × ArBBox.1 × ArBBox.2)
	SSA (mm ⁻¹)	Specific Surface Area	سطح ویژه دانه	Specific Surface Area = (Area + Area.1 + Area.2) / Volume
	SUF	Shape Uniformity Factor	فاکتور همگنی شکل	Shape Uniformity Factor = (Perim + Perim.1 + Perim.2) / (3 × Feret)
	CAI	Concentricity Index	شاخص هم‌مرکزی	Concentricity Index = (MinR + MaxR) / MBCRadius
	SI	Stability Index	شاخص پایداری	Stability Index = (MaxR - MinR) / MaxR
	WDI (gr/mm ²)	Weight-to-Dimensions Ratio	نسبت وزن به ابعاد	WDI = TKW / (Feret × Breadth × Thickness)
	DWI (gr/mm ³)	Dimensions-to-Weight Ratio	نسبت ابعاد به وزن	Dimensions-to-Weight Ratio = (Feret × Breadth × Thickness) / TKW
	CVI (mm ⁻¹)	Curvature-to-Volume Ratio	نسبت انحنا به حجم	= (Concavity + Convexity) / Volume
	VCI (mm ³)	Volume-to-Curvature Ratio	نسبت حجم به انحنا	= Volume / (Concavity + Convexity)
	SWI (mm ² /gr)	Surface Area-to-Weight Ratio	نسبت سطح به وزن	= (Area + Area.1 + Area.2) / TKW
	WSI(gr/mm ²)	Weight-to-Surface Area Ratio	نسبت وزن به سطح	= TKW / (Area + Area.1 + Area.2)
	CSI	Curvature-to-Surface Area Ratio	نسبت انحنا به سطح	= (Concavity + Convexity) / (Area + Area.1 + Area.2)
	SCI	Surface Area-to-Curvature Ratio	نسبت سطح به انحنا	= (Area + Area.1 + Area.2) / (Concavity + Convexity)
	CWI (mm ² /gr)	Curvature-to-Weight Ratio	نسبت انحنا به وزن	= (Concavity + Convexity) / TKW
	WCI (gr/mm ²)	Weight-to-Curvature Ratio	نسبت وزن به انحنا	= TKW / (Concavity + Convexity)
	CDI (mm ⁻¹)	Curvature-to-Dimensions Ratio	نسبت انحنا به ابعاد	= (Concavity + Convexity) / (Feret × Breadth × Thickness)
	DCI (mm)	Dimensions-to-Curvature Ratio	نسبت ابعاد به انحنا	= (Feret × Breadth × Thickness) / (Concavity + Convexity)
	LSym	Longitudinal Symmetry	تقارن طولی	= (Feret_Dorsal - Feret_Lateral) / (Feret_Dorsal + Feret_Lateral)
	TSy	Transverse Symmetry	تقارن عرضی	= (Breadth_Dorsal - Thickness_Lateral) / (Breadth_Dorsal + Thickness_Lateral)
	NetInd (mm ⁻¹)	Network Index	شاخص شبکه‌ای	= (Perimeter_Dorsal + Perimeter_Lateral + Perimeter_Vertical) / (Area_Dorsal + Area_Lateral + Area_Vertical)
	Smooth	Smoothness	صافی سطح	= Convex Hull (Dorsal View) / Perimeter (Dorsal View)

جدول ۲. آماره‌های توصیفی صفات مورفومتریک در ژنوتیپ‌های گندم تحت شرایط پایه و تنش شوری.

Table 2. Descriptive statistics of morphometric traits in wheat genotypes under baseline (N) and saline (S) conditions.

S					N					Traits
Kurto	Skewne	CV	StdDe	Mea	Kurtos	Skewne	CV	StdDe	Mea	
3.14	0.38	21.42	6.86	32.0	2.81	0.12	20.3	8.85	43.4	محیط D
3.79	-0.30	7.28	1.23	16.8	4.26	-0.29	6.53	1.23	18.8	مساحت D
3.06	0.05	13.33	2.05	15.3	2.97	-0.15	12.5	2.35	18.7	شعاع محیطی D
2.75	0.16	9.21	0.26	2.77	3.01	-0.15	8.51	0.27	3.21	شعاع محیطی D
4.26	-0.30	8.12	0.55	6.74	5.66	-0.06	7.10	0.53	7.47	طول ماکزیمم D
4.14	-0.43	8.13	0.56	6.91	5.01	-0.41	7.28	0.56	7.68	عرض ماکزیمم D
2.73	0.17	8.80	0.25	2.89	2.87	-0.08	8.00	0.27	3.34	محیط محدب D
4.40	-0.34	7.90	1.68	21.2	5.81	-0.02	7.05	1.66	23.4	مساحت محدب D
3.07	0.02	12.83	2.07	16.1	3.00	-0.14	12.3	2.41	19.5	شعاع کوچک‌ترین دایره محیطی
2.78	0.19	8.79	0.13	1.45	3.36	-0.21	8.14	0.14	1.67	نسبت طول به عرض D
3.60	0.53	10.23	0.25	2.39	8.19	1.06	9.68	0.23	2.39	دایره‌وار بودن D
7.12	0.60	7.70	0.05	0.62	4.31	-0.20	6.24	0.04	0.67	گردی D
5.95	0.56	10.55	0.04	0.40	3.42	-0.09	8.87	0.04	0.44	مساحت جعبه محیطی D
3.04	-0.13	7.18	0.31	4.33	3.19	-0.33	6.34	0.31	4.90	قطر معادل محیط D
3.62	-0.29	7.42	0.40	5.36	4.28	-0.22	6.54	0.39	6.00	مساحت بیضی معادل D
3.16	-0.06	13.44	2.20	16.3	3.02	-0.22	12.5	2.51	20.0	فشردگی D
3.89	0.54	7.47	0.11	1.48	7.61	0.88	7.01	0.11	1.51	یکپارچگی D
22.96	2.20	3.16	0.03	0.92	40.92	1.77	2.05	0.02	0.97	انحنای D
4.86	0.84	19.47	0.15	0.76	17.68	1.85	18.5	0.15	0.83	تحدب D
40.22	3.32	3.92	0.05	1.21	24.68	-0.50	3.16	0.04	1.26	فاکتور شکل D
4.00	0.58	7.48	1.39	18.6	7.03	1.04	6.95	1.32	19.0	محیط L
53.02	4.34	3.56	0.03	0.94	39.90	-0.18	2.51	0.03	0.98	مساحت L
3.04	0.17	10.30	0.08	0.77	3.29	0.02	9.08	0.08	0.85	مساحت جعبه محدود L
3.01	0.13	10.19	0.04	0.40	3.56	-0.12	8.85	0.04	0.44	ضخامت L
3.19	-0.05	13.51	2.81	20.8	2.99	-0.21	12.5	3.20	25.4	محیط V
279.1	13.77	5.87	0.04	0.71	37.79	-0.38	2.95	0.02	0.74	مساحت V
3.07	-0.11	7.11	0.96	13.5	3.47	-0.41	6.46	0.99	15.3	مساحت جعبه محیطی V
2.93	0.19	14.32	1.77	12.3	2.84	-0.08	13.5	2.08	15.3	حجم
3.04	0.03	13.99	2.82	20.1	2.97	-0.24	13.0	3.26	24.9	وزن هزار دانه
2.80	0.20	9.54	0.27	2.80	2.84	-0.16	8.64	0.28	3.27	نسبت ضخامت به طول
2.89	0.11	7.57	0.82	10.8	3.14	-0.17	6.97	0.86	12.3	نسبت ضخامت به عرض
3.00	0.36	16.87	1.16	6.86	2.80	0.16	16.0	1.40	8.74	نسبت حجم به مساحت
2.93	0.37	17.58	1.49	8.48	2.75	0.13	16.5	1.80	10.8	چگالی
3.06	0.47	24.06	6.75	28.0	2.94	0.10	18.8	6.76	35.8	استوانه‌ای بودن
2.91	0.04	9.82	0.04	0.41	3.40	-0.10	8.91	0.04	0.43	شاخص حجم به جعبه محیطی
17.27	1.54	2.19	0.02	0.97	4.77	-0.41	1.68	0.02	0.98	سطح ویژه دانه
4.41	-0.09	9.37	0.19	2.07	2.76	-0.12	9.11	0.21	2.29	فاکتور همگنی شکل
15.60	1.86	23.39	0.21	0.89	5.58	1.15	21.2	0.18	0.85	شاخص هم‌مرکزی
2.87	0.02	9.41	0.04	0.41	3.31	-0.04	8.64	0.04	0.43	شاخص پایداری
4.43	0.96	23.27	0.00	0.01	5.28	1.20	22.2	0.00	0.01	نسبت وزن به ابعاد
33.08	2.89	9.02	0.10	1.10	4.01	0.78	8.23	0.08	1.00	نسبت ابعاد به وزن
2.98	0.16	4.27	0.09	1.99	4.00	0.27	4.04	0.08	2.02	نسبت انحنا به حجم
3.91	0.57	6.62	0.44	6.61	6.41	0.94	6.04	0.39	6.41	نسبت حجم به انحنا
2.79	0.05	6.79	0.04	0.59	3.34	0.12	6.73	0.04	0.57	نسبت سطح به وزن
4.78	0.77	22.10	0.26	1.18	6.07	0.78	20.2	0.25	1.23	نسبت وزن به سطح
45.09	4.17	6.15	0.11	1.77	38.79	2.62	4.66	0.09	1.96	نسبت انحنا به سطح
5.73	0.94	16.16	0.22	1.33	4.37	0.93	16.1	0.18	1.11	نسبت سطح به انحنا
4.54	0.77	5.72	0.06	1.06	12.28	1.59	5.08	0.06	1.09	نسبت انحنا به وزن
25.75	2.35	19.12	0.05	0.26	3.67	0.18	14.5	0.04	0.30	نسبت وزن به انحنا
4.37	0.84	22.44	0.11	0.50	5.42	1.10	21.2	0.09	0.43	نسبت انحنا به ابعاد

18.73	2.17	24.78	0.02	0.07	5.81	1.28	23.2	0.01	0.05	نسبت ابعاد به انحنا
2.93	0.12	9.28	0.04	0.41	3.46	0.16	9.12	0.04	0.39	تقارن طولی
13.39	-1.14	70.12	0.01	0.02	4.94	0.50	73.4	0.01	0.01	تقارن عرضی
3.01	0.36	8.22	0.10	1.20	3.47	0.63	8.27	0.09	1.10	شاخص شبکه‌ای
5.45	0.14	2.48	0.03	1.26	3.84	-0.01	2.18	0.03	1.25	صافی سطح

Refer to the "Materials and Methods" section for abbreviations.

برای اختصارات به بخش مواد و روش‌ها رجوع شود.

تحلیل واریانس تفاوت‌های معنی‌دار ($p < 0.05$) بین میانگین‌های صفات در دو شرایط آبیاری را آشکار کرد. به‌طور خاص، تأثیر منفی شوری بر صفاتی مانند محیط، مساحت، حجم، چگالی و وزن هزار دانه به وضوح مشهود بود.

جدول ۳. تجزیه واریانس صفات مورفومتریک در ژنوتیپ‌های گندم تحت شرایط پایه و تنش شوری.

Table 3. Analysis of variance of morphometric traits in wheat genotypes under baseline and saline conditions.

CV (%)	Error	Genotype: Treatment	Treatment	Genotype	Traits
7.749	8.554	29.980 ***	41483.474 ***	171.898 ***	محیط D_
3.617	0.416	0.750 ***	1259.315 ***	4.056 ***	مساحت D_
4.802	0.671	2.086 ***	3698.373 ***	13.536 ***	شعاع محاطی D_
4.077	0.015	0.033 ***	62.974 ***	0.190 ***	شعاع محیطی D_
4.632	0.108	0.147 ***	166.733 ***	0.766 ***	طول ماکزیمم D_
4.482	0.107	0.153 ***	189.659 ***	0.842 ***	عرض ماکزیمم D_
3.776	0.014	0.032 ***	65.714 ***	0.188 ***	محیط محدب D_
4.427	0.979	1.376 ***	1625.789 ***	7.321 ***	مساحت محدب D_
4.860	0.753	2.194 ***	3867.698 ***	14.033 ***	شعاع کوچک‌ترین دایره محیطی D_
3.901	0.004	0.008 ***	16.336 ***	0.048 ***	نسبت طول به عرض D_
7.079	0.029	0.033 *	0.0002 ns	0.116 ***	دایره‌وار بودن D_
5.097	0.001	0.001 ns	0.782 ***	0.005 ***	گردی D_
6.972	0.001	0.001 ns	0.500 ***	0.004 ***	مساحت جعبه محاطی D_
2.675	0.015	0.045 ***	105.306 ***	0.275 ***	قطر معادل محیط D_
3.629	0.042	0.084 ***	128.671 ***	0.416 ***	مساحت بیضی معادل D_
4.974	0.817	2.458 ***	4286.527 ***	15.427 ***	فشردگی D_
5.355	0.006	0.008 *	0.320 ***	0.021 ***	یکپارچگی D_
1.941	0.0003	0.001 ***	0.810 ***	0.001 ***	انحنا D_
15.756	0.016	0.019 *	1.352 ***	0.041 ***	تحدب D_
2.857	0.001	0.002 ***	0.725 ***	0.002 ***	فاکتور شکل D_
5.275	0.985	1.230 *	57.807 ***	3.351 ***	محیط L_
2.351	0.001	0.001 ***	0.572 ***	0.001 ***	مساحت L_
6.761	0.003	0.003 ns	1.714 ***	0.015 ***	مساحت جعبه محدود L_
6.713	0.001	0.001 ns	0.498 ***	0.004 ***	ضخامت L_
5.008	1.344	4.102 ***	6912.188 ***	25.102 ***	محیط V_
3.985	0.001	0.001 ***	0.364 ***	0.001 ***	مساحت V_
2.776	0.161	0.459 ***	1061.206 ***	2.687 ***	مساحت جعبه محاطی V_
5.420	0.563	1.610 ***	2821.753 ***	10.259 ***	حجم
5.095	1.321	4.232 ***	7276.013 ***	25.832 ***	وزن هزار دانه
4.170	0.016	0.036 ***	69.134 ***	0.207 ***	نسبت ضخامت به طول
2.929	0.115	0.357 ***	788.084 ***	1.988 ***	نسبت ضخامت به عرض
7.286	0.323	0.760 ***	1128.482 ***	4.453 ***	نسبت حجم به مساحت
7.613	0.543	1.271 ***	1860.915 ***	7.347 ***	چگالی
10.951	12.245	31.184 ***	19584.659 ***	126.905 ***	استوانه‌ای بودن
6.750	0.001	0.001 ns	0.123 ***	0.003 ***	شاخص حجم به جعبه محاطی
1.769	0.0003	0.0004 ***	0.018 ***	0.0004 **	سطح ویژه دانه
4.656	0.010	0.020 ***	16.532 ***	0.102 ***	فاکتور همگنی شکل
15.735	0.019	0.033 ***	0.670 ***	0.069 ***	شاخص هم‌مرکزی

6.432	0.001	0.001 ns	0.106 ***	0.003 ***	شاخص پایداری
9.661	0.000001	0.000002 ***	0.003 ***	0.00001 ***	نسبت وزن به ابعاد
4.851	0.003	0.004 ***	2.932 ***	0.020 ***	نسبت ابعاد به وزن
3.088	0.004	0.004 ns	0.359 ***	0.016 ***	نسبت انحنا به حجم
4.614	0.090	0.089 ns	12.196 ***	0.399 ***	نسبت حجم به انحنا
4.824	0.001	0.001 ns	0.120 ***	0.004 ***	نسبت سطح به وزن
14.742	0.032	0.059 ***	0.948 ***	0.118 ***	نسبت وزن به سطح
4.196	0.006	0.014 ***	11.222 ***	0.007 *	نسبت انحنا به سطح
7.439	0.008	0.016 ***	15.734 ***	0.099 ***	نسبت سطح به انحنا
3.850	0.002	0.002 ***	0.217 ***	0.006 ***	نسبت انحنا به وزن
12.492	0.001	0.001 ns	0.675 ***	0.005 ***	نسبت وزن به انحنا
15.197	0.005	0.010 ***	1.636 ***	0.020 ***	نسبت انحنا به ابعاد
14.239	0.0001	0.0001 ***	0.066 ***	0.000 ***	نسبت ابعاد به انحنا
6.524	0.001	0.001 ns	0.089 ***	0.003 ***	تقارن طولی
65.168	0.0001	0.0001 ***	0.005 ***	0.0001 **	تقارن عرضی
3.856	0.002	0.004 ***	3.555 ***	0.023 ***	شاخص شبکه‌ای
2.028	0.001	0.001 *	0.053 ***	0.001 ***	صافی سطح

(*)، ** و ns به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال یک و پنج درصد و غیرمعنی‌دار. برای اختصارات به بخش مواد و روش‌ها رجوع شود.

* and **: Significant at the 1% and 5% probability levels and not-significant, respectively. Refer to the "Materials and Methods" section for abbreviations.

تحلیل واریانس نشان داد که اثر شرایط آبیاری (پایه و شوری) و ژنوتیپ بر صفات محیط و مساحت دانه گندم به‌طور معنی‌داری متفاوت است (جدول ۲). میانگین محیط دانه در شرایط پایه (N) برابر با ۴۳/۴۳ میلی‌متر با انحراف معیار ۸/۸۵ بود، درحالی‌که در شرایط شوری (S) این مقدار به ۳۲/۰۵ میلی‌متر با انحراف معیار ۶/۸۶ کاهش یافت (جدول ۲). این کاهش معنی‌دار، تأثیر منفی تنش شوری بر رشد و توسعه دانه گندم را نشان می‌دهد. علاوه‌براین، اثر ژنوتیپ بر این صفت بسیار معنی‌دار بود ($F=171.898, p<0.0001$) که نشان‌دهنده تفاوت‌های ژنتیکی قابل توجه در پاسخ به تنش شوری است. این یافته‌ها با مطالعات پیشین (Farooq *et al.*, 2024; Khan *et al.*, 2022) همخوانی دارد که نشان داده‌اند تنوع ژنتیکی در صفات مرتبط با دانه می‌تواند نقش کلیدی در تحمل به شوری ایفا کند. همچنین، اثر شرایط آبیاری به‌طور معنی‌داری بر مساحت دانه تأثیر گذاشت ($p<0.0001, F=4.056$)، به‌طوری‌که کاهش آن تحت شوری احتمالاً ناشی از اختلال در تقسیم و گسترش سلولی در دانه‌های در حال رشد است. این نتایج مطابق با گزارش‌های پیشین (Ibrahimova *et al.*, 2025; Lindberg & Premkumar, 2023) است که نشان دادند تنش شوری با ایجاد استرس اسمزی و سمیت یونی، مسیرهای متابولیکی را مختل کرده و سبب کاهش اندازه و وزن دانه می‌شود. علاوه‌براین، تعامل بین ژنوتیپ و شرایط آبیاری برای هر دو صفت محیط و مساحت دانه معنی‌دار بود (به‌ترتیب $F=29.980, p<0.0001$ و $F=0.750, p<0.0001$) که نشان می‌دهد ژنوتیپ‌های مختلف پاسخ‌های متفاوتی به تنش شوری دارند. برخی ژنوتیپ‌ها ممکن است با بهره‌گیری از مکانیسم‌های تحمل به شوری مانند تنظیم اسمزی و تغییر در توزیع منابع، توانایی حفظ صفات مرتبط با دانه را داشته باشند؛ درحالی‌که سایر ژنوتیپ‌ها ممکن است کاهش قابل توجهی در این صفات تجربه کنند. این یافته‌ها با نتایج پیشین که نشان داده‌اند تعامل ژنوتیپ و شوری می‌تواند به بهبود یا حفظ صفات مرتبط با دانه در ژنوتیپ‌های مقاوم منجر شود، همسو است (Elfanah *et al.*, 2023; Karimzadeh *et al.*, 2023). بنابراین، شناسایی ژنوتیپ‌های مقاوم به شوری و استفاده از آن‌ها در برنامه‌های اصلاحی می‌تواند راهکاری مؤثر برای بهبود عملکرد دانه در شرایط تنش‌های محیطی باشد.

بررسی آماری با استفاده از تجزیه واریانس مشخص کرد که ژنوتیپ تأثیر معنی‌داری بر کمترین و بیشترین شعاع دانه، طول و عرض دانه دارد ($p<0.0001$). این نتایج حاکی از وجود تنوع ژنتیکی قابل توجه در ابعاد دانه بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی است (جدول ۲). این تنوع می‌تواند ناشی از تفاوت در بیان ژن‌های کنترل‌کننده رشد دانه، فعالیت مسیرهای تنظیمی و ترکیب هورمونی بذر باشد. برای نمونه، ژن TaGS5-3A که در تعیین اندازه و عرض دانه نقش دارد، ممکن است در ژنوتیپ‌های مختلف به‌طور متفاوتی تنظیم شوند که این امر منجر به تغییرات مشاهده‌شده در اندازه دانه می‌شود (Ma *et al.*, 2016). علاوه‌بر ژنوتیپ، شوری نیز تأثیر معنی‌داری بر تمامی پارامترهای اندازه‌گیری‌شده داشته و منجر به کاهش اندازه دانه شده است ($p<0.0001$). این کاهش

احتمالاً ناشی از ایجاد تنش اسمزی، کاهش جذب آب و مواد مغذی و اختلال در فرآیندهای متابولیکی دانه است. در شرایط تنش شوری، کاهش فعالیت آنزیم‌های درگیر در رشد سلولی می‌تواند گسترش دانه را محدود کرده و شعاع و قطر آن را کاهش دهد. این نتایج با یافته‌های پیشین که کاهش اندازه دانه را تحت تنش شوری گزارش کرده‌اند، همخوانی دارد (Karimzadeh et al., 2023). از منظر فیزیولوژیکی، این اثرات ممکن است به تغییر در تعادل یونی و کاهش تنظیم اسمزی مرتبط باشد که رشد دانه را در گونه‌های حساس محدود می‌کند. تعامل بین ژنوتیپ و شرایط شوری نیز از نظر آماری معنی‌دار بوده است که نشان‌دهنده واکنش‌های متفاوت ژنوتیپ‌ها به تنش شوری است. برخی ژنوتیپ‌ها ممکن است دارای مکانیسم‌های تحمل مؤثرتری باشند، مانند افزایش بیان ژن‌های مرتبط با تحمل به شوری یا تنظیم بهتر اسمزی که به آن‌ها امکان حفظ اندازه دانه در شرایط تنش را می‌دهد. در مقابل، ژنوتیپ‌های حساس ممکن است کاهش بیشتری در اندازه دانه نشان دهند. این یافته‌ها بر اهمیت شناسایی ژنوتیپ‌های مقاوم برای استفاده در برنامه‌های اصلاح نباتات تأکید دارد، زیرا انتخاب و به‌کارگیری این ژنوتیپ‌ها می‌تواند به بهبود تحمل به شوری و حفظ کیفیت محصول در شرایط تنش کمک کند (Ahsan Irshad et al., 2022).

یافته‌های تجزیه واریانس حاکی از آن است که ژنوتیپ به‌طور معنی‌داری بر نسبت طول به عرض دانه ($F = 3867.698, p < 0.0001$) و گردی دانه ($p < 0.0002$) تأثیرگذار است. این نتایج، وجود تنوع ژنتیکی چشمگیر در ویژگی‌های ریخت‌شناسی دانه بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی را تأیید می‌کند. این تنوع می‌تواند ناشی از تفاوت در الگوی بیان ژن‌های تنظیم‌کننده رشد و نمو دانه، میزان فعالیت مسیرهای پیام‌رسانی رشد و پروفایل هورمونی بذر باشد. به‌عنوان مثال، تغییرات در بیان ژن‌هایی نظیر GSW3 که نقش کلیدی در تنظیم اندازه دانه دارد، می‌تواند عامل این تفاوت‌ها در بین ژنوتیپ‌ها باشد (Bai et al., 2023). از دیدگاه زیستی، این تنوع ژنتیکی می‌تواند ناشی از تفاوت در فعالیت ژن‌های محوری دخیل در رشد دانه باشد. ژن‌هایی نظیر GS3 و GW7 نقش اساسی در تنظیم طول و عرض دانه ایفا می‌کنند و تغییرات در فعالیت آن‌ها می‌تواند منجر به تفاوت در اندازه دانه بین ژنوتیپ‌ها شود. علاوه‌براین، تفاوت در میزان فعالیت مسیرهای پیام‌رسانی رشد و پروفایل هورمونی بذر نیز می‌تواند در این تنوع نقش داشته باشد (Ahmed et al., 2023).

علاوه‌بر ژنوتیپ، شرایط آبیاری (شوری) نیز تأثیر معنی‌داری بر نسبت طول به عرض دانه ($F = 14.033, p < 0.0001$) و گردی دانه ($p < 0.001$) نشان داد. اثر منفی شوری بر کاهش یکنواختی رشد و تغییر ریخت‌شناسی دانه در تمامی پارامترهای اندازه‌گیری‌شده مشهود بود (جدول ۲). این تأثیر احتمالاً به دلیل القای تنش اسمزی، کاهش جذب آب و مواد مغذی و اختلال در فرآیندهای متابولیکی دانه است. کاهش فعالیت آنزیم‌های دخیل در رشد سلولی و اختلال در توزیع ذخایر نشاسته تحت تنش شوری، منجر به محدود شدن رشد دانه و تغییر شکل آن می‌شود. Ehtaiwesh et al. (2024) نیز آشکار ساخته‌اند که شوری از طریق تأثیر بر مسیرهای پیام‌رسانی تنظیم‌کننده هم‌ایستایی یونی و تنظیم هورمون‌های رشد نظیر اکسین و جیبرلین، اندازه و شکل دانه را در گونه‌های حساس به شوری کاهش می‌دهد. از منظر فیزیولوژیکی، تأثیر منفی شوری بر اندازه و شکل دانه می‌تواند به دلیل القای تنش اسمزی، کاهش جذب آب و مواد مغذی و اختلال در فرآیندهای متابولیکی دانه باشد (Chourasia et al., 2021; Hameed et al., 2021; Zhang et al., 2022). شوری می‌تواند منجر به کاهش فعالیت آنزیم‌های دخیل در رشد سلولی و اختلال در توزیع ذخایر نشاسته و در نتیجه محدود شدن رشد دانه شود. علاوه‌براین، شوری می‌تواند با تأثیر بر مسیرهای پیام‌رسانی تنظیم‌کننده هم‌ایستایی یونی و تنظیم هورمون‌های رشد، اندازه و شکل دانه را کاهش دهد (Pastuszak et al., 2022; Zhang et al., 2022). تعامل معنی‌داری بین ژنوتیپ و شرایط شوری، پاسخ‌های متفاوت ژنوتیپ‌ها به تنش شوری را در رابطه با نسبت طول به عرض دانه ($F = 2.194, p < 0.0001$) و گردی دانه ($p < 0.05$) آشکار می‌سازد. برخی ژنوتیپ‌ها ممکن است دارای مکانیسم‌های تحمل برتری باشند که به آن‌ها امکان حفظ تعادل رشد سلولی و شکل دانه تحت تنش شوری را می‌دهد؛ درحالی‌که برخی دیگر به دلیل حساسیت بیشتر، ناهماهنگی در رشد و تغییر شکل بیشتری را نشان می‌دهند. شناسایی ژنوتیپ‌هایی که توانایی حفظ اندازه و شکل مطلوب دانه در شرایط شور را دارند، می‌تواند در برنامه‌های اصلاحی برای بهبود تحمل به شوری و حفظ کیفیت دانه مفید باشد (Munns, 2005).

با استناد به تحلیل واریانس، می‌توان نتیجه گرفت که شرایط آبیاری (پایه و شوری) به‌طور معنی‌داری بر حجم دانه ($p < 0.001$) و تراکم دانه ($F = 7.347$, $p < 0.001$) تأثیرگذار است (جدول ۲). این یافته‌ها تأییدکننده تأثیر قابل توجه تنش شوری بر این ویژگی‌ها است. تنش شوری منجر به کاهش حجم دانه می‌شود که احتمالاً ناشی از کاهش تکثیر و انبساط سلولی و همچنین اثرات منفی بر ذخیره‌سازی مواد اندوخته‌ای در دانه است. Rui Zhang *et al.* (2022) نیز گزارش کرده‌اند که تنش شوری از طریق اختلال در جذب آب و کاهش سنتز کربوهیدرات‌ها، تأثیر منفی بر رشد و نمو دانه دارد. همچنین، تنش شوری با ایجاد اختلال در فرآیندهای رشد و نمو دانه، می‌تواند منجر به تغییر در تراکم دانه شود. از منظر فیزیولوژیکی، تنش شوری با ایجاد اختلال در فرآیندهای رشد و نمو دانه، منجر به تغییر در حجم و تراکم دانه می‌شود. اختلال در جذب آب و کاهش سنتز کربوهیدرات‌ها منجر به کاهش حجم دانه می‌شود. همچنین، اختلال در فرآیندهای رشد و نمو دانه می‌تواند منجر به تغییر در تراکم دانه شود (He *et al.*, 2013; Rui Zhang *et al.*, 2022).

اثر ژنوتیپ بر حجم دانه ($p < 0.001$) و تراکم دانه ($F = 1860.915$, $p < 0.001$) نیز به‌طور قابل توجهی معنی‌دار بود. این نتایج نشان‌دهنده تفاوت‌های ژنتیکی قابل ملاحظه بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی در این ویژگی‌ها است. برخی ژنوتیپ‌ها ظرفیت بالاتری برای حفظ حجم و تراکم دانه دارند که می‌تواند ناشی از ویژگی‌های ژنتیکی مرتبط با کارایی بهره‌وری از منابع، تنظیم فشار اسمزی، تخصیص بهینه مواد غذایی و عوامل ژنتیکی مؤثر بر صفات فیزیکی دانه باشد. یافته‌های حاضر همسو با مطالعات قبلی است که نشان داده‌اند ژنوتیپ‌های مقاوم به شوری می‌توانند از طریق سازوکارهای تنظیم اسمزی و سازگاری متابولیکی، کاهش حجم و تراکم دانه را در شرایط شوری به حداقل برسانند و برخی صفات فیزیکی دانه تحت تأثیر عوامل ژنتیکی قوی هستند. از منظر زیست‌شناختی، تفاوت‌های ژنتیکی بین ژنوتیپ‌ها نقش مهمی در تعیین حجم و تراکم دانه ایفا می‌کند (Li *et al.*, 2015). اثر متقابل ژنوتیپ و شرایط آبیاری بر حجم دانه ($p < 0.01$) و تراکم دانه ($F = 1.271$, $p < 0.001$) نیز معنی‌دار بود. این نتایج نشان‌دهنده پاسخ‌های متفاوت ژنوتیپ‌ها به تنش شوری در مورد حجم و تراکم دانه است. برخی ژنوتیپ‌ها ممکن است تحت تنش شوری نسبت به سایرین کاهش کمتری در حجم و تراکم دانه نشان دهند و توانایی بیشتری برای حفظ تراکم طبیعی دانه داشته باشند. این یافته حاکی از آن است که تفاوت در توانایی ژنوتیپ‌ها در حفظ جذب آب، متابولیسم نشاسته و تنظیم بیان ژن‌های مرتبط با رشد دانه و همچنین تفاوت در بیان ژن‌های مرتبط با مقاومت به تنش و تنظیم‌کننده‌های رشد می‌تواند منجر به واکنش‌های متفاوت ژنوتیپ‌ها به شرایط محیطی شود (Razzaque & Juenger, 2022).

پژوهش حاضر با استفاده از تحلیل واریانس آشکار ساخت که ژنوتیپ تأثیر معنی‌داری بر شاخص گردی دانه ($F = 0.106$, $p < 0.001$) اعمال نمود. این یافته‌ها تأییدکننده وجود تفاوت‌های ژنتیکی در میان ژنوتیپ‌های مورد ارزیابی در این ویژگی است. این یافته حاکی از آن است که ژنوتیپ‌ها از حیث ساختار و ابعاد دانه متمایز هستند که می‌تواند ناشی از تفاوت در الگوی بیان ژن‌های تنظیم‌کننده رشد و ریخت‌شناسی دانه باشد. مطالعه‌ی پیشین نیز تصدیق کرده است که شاخص گردی دانه به عنوان یک صفت ریخت‌شناختی، تحت تأثیر عوامل ژنتیکی و سازوکارهای تنظیم‌کننده رشد دانه قرار دارد (Wang *et al.*, 2024). اثر شرایط آبیاری (شوری در مقابل شرایط پایه) بر شاخص گردی دانه نیز به‌طور معنی‌داری تأثیرگذار بود ($F = 0.003$, $p < 0.001$). این نتیجه آشکار می‌سازد که تنش شوری می‌تواند به‌طور مستقیم بر این ویژگی اعمال نفوذ نموده و منجر به تغییر در نسبت طول به عرض دانه شود. تحقیقات نشان داده‌اند که شوری می‌تواند از طریق کاهش تکثیر سلولی و تغییر در انتقال مواد مغذی، سبب تغییر در شکل دانه گردد. در برخی گونه‌ها، تنش شوری باعث افزایش کشیدگی دانه شده است؛ درحالی‌که در سایر گونه‌ها ممکن است کاهش طول و تغییر در نسبت ابعاد دانه مشاهده شود (Al-Ashkar *et al.*, 2021; Gupta *et al.*, 2025). از سوی دیگر، اثر متقابل ژنوتیپ و شوری بر شاخص گردی دانه معنی‌دار نبود ($F = 0.001$, $p = 0.88$) که آشکار می‌سازد پاسخ ژنوتیپ‌های متمایز نسبت به شوری از نظر این ویژگی تفاوت قابل توجهی ندارد. این نتیجه حاکی از آن است که اگرچه ژنوتیپ‌ها در شرایط عادی تفاوت‌هایی در شاخص شکل دانه دارند، اما این تفاوت‌ها در مواجهه با تنش شوری تغییر قابل توجهی نشان نمی‌دهد. یافته‌های متناقضی در تحقیق Wang *et al.* (2024) گزارش شده‌اند که آشکار می‌سازند برخی صفات ریخت‌شناختی، اگرچه تحت تأثیر ژنتیک

قرار دارند، اما در شرایط تنش محیطی، الگوی پایداری از خود نشان می‌دهند. این نتایج می‌تواند در برنامه‌های اصلاحی برای گزینش ژنوتیپ‌هایی با شاخص شکل پایداری در شرایط شوری مورد استفاده قرار گیرد و به توسعه ارقام مقاوم به تنش کمک کند.

۳-۲. بررسی رابطه صفات

۳-۲-۱. تحلیل همبستگی بین صفات

همبستگی قوی بین طول (Ferret) و عرض (Breadth) دانه ($r=0.983$, $p<0.01$) نشان‌دهنده هماهنگی در رشد ابعادی دانه‌ها است (شکل ۱). این نتیجه بیانگر آن است که افزایش در یکی از این ابعاد معمولاً با افزایش در دیگری همراه است. همچنین، طول و عرض هر دو با حجم دانه (Volume) ارتباط مثبت و معنی‌داری دارند ($r=0.746$ و $r=0.754$, $p<0.01$) که نشان می‌دهد افزایش در هر یک از این دو ویژگی به افزایش حجم کلی دانه منجر می‌شود. از سوی دیگر، وزن هزار دانه (TKW) با هر سه بعد دانه (طول، عرض و ضخامت) همبستگی مثبت داشت، اما این ارتباط برای ضخامت ($r=0.966$, $p<0.01$) در مقایسه با طول ($r=0.836$, $p<0.01$) و عرض ($r=0.854$, $p<0.01$) قوی‌تر بود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که در مقایسه با سایر ابعاد، ضخامت دانه نقش تعیین‌کننده‌تری در وزن نهایی دانه دارد. نتایج این مطالعه با یافته‌های سایر تحقیقات در زمینه ابعاد دانه و وزن آن هم‌راستا است و تأیید می‌کند که ابعاد دانه به‌طور هماهنگ رشد می‌کنند و ضخامت دانه عامل اصلی تعیین‌کننده وزن نهایی دانه است (Herrera & Calderini, 2020). ضخامت دانه علاوه بر ارتباط قوی با وزن هزار دانه، با حجم دانه نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری نشان داد ($r=0.55$, $p<0.01$). این نتیجه تأکید می‌کند که دانه‌های ضخیم‌تر معمولاً حجم بیشتری دارند که می‌تواند به دلیل افزایش مواد ذخیره‌ای درون دانه باشد. از سوی دیگر، نسبت طول به عرض (AspRatio) دانه‌ها همبستگی معنی‌داری با گردی (Roundness) و کرویت (Sphericity) نشان داد ($r=0.717$, $p<0.01$) که بیانگر این است که دانه‌هایی با نسبت طول به عرض بالاتر تمایل به داشتن شکل‌های گردتر و کروی‌تری دارند. این ویژگی ممکن است بر نحوه قرارگیری دانه‌ها در سنبله و همچنین بر فرآوری و کیفیت دانه‌ها در صنایع غذایی تأثیرگذار باشد. یافته‌های این پژوهش که با نتایج سایر مطالعات همخوانی دارد، نشان می‌دهد که ضخامت و نسبت طول به عرض دانه، عوامل کلیدی تعیین‌کننده حجم و شکل دانه‌ها هستند (Xuedan et al., 2023). ارتباط بین صفات فیزیکی دانه‌ها نیز حائز اهمیت است. گردی و کرویت دانه با فشردگی (Compactness) همبستگی مثبت نشان دادند ($r=0.424$, $p<0.01$) که نشان می‌دهد دانه‌های گردتر و کروی‌تر ساختار فشرده‌تری دارند (شکل ۱). علاوه بر این، فشردگی دانه‌ها همبستگی بسیار قوی با وزن هزار دانه داشت ($r=0.995$, $p<0.01$) که بیانگر نقش کلیدی این ویژگی در تعیین وزن نهایی دانه است. از آنجایی که فشردگی با نسبت طول به عرض نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری نشان داد ($r=0.974$, $p<0.01$)، می‌توان نتیجه گرفت که دانه‌های دارای نسبت طول به عرض بالاتر تمایل به داشتن ساختار فشرده‌تری دارند که ممکن است بر چگالی و قابلیت ذخیره‌سازی آن‌ها تأثیرگذار باشد. نتایج این مطالعه با یافته‌های سایر تحقیقات هم‌راستا است و تأیید می‌کند که فشردگی دانه، نقش مهمی در تعیین وزن نهایی دانه و همچنین ارتباط معنی‌داری با گردی و نسبت طول به عرض دانه دارد (Hoyle et al., 2019).

در مجموع، تجزیه همبستگی‌ها نشان می‌دهد که صفات مورفولوژیک و فیزیکی دانه‌ها به‌طور پیچیده‌ای با یکدیگر در ارتباط هستند. افزایش طول، عرض و ضخامت دانه به‌طور مستقیم بر حجم و وزن دانه تأثیر دارد؛ درحالی که نسبت طول به عرض، گردی و کرویت دانه‌ها بر فشردگی و وزن دانه اثرگذارند. نتایج این مطالعه اهمیت توجه هم‌زمان به این صفات را برای بهبود عملکرد و کیفیت دانه‌ها در شرایط تنش شوری نشان می‌دهد، به‌ویژه اینکه برخی از این ویژگی‌ها مانند ضخامت و فشردگی دانه نقش تعیین‌کننده‌تری در افزایش وزن دانه دارند.

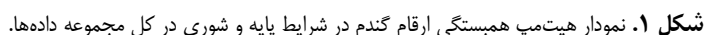
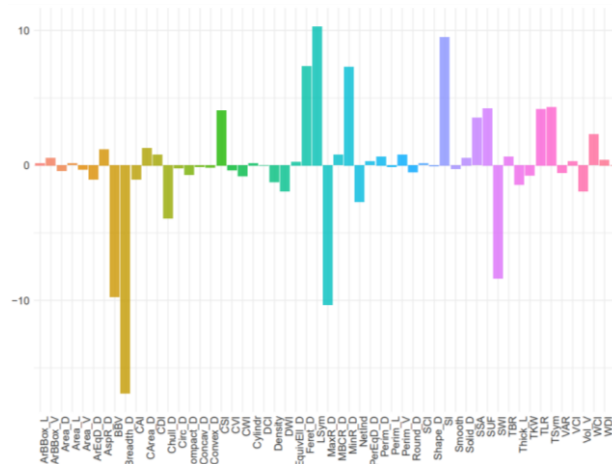


Figure 1. Heatmap of correlation analysis of wheat genotypes under Baseline and salinity conditions* and **: Significant at the 1% and 5% probability levels, respectively. Refer to the “Materials and Methods” section for abbreviations.

تحلیل تفکیک خطی (LDA) نشان داد که تفکیک بین ژنوتیپ‌های گندم تحت شرایط آبیاری شور و پایه به طور معنی‌داری قابل تشخیص است ($p < 0.001$) (شکل ۲). این یافته با نتایج پژوهش پیشین که نشان داده ویژگی‌های ریخت‌شناسی دانه تحت تنش شوری تغییر کرده و منجر به تمایز ژنوتیپی می‌شوند همخوانی دارد (Karimzadeh et al., 2023). ضرایب تفکیکی محاسبه‌شده نشان داد که برخی ویژگی‌های هندسی مانند طول دانه (Feret)، عرض دانه (Breadth) و ضخامت دانه (Thickness) بیشترین سهم را در تفکیک ژنوتیپ‌ها داشتند. همچنین شاخص‌هایی مانند نسبت وزن به ابعاد، شاخص هم‌مرکزی (CAI) و نسبت سطح به وزن تأثیر زیادی بر تمایز بین نمونه‌ها نشان دادند. مطالعه حاضر تأیید می‌کند که تنش شوری باعث تغییرات قابل توجهی در ویژگی‌های ظاهری و ژنتیکی دانه‌های گندم می‌شود. این یافته‌ها با نتایج تحقیقات پیشین همخوانی دارد (Al-Ashkar et al., 2020; Sen et al., 2022). مدل LDA توانست با دقت ۹۶٪، ژنوتیپ‌ها را در گروه‌های مربوطه طبقه‌بندی کند. ژنوتیپ‌هایی با امتیاز LDA مثبت بیشتر در دسته شور و ژنوتیپ‌هایی با امتیاز LDA منفی بیشتر در دسته پایه قرار گرفتند. بیشترین مقدار امتیاز LDA به ژنوتیپ اوحدی تحت شرایط شور و کمترین مقدار LDA Score (-9.900) به ژنوتیپ داراب ۲ تحت شرایط پایه تعلق داشت. میانگین LDA Score در ژنوتیپ‌های آبیاری پایه ۱/۲۸۲- و در ژنوتیپ‌های شور ۱/۲۸۲ بود. بررسی ضرایب تفکیکی نشان داد که متغیر "Area_D" با ضریب $LD1 = -0.701$ بیشترین تأثیر را در تفکیک گروه‌ها داشت. این ضریب منفی نشان می‌دهد که کاهش این ویژگی با افزایش احتمال طبقه‌بندی نمونه‌ها در گروه شور ارتباط دارد. در مقابل، متغیر تحذب "Convex_D" با ضریب $LD1 = 0.104$ کمترین تأثیر را در تفکیک داشت. سایر متغیرهای مؤثر عبارتند از فاکتور شکل "Shape_D" ($LD1 = -0.436$) و محیط جانبی "Perim_L" ($LD1 = -0.307$)، که هر دو تأثیر منفی در تفکیک داشتند. متغیر مساحت جانبی، "Area_L" نیز با ضریب $LD1 = -0.141$ در دسته صفات با تأثیر کم قرار گرفت.

ژنوتیپ‌هایی با نمره LDA نزدیک به صفر، بیشترین احتمال را برای اشتباه در طبقه‌بندی داشتند (میزان خطای طبقه‌بندی مدل ۴٪ بود). به عنوان مثال، ژنوتیپ‌ها با امتیاز LDA برابر با ۰/۰۲، به اشتباه از گروه پایه به شور طبقه‌بندی شد. بررسی ویژگی‌های ریخت‌شناسی و فیزیکی این ژنوتیپ‌ها نشان داد که آن‌ها دارای صفات مشترک بین دو گروه بوده‌اند. بررسی امتیازات تفکیکی (Discriminant Scores) نشان داد که ژنوتیپ‌های مقاوم به شوری الگوهای متفاوتی از ویژگی‌های ریخت‌شناسی دانه نسبت به ژنوتیپ‌های حساس دارند. این مسئله را می‌توان به توانایی این ژنوتیپ‌ها در تنظیم فیزیولوژیکی و آناتومیکی دانه برای

مقابله با اثرات تنش شوری نسبت داد. به عنوان مثال، ژنوتیپ‌های مقاوم معمولاً ساختار سلولی فشرده‌تری دارند که باعث کاهش تبخیر و بهبود نگهداری آب در بافت‌ها می‌شود (Irshad et al., 2022; Nassar et al., 2020).



شکل ۲. نمودار بارگذاری‌های تجزیه تفکیکی خطی (LDA) برای بررسی ساختار داده‌ها. برای اختصارات به بخش مواد و روش‌ها رجوع شود.

Figure 2. LDA loadings plots for exploring data structure
Refer to the Materials and Methods section for abbreviations.

۳-۲-۳. تحلیل عاملی

به منظور بررسی ساختار پنهان میان صفات ریخت‌شناسی دانه گندم تحت تنش شوری، تجزیه عاملی اکتشافی انجام شد (شکل ۳). در ابتدا، کفایت داده‌ها برای انجام این تجزیه از طریق دو آزمون مهم مورد بررسی قرار گرفت. شاخص کفایت نمونه‌گیری (KMO) Kaiser-Meyer-Olkin مقدار ۰.۹۰۲ را نشان داد که در سطح "بسیار عالی" قرار دارد و بیانگر مناسب بودن اندازه داده‌ها برای تجزیه به عامل‌ها است. همچنین، آزمون کرویت بارتلت ($\chi^2 = 347.654$ ، درجه آزادی = ۱/۴۸۵، $p < 0.001$) نشان داد که همبستگی بین متغیرها از لحاظ آماری معنی‌دار است و ماتریس همبستگی داده‌ها شرایط لازم برای تجزیه به عامل‌ها را دارد. نتایج محاسبه میزان تبیین واریانس (Communalities) نشان داد که برخی از صفات مانند عرض ماکزیمم (Breadth_D: ۰.۹۹۳)، وزن هزار دانه (TKW: ۰.۹۸۹)، طول ماکزیمم (Feret_D: ۰.۹۸۳) و مساحت دانه (Area_D: ۰.۹۸۲) بالاترین مقدار واریانس تبیین شده را داشته و بنابراین نقش مهمی در ساختار عاملی دارند (جدول ۴). در مقابل، صفاتی مانند سطح ویژه دانه (SSA: ۰.۲۰۲)، تقارن عرضی (TSym: ۰.۲۰۷)، نسبت وزن به سطح (WSI: ۰.۲۸۳)، و استوانه‌ای بودن (Cylindr: ۰.۴۵۵) کمترین میزان واریانس تبیین شده را نشان دادند که بیانگر ارتباط ضعیف‌تر آن‌ها با ساختار استخراج شده است. بر اساس معیار Kaiser، عواملی که مقدار ویژه (Eigenvalue) آن‌ها بیشتر از یک است به عنوان عوامل معنی‌دار در نظر گرفته شدند. در این پژوهش، چهار عامل استخراج شد که در مجموع ۸۳/۵٪ از واریانس کل داده‌ها را تبیین کردند.

جدول ۴. نتایج تحلیل عاملی صفات گندم تحت شرایط پایه و تنش شوری (مقدار ویژه و درصد واریانس تبیین شده).

Table 4. Factor analysis results of wheat traits under baseline and salinity stress conditions (Eigenvalues and percentage of explained variance).

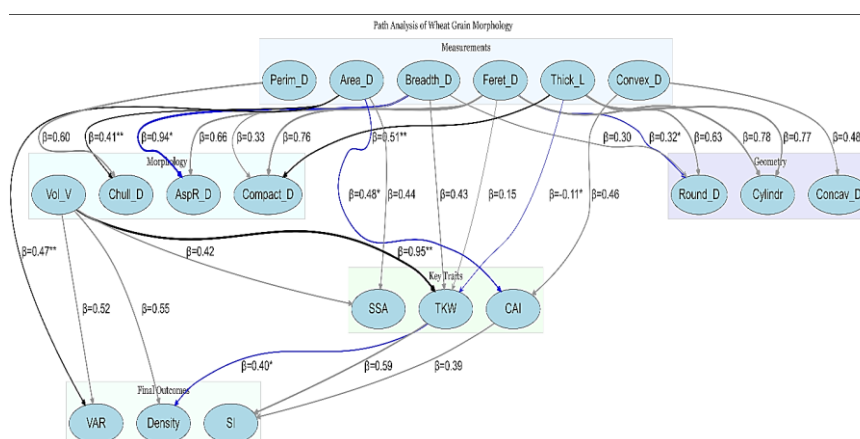
عامل	Eigenvalue	درصد واریانس تبیین شده
۱	29.19	48.65%
۲	13.31	22.18%
۳	5.13	8.55%
۴	۲.۴۷	۴.۱۲%
جمع کل واریانس تبیین شده	-	۸۳.۵۰%

نتایج ماتریس بارهای عاملی نشان داد که عامل اول که ۴۸/۶۵٪ از واریانس را تبیین می‌کند، مربوط به صفات اندازه و حجم دانه مانند وزن هزار دانه، عرض، طول، و حجم دانه است. بارهای عاملی نشان می‌دهند که این صفات به شدت تحت تأثیر عامل اول هستند و کاهش مقادیر این صفات در شرایط شوری احتمالاً نشان‌دهنده اثر منفی تنش شوری بر رشد دانه‌هاست. پیش از این نیز نشان داده شده بود که شوری باعث کاهش وزن هزار دانه و کاهش ابعاد دانه در گونه‌های حساس به تنش شوری می‌شود (Mubushar *et al.*, 2024). علاوه بر این، بررسی‌های مشابه در سایر گیاهان زراعی نیز روند مشابهی را تأیید کرده‌اند، جایی که کاهش ابعاد دانه با کاهش شاخص‌های رشد کلی گیاه همبستگی دارد. عامل دوم که ۲۲/۱۸ درصد از واریانس را تبیین می‌کند، به صفات مرتبط با شکل و تقارن دانه‌ها مانند دایره‌ای بودن (Circularity)، یکپارچگی (Solidity)، و محیط دانه (Perimeter) مربوط می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که شوری ممکن است بر یکنواختی و ساختار هندسی دانه تأثیرگذار باشد و این تغییرات می‌توانند بر کیفیت آسیابانی گندم اثر منفی داشته باشند. مطالعات دیگری نیز تأیید کرده‌اند که کاهش تقارن و افزایش بی‌نظمی در شکل دانه تحت تأثیر شوری می‌تواند قابلیت فرآوری دانه را کاهش داده و باعث افت کیفیت نهایی محصول شود. این نتایج بیانگر آن است که صفات مرتبط با شکل دانه می‌توانند معیارهای مهمی در گزینش ژنوتیپ‌های مقاوم به شوری باشند، به‌ویژه در برنامه‌های اصلاحی که بر کیفیت فرآوری و ارزش صنعتی گندم تمرکز دارند (Aniskina *et al.*, 2023). عامل سوم که ۸/۵۵٪ از واریانس را توضیح می‌دهد، مربوط به ناهمواری‌های سطح دانه و میزان انحنا آن است. صفاتی مانند ناهمواری (Concavity) و شاخص شکل (Shape Index) در این عامل بار عاملی بالایی دارند که نشان می‌دهد افزایش شوری باعث افزایش ناهمواری سطح دانه‌ها می‌شود. این تغییرات می‌توانند بر قابلیت جذب آب دانه و در نتیجه بر جوانه‌زنی و رشد اولیه آن تأثیرگذار باشند (Jin *et al.*, 2024; Reed *et al.*, 2022). عامل چهارم که ۴/۱۲٪ از واریانس را تبیین می‌کند، مرتبط با تراکم و چگالی دانه است و صفاتی مانند استوانه‌ای بودن (Cylindricity) و شاخص هم‌مرکزی (CAI) در این گروه قرار می‌گیرند. مقادیر منفی بارهای عاملی در این عامل نشان‌دهنده کاهش چگالی و تراکم دانه‌ها تحت تنش شوری است که می‌تواند بر کیفیت و استحکام ساختاری دانه‌ها اثر بگذارد. بر اساس نتایج تجزیه به عامل‌ها، امکان خوشه‌بندی صفات ریخت‌شناسی دانه در چهار گروه مجزا فراهم شد (شکل ۳). گروه اول شامل صفات مربوط به ابعاد اولیه دانه مانند طول ماکزیمم (Ferret)، عرض ماکزیمم (Breadth) و مساحت دانه (Area) است. گروه دوم شامل صفات مرتبط با تقارن و شکل‌پذیری مانند دایره‌ای بودن (Circularity) و یکپارچگی (Solidity) است که نشان‌دهنده تأثیر شوری بر یکنواختی دانه است. گروه سوم مربوط به صفات مرتبط با میزان انحنا و ناهمواری سطح دانه مانند ناهمواری (Concavity) و شاخص شکل (Shape Index) است که می‌تواند بر فرآیند جوانه‌زنی تأثیر بگذارد. گروه چهارم شامل صفاتی مانند استوانه‌ای بودن (Cylindricity) و شاخص هم‌مرکزی (CAI) است که ویژگی‌های تراکم و چگالی دانه را نشان می‌دهند. در مجموع، یافته‌های این پژوهش تأیید می‌کند که تنش شوری تأثیر منفی بر ابعاد، شکل، تقارن، و تراکم دانه‌های گندم دارد. این تغییرات می‌توانند بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و کاربردی دانه تأثیر بگذارند و بر انتخاب ژنوتیپ‌های مقاوم به شوری در برنامه‌های به‌نژادی اثرگذار باشند. بر این اساس، می‌توان از شاخص‌های استخراج‌شده در این تحلیل برای شناسایی و اصلاح ژنوتیپ‌های دارای تحمل بالاتر به شوری استفاده کرد.

۳-۲-۴. تحلیل مسیر

نتایج مدل‌سازی مسیر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک دانه گندم تحت تأثیر شوری نشان داد که حجم دانه (Vol_V) بیشترین تأثیر مثبت و معنی‌دار را بر وزن هزار دانه (TKW) داشت ($\beta=0.95, p<0.01$) که نشان‌دهنده نقش کلیدی افزایش حجم در بهبود وزن دانه است. عرض دانه (Breadth_D) نیز اثر مثبت قابل توجهی بر TKW داشت ($\beta=0.43, p=0.06$)؛ هرچند این ارتباط از نظر آماری در آستانه معنی‌داری ($p<0.1$) قرار گرفت (شکل ۴). در مقابل، ضخامت دانه (Thick_L) تأثیر منفی بر TKW نشان داد ($\beta=-0.11, p<0.05$) که احتمالاً ناشی از تغییرات ساختاری دانه تحت تأثیر شوری است. در ارتباط با چگالی دانه (Density)، حجم دانه (Vol_V) به‌عنوان تعیین‌کننده اصلی چگالی ظاهری شناسایی شد ($\beta=0.55, p=0.07$) که نشان می‌دهد افزایش حجم، چگالی دانه را کاهش می‌دهد. با توجه به فرمول ($\text{Density} = \text{TKW} / \text{Volume}$) وزن هزار دانه (TKW) نیز اثر مثبت مرزی بر چگالی داشت ($\beta=0.40, p=0.02$)، اما این اثر به دلیل وابستگی فرمولی چگالی به

با عملکرد دانه در شرایط پایه و شور ایفا می‌کنند. به‌ویژه صفاتی مانند ضخامت دانه (Thickness)، فشردگی (Compactness)، وزن هزار دانه (TKW) و نسبت طول به عرض (AspRatio) به‌صورت مکرر در هر چهار نوع تحلیل به‌عنوان عوامل مؤثر ظاهر شده‌اند. در نتیجه، توصیه می‌شود برای ادامه تحلیل‌ها و نتیجه‌گیری نهایی، به‌ویژه در زمینه شناسایی ژنوتیپ‌های برتر و مقاوم به شوری، بر صفات زیر تمرکز بیشتری صورت گیرد: ۱- ضخامت دانه (Thickness)، ۲- فشردگی دانه (Compactness)، ۳- وزن هزار دانه (TKW)، ۴- نسبت طول به عرض دانه (AspRatio)، ۵- حجم دانه (Volume)، ۶- شاخص‌های مساحت دانه و فاکتور شکل (Shape_D و Area_D) با توجه به نقش آنها در تفکیک ژنوتیپ‌ها. این صفات نه تنها از لحاظ آماری معنی‌دار و قابل اعتماد هستند، بلکه از نظر فیزیولوژیکی و کاربردی نیز با ویژگی‌های مهم عملکردی و مقاومتی دانه‌ها تحت شرایط تنش شوری ارتباط مستقیم دارند.



شکل ۴. نمودار تجزیه مسیر صفات مورفومتریک در ژنوتیپ‌های گندم.

برای اختصارات به بخش مواد و روش‌ها رجوع شود.

Figure 4. Path analysis diagram of morphometric in wheat genotypes
Refer to the "Materials and Methods" section for abbreviations.

۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش با ارزیابی ۳۲۰ ژنوتیپ گندم تحت شرایط پایه و شوری، تأثیرات تنش شوری بر ویژگی‌های مورفومتریک و فیزیکی دانه را با استفاده از روش‌های پیشرفته پردازش تصویر و تحلیل‌های آماری چندمتغیره بررسی کرد. نتایج حاصل از تجزیه واریانس (ANOVA) نشان داد که تنش شوری به‌طور معنی‌داری ($p < 0.0001$) وزن هزار دانه (TKW) را ۲۸/۵٪ کاهش داده و ابعاد دانه (طول، عرض، ضخامت) را تحت تأثیر منفی قرار می‌دهد. تجزیه تفکیک خطی (LDA) با دقت ۹۶٪، تفاوت‌های ژنوتیپی در پاسخ به شوری را تأیید کرد و نشان داد متغیرهای مرتبط با ابعاد دانه (طول، عرض و ضخامت) بیشترین سهم را در تفکیک ژنوتیپ‌ها دارند. تجزیه به عامل‌ها چهار مؤلفه اصلی استخراج نمود که ۸۳/۵٪ از واریانس داده‌ها را تبیین می‌کنند: عامل اول (۴۶/۶۵٪) مربوط به ابعاد و حجم دانه، عامل دوم (۲۲/۱۸٪) به شکل و تقارن، عامل سوم (۸/۵۵٪) به ناهمواری سطح، و عامل چهارم (۴/۱۲٪) به تراکم دانه مرتبط بودند. تنش شوری با ایجاد اختلال در جذب آب و مواد مغذی، کاهش فعالیت آنزیم‌های رشد و تغییر تعادل یونی، منجر به کاهش هماهنگ ابعاد دانه و وزن هزار دانه شد. همبستگی قوی بین ضخامت دانه و وزن هزار دانه ($r = 0.966$) و TKW نشان داد که ضخامت و حجم، عوامل کلیدی در تعیین عملکرد نهایی دانه هستند. تفاوت‌های ژنتیکی معنی‌دار بین ژنوتیپ‌ها، به‌ویژه در صفاتی مانند نسبت طول به عرض و گردی دانه ($p < 0.0001$)، بیانگر پتانسیل بالایی انتخاب ژنوتیپ‌های مقاوم (مانند اوحدی) با توانایی حفظ ساختار دانه تحت شوری است. کاربرد فنون پردازش تصویر و تحلیل‌های چندمتغیره در این پژوهش، امکان شناسایی دقیق و غیرمخرب شاخص‌های مورفومتریک را فراهم کرد که نقش محوری در غربالگری ژنوتیپ‌های متحمل دارد. این یافته‌ها نه تنها به بهبود برنامه‌های اصلاحی برای توسعه ارقام مقاوم به شوری کمک می‌کند، بلکه با حفظ کیفیت و عملکرد دانه در شرایط نامساعد، به تضمین امنیت غذایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک

جهان یاری می‌رساند. برای تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود مکانیسم‌های مولکولی مرتبط با تحمل به شوری (مانند بیان ژن‌های TaGS5-3A و GSW3) در ژنوتیپ‌های مقاوم بررسی شود. علاوه بر این، اعتبارسنجی شاخص‌های مورفومتریک در جمعیت‌های بزرگ‌تر و ادغام داده‌های فنوتیپی با اطلاعات ژنومی می‌تواند توسعه نشانگرهای مولکولی کارآمد برای تسریع در گزینش ارقام مقاوم به تنش را تسهیل کند. مطالعات طولانی‌مدت بر تأثیر شوری بر کیفیت فرآوری گندم و پایداری این ویژگی‌ها در نسل‌های بعدی نیز ضروری است. در مجموع، این پژوهش گامی کلیدی در جهت درک پاسخ ژنوتیپ‌های گندم به تنش شوری و ارائه راهکارهای عملی برای بهبود پایداری تولید گندم در شرایط تغییرات اقلیمی محسوب می‌شود.

۵. منابع

- Abd El-Aleem, O., Nawar, A., Barakat, M., Milad, S., & Sabry, S. (2022). Salinity stress affects field performance of wheat genotypes differing in genetic background. *Alexandria Science Exchange Journal*, 43, 651-667. <https://doi.org/10.21608/asejaiqsac>.
- Ahmed, H.G.M.D., Zeng, Y., Khan, M.A., Rashid, M.A.R., Ameen, M., Akrem, A., & Saeed, A. (2023). Genome-wide association mapping of bread wheat genotypes using yield and grain morphology-related traits under different environments. *Frontiers in Genetics*, 13. <https://www.frontiersin.org/journals/genetics/articles/10.3389/fgene.2022.1008024>.
- Ain, Q.U., Hussain, H.A., Zhang, Q., Kamal, F., Charagh, S., Imran, A., Hussain, S., & Bibi, H. (2024). Deciphering the role of nanoparticles in stimulating drought and salinity tolerance in plants: Recent insights and perspective. *Journal of Plant Growth Regulation*, 43(5), 1605-1630.
- Al-Ashkar, I., Alderfasi, A., Ben Romdhane, W., Seleiman, M.F., El-Said, R.A., & Al-Doss, A. (2020). Morphological and genetic diversity within salt tolerance detection in eighteen wheat genotypes. *Plants*, 9(3).
- Al-Ashkar, I., Romdhane, W.B., El-Said, R.A., Ghazy, A., Attia, K., & Al-Doss, A. (2021). Agro-physiologic responses and stress-related gene expression of four doubled haploid wheat lines under salinity stress conditions. *Biology (Basel)*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/biology10010056>.
- Alsamadany, H., Abdulbaki, A.S., & Alzahrani, Y. (2024). Unravelling drought and salinity stress responses in barley genotypes: Physiological, biochemical, and molecular insights. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1417021.
- Amiri, H., Banakar, M.H., & Hemmati Hassan Gavyar, P. (2024). Polyamines: New plant growth regulators promoting salt stress tolerance in plants. *Journal of Plant Growth Regulation*, 1-18.
- Aniskina, T.S., Baranova, E.N., Lebedev, S.V., Reger, N.S., Besaliev, I.N., Panfilov, A.A., Kryuchkova, V.A., & Gulevich, A.A. (2023). Unexpected effects of sulfate and sodium chloride application on yield qualitative characteristics and symmetry indicators of hard and soft wheat kernels. *Plants (Basel)*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/plants12050980>.
- Atta, K., Mondal, S., Gorai, S., Singh, A.P., Kumari, A., Ghosh, T., Roy, A., Hembram, S., Gaikwad, D.J., Mondal, S., Bhattacharya, S., Jha, U.C., & Jespersen, D. (2023). Impacts of salinity stress on crop plants: Improving salt tolerance through genetic and molecular dissection. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1241736. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1241736>.
- Bai, F., Ma, H., Cai, Y., Shahid, M.Q., Zheng, Y., Lang, C., Chen, Z., Wu, J., Liu, X., & Wang, L. (2023). Natural allelic variation in GRAIN SIZE AND WEIGHT 3 of wild rice regulates the grain size and weight. *Plant Physiology*, 193(1), 502-518. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiad320>.
- Basile, G., De Maio, A.C., Catalano, A., Ceramella, J., Iacopetta, D., Bonofiglio, D., Saturnino, C., & Sinicropi, M. (2022). Ancient wheats as promising nutraceuticals for the prevention of chronic and degenerative diseases. *Current Medicinal Chemistry*. <https://doi.org/10.2174/0929867329666220915122216>.
- Bouras, E., Jarlan, L., Khabba, S., Er-Raki, S., Dezetter, A., Sghir, F., & Trambly, Y. (2019). Assessing the impact of global climate changes on irrigated wheat yields and water requirements in a semi-arid environment of Morocco. *Scientific Reports*, 9(1), 19142. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55251-2>.
- Cao, H., Ding, R., Kang, S., Du, T., Tong, L., Zhang, Y., Chen, J., & Shukla, M.K. (2023). Chapter three - Drought, salt, and combined stresses in plants: Effects, tolerance mechanisms, and strategies. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy*, 178, 107-163. Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.11.004>.
- Cervantes, E., Martín, J.J., & Saadaoui, E. (2016). Updated methods for seed shape analysis. *Scientifica (Cairo)*, 5691825. <https://doi.org/10.1155/2016/5691825>.
- Chourasia, K.N., Lal, M.K., Tiwari, R.K., Dev, D., Kardile, H.B., Patil, V.U., Kumar, A., Vanishree, G., Kumar, D., Bhardwaj, V., Meena, J.K., Mangal, V., Shelake, R.M., Kim, J.Y., & Pramanik, D. (2021). Salinity stress in potato: Understanding physiological, biochemical and molecular responses. *Life(Basel)*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/life11060545>.

- Di Santo, L.N., Polgar, M., Nies, S., Hodgkiss, P., Canning, C.A., Wright, J.W., & Hamilton, J.A. (2021). Seed morphological traits as a tool to quantify variation maintained in ex situ collections: A case study in *Pinus torreyana*. *Aob Plants*, 13(5), plab058. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plab058>.
- Duc, N.T., Ramlal, A., Rajendran, A., Raju, D., Lal, S.K., Kumar, S., Sahoo, R.N., & Chinnusamy, V. (2023). Image-based phenotyping of seed architectural traits and prediction of seed weight using machine learning models in soybean. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2023.1206357>.
- Ehtaiwesh, A., Sunoj, V.S.J., Djanaguiraman, M., & Prasad, P.V.V. (2024). Response of winter wheat genotypes to salinity stress under controlled environments. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1396498. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1396498>.
- El Sabagh, A., Islam, M.S., Skalicky, M., Ali Raza, M., Singh, K., Anwar Hossain, M., Hossain, A., Mahboob, W., Iqbal, M.A., Ratnasekera, D., Singhal, R.K., Ahmed, S., Kumari, A., Wasaya, A., Sytar, O., Brestic, M., Çig, F., Erman, M., Habib Ur Rahman, M., ..., Arshad, A. (2021). Salinity stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) in the changing climate: Adaptation and management strategies. *Frontiers in Agronomy*, 3. <https://www.frontiersin.org/journals/agronomy/articles/10.3389/fagro.2021.661932>.
- Elfanah, A.M.S., Darwish, M.A., Selim, A.I., Elmoselhy, O.M.A., Ali, A.M., El-Maghraby, M.A., & Abdelhamid, M.T. (2023). Hyperspectral reflectance and agro-physiological traits for field identification of salt-tolerant wheat genotypes using the genotype by yield*trait biplot technique. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2023.1165113>.
- Elkot, A., ElRashidy, Z., & Mokhtar, A. (2023). Evaluation of eight bread wheat cultivars for soil salinity tolerance. *Egyptian Journal of Agronomy*. <https://doi.org/10.21608/agro.2023.217410.1378>.
- Farooq, M., Zahra, N., Ullah, A., Nadeem, F., Rehman, A., Kapoor, R., Al-Hinani, M.S., & Siddique, K.H.M. (2024). Salt stress in wheat: Effects, tolerance mechanisms, and management. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24(4), 8151-8173. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-02104-1>.
- Filip, E., Woronko, K., Stępień, E., & Czarniecka, N. (2023). An overview of factors affecting the functional quality of common wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Molecular Sciences*, 2(4). <https://doi.org/10.3390/ijms24087524>.
- Ghimire, A., Kim, S.H., Cho, A., Jang, N., Ahn, S., Islam, M.S., Mansoor, S., Chung, Y.S., & Kim, Y. (2023). Automatic evaluation of soybean seed traits using RGB image data and a python algorithm. *Plants (Basel)*, 12(17). <https://doi.org/10.3390/plants12173078>.
- Giordano, M., Petropoulos, S.A., & Rouphael, Y. (2021). Response and defence mechanisms of vegetable crops against drought, heat and salinity stress. *Agriculture*, 11(5), 463. <https://www.mdpi.com/2077-0446/11/5/72>.
- Gupta, S., Niels Groen, S., Zaidem, M.L., Sajise, A.G.C., Calic, I., Natividad, M., McNally, K., Vergara, G.V., Satija, R., Franks, S.J., Singh, R.K., Joly-Lopez, Z., & Purugganan, M.D. (2025). Systems genomics of salinity stress response in rice. *eLife*, 13, RP99352. <https://doi.org/10.7554/eLife.99352>.
- Hameed, A., Ahmed, M.Z., Hussain, T., Aziz, I., Ahmad, N., Gul, B., & Nielsen, B.L. (2021). Effects of salinity stress on chloroplast structure and function. *Cells*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/cells10082023>.
- Hassani, A., Azapagic, A., & Shokri, N. (2021). Global predictions of primary soil salinization under changing climate in the 21st century. *Nature Communications*, 12(1), 6663. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26907-3>.
- He, J.F., Goyal, R., Laroche, A., Zhao, M.L., & Lu, Z.X. (2013). Effects of salinity stress on starch morphology, composition and thermal properties during grain development in triticale. *Canadian Journal of Plant Science*, 93(5), 765-771. <https://doi.org/10.4141/cjps2013-065>.
- Herrera, J., & Calderini, D.F. (2020). Pericarp growth dynamics associate with final grain weight in wheat under contrasting plant densities and increased night temperature. *Annals of Botany*, 126(6), 1063-1076. <https://doi.org/10.1093/aob/mcaa131>.
- Hoyle, A., Brennan, M., Jackson, G., & Hoad, S. (2019). Specific weight of barley grains is determined by traits affecting packing efficiency and by grain density. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(5), 2548-2555. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9465>.
- Hussain, S., Zhang, R., Liu, S., Wang, Y., Ahmed, I., Yinglong, C., Hou, H., & Dai, Q. (2022). Salt stress affects the growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) by altering the antioxidant machinery and expression of hormones and stress-specific genes. *Phyton*, 92. <https://doi.org/10.32604/phyton.2023.025487>.
- Ibrahimova, U., Talai, J., Mahadi Hasan, M., Huseynova, I., Raja, V., Rastogi, A., Ghaffari, H., Zivcak, M., Yang, X., & Brestic, M. (2025). Dissecting the osmotic and oxidative stress responses in salt-tolerant and salt-sensitive wheat genotypes under saline conditions. *Plant, Soil and Environment*, 71(1), 36-47. <https://pse.agriculturejournals.cz/artkey/pse-202501-0004.php>. <http://dx.doi.org/10.17221/459/2024-PSE>.
- Irshad, A., Ahmed, R.I., Ur Rehman, S., Sun, G., Ahmad, F., Sher, M.A., Aslam, M.Z., Hassan, M.M., Qari, S.H., Aziz, M.K., & Khan, Z. (2022). Characterization of salt tolerant wheat genotypes by using morpho-

- physiological, biochemical, and molecular analysis [Original Research]. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2022.956298>.
- Irshad, A., Ahmed, R.I., Ur Rehman, S., Sun, G., Ahmad, F., Sher, M.A., Aslam, M.Z., Hassan, M.M., Qari, S.H., Aziz, M.K., & Khan, Z. (2022). Characterization of salt tolerant wheat genotypes by using morpho-physiological, biochemical, and molecular analysis. *Frontiers in Plant Science*, 13, 956298. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.956298>.
- Jin, W., Wei, Z., Li, L., Ashraf, U., He, W., Zhang, Y., & Qi, S. (2024). Grain quality deterioration of hybrid rice is associated with alterations in physicochemical and structural properties of starch under saline conditions. *Crop Science*, 64. <https://doi.org/10.1002/csc2.21186>.
- Karimzadeh, H., Borzouei, A., Naserian, B., Tabatabaee, S.A., & Rahemi, M.R. (2023). Investigating the response mechanisms of bread wheat mutants to salt stress. *Scientific Reports*, 13(1), 18605. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45009-2>.
- Khalid, A., Hameed, A., & Tahir, M. (2023). Wheat quality: A review on chemical composition, nutritional attributes, grain anatomy, types, classification, and function of seed storage proteins in bread making quality. *Frontiers in Nutrition*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1053196>.
- Khan, R.W.A., Khan, R.S.A., Awan, F.S., Akrem, A., Iftikhar, A., Anwar, F.N., Alzahrani, H.A.S., Alsamadany, H., & Iqbal, R.K. (2022). Genome-wide association studies of seedling quantitative trait loci against salt tolerance in wheat. *Frontiers in Genetics*, 13, 946869. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.946869>.
- Khan, T., Jamil, M., Ali, A., Rasheed, S., Irshad, A., Maqsood, M.F., Zulfikar, U., Chaudhary, T., Ali, M.A., & Elshikh, M.S. (2024). Exploring water-absorbing capacity: A digital image analysis of seeds from 120 wheat varieties. *Scientific Reports*, 14(1), 6757. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57193-w>.
- Kheiralipour, K., Brandão, M., Holka, M., & Choryński, A. (2024). A review of environmental impacts of wheat production in different agrotechnical systems. *Resources*. <https://doi.org/10.3390/resources13070093>.
- Latorre, S.M., Were, V.M., Foster, A.J., Langner, T., Malmgren, A., Harant, A., Asuke, S., Reyes-Avila, S., Gupta, D.R., Jensen, C., Ma, W., Mahmud, N.U., Mehebbub, M.S., Mulenga, R.M., Muzahid, A.N.M., Paul, S.K., Rabby, S.M.F., Rahat, A.A.M., Ryder, L., ..., & Kamoun, S. (2023). Genomic surveillance uncovers a pandemic clonal lineage of the wheat blast fungus. *Plos Biology*, 21(4), e3002052. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3002052>.
- Li, N., Peng, W., Shi, J., Wang, X., Liu, G., & Wang, H. (2015). The natural variation of seed weight is mainly controlled by maternal genotype in rapeseed (*Brassica napus* L.). *Plos One*, 10(4), e0125360. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125360>.
- Li, Q., Zhu, P., Yu, X., Xu, J., & Liu, G. (2024). Physiological and molecular mechanisms of rice tolerance to salt and drought stress: Advances and future directions. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(17), 9404.
- Lindberg, S., & Premkumar, A. (2023). Ion changes and signaling under salt stress in wheat and other important crops. *Plants (Basel)*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/plants13010046>.
- Ma, L., Li, T., Hao, C., Wang, Y., Chen, X., & Zhang, X. (2016). Ta5-3A, a grain size gene selected during wheat improvement for larger kernel and yield. *Plant Biotechnology Journal*, 14(5), 1269-1280. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/pbi.12492>.
- Mao, H., Jiang, C., Tang, C., Nie, X., Du, L., Liu, Y., Cheng, P., Wu, Y., Liu, H., Kang, Z., & Wang, X. (2023). Wheat adaptation to environmental stresses under climate change: Molecular basis and genetic improvement. *Molecular Plant*, 16(10), 1564-1589. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2023.09.001>.
- Mishra, A.K., Das, R., George Kerry, R., Biswal, B., Sinha, T., Sharma, S., Arora, P., & Kumar, M. (2023). Promising management strategies to improve crop sustainability and to amend soil salinity [Review]. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.962581>.
- Morales, M.A., Worrall, H., Piche, L., Adeniyi, A.S., Dariva, F., Ramos, C., Hoang, K., Yan, C., Flores, P., & Bandillo, N. (2024). High-throughput phenotyping of seed quality traits using imaging and deep learning in dry pea. *BioRxiv*, 583-564. <https://doi.org/10.1101/2024.03.05.583564>.
- Mottaleb, K.A., & Govindan, V. (2023). How the ongoing armed conflict between Russia and Ukraine can affect the global wheat food security?. *Frontiers in Food Science and Technology*, 3. <https://doi.org/10.3389/frfst.2023.1072872>.
- Mubushar, M., El-Hendawy, S., Dewir, Y.H., & Al-Suhaibani, N. (2024). Ability of different growth indicators to detect salt tolerance of advanced spring wheat lines grown in real field conditions. *Plants*, 13(6).
- Mukhopadhyay, R., Sarkar, B., Jat, H.S., Sharma, P.C., & Bolan, N.S. (2021). Soil salinity under climate change: Challenges for sustainable agriculture and food security. *The Journal of Environmental Management*, 280, 111736. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111736>.
- Munns, R. (2005). Genes and salt tolerance: Bringing them together. *New Phytologist*, 167(3), 645-663. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01487.x>.

- Nassar, R.M.A., Kamel, H.A., Ghoniem, A.E., Alarcón, J.J., Sekara, A., Ulrichs, C., & Abdelhamid, M.T. (2020). Physiological and anatomical mechanisms in wheat to cope with salt stress induced by seawater. *Plants (Basel)*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/plants9020237>.
- Pastuszak, J., Dziurka, M., Hornyák, M., Szczerba, A., Kopeć, P., & Płazek, A. (2022). Physiological and biochemical parameters of salinity resistance of three durum wheat genotypes. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(15). <https://doi.org/10.3390/ijms23158397>.
- Qiao, M., Hong, C., Jiao, Y., Hou, S., & Gao, H. (2024). Impacts of drought on photosynthesis in major food crops and the related mechanisms of plant responses to drought. *Plants*, 13(13), 1808.
- Rabieyan, E., Bihamta, M.R., Moghaddam, M.E., Mohammadi, V., & Alipour, H. (2022). Genome-wide association mapping for wheat morphometric seed traits in Iranian landraces and cultivars under rain-fed and well-watered conditions. *Scientific Reports*, 12(1), 17839. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22607-0>.
- Rashid, M.H., & Nasrin, S. (2015). Productivity and preference of salt tolerant Boro rice varieties in saline non-gher and gher ecosystems. *Bangladesh Rice Journal*, 18, 18. <https://doi.org/10.3329/brj.v18i1-2.22996>.
- Razzaque, S., & Juenger, T.E. (2022). The ecology and quantitative genetics of seed and seedling traits in upland and lowland ecotypes of a perennial grass. *Evolution Letters*, 6(6), 460-473. <https://doi.org/10.1002/evl3.297>.
- Reed, R.C., Bradford, K.J., & Khanday, I. (2022). Seed germination and vigor: Ensuring crop sustainability in a changing climate. *Heredity (Edinb)*, 128(6), 450-459. <https://doi.org/10.1038/s41437-022-00497-2>.
- Sen, A., Islam, M.M., Zaman, E., Ghosh, U.K., Momtaz, M.B., Islam, M.A., Urmi, T.A., Mamun, M.A., Rahman, M.M., Kamal, M.Z., Rahman, G.K.M.M., Haque, M.M., & Murata, Y. (2022). Agro-morphological, yield and biochemical responses of selected wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes to salt stress. *Agronomy*, 12(12).
- Senbeta, A.F., & Worku, W. (2023). Ethiopia's wheat production pathways to self-sufficiency through land area expansion, irrigation advance, and yield gap closure. *Heliyon*, 9(10), e20720. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20720>.
- Sertse, D., You, F.M., Klymiuk, V., Haile, J.K., N'Diaye, A., Pozniak, C.J., Cloutier, S., & Kagale, S. (2023). Historical selection, adaptation signatures, and ambiguity of introgressions in wheat. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(9), 8390. <https://www.mdpi.com/1422-0067/24/9/8390>.
- Silva, J.V., Jaleta, M., Tesfaye, K., Abeyo, B., Devkota, M., Frija, A., Habarurema, I., Tembo, B., Bahri, H., Mosad, A., Blasch, G., Sonder, K., Snapp, S., & Baudron, F. (2023). Pathways to wheat self-sufficiency in Africa. *Global Food Security*, 37, 100684. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2023.100684>.
- Tajdari, H.R., Soleymani, A., Montajabi, N., Naderi Darbaghshahi, M.R., & Javanmard, H.R. (2024). The effect of foliar application of plant growth regulators on functional and qualitative characteristics of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salinity and drought stress conditions. *Applied Water Science*, 14(6), 1-15.
- Wang, Y., Chen, W., Xing, M., Sun, J., Wang, S., Yang, Z., Huang, J., Nie, Y., Zhao, M., Li, Y., Guo, W., Wang, Y., Chen, Z., Zhang, Q., Hu, J., Li, Y., Huang, K., Zheng, X., Zhou, L., . . . , & Qiao, W. (2024). Wild rice GL12 synergistically improves grain length and salt tolerance in cultivated rice. *Nature Communications*, 15(1), 9453. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-53611-9>.
- Wang, Y., Gao, M., Chen, H., Fu, X., Wang, L., & Wang, R. (2023). Soil moisture and salinity dynamics of drip irrigation in saline-alkali soil of Yellow River basin. *Frontiers in Environmental Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1130455>.
- Wei, H., Geng, X., Zhu, W., Zhang, X., Zhang, X., Chen, Y., Huo, Z., Xu, K., Zhou, G., Meng, T., & Dai, Q. (2023). Individual and combined influences of salinity and drought stress on the agro-physiological traits and grain yield of rice. *Field Crops Research*, 304, 109172. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109172>.
- Xuedan, L., Fan, L., Yunhua, X., Feng, W., Guilian, Z., Huabing, D., & Wenbang, T. (2023). Grain shape genes: Shaping the future of rice breeding. *Rice Science*, 30(5), 379-404. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rsci.2023.03.014>.
- Zahra, N., Hafeez, M.B., Wahid, A., Al Masruri, M.H., Ullah, A., Siddique, K.H.M., & Farooq, M. (2023). Impact of climate change on wheat grain composition and quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(6), 2745-2751. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jsfa.12289>.
- Zhang, R., Wang, Y., Hussain, S., Yang, S., Li, R., Liu, S., Chen, Y., Wei, H., Dai, Q., & Hou, H. (2022). Study on the effect of salt stress on yield and grain quality among different rice varieties. *Frontiers in Plant Science*, 13, 918460. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.918460>.
- Zhang, R., Wang, Y., Hussain, S., Yang, S., Li, R., Liu, S., Chen, Y., Wei, H., Dai, Q., & Hou, H. (2022). Study on the effect of salt stress on yield and grain quality among different rice varieties. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2022.918460>.
- Zhou, Y., Kusmec, A., Mirnezami, S.V., Attigala, L., Srinivasan, S., Jubery, T.Z., Schnable, J.C., Salas-Fernandez, M.G., Ganapathysubramanian, B., & Schnable, P.S. (2021). Identification and utilization of genetic determinants of trait measurement errors in image-based, high-throughput phenotyping. *The Plant Cell*, 33(8), 2562-2582. <https://doi.org/10.1093/plcell/koab134>.